Aerodynamik des Automobils



Аэродинамика автомобиля

Аэродинамика АВТОМОБИЛЯ

Dr.-Ing. Wolf-Heinrich Hucho (Herausgeber)

Aerodynamik des Automobils

Eine Brücke von der Strömungsmechanik zur Fahrzeugtechnik

Autoren:
Dipl.-Ing Hans-Joachim Emmelmann
Dr.-Ing. Klaus-Dieter Emmenthal
Dipl.-Ing. Helmut Flegl
Dipl.-Ing. Hans Götz
Dr.-Ing. Wolf-Heinrich Hucho
Prof. Dr.-Ing. Dietrich Hummel
Ing. (grad.) Reinhard Lechner
Dr.-Ing. Görgün A. Necati
Dipl.-Ing. Raimund Piatek

VOGEL-VERLAG



Аэродинамика АВТОМОБИЛЯ

Под редакцией В.-Г. Гухо

Перевод с немецкого
Н. А. Юниковой

Под редакцией
канд. техн. наук С. П. Загородникова



Москва
«Машиностроение»
1987

ББК 39.33
А99
УДК 629.114.6:533.6

А99 Аэродинамика автомобиля /Под ред. В.-Г. Гухо; Пер. с нем. Н.А. Юниковой; Под ред. С.П. Загородникова. — М.: Машиностроение, 1987. — 424 с.: ил.

(В пер.): 2 р. 20 к.

Книга западногерманских специалистов базируется на учебных материалах курсов повышения квалификации инженеров-автомобилестроителей. Советскому читателю предлагается систематизированный труд, посвященный рассмотрению не только обтекания кузова автомобиля, но и теплообмена системы охлаждения, вентиляции и отопления салона, экономичности, загрязнения, аэродинамического шума. Даны рекомендации по проектированию легковых и спортивных автомобилей, автопоездов и автобусов, приведена техника экспериментальных исследований.

Для конструкторов, испытателей и дизайнеров транспортных средств, преподавателей и студентов вузов.

А $\frac{3603030000\text{-}306}{038\,(01)\,\text{-}\,87}$ 306-87

ББК 39.33

© Vogel-Verlag, Würzburg, 1981
© Перевод на русский язык, "Машиностроение", 1987

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 10
Перечень названий иностранных фирм и автомобилей, приведенных в книге 12

Вольф-Генрих Гухо

1. Введение в аэродинамику автомобиля 14
1.1. Разграничение темы 14
1.1.1. Основы аэродинамики автомобиля 14
1.1.2. Методология в аэродинамике автомобиля 21
1.1.3. Родственные области науки 23
1.2. Историческое развитие 25
1.2.1. Обзор 25
1.2.2. Формы, заимствованные из других областей техники 27
1.2.3. Хорошо обтекаемые формы 30
1.2.4. Оптимизация формы 44
1.3. Тенденции развития 46
1.3.1. Технические показатели автомобиля 46
1.3.2. Аэродинамика автомобиля 50
1.3.3. Затраты на развитие работ по улучшению аэродинамических свойств автомобиля 53
1.4. Обозначения 55

Дитрих Гуммель

2. Некоторые особенности механики обтекания 55
2.1. Свойства несжимаемых жидкостей 55
2.1.1. Плотность 55
2.1.2. Вязкость 56
2.1.3. Теплопроводность 57
2.2. Вопросы механики обтекания автомобилей 57
2.2.1. Внешнее обтекание автомобиля 57
2.2.2. Прохождение потока в канале 58
2.3. Некоторые аспекты внешнего обтекания 59
2.3.1. Основные уравнения для несжимаемого и не обладающего вязкостью внешнего потока 59
2.3.2. Примеры 60
2.3.3. Влияние трения 62
2.3.4. Особые проблемы 76
2.4. Проблемы прохождения потока в канале 81
2.4.1. Основные уравнения для несжимаемого потока 81
2.4.2. Характерные примеры течения в канале 82
2.5. Взаимодействие внешнего потока, обтекающего автомобиль, и внутреннего потока, проходящего через автомобиль 88
2.6. Обозначения 89

Ганс-Йоахим Эммельманн

3. Мощностные показатели легковых автомобилей и автомобилей-фургонов 91
3.1. Постановка задачи 91
3.2. Составляющие силы сопротивления движению 92
3.2.1. Уравнение силы сопротивления движению 92
3.2.2. Анализ сил сопротивления движению 92
3.3. Мощностные показатели 95
3.3.1. Тяговый баланс автомобиля 95
3.3.2. Время разгона и скоростная характеристика разгона 95
3.4. Определение расхода топлива 97
3.4.1. Методика проведения работ 97
3.4.2. Характеристика расхода двигателя 97

3.4.3. Согласование передач 99
3.4.4. Ездовые циклы 102
3.4.5. Точки переключения 104
3.5. Расход топлива и мощностные показатели 104
3.5.1. Сравнение сопротивления воздуха и сопротивления качению . 104
3.5.2. Предварительный анализ и классификация автомобилей к последующим рассуждениям о расходе топлива 106
3.5.3. Снижение расхода топлива за счет уменьшения силы сопротивления воздуха 108
3.5.4. Влияние силы сопротивления воздуха, веса и мощности двигателя 109
3.5.5. Максимальная скорость 113
3.5.6. Оптимальная с точки зрения расхода топлива концепция автомобиля 114
3.5.7. Расход топлива для автомобилей-фургонов 116
3.6. Заключение 119
3.7. Обозначения 119

Вольф-Генрих Гухо

4. Сопротивление воздуха при движении легковых автомобилей 120
4.1. Аэродинамическое сопротивление легкового автомобиля в ряду аэродинамических сопротивлений других тел 120
4.2. Поле потока вокруг легкового автомобиля 123
4.3. Анализ составляющих сопротивления воздуха 129
4.3.1. Основные понятия 129
4.3.2. Сопротивления элементов и частей автомобиля 133
4.4. Исследования аэродинамики легкового автомобиля 151
4.4.1. Постановка задачи 151
4.4.2. Хорошо обтекаемые тела, помещенные вблизи основания . . . 152
4.4.3. Влияние изменения геометрических параметров формы кузова на аэродинамическое сопротивление автомобиля 155
4.5. Измерения аэродинамического сопротивления для автомобиля натуральной величины 158
4.5.1. Классификация результатов измерений 158
4.5.2. Положение автомобиля в пространстве, боковой ветер 159
4.5.3. Эксплуатационное состояние автомобиля 163
4.5.4. Коэффициенты сопротивления воздуха автомобилей серийного производства 165
4.5.5. Изменения формы 165
4.6. Практические работы по доводке аэродинамики легковых автомобилей 184
4.6.1. Оптимизация формы 184
4.6.2. Интерактивная оптимизация формы 187
4.6.3. Согласование навесных элементов 187
4.7. Будущее аэродинамики автомобилей 188
4.7.1. Существующий потенциал улучшения аэродинамических свойств автомобилей 188
4.7.2. Создание легкового автомобиля, обладающего очень малым аэродинамическим сопротивлением 189
4.7.3. Задачи исследования 192
4.8. Обозначения 193

Ганс-Йоахим Эммельманн

5. Устойчивость движения при боковом ветре 195
5.1. Постановка задачи 195
5.2. Аэродинамические силы и моменты, действующие на автомобиль . 197
5.2.1. Естественный атмосферный ветер 197

5.2.2. Автомобиль при стационарном боковом ветре 198
5.2.3. Аэродинамическая устойчивость 200
5.2.4. Аэродинамические силы при нестационарном боковом ветре . 203
5.3. Встречающиеся на практике проблемы бокового ветра 204
5.3.1. Прокладка дорог и защита от бокового ветра 204
5.3.2. Естественные и искусственные порывы бокового ветра 206
5.4. Динамические аспекты 208
5.5. Влияние аэродинамического воздействия на боковое отклонение. . 209
5.5.1. Уменьшение числа параметров 209
5.5.2. Уравнение для оценки влияния боковой силы, веса и положения центра давления на боковое отклонение автомобиля 211
5.5.3. Вычисление бокового отклонения серийных автомобилей . . . 212
5.6. Предельное условие возникновения опасности 213
5.7. Заключение 214
5.8. Обозначения 215

Раймунд Пиатек

6. Функциональность, безопасность и комфорт 215
6.1. Разграничение темы 215
6.2. Поле потока вокруг автомобиля 216
6.2.1. Характер обтекания 216
6.2.2. Распределение давления 219
6.3. Силы, действующие на детали кузова 223
6.4. Загрязнение поверхности автомобиля 224
6.4.1. Общие положения 224
6.4.2. Поток воды 225
6.4.3. Оседание грязи 227
6.5. Аэродинамический шум 231
6.5.1. Причины возникновения аэродинамических шумов в автомобиле 231
6.5.2. Влияние механики обтекания 232
6.6. Обтекание отдельных деталей 237
6.6.1. Очиститель ветрового стекла 237
6.6.2. Тормоза 238
6.7. Заключение 239
6.8. Обозначения 239

Гельмут Флегль, Райнхард Лехнер

7. Некоторые аспекты аэродинамики спортивных и гоночных автомобилей . 240
7.1. Требования аэродинамики и пути их выполнения 240
7.1.1. Аэродинамическое сопротивление 240
7.1.2. Аэродинамическая прижимающая (отрицательная подъемная) сила 243
7.1.3. Зависимость между силой сопротивления воздуха и прижимающей (отрицательной подъемной) силой 245
7.1.4. Устойчивость движения 247
7.1.5. Вентиляция, охлаждение 253
7.2. Прочие требования 255
7.2.1. Потребительские качества 255
7.2.2. Спортивный регламент 256
7.3. Примеры оригинальных конструкций 258
7.3.1. Эффект отсоса прилежащего к поверхности дороги воздуха – "пылесос" 258
7.3.2. Эффект создания значительного разрежения у поверхности дороги – "автомобиль с крыльями" 259
7.3.3. Автомобили, предназначенные для установления рекордов скорости 260
7.4. Обозначения 261

Ганс Гетц

8. Аэродинамика грузовых автомобилей 261
8.1. Постановка задачи 261
8.2. Сопротивление движению и расход топлива 262
8.3. Влияние мероприятий, уменьшающих силу аэродинамического сопротивления, на расход топлива 264
8.4. Коэффициенты аэродинамического сопротивления различных грузовых автомобилей 265
8.4.1. Симметричное обтекание 265
8.4.2. Кососимметричное обтекание 266
8.4.3. Ограничение угла скоса потока с учетом скорости ветра 266
8.4.4. Параметр, характеризующий силу аэродинамического сопротивления в реальных условиях эксплуатации 267
8.5. Факторы, влияющие на аэродинамическое сопротивление 267
8.5.1. Возможности реализации аэродинамических мероприятий на грузовых автомобилях 267
8.5.2. Оптимизация формы в аэродинамической трубе и возникающие при этом методологические проблемы 268
8.5.3. Пути снижения аэродинамического сопротивления для грузового автомобиля 270
8.5.4. Пути снижения аэродинамического сопротивления автобусов и автомобилей-фургонов 279
8.5.5. Особые проблемы 282
8.6. Загрязнение автомобиля 287
8.6.1. Загрязнение от посторонних участников движения 287
8.6.2. Самозагрязнение 289
8.7. Обозначения 297

Клаус-Дитер Эмменталь

9. Охлаждение двигателя 294
9.1. Постановка задачи 294
9.2. Требования к системе охлаждения 296
9.2.1. Расчетные точки на графике мощностного баланса 298
9.2.2. Тепловой поток от двигателя к охлаждающей жидкости 299
9.3. Элементы системы охлаждения двигателя 301
9.3.1. Поступление охлаждающего воздуха 301
9.3.2. Радиаторы для легковых автомобилей 303
9.3.3. Вентилятор радиатора 304
9.3.4. Водяной насос 305
9.4. Определение параметров систем охлаждения 305
9.4.1. Радиатор как теплообменник с перекрестным током 305
9.4.2. Измерение характеристик радиатора 307
9.4.3. Определение размеров радиатора 309
9.4.4. Проверочный расчет системы 313
9.5. Испытания системы охлаждения 314
9.6. Оценка систем охлаждения 315
9.7. Обозначения 316

Вернер Генгенбах

10. Отопление, вентиляция и микроклимат в салоне автомобиля 318
10.1. Климат 318
10.2. Климатическая физиология 319
10.2.1. Температура воздуха в салоне 319
10.2.2. Подвижность воздуха 322
10.2.3. Влажность воздуха 323
10.2.4. Требования, предъявляемые к микроклимату в салоне автомобиля 325

10.3. Обеспечение микроклимата в салоне . . . 325
10.4. Компоненты системы отопления и вентиляции . . . 327
10.4.1. Кузов . . . 328
10.4.2. Радиатор системы отопления . . . 330
10.4.3. Вентилятор . . . 334
10.4.4. Регулирование температуры . . . 335
10.5. Пример системы отопления . . . 339
10.6. Обозначения . . . 341

Вольф-Генрих Гухо

11. Аэродинамические трубы для изучения аэродинамических свойств автомобилей . . . 342
11.1. Постановка задачи . . . 342
11.1.1. Требования, предъявляемые к автомобильной аэродинамической трубе . . . 342
11.1.2. Моделирование дорожного движения . . . 344
11.2. Основные сведения об аэродинамических трубах . . . 347
11.2.1. Предварительные замечания . . . 347
11.2.2. Устройство и принцип действия . . . 347
11.2.3. Элементы конструкции . . . 349
11.2.4. Оснащение . . . 355
11.3. Ограничения при имитации . . . 356
11.3.1. Качество потока . . . 356
11.3.2. Способы моделирования поверхности дороги . . . 357
11.3.3. Блокировка потока, деформация, градиент давления . . . 362
11.4. Испытания моделей в уменьшенном масштабе . . . 364
11.4.1. Техника моделирования . . . 364
11.4.2. Влияние числа Рейнольдса . . . 366
11.5. Примеры автомобильных аэродинамических труб . . . 370
11.5.1. Обзор . . . 370
11.5.2. Большие аэродинамические трубы для испытаний автомобилей и моделей в масштабе 1:1 . . . 375
11.5.3. Малые аэродинамические трубы для испытаний автомобилей и моделей в масштабе 1:1 . . . 375
11.5.4. Аэродинамические трубы для проведения исследований на моделях в уменьшенном масштабе . . . 376
11.5.5. Климатические каналы . . . 377
11.5.6. Климатические камеры с обдувом . . . 377
11.5.7. Сравнительные измерения в европейских автомобильных аэродинамических трубах . . . 378
11.6. Заключение . . . 380
11.7. Обозначения . . . 380

Герегин А. Некати

12. Методы и оборудование для измерений при аэродинамических испытаниях . . . 382
12.1. Методы и оборудование для измерений в аэродинамической трубе . . . 382
12.1.1. Измерение сил и моментов . . . 382
12.1.2. Измерение давления . . . 384
12.1.3. Измерение скорости . . . 386
12.1.4. Измерение температуры . . . 388
12.1.5. Измерение расхода воздуха . . . 392
12.2. Аэродинамические измерения вне аэродинамической трубы . . . 395
12.2.1. Испытания методом выбега . . . 395
12.2.2. Испытание при имитации бокового ветра различными устройствами . . . 397
12.2.3. Испытания системы охлаждения двигателя . . . 399
12.2.4. Загрязнение стекол и деталей кузова . . . 401
12.2.5. Аэродинамический шум . . . 402
12.3. Обозначения . . . 403
Список литературы

ПРЕДИСЛОВИЕ

Необходимая мощность двигателя, ездовые качества и комфортабельность автомобиля в сильной степени определяются его аэродинамическими свойствами. Малое аэродинамическое сопротивление является важной предпосылкой хорошей экономичности автомобиля. Постоянно повышающиеся цены на топливо и наличие законодательных предписаний по расходу топлива ведут к тому, что этой связи, известной уже давно, уделяется все большее и большее внимание. Наряду с этим существенное значение придается устойчивости автомобиля к боковому ветру, шуму ветра, загрязнению кузова, охлаждению двигателя, коробки передач, тормозов и, наконец, отоплению и вентиляции салона, которые зависят от обтекания автомобиля воздухом и от прохождения воздушного потока внутри автомобиля.

Исследования в области аэродинамики автомобиля в основном носят эмпирический характер. Кроме того, инженеры-автомобилестроители, занимающиеся аэродинамикой автомобиля, систематически обращаются к смежным областям знаний, например к аэродинамике самолета, гидродинамике судна, газодинамике турбин, что приводит к непрерывному расширению знаний по данной дисциплине. Причина такого подхода к проблемам аэродинамики автомобиля заключается в том, что имеющие место на автомобиле зоны срывного обтекания труднодоступны для теоретического исследования. Поэтому специалист по аэродинамике автомобиля при решении поставленной перед ним задачи вновь и вновь должен возвращаться ко множеству отдельных результатов. Определяющим для успеха его работы является то, насколько правильно он сумеет перенести ранее полученный результат на свою актуальную проблему и соответствующим образом связать детальные решения с общей концепцией.

Цель, преследуемая авторами этой книги, – помочь специалистам в области аэродинамики автомобиля разобраться в многообразии и в особенностях задач, стоящих перед этой дисциплиной; при этом решаются три проблемы:

разрабатываются физические принципы аэродинамики автомобиля;

сопоставляются основные практические результаты исследований, они обобщены в принципы механики обтекания и по возможности изложены в общедоступном виде;

описываются оправданные на практике методы, используя которые можно получить рационально собранные воедино объективные результаты.

Обстоятельно представлена аэродинамика легковых, грузовых, спортивных и гоночных автомобилей. При этом внимание уделено не только обтеканию автомобиля воздухом снаружи, но и вопросам, касающимся воздухообмена: охлаждению двигателя, вентиляции и отоплению салона, кондиционированию воздуха. Совместно рассмотрены внешние и внутренние потоки воздуха из-за их тесной взаимосвязи друг с другом; в конце книги описано оборудование для проведения испытаний.

Предлагаемая книга базируется на материале учебного курса, который организован редактором и авторами книги в Доме техники (г. Эссен) по инициативе инженера Г. Гана. Она предназначена для дизайнеров и инженеров, занимающихся проектированием и исследованием автомобильной техники, преподавателей и узких специалистов по отдельным разделам, а также для широкого круга читателей, интересующихся этим вопросом. Книга не предполагает необходимости углубленного знания аэродинамики; в главе 2 представлены принципы, необходимые для лучшего понимания предмета. Чтобы не выходить за рамки темы, в ней не останавливаются на теоретических методах расчёта потока, поскольку они еще не нашли широкого применения в процессе аэродинамической доработки автомобиля. Однако эта книга обращена и к теоретикам аэродинамики, поскольку в ней можно найти данные, необходимые для получения расчетных моделей.

Выражаю глубокую благодарность всем, кто работал над этой книгой: авторам за их готовность вникнуть в концепцию книги, секретарям и художникам за их участие в оформлении рукописи и иллюстраций, а также фирмам за то, что они дали согласие на совместную работу. Особая благодарность издательству "Фогель" за плодотворное сотрудничество и высококачественное оформление книги.

Вольф-Генрих Гухо

ПЕРЕЧЕНЬ НАЗВАНИЙ ИНОСТРАННЫХ ФИРМ И АВТОМОБИЛЕЙ, ПРИВЕДЕННЫХ В КНИГЕ

Alfa Romeo – Альфа Ромео
AVA (Aerodynamische Versuchsanstalt) – Институт аэродинамических исследований
AED-Covrad-Union Carbide – AED Унион Карбайд
Audi-NSU – Ауди-*NSU*
BMW – БМВ, Баварский моторный завод
Behr – Бэр
Citroen – Ситроен
Chrysler – Крайслер
Daimler Benz – Даймлер Бенц
FKF – Forschungsinstitut fur Kraftwesen und Fahrzeugmotoren – Исследовательский институт по транспортной технике и автомобильным двигателям
FIAT – Фиат
Ford – Форд
General Motors – Дженерал Моторс
J.A.R.I. – Японский научно-исследовательский автомобильный институт
Lockheed Georgia – Локкид Джорджия
MIRA – Motor Industry Research Association – Научно-исследовательская ассоциация автомобильной промышленности
NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) – Национальный консультативный комитет по аэронавтике (США)
Nissan – Ниссан
Opel – Опель
Porsche – Порше
Pininfarina – Пининфарина
Sofica – Софика
Schmöle – Шмёле
Toyota – Тойота
Volvo – Вольво

Названия автомобилей

Adler Trumpf – Адлер Трумпф
Audi 80, Audi 100, Audi L Avant – Ауди 80, Ауди 100, Ауди *L* Авант
Audi Alpensieger – Ауди Альпензигер
Alfasud – Альфазуд
Alfasud Ti – Альфазуд *Ti*
Alfa Romeo Giulietta 1,6 – Альфа Ромео Джульетта 1,6
BMW 2500, BMW 316, BMW 520, BMW 728 – автомобили *BMW* 2500. 316, 520, 728
Brabham Alfa – Брабгам Альфа
Chrysler Simca Horizon GL – Крайслер Симка Горизон *GL*
Citroen GS – Ситроен *GS*
Chrysler Simca 1307 GLS – Крайслер Симка 1307 *GLS*
Citroen CX 2000 – Ситроен *CX* 200
Chapparal 2J – Чаппарэл 2*J*
Citroen ID 19 – Ситроен *ID* 19
DB 170 V (Daimler Benz 170 V) – Даймлер Бенц 170 *V*
F 2–2 – рекордный автомобиль *F* 2–2
Ford Taunus, Ford Taunus L – Форд Таунус, Форд Таунус *L*
Ford Fiesta, Ford Fiesta L – Форд Фиеста, Форд Фиеста *L*
Ford Granada, Ford Granada GL – Форд Гранада, Форд Гранада *GL*

Ford Escort GL – Форд Эскорт *GL*
Ferrari, Ferrari 308 GT 4 – Феррари, Феррари 308 *GT 4*
Fiat Ritmo – Фиат ритмо
I 1-2 – рекордный автомобиль *I 1–2*
Jaguar XJ 5,3 – Ягуар *XJ* 5,3
Mercedes 240 (W 123) – Мерседес 240 (*W* 123)
Mercedes 230, Mersedes 280 TE – Мерседес 230, Мерседес 280 *TE*
Mercedes-Benz T 80 – Мерседес-Бенц *T*80
Mazda 323 de Luxe – Мазда 323 де Люкс
Mistral – Мистраль
NSU Ro80
Opel Ascona – Опель Аскона
Opel Kadett – Опель Кадетт
Opel Kadett Citi – Опель Кадетт Сити
Opel Kadett 1,65 – Опель Кадетт 1,65
Opel GT – Опель *GT*
Opel Rekord – Опель Рекорд
Opel Manta GT/E – Опель Манта *GT/E*
Peugeot 305 SR – Пежо 305 *SR*
Peugeot 604 – Пежо 604
Porsche 924, 928, 914, 911 T, 356 A, 356 B, 911 S, 911, 917, 936/78, 934/76, 935/76, 935/78 – Порше 924, 928, 914, 911 *T*, 356 *A*, 356 *B*, 911 *S*, 911, 917, 936/78, 934/76, 935/76, 935/78
Porsche 911 Carrera – Порше 911 Каррера
Porsche 917/30 (Can Am Prototyp) – Порше 917/30 (прототип для гонок Кан Ам)
Renault R5 TL – Рено *R5 TL*
Renault R14 TL – Рено *R14 TL*
Renault R 16 – Рено *R 16*
Renault 30 TS – Рено 30 *TS*
Rover 3500 – Ровер-3500
Tatra 87 – Татра 87
VW Scirocco, VW Scirocco LS, VW Scirocco GTI – *VW* "Фольксваген" Сирокко, *VW* Сирокко *LS*, *VW* Сирокко *GTI*
VW Passat – *VW* Пассат
VW Polo, VW Polo L – *VW* Поло, *VW* Поло *L*
VW Kafer, VW 1200 Kafer, VW 1300 Kafer – *VW* "Жук", *VW 1200* "Жук", *VW 1300* "Жук"
VW Variant 411, 411 L, 181, 1302, 1200 – *VW* Вариант 411, 411 *L*, 181, 1302, 1200
VW Karmann Ghia 1300 – Кармани Чиа 1300
VW Golf LS – *VW* Гольф *LS*
VW Passat S/Variant S – *VW* Пассат *S*/Вариант *S*
VW do Brasil 1600 X – *VW* до Бразиль 1600 *X*
VW-P1, VW-P2
Volvo 244 GL – Вольво 244 *GL*

Прочие названия

Rumpler Taube – самолет "Румплер Таубе"
NACA-6 – профиль *NACA-6*
Kamm-Wagen – автомобиль Камма
Schlör – Wagen – автомобиль Шлера
Lange – Wagen – автомобиль Ланге
DOT – Департамент транспорта США
DIN – Промышленный стандарт ФРГ
SAE – Общество автомобильных инженеров (США)

1. ВВЕДЕНИЕ В АЭРОДИНАМИКУ АВТОМОБИЛЯ

Вольф-Генрих Гухо

1.1. РАЗГРАНИЧЕНИЕ ТЕМЫ

1.1.1. ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ АВТОМОБИЛЯ

Движение автомобиля сопровождается многочисленными процессами взаимодействия с окружающим его воздухом. Эти процессы можно объединить в три группы:

обтекание внешней поверхности автомобиля;

потоки внутри кузова;

потоки внутри агрегатов.

Процессы, объединенные в первые две группы, тесно связаны друг с другом. Так, например, поле скоростей потока в моторном отсеке непосредственно зависит от поля обтекания внешней поверхности автомобиля. Оба поля должны рассматриваться совместно, оба они являются объектом изучения автомобильной аэродинамики. Потоки внутри двигателя и трансмиссии, напротив, не связаны с процессом обтекания автомобиля; они связаны лишь с механикой работы этих агрегатов. Такие потоки не относятся к аэродинамике автомобиля, и в данной книге они рассматриваться не будут.

Обтекание внешним потоком воздуха приводит к возникновению сил и моментов, действующих на автомобиль, которые весьма существенно влияют на потребляемую мощность и курсовую устойчивость. Долгое время автомобильная аэродинамика занималась исключительно этими двумя эффектами обтекания. В последнее время круг задач расширился, и решается ряд новых проблем: исключение загрязнения и скапливания дождевой воды на стеклах и фонарях автомобиля; уменьшение аэродинамического шума ветра; исключение отрыва щеток стеклоочистителя от очищаемой поверхности стекла; организация эффектив-



Рис. 1.1. Линии обтекания в продольном сечении автомобиля "*VW* Гольф" при испытаниях автомобиля в натуральную величину в климатической аэродинамической трубе фирмы "Фольксваген"

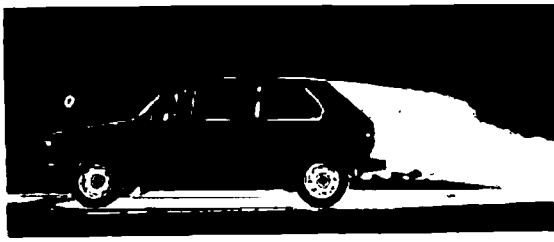


Рис. 1.2. Обтекание автомобиля "*VW* Гольф" при движении по инерции (сзади видна зона вихревого следа)

ного охлаждения масляного поддона двигателя и колесных тормозных механизмов.

На рис. 1.1 наглядно показано поле обтекания автомобиля. Струйки дыма, направленные в плоскости продольного осевого сечения, показывают характер линий тока в этой плоскости при симметричном обтекании. Такое обтекание имеет место при движении автомобиля в условиях отсутствия ветра (штиль) или когда направление ветра точно совпадает с линией движения (попутный ветер, встречный ветер). С помощью такой картины линий тока можно идентифицировать ряд основных процессов обтекания.

Обращает на себя внимание явление отрыва потока в задней части автомобиля. В то время, как линии тока для обширных участков контура автомобиля даже в областях более резких изломов контура проходят плавно, от задней кромки крыши поток отрывается. Образуется большая зона вихревого следа, хорошо видимая на рис. 1.2 благодаря тому, что дым (как и на рис. 1.1) не прилегает к контуру автомобиля, а устремляется в оторвавшийся поток.

Сопротивление воздуха W, а также другие компоненты результирующей аэродинамической силы и их моменты возрастают в квадратичной зависимости от скорости движения автомобиля:

$$W \sim V_F^2. \qquad (1.1)$$

Для легкового автомобиля среднего класса доля сопротивления воздуха в суммарном сопротивлении движению при скорости $V_F = 100$ км/ч составляет уже 75–80 %. Следовательно, уменьшая сопротивление воздуха, можно значительно улучшить экономические показатели автомобиля. Поэтому, как и прежде, главной задачей аэродинамики автомобиля является уменьшение сопротивления воздуха до минимально возможного значения, независимо от того, является ли целью проектирования повышение максимальной скорости или снижение расхода топлива. Если записать уравнение (1.1) для силы сопротивления воздуха в полном виде, имеем:

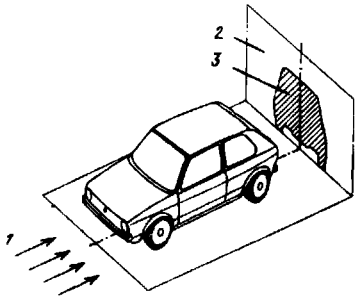


Рис. I.3. Определение площади лобового сопротивления A для автомобиля:
1 – параллельные лучи света;
2 – плоскость проецирования;
3 – площадь лобового сопротивления A

$$W = c_W A(\rho/2)V_F^2, \qquad (1.2)$$

где c_W – коэффициент аэродинамического сопротивления (безразмерная величина); A – площадь проекции автомобиля на плоскость, перпендикулярную к его продольной оси (рис. I.3); ρ – плотность окружающего автомобиль воздуха. Таким образом, аэродинамическое сопротивление автомобиля W, с одной стороны, определяется габаритными размерами автомобиля, выраженными в виде площади фронтальной проекции A, с другой стороны, его формой, аэродинамическое качество которой определяется коэффициентом аэродинамического сопротивления c_W. Как правило, размеры автомобиля задаются предъявляемыми к нему требованиями, и уменьшение сопротивления воздуха сводится к уменьшению коэффициента c_W.

Сравнивая (см. рис. 1.1) расстояние между линиями тока в сечении, расположенном перед автомобилем, с расстоянием между линиями тока над крышей автомобиля, можно получить представление о действующей на него подъемной силе. Как увидим далее в п. 2.3.1, малое расстояние между линиями тока означает высокую скорость потока; а она, в свою очередь, связана с малым статическим давлением. По разности давления над крышей и под днищем автомобиля можно вычислить приложенную в плоскости симметрии перпендикулярно к направлению движения силу, которая называется подъемной силой. Как правило, подъемная сила действует вверх, т.е. она стремится приподнять автомобиль и тем самым уменьшить эффективные нагрузки на колеса. Эта сила связана с продольным аэродинамическим моментом (называемым также моментом галопирования), который приводит к тому, что уменьшение нагрузок на колеса передней и задней осей различно. В области скоростей, характерных для массового легкового автомобиля, т.е. при $V_F <$ $<$ 150 км/ч, подъемная сила и продольный аэродинамический момент мало влияет на его ездовые качества, это утверждение верно и при боковом ветре. Тем не менее необходимо отметить, что они изменяют положение кузова автомобиля относительно дороги и тем самым несколько изменяют его лобовое сопротивление. Уменьшение нагрузок под действием аэродинамических составляющих по сравнению со статическими нагрузками на колеса от массы автомобиля мало, поэтому это едва ли ухудшает курсовую устойчивость авомобиля.



Рис. 1.4. Устройства, обеспечивающие появление прижимающей силы на гоночном автомобиле формулы 1

Сказанное выше не относится к высокоскоростным спортивным автомобилям. В п. 7 показано, как за счет установки спойлеров можно противодействовать уменьшению нагрузки на колеса. Еще дальше пошли в гоночных автомобилях, где с помощью вспомогательных устройств, вызывающих появление прижимающей силы, достигают эффекта, при котором нагрузка на колеса с возрастанием скорости автомобиля увеличивается. Пример такой конструкции приведен на рис. 1.4; как осуществляется доводка таких вспомогательных устройств рассмотрено в п. 7.

При боковом ветре обтекающий автомобиль поток несимметричен относительно продольной осевой плоскости. За счет формообразования следует стремиться к тому, чтобы появляющиеся дополнительные силы и моменты оставались по возможности малыми, не вызывая при наличии бокового ветра значительного ухудшения курсовой устойчивости. В п. 5 объясняется, что чувствительность автомобиля к боковому ветру должна рассматриваться с двух точек зрения. Как правило, неизбежность реагирования на боковой ветер переменной силы и направления означает большее или меньшее ухудшение ездового комфорта; необходимость постоянной корректировки небольших отклонений от курса движения с помощью рулевого колеса ощущается водителем весьма тягостно. Только в очень редких случаях из-за бокового ветра возникает непосредственная опасность для водителя и автомобиля. Этого необходимо избегать с помощью аэродинамически удачного формообразования. Важно также за счет правильного оформления дорог и прилегающей к ним местности предотвращать ситуации, в которых участники движения теряются перед внезапными порывами бокового ветра, предъявляющими

к ним повышенные требования в отношении быстроты реакции.

Используя данные о вихревом следе за автомобилем (см. рис. 1.2), можно решать вопрос о загрязнении задней части автомобиля, подробно этот вопрос рассмотрен в п. 6. В зависимости от состояния полотна дороги колесами захватывается пыль или грязная вода. Частицы пыли и воды в процессе турбулентного перемешивания распределяются по всему объему вихревого следа и оседают на задней поверхности автомобиля. Так как состояние потока в задней части автомобиля, в свою очередь, сильно влияет на силу сопротивления воздуха, то проблему загрязнения задней части автомобиля нельзя рассматривать изолированно.

Пользуясь рис. 1.1, можно сделать некоторые выводы о связи внешнего обтекания с внутренними потоками. Поток через радиатор (см. п. 9) определяется формой потока перед автомобилем. Хорошо видно, что точка разделения потока на верхний и нижний находится на высоте бампера; отверстия расположены выше и ниже бампера (они не видны на рис. 1.1), поэтому поток по отношению к ним направлен под углом. Задача декоративной решетки перед радиатором – направить этот поток, по возможности без потерь, к радиатору, который располагается вертикально.

В зоне сопряжения капота с ветровым стеклом поток прилегает к поверхности. Здесь образуется зона избыточного давления, которая, как описано в п. 10, может использоваться для забора воздуха системы отопления и вентиляции салона. На большинстве автомобилей отверстие для забора свежего воздуха располагается в центре указанной зоны. В этом месте давление зависит от скорости движения автомобиля. Поэтому с повышением скорости увеличивается объем свежего воздуха, подаваемого в салон, что сильно затрудняет поддержание удовлетворительного микроклимата внутри автомобиля. Если расположить отверстие для забора свежего воздуха в таком месте кузова, где коэффициент давления на поверхность равен нулю, то можно, по крайней мере, для симметричного обтекания (без бокового ветра) разделить поля внутреннего потока и внешнего обтекания.

Расположение вентиляционных отверстий для выхода воздуха системы вентиляции салона также в зонах с нулевым коэффициентом давления позволит при установке приточного вентилятора достаточно больших размеров обеспечить необходимый объемный расход воздуха, не зависящий от скорости движения.

Важное значение имеет внутренняя аэродинамика, включающая движение воздуха через радиатор системы охлаждения двигателя, моторный отсек и потоки систем отопления и вентиляции салона. Некоторые типы автомобилей, например гоночные автомобили, дополнительно имеют воздуховоды охлаждения масляного радиатора и для подачи воздуха в камеры сгорания двигателя (см. п.7).

Воздушным потоком через радиатор и моторный отсек от двигателя отводится тепловой поток Q, который имеет примерно то же значение, что и полезная мощность двигателя P:

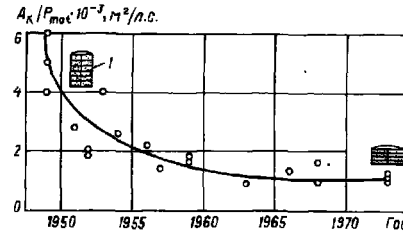


Рис. 1.5. Площадь забора воздуха, отнесенная к мощности установленного на автомобиль двигателя, как функция времени, по Эмменталю:
1 – площадь забора воздуха A_K

$$\dot{Q} \approx P. \qquad (1.3)$$

В свете общих тенденций развития автомобилестроения требования к конструктивному оформлению системы подачи охлаждающего воздуха сильно возросли. Учитывая то, что при водяном охлаждении требуется больший объемный расход холодного воздуха, чем при воздушном, эти возросшие требования к конструкции системы подачи воздуха будут обсуждаться лишь применительно к водяному охлаждению (подробности см. в п. 9).

1. Как подробнее описано в п. 1.3, мощность двигателей, устанавливаемых на автомобиль, постоянно увеличивалась. Поэтому становились необходимыми и возрастающие объемные расходы охлаждающего воздуха.

2. Поверхность кузовов становилась все более ровной; суммарная площадь отверстий для забора воздуха все меньше и меньше. Это хорошо видно на примере данных, приведенных на рис. 1.5. Первоначально большая площадь забора воздуха была разделена на отдельные частичные площади.

3. Вследствие тенденции к компактности конструкции для радиатора и направляющих воздух устройств в моторном отсеке отводилось все меньше и меньше места.

4. В связи с необходимостью улучшения пассивной безопасности автомобиля кузов в передней части постоянно усиливался. Наличие широких бамперов и поперечин затрудняет организацию движения воздушных потоков в моторном отсеке.

Поток охлаждающего воздуха должен проходить таким образом, чтобы теплоотдача по всей площади радиатора по возможности была равномерной, за счет этого можно сэкономить дорогостоящий материал, из которого он изготовлен. Следует обратить внимание на то, что аэродинамическое сопротивление автомобиля вследствие потери скоростного напора в потоке охлаждающего воздуха возрастает; приняв соответствующие меры, можно уменьшить это сопротивление, что обосновывается в

п. 4. Если образуемого при движении расхода воздуха для охлаждения недостаточно, должен включаться вентилятор; радиатор и вентилятор должны быть подобраны друг к другу таким образом, чтобы система охлаждения была экономичной с точки зрения ее стоимости и энергетических затрат на привод вентилятора.

Система вентиляции салона, речь о которой пойдет в п. 10, должна выполнять следующие три задачи.

1. Обеспечить удовлетворительную кратность воздухообмена в салоне. Путем подачи свежего воздуха должны удаляться все вредные вещества в форме газов, паров и пыли, а также восполняться расход кислорода, необходимого для дыхания человека.

2. Создавать приятный микроклимат в салоне и обеспечивать возможность его поддержания в широком диапазоне изменения внешних погодных условий. Для эксплуатации автомобиля зимой следует предусмотреть эффективную систему отопления. Летом комфортные условия можно обеспечить подачей необходимого количества свежего воздуха. В очень жарких странах этого недостаточно, воздух перед поступлением в салон должен охлаждаться в специальных устройствах.

3. Устранять запотевание и замораживание стекол. Для этого внутренний поток необходимо направить вдоль стекол, чтобы конденсируемая на них влага (вода) испарялась, и лед, который может образовываться с обеих сторон стекла, таял.

К динамическим свойствам системы распределения потока в салоне предъявляются особые требования. Так, например, система отопления должна обеспечивать быстрый прогрев воздуха в салоне после пуска двигателя. Во время езды микроклимат в салоне не должен зависеть от скорости автомобиля, режима работы двигателя и состояния окружающей среды. Поток должен перемещаться бесшумно, аэродинамические шумы должны быть устранены, шум от вентилятора должен быть минимально возможным. Отверстия в кузове, через которые внутренний поток связан с внешней средой, должны конструктивно выполняться таким образом, чтобы предотвратить проникновение влаги при экстремальных условиях (мойка автомобиля).

При решении названных задач по формированию внешнего обтекания и внутренних потоков необходимо учитывать специфические особенности автомобиля. Если, например, при решении вопросов аэродинамики гоночного автомобиля формулы 1 на первом месте стоит проблема получения прижимающей силы, то для обычного легкового автомобиля основное внимание уделяется силе сопротивления воздуха. Для скоростного микроавтобуса или фургона актуальной может стать проблема уменьшения чувствительности к боковому ветру. Тип автомобиля определяет также и пути решения поставленных аэродинамических задач. Так, для гоночных автомобилей главная цель – улучшение силового замыкания между колесами и полотном дороги за счет прижимающей аэродинамической силы – достигается независимо от формы автомобиля. Крыловидные профили спереди и сзади стали составной частью внешнего вида современных гоночных автомобилей. Стремясь уменьшить

аэродинамическое сопротивление обычного легкового автомобиля, пользуются внешне незаметными средствами или пытаются приспособить аэродинамические мероприятия к изменяющемуся восприятию стиля.

1.1.2. МЕТОДОЛОГИЯ В АЭРОДИНАМИКЕ АВТОМОБИЛЯ

Между аэродинамикой автомобиля и аэродинамикой самолета можно провести ряд параллелей. Цели в обеих дисциплинах весьма схожи: с одной стороны, стремятся снизить мощности, затрачиваемые на движение или полет (продольная динамика), в конечном счете – это малая сила сопротивления воздуха; с другой стороны, силы и моменты, действующие относительно двух других осей, перпендикулярных к направлению перемещения, должны быть согласованы между собой таким образом, чтобы обеспечивалась хорошая курсовая устойчивость автомобиля или самолета (поперечная динамика). Об аналогии свидетельствует также последующее применение аэродинамических сил и моментов в уравнениях движения. И все-таки, в автомобильной аэродинамике сложилась методология, которая во многих подобластях отличается от методологии в аэродинамике самолета. Необходимо выделить следующие особенности.

Аэродинамика самолета опирается на хорошо разработанную теоретическую базу; теория вместе с подтверждающими ее правильность экспериментальными данными подробно изложена в специальной литературе, посвященной этому вопросу, например, в книге Шлихтинга и Труккенбродта [1.1]. Исходя из этого, при проектировании самолета разрабатывается расчетная аэродинамическая модель, которая в последующем улучшается в процессе проведения доводочных экспериментальных работ с масштабными моделями в аэродинамической трубе и летных испытаний прототипа.

При проектировании автомобиля вопрос его аэродинамики решается иным образом, оптимизация формы с точки зрения аэродинамики осуществляется исключительно экспериментальным путем. Правда, здесь есть преимущество: вследствие меньших по сравнению с самолетом габаритных размеров автомобиля исследования в аэродинамической трубе могут проводиться с использованием моделей в натуральную величину или прототипов.

Такой подход определяется двумя причинами.

Во-первых, аэродинамика для автомобиля имеет иное значение, чем для самолета. Качество автомобиля не определяется его аэродинамикой в такой степени, как это имеет место для самолета. Важнейшие критерии оценки проектируемого автомобиля во многом ориентируются на требования стиля, ходовые качества, технологию его изготовления. К акцентированию роли аэродинамики ведет увеличение цен на топливо.

Во-вторых, по сравнению с аэродинамикой самолета отсутствует надежная теоретическая база. Правда, постоянно предпринимались попытки использовать выводы аэродинамики самолета применительно к аэродинамике автомобиля, и при решении отдельных проблем были

достигнуты заметные успехи. Тем не менее до настоящего времени отсутствует целостная законченная теория аэродинамики автомобиля, поэтому в рамках этой книги она не может быть предложена вниманию читателя.

Расчет обтекания самолета облегчается тем, что поля потоков для отдельных элементов, таких, как крыло, фюзеляж и хвостовое оперение, могут рассматриваться отдельно; интерференцию между отдельными элементами можно проанализировать теоретически. Так как речь преимущественно идет о безотрывном потоке, то расчет можно выполнять в два этапа. Сначала рассчитывается свободное от трения поле потока; затем с использованием теории пограничного слоя определяется влияние трения. Положенные в основу такого подхода теоретические методы постоянно развиваются дальше и расширяются в связи с изменяющимися требованиями, которые являются результатом перемещения в область более высоких скоростей полета.

Обтекание автомобиля не может быть рассмотрено в виде отдельных, независимых друг от друга полей потоков. Правда, с помощью разработанного в самолетостроении "метода панелей" для такого сложного тела, каким является автомобиль, с учетом влияния основания можно рассчитать свободный от сил трения поток, как это описано, например, в работах Ахмеда и Гухо [1.2], [1.3]. Но, как наглядно показывает рис. 1.1 и рис. 1.2, картина обтекания автомобиля существенно изменяется под воздействием сил трения. Области срывающегося потока оказывают весьма существенное влияние на процесс обтекания, так что разделение расчета на определение свободного от трения внешнего потока и пограничного слоя предпринять нельзя. На рис. 1.6 и 1.7 схематически показаны все зоны, в которых может иметь место отрыв; к ним следует добавить и не показанные срывы потока от деталей шасси. Только часть этих срывов можно предотвратить за счет аэродинамического формообразования. Отрывы потока в задней части автомобиля, как пра-

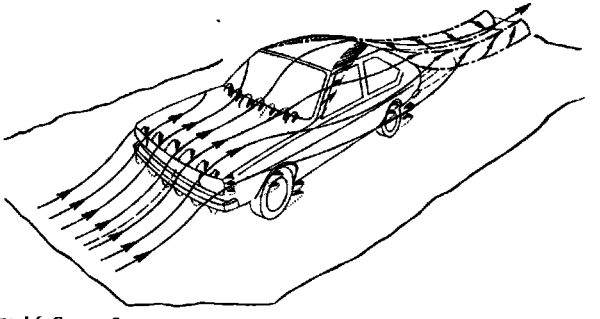


Рис. 1.6. Схема обтекания легкового автомобиля

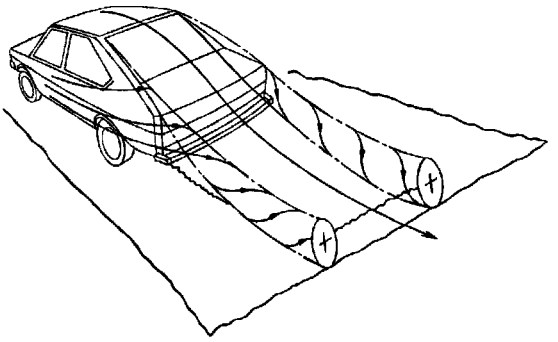


Рис. 1.7. Схема обтекания задней части легкового автомобиля

вило, предотвратить нельзя вследствие необходимости соблюдения ряда требований по ограничению габаритной длины, обеспечению удобства посадки и объему багажника.

Воздействие на отрыв, т.е. его предотвращение, либо его целенаправленное провоцирование является существенной частью аэродинамической доработки автомобиля. Подробно об этом рассказано в пп. 4–8.

1.1.3. РОДСТВЕННЫЕ ОБЛАСТИ НАУКИ

Из родственных с аэродинамикой автомобиля дисциплин следует выделить те, для которых существуют тесные параллели в постановке задач, методологии и прежде всего технике проведения экспериментальных работ. Отсюда специалисты в области аэродинамики автомобиля могут получить многочисленные данные, необходимые в работе. В дополнение к представленным на рис. 1.8 смежным областям науки можно сделать ряд пояснений.

С аэродинамикой архитектурных сооружений существуют следующие параллели: обтекание угловатых тел, образованных плоскими панелями или панелями малой кривизны; влияние на поток отрывов; влияние основания и прилежащего к основанию пограничного слоя; интерференция между архитектурными сооружениями; методы испытаний в аэродинамической трубе.

Аэродинамика архитектурных сооружений преследует ряд целей, аналогичных аэродинамике автомобиля: определение аэродинамических сил, действующих на архитектурное сооружение в целом; определение аэродинамических сил, действующих на такие элементы, как крыши, фасады, окна; определение влияния прилегающего поля потока на защиту прохожих; согласование внешнего и внутреннего потоков (климат, вытяжная вентиляция).

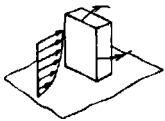
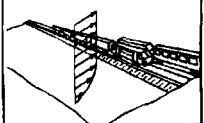
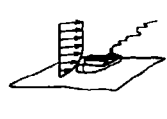
Архитектурные сооружения	Рельсовые транспортные средства	Суда (надводная часть)
		
Аэродинамические силы как источники дополнительных нагрузок; аэродинамические силы, действующие на элементы здания; поле обтекания; вентиляция	Сопротивление воздуха; пиковые значения давления; боковой ветер; поле обтекания; вентиляция	Аэродинамическое сопротивление (для глиссирующих катеров и катеров на подводных крыльях); поперечная сила; вентиляция; приточная вентиляция

Рис. 1.8. Родственные с аэродинамикой автомобиля области науки

Наряду со множеством отдельных публикаций по указанным вопросам появилось несколько обширных трудов. О воздействии сил ветра на архитектурные сооружения имеется подробная информация у Гернера [1.4]. Аккерет в [1.5], используя наглядные примеры, приводит обзор по важнейшим проблемам аэродинамики зданий. Полное представление об уровне знаний дал Захс [1.6], ссылаясь на многочисленные литературные источники. В сжатой форме аэродинамика архитектурных сооружений изложена Хоктоном и Кэрразерсом [1.7].

Поле обтекания рельсового транспортного средства весьма похоже на поле обтекания автомобиля. Важнейшее отличие заключается в том, что вследствие сцепления отдельных вагонов в длинные поезда получается очень длинное тело по сравнению с его высотой и шириной. Особые условия возникают при встречном разъезде поездов из-за малого расстояния между рельсами, а также при въезде в туннель и при движении по очень узкому туннелю. Важнейшими задачами аэродинамики рельсового транспорта являются: уменьшение силы сопротивления воздуха; снижение пиков давления при встрече поездов и при движении по тоннелям; уменьшение чувствительности к боковому ветру; согласование внешнего обтекания и внутренних потоков с целью получения удовлетворительного охлаждения и вентиляции.

В отличие от автомобилей, для которых, если не принимать во внимание гоночные автомобили, тенденция к увеличению скорости движения затухает, для рельсовых транспортных средств скорости движения продолжают расти. Поэтому аэродинамике поездов уделяется большое внимание. Некоторые данные о сопротивлении железнодорожных поездов приведены у Гернера [1.4]. Более поздние данные обобщил и критически проверил Боден [1.8]. Имеющие место при встречном разъезде поездов пиковые давления исследованы Гильманном [1.9] и Коллином [1.10]. Проблемы, касающиеся высокоскоростных поездов, в особенности при движении в тоннелях, обсуждались в работах Непперта и Зандерсона [1.11], а также Штайнхойера [1.52].

Не остается без внимания и проблема обтекания воздухом надводных частей судов. Сопротивление воздуха для водоизмещающего судна по сравнению с преодолеваемым им сопротивлением воды мало. Для быстрых глиссирующих катеров и катеров на подводных крыльях роль сопротивления воздуха более существенна. Наряду с продольным сопротивлением в аэродинамике надводного судна уделяется внимание поперечной силе. Последняя имеет огромное значение для судов с высокими бортами, например паромов, при швартовке. Для пассажирских судов на первое место выдвигается приточная вентиляция.

Основательного труда по аэродинамике надводного судна на сегодняшний день нет. Как и для рельсовых транспортных средств, можно сослаться на целый ряд отдельных публикаций. О сопротивлении воздуха есть сведения у Гернера [1.4]. Из многочисленных работ по приточной вентиляции можно назвать работу Тиме [1.12]. С вопросами, касающимися поперечных сил, которые являются следствием воздействия на судно ветра, можно ознакомиться в труде Гоулда [1.13]. Здесь же приведены сведения об имитации поверхности воды и воспроизведении пограничного слоя воздуха над зеркалом воды в аэродинамическом канале. Существует аналогия с другими дисциплинами и по внутренним потокам автомобиля. Обтекание водяного радиатора в автомобиле идентично обтеканию масляного радиатора в самолете. Эта аналогия используется в п. 9 для описания процесса охлаждения в автомобиле. Создание микроклимата в салоне автомобиля дополняется сведениями о создании микроклимата в зданиях, это используется в п. 10.

1.2. ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ

1.2.1. ОБЗОР

В развитии аэродинамики легкового автомобиля можно выделить три этапа, правда, их нельзя четко разграничить по времени. Важнейшие ступени развития показаны на рис. 1.9 (см. работу Гухо, Янссена, Эммельманна [1.14]).

На первом этапе, начало которого можно датировать периодом смены веков, предпринимались попытки непосредственно использовать для автомобиля обтекаемые формы, существовавшие в воздухоплавании и судостроении. Однако эти формы не могли прижиться в автомобилестроении. Формы типа "дирижабль" и кузова с задней частью, выполненной в форме корпуса корабля, были неприспособлены и бессмысленны для автомобиля. Возможные скорости движения вследствие очень плохих дорог и малых мощностей двигателя были настолько малы, что аэродинамическое сопротивление, без сомнения, играло весьма несущественную роль.

Второй этап характеризуется тем, что усилия были направлены на перенос полученных преимущественно в самолетостроении знаний в автомобилестроение и последовательное приспособление их к автомобильной технике. Цель работ – получение "обтекаемого" автомобиля. Разра-

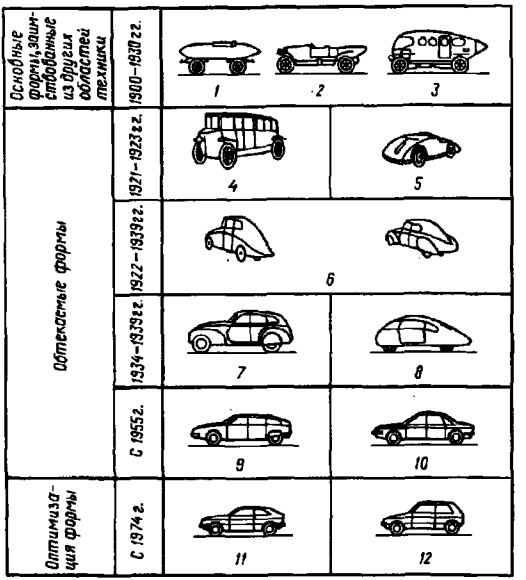


Рис. 1.9. Три важнейших этапа развития аэродинамики автомобиля на примере легковых автомобилей [1.14]:
1 – торпеда; *2* – форма в виде "остова корабля"; *3* – дирижабль; *4* – автомобиль Румплера; *5* – автомобиль Бугатти; *6* – автомобили Джерея; *7* – автомобиль Камма; *8* – автомобиль Шлера; *9* – автомобиль "Ситроен"; *10* – автомобиль "*NSURo* 80"; *11* – автомобиль "*VW* Сирокко"; *12* – автомобиль "*VW* Гольф"

ботанные преимущественно специалистами в области аэродинамики самолета формы нельзя было принять в автомобилестроении прежде всего из-за их большой длины и неблагоприятных соотношений между объемом салона и габаритными размерами. И лишь благодаря работам Эверлинга [1.15] и Камма [1.16], [1.17] были накоплены знания, которые дали возможность обеспечить аэродинамически удачное формообразование для автомобиля массового производства. Форма Камма победила плавно оканчивающийся и недопустимо длинный автомобиль.

Третий, развивающийся в настоящее время этап, с самого начала отличается от предшествующих. Больше уже не пытаются разработать обтекаемую форму, а затем приспособить ее к требованиям, которым должен удовлетворять автомобиль. За счет оптимизации многочисленных элементов формы предлагаемого дизайнерского решения, сохраняя его своеобразие, стремятся получить хорошие аэродинамические свойства.

При таком подходе были получены заметные успехи (см. работу Янссена и Гухо [1.18]); но пределы, кажется, достигнуты. Начинает вырисовываться новый, не показанный на рис. 1.9, четвертый этап. Из обтекаемых тел с габаритными размерами легкового автомобиля "последовательно разрабатываются" формы автомобиля, от которых, допуская компромиссы по форме, можно ожидать очень малый коэффициент аэродинамического сопротивления.

Развитие формы сначала было направлено исключительно на снижение сопротивления воздуха. С увеличением скорости движения возникла проблема устойчивости к боковому ветру. В более позднее время стали предпринимать попытки за счет формообразования уменьшить загрязнение и скопление дождевой воды на стеклах и фонарях.

Приведенное ниже описание развития аэродинамики автомобиля базируется на имеющейся литературе. Указанные числовые данные, особенно значения коэффициентов аэродинамического сопротивления, весьма недостоверны. Измерения коэффициента аэродинамического сопротивления производились для автомобилей частично методом свободного выбега, частично посредством измерения максимальной скорости. Возможные погрешности этих методов освещены в п. 12. Многие экспериментальные значения получены при испытаниях в аэродинамической трубе. Они проводились на моделях очень различного качества изготовления и выполненных в различных масштабах. Не одинаковым был способ моделирования полотна дороги, поэтому, как объяснено в п. 11, значения нельзя считать абсолютно точными и сравнивать данные, приведенные разными авторами, невозможно.

Описание истории аэродинамики автомобиля в следующих ниже разделах ведется с учетом двух аспектов: с одной стороны, необходимо показать, благодаря каким работам были получены основные знания по аэродинамике автомобиля; с другой – следует осветить, каким образом накопленные знания применялись в автомобилестроении. К подробному обзору параллельных или специальных направлений развития мы не стремились, – это освещено Кениг-Фахзенфельдом [1.19]. Более поздние публикации по истории аэродинамики, преимущественно для Америки, принадлежат Людвигсену [1.53] и Мак-Дональду [1.54].

1.2.2. ФОРМЫ, ЗАИМСТВОВАННЫЕ ИЗ ДРУГИХ ОБЛАСТЕЙ ТЕХНИКИ

Первые попытки создать обтекаемый кузов автомобиля заключались в том, что формы, которые родились в других областях техники, были заимствованы для автомобилестроения. При этом отказывались от того, чтобы соответствующим образом трансформировать эти формы с учетом особенностей автомобиля и условий его обтекания. Так, например, симметричные формы тел вращения из мореплавания и воздухоплавания были использованы для автомобиля, несмотря на то что они, будучи помещенными вблизи основания, при наличии шасси уже не будут иметь симметричного обтекания. Тем не менее по сравнению с кузовами, перешедшими из каретостроения, эти формы были прогрессом на

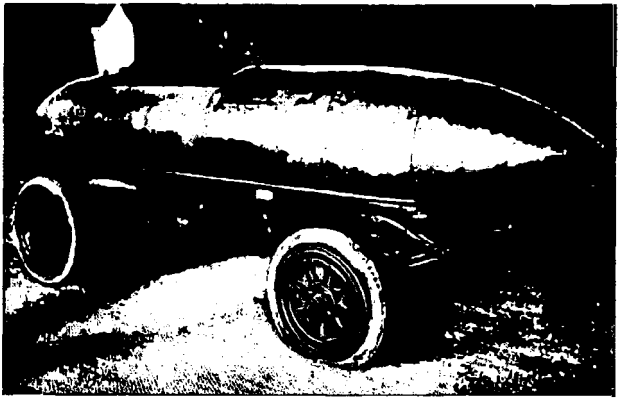


Рис. 1.10. Рекордный автомобиль Камилла Дженатци, 1899 г.

пути к уменьшению сопротивления воздуха. Старейшим из этой плеяды является автомобиль Камилла Дженатци, на котором он впервые в истории, 29 апреля 1899 г. достиг скорости, большей 100 км/ч. Показанный на рис. 1.10 автомобиль, имеющий электрический привод, развивал максимальную скорость V_F = 105,9 км/ч (см. работу Франкенберга и Матточчи [1.20]). Только кузов, благодаря его торпедообразной форме с соотношением длины к диаметру $l/d = 4$, имел хорошую обтекаемость; отстоящие от кузова колеса, а также и сам водитель, не "вписывались" в единую форму, из-за этого сопротивление воздуха сильно увеличивалось. Рекордный автомобиль Дженатци можно считать предком всех одноместных гоночных автомобилей даже с учетом того, что кузов автомобиля еще располагался над колесами, а не между ними.

Другой автомобиль с обтекаемым кузовом показан на рис. 1.11; речь идет об "Альфа Ромео" выпуска 1913 г. Для этого автомобиля соотношение длины к высоте кузова $l/h = 3$. Существовали аналогичные автомобили, у которых колеса были частично закрыты кузовом (проект Бергманна, см. [1.20]). Позднее, как показано в следующем разделе, попытки выполнить кузов в виде единого тела предпринимались довольно часто. При переходе автомобилестроения на массовое производство от этой концепции отказались.

В противоположность показанным на рис. 1.10 и 1.11 формам кузов с задней частью в виде "остова корабля" с точки зрения аэродинамики совершенно неудачен. Пример автомобиля с такой формой кузова приведен на рис. 1.12. Отрывающийся от острых кромок задней части автомобиля и от многих выступающих деталей поток из-за вогнутой формы задней части повторно к ней не прилегает. Задняя часть кузова в

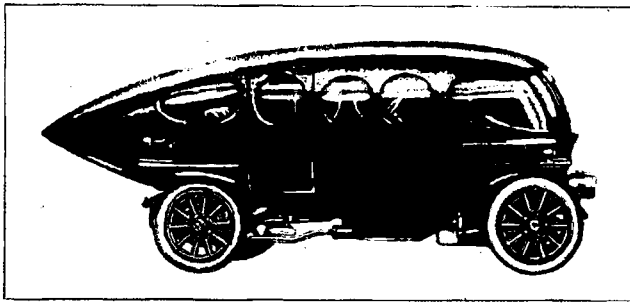


Рис. 1.11. Автомобиль "Альфа Ромео" Рикотти, 1913 г., фото фирмы "Альфа Ромео"

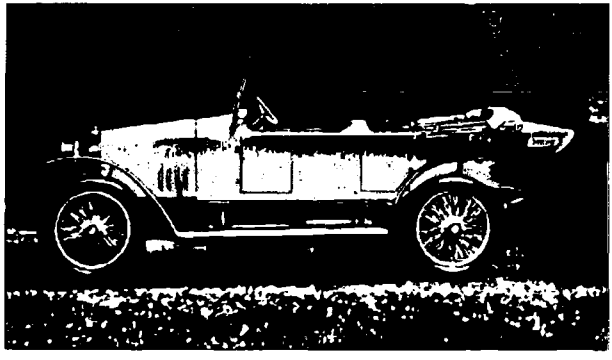


Рис. 1.12. Автомобиль с формой кузова в виде "остова корабля" "Ауди-Альпен-зигер", 1913 г., фото Немецкого музея

форме "остова корабля", которая в различных вариантах использовалась для серийных лимузинов и спортивных автомобилей, служит примером тому, как злоупотребляли аэродинамическими аргументами для оправдания странностей стилистического оформления.

1.2.3. ХОРОШО ОБТЕКАЕМЫЕ ФОРМЫ

Хорошим подспорьем для развития аэродинамики автомобиля явился анализ сил, составляющих сопротивление движению, который был предпринят в 1911 г. Ридлером [1.21]. Одновременно, для объяснения возникновения аэродинамического сопротивления автомобилей, стали использовать сведения, приведенные Прандтлем и Эйфелем, см. п. 2. Примером служит труд Астона [1.22], появившийся в 1911 г. Очень медленно происходил процесс вытеснения Ньютоновской трактовки механизма возникновения аэродинамического сопротивления на основании закона изменения количества движения.

После первой мировой войны создание обтекаемых кузовов началось одновременно во многих странах; использовались знания по аэродинамике, приобретенные в самолетостроении. Румплер, известный своим удачным самолетом "Румплер-Таубе", разработал несколько автомобилей, которые он назвал "каплеобразными". Лимузин Румплера показан на рис. 1.13; чтобы полезно использовать заостряющуюся заднюю часть автомобиля, Румплер разместил двигатель сзади. В горизонтальной проекции этот автомобиль имел форму профиля крыла, на виде спереди его проекция представляла прямоугольник (см. работы Геллера [1.23], Эпингера [1.24] и Румплера [1.25]). Исследования, проведенные Буххаймом в аэродинамической трубе фирмы "Фольксваген" в 1979 г. на представленном немецким музеем оригинале этого автомобиля, дали следующие результаты :

площадь лобового сопротивления $A = 2{,}57\ м^2$;

коэффициент аэродинамического сопротивления $c_W = 0{,}28$.

Если вырезать из крыла большой протяженности $\Lambda = b/l$ часть профиля, то для этой части обтекание приобретает объемный характер, см. рис. 1.13 и 1.14. На автомобиле Румплера колеса вынесены за габариты кузова. В п. 7 на основании результатов испытаний гоночных авто-

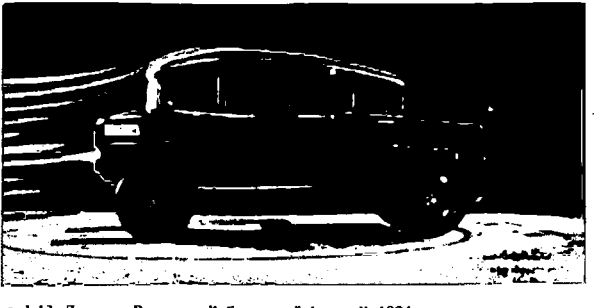


Рис. 1.13. Лимузин Румплера "обтекаемой формы", 1924 г., снимок выполнен при испытаниях в аэродинамической трубе фирмы "Фольксваген" Буххаймом в 1979 г.

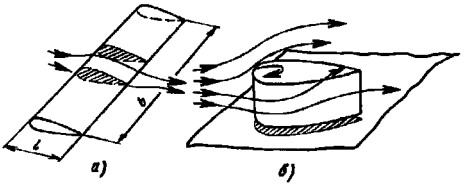


Рис. 1.14. Схемы обтекания профиля:
а – схема двухмерного обтекания профиля; *б* – схема объемного обтекания части профиля

мобилей доказывается, что из-за этого увеличивается аэродинамическое сопротивление, и это увеличение тем больше, чем более обтекаем кузов автомобиля. Как показали измерения, проведенные Клемперером [1.26] в 1922 г., увеличение сопротивления из-за выступающих за габариты кузова колес для автомобиля Румплера могло составлять, по меньшей мере, 50 %.

Гоночный автомобиль Бугатти, появившийся в 1923 г., проектировался с учетом двухмерного обтекания (рис. 1.15). Расположенный горизонтально профиль, образующий кузов, при обтекании потоком вблизи основания является лучшим решением; как и на современных гоночных автомобилях, предназначенных для соревнований, за счет опускания кузова предотвращалось вторичное перетекание воздуха по контуру автомобиля. Выпуклая форма профиля облегчает размещение колес, закрытых кузовом. Из-за водителя и пассажира рядом с ним поток за автомобилем существенно искажается.

Объемное обтекание тела вращения вблизи основания впервые проанализировал Джерей; в своей дальновидной работе под названием "Обтекаемые автомобили, новая форма автомобильных кузовов" [1.27] он впервые применил термин "обтекаемый автомобиль". Мысли Джерея недавно подробно изложены Брелем [1.28]. Джерей пришел к выводу, что обтекание тела вращения, имеющего при большом расстоянии от основания весьма малый коэффициент аэродинамического сопротивления, при приближении к основанию становится несимметричным и что вследствие возникающего от обратной стороны отрыва сопротивление возрастает. В предельном случае, когда расстояние до основания стремится к нулю,

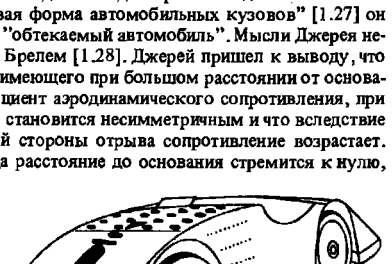


Рис. 1.15. Гоночный автомобиль Бугатти, 1923 г. (рабочий объем двигателя 2 л)

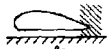
	$A_{1,1}[м^2]$	c_w
	2,99	0,64
 Большой автомобиль Джерея	2,86	0,30
 Малый автомобиль Джерея	1,87	0,29
	2,99	
 Полутело вращения без колес	Спереди острая кромка	0,13
	Спереди кромка скруглена	0,09
Полутело вращения с колесами		0,15

Рис. 1.16. Измеренные Клемперером в 1922 г. для моделей в масштабе 1:10 коэффициенты сопротивления воздуха

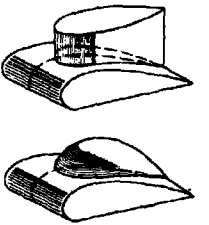


Рис. 1.17. Комбинированные формы по Джерею. Верхняя форма состоит из двух установленных друг на друга профилей; нижняя форма образована сопряжением профиля с полутелом вращения

оптимальная с точки зрения сопротивления форма представляет собой полутело, которое вместе со своим зеркальным отражением (относительно полотна дороги) образует полное тело вращения. Это полутело, которое имело соотношение между длиной и высотой $l/h = 4$, Джерей изменил таким образом, чтобы мидель приобрел форму прямоугольника, верхние углы которого были скруглены. При испытаниях в аэродинамической трубе, проведенных Клемперером [1.26], получилось, что сопротивление этого полутела с увеличением расстояния до основания вследствие обтекания острых нижних кромок увеличивалось; благодаря скруглению кромок это увеличение можно было приостановить (рис. 1.16). Джерей попытался создать обтекаемое полутело путем объединения отдельных обтекаемых тел, одновременно он стремился учесть все другие требования, предъявляемые к кузову. Идея обтекаемого тела, как будет показано ниже, позднее использовалась многими конструкторами.

На рис. 1.17 схематично показано, каким образом Джерей создавал свои формы автомобиля, используя крыловидные профили и тела вращения. В обоих примерах в основу формообразования кузова положена комбинация из двух хорошо обтекаемых тел; нижнее тело представляет собой крыловидный профиль, на который в первом случае перпендикулярно установлен симметричный обтекаемый профиль, а во втором – полутело вращения. В такое построение поверхности кузова, позднее названного "комбинированным" положено следующее соображение: малое сопротивление воздуха можно получить лишь тогда, когда существенно

уменьшается поверхность срыва потока в задней части. При задней части автомобиля, имеющего форму полутела вращения, можно этого добиться лишь в том случае, если задняя часть сильно вытянута. Комбинированная форма кузова позволяет проводить изменения формы задней части в двух плоскостях. За счет этого должно предотвращаться слишком сильное повышение давления, которое связано с опасностью возникновения отрыва. К сожалению, Джерей в [1.29] привел только "схематичное" распределение давления для комбинированной формы; рисунки линий тока, приведенные Кениг-Фахзенфельдом в [1.19] для автомобилей Джерея, показывают, что отрыв предотвращается только при очень плавных комбинированных формах.

Позднее Джерей представил типовую таблицу, в которой уделил внимание многообразию аэродинамического формообразования кузовов. Особенностью всех его проектов была горизонтальная задняя кромка. Джерей предложил классифицировать отдельные параметры форм по номерам аналогично тому, как это введено Национальным консультативным комитетом по аэронавтике (*NACA*) в США для крыловидного профиля. Но это предложение – как и все более поздние – для автомобилестроения оказалось бесполезным.

На рис. 1.16 представлены важнейшие результаты замеров, выполненные Клемперером [1.26] для первых моделей Джерея. По сравнению с общепринятыми в то время конструкциями кузовов комбинированная форма вдвое уменьшала коэффициент сопротивления воздуха. С другой стороны, коэффициент сопротивления для комбинированной формы Джерея $c_W = 0{,}30$ был вдвое больше коэффициента для полутела вращения, поставленного на колеса ($c_W = 0{,}15$). В п. 4 показано, каким образом современная аэродинамика автомобиля использует достигнутые уже в 1922 г. Джереем и Клемперером возможности.

Как видно из рис. 1.16, первые модели Джерея были необычно высокими; соотношение длины и высоты составляло $l/h = 2{,}1$. В 1922 и 1923 гг. было создано несколько автомобилей формы Джерея этого типа; однако такая своеобразная форма не имела успеха.

По тому же пути, что и Джерей, пошел Мобуссан [1.30]. Его автомобиль "Мистраль" на виде сверху имел форму обтекаемого профиля. Задние колеса закрывались горизонтальным профилем, так что задняя часть автомобиля была аналогична форме Джерея. Сужающиеся линии кузова стесняли внутреннее пространство по ширине.

Затем были разработаны несколько экспериментальных автомобилей формы Джерея, которые выглядели более привлекательно. Пример показан на рис. 1.18 – спортивный автомобиль "Адлер-Трумпф". Сужающаяся форма с отношением $l/h = 3{,}3$, а в особенности спадающая линия задка, ухудшали возможности использования внутреннего пространства. Коэффициент сопротивления воздуха для этого автомобиля неизвестен.

Серийным автомобилем, имеющим форму Джерея, является разработанный Ледвинкой автомобиль "Татра-87", созданный в 1940 году, см. рис. 1.19. При отношении $l/h = 2{,}9$ этот автомобиль сужался меньше,

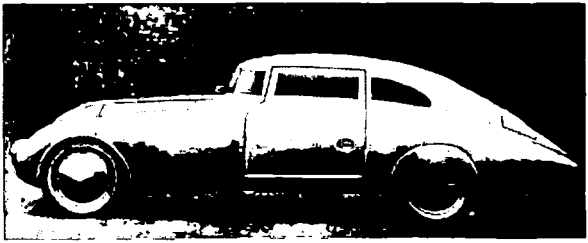


Рис. 1.18. Автомобиль "Аддер-Трумпф", 1934–1935 гг.; рабочий объем двигателя 1,5 л, привод на передние колеса. Форма кузова разработана Э. Клейером, фото барона Кениг-Фахзенфельда

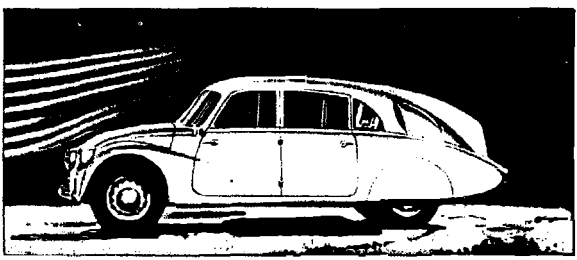


Рис. 1.19. Автомобиль "Татра тип 87", 1940 г.; двигатель восьмицилиндровый, рабочий объем 3 л; форма кузова разработана Ледвинкой, фото Буххайма, фирма "Фольксваген", 1979 г.

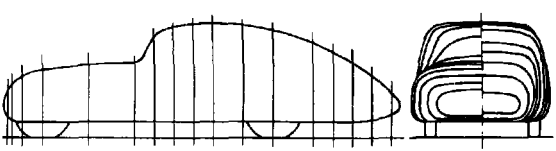


Рис. 1.20. Автомобиль Ланге; отношение длины к высоте $l/h = 3{,}52$; $c_W = 0{,}14 \div 0{,}16$. Абсолютно гладкая модель

чем показанный на рис. 1.18 "Адлер-Трумпф". Расположение двигателя в задней части позволило сместить салон вперед, в область большого объема. Для автомобиля "Татра-87" Ланге были проведены испытания в аэродинамической трубе с моделью в масштабе 1:5. Опубликованное Кениг-Фахзенфельдом [1.31] значение $c_W = 0{,}244$ было поставлено под сомнение в примечании редакции, пришлось остановиться на рассчитанном по максимальной скорости и мощности двигателя значении $c_W = 0{,}31$. В действительности же это значение составляет $c_W = 0{,}36$, как определил Буххайм при замерах в аэродинамической трубе фирмы "Фольксваген", выполненных в 1979 г. для представленного музеем оригинала этого автомобиля.

Первые испытания в аэродинамической трубе для форм Джерея, которые провел Клемперер [1.26] в 1921–1922 гг., были продолжены затем Институтом аэродинамических исследований (*AVA*) в Геттингене под руководством Прандтля. Была разработана форма кузова, состоящая из горизонтально расположенного основного профиля, к которому, начиная от ветрового стекла, присоединялся второй профиль, также расположенный горизонтально. Второй профиль, как и в формах Джерея, на виде сверху спереди был скругленным. Такая форма стала известна под названием "автомобиль Ланге". Для показанной на рис. 1.20 модели такого "автомобиля Ланге" был получен коэффициент аэродинамического сопротивления $c_W = 0{,}14$ (см. работу Ланге [1.32]). Измерения, проведенные автором и его коллегами на выполненной позднее модели в масштабе 1:5 (данные не опубликованы) показали близкое значение $c_W = 0{,}16$. Однако модель сделана без учета некоторых элементов, таких, как детали шасси, арки колес, проемы окон. Для формы Ланге можно было получить такие же малые значения коэффициента c_W, как и для форм полутела вращения (сравните рис. 1.16), которые, правда, были несколько объемнее: $l/h = 3$. Форму автомобиля Ланге напоминает "Порше 911".

Необходимая относительно большая длина автомобиля (отношение l/h) воспрепятствовала успеху идей Джерея. Но были созданы автомобили, имеющие псевдоформы Джерея, это автомобили с плавно спускающейся сзади крышей (фастбек), для которых линия задка была более крутой. Как показано в п. 4, при такой форме образуются два четко выраженных кромочных вихря. Вследствие индуцируемого ими поля нисходящего потока обтекание в зоне среднего продольного сечения автомобиля долго остается прилегающим, но возникает высокое индуктивное сопротивление, поэтому общее сопротивление больше, чем при истинных линиях Джерея. По сравнению с фургонообразными кузовами с коэффициентом аэродинамического сопротивления $0{,}6 < c_W < 0{,}8$ автомобили с псевдоформой Джерея при $0{,}4 < c_W < 0{,}5$ являлись шагом вперед на пути прогресса.

Измерения Клемперера [1.26] дали достижимое предельное значение $c_W = 0{,}15$ для бескомпромиссного формообразования (получено вращения с колесами), такое значение стало возможным получить (см. п. 4) в более позднее время. Попытка Джерея как можно ближе продвинуться

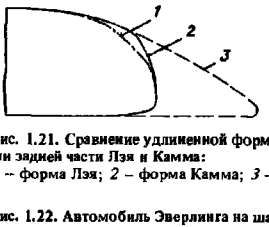


Рис. 1.21. Сравнение удлиненной формы задка Клемперера с укороченными формами задней части Лэя и Камма:
1 – форма Лэя; *2* – форма Камма; *3* – форма Клемперера

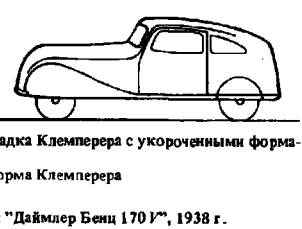


Рис. 1.22. Автомобиль Эверлинга на шасси "Даймлер Бенц 170 *V*", 1938 г.

к этому предельному значению привела к формам, которые были неприемлемы на практике. Работы Джерея не дают указаний о том, за счет каких мероприятий было бы возможно последовательно сократить разрыв между коэффициентом $c_W = 0{,}7$ для автомобилей 20-х годов и $c_W = 0{,}15$ – возможным предельным значением. Этот недостаток частично был ликвидирован благодаря измерениям, проведенным Лэем [1.33], сотрудником Мичиганского университета (1933–1934 гг.). Системно изменяя форму автомобиля спереди и сзади, Лэй показал ее влияние на коэффициент аэродинамического сопротивления; полученные им результаты приведены в п. 4. Важнейшим результатом исследований Лэя был вывод о том, что для автомобиля, в целом имеющего обтекаемую форму, круто спускающаяся форма задка в сравнении с вытянутой дает относительно малое увеличение сопротивления. Подобные замечания были сделаны Дорнье еще в 1920 г. при измерениях для профилей со срезанной задней кромкой [1.4]; однако в то время на формообразование автомобилей эти замечания не распространялись.

Из круто спускающейся формы задка Лэя, начиная с 1934 г., была разработана форма Камма, преимущество которой заключалось в наличии большего пространства над головой в зоне заднего сиденья при сохранении малого значения коэффициента c_W (рис. 1.21). Низкое значение коэффициента c_W достигается за счет того, что на крыше поток прилегает, а затем благодаря крутому срезу задка переносится на значительно меньшее сечение для отрыва. В результате этого поперечная площадь вихревого следа значительно уменьшается, и зона разрежения за автомобилем мала.

Огибание задней части кузова потоком сопровождается повышением статического давления, в результате чего давление на заднюю часть автомобиля, так называемое базовое давление, высоко и способствует получению низкого значения аэродинамического сопротивления. Эта мысль высказана Каммом в статье [1.16]. Поэтому форма кузова с обрезанной таким образом задней частью называется формой Камма (сокращенно "К-форма"). С другой стороны, Эверлинг [1.34] (1948 г.) считал, что именно ему первому стало известно о преимуществе обрезанной формы задней части автомобиля. В начале 30-х годов он создал автобус с обре-

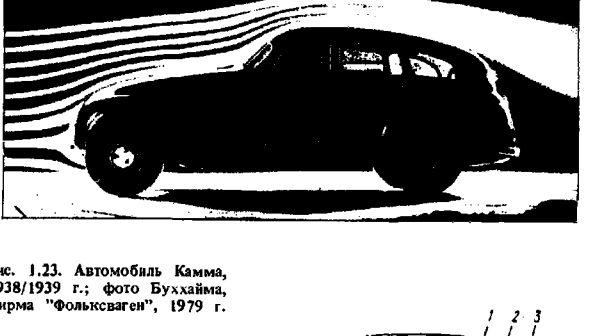


Рис. 1.23. Автомобиль Камма, 1938/1939 г.; фото Буххайма, фирма "Фольксваген", 1979 г.

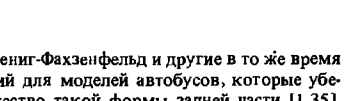


Рис. 1.24. Сравнение формы Камма с удлиненной и короткой формами Джерея; "Татра 87" показана без заднего киля: *1* – "Татра 87"; *2* – форма Камма; *3* – "Адлер Трумпф"

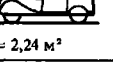
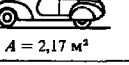
занной формой задней части; Кениг-Фахзенфельд и другие в то же время опубликовали данные измерений для моделей автобусов, которые убедительно показывали преимущество такой формы задней части [1.35].

Камм в Исследовательском институте по транспортной технике и автомобильным двигателям проводил систематические исследования, направленные на оптимизацию формы задней части автомобиля и им был собран первый легковой автомобиль с формой Камма, автомобиль Эверлинга (рис. 1.22), несколько позднее Камм разработал еще несколько автомобилей "К-формы". На автомобиле К-5 (рис. 1.23), эта форма достигла такого уровня развития, что ее можно было внедрять в серийное производство. Сравнение формы Камма с другими существовавшими тогда формами показано на рис. 1.24. Из-за начала мировой войны (1939 г.) работы в этом направлении были прерваны.

Значения коэффициентов аэродинамического сопротивления для автомобилей Эверлинга и Камма, приведенные в публикациях по этому вопросу, имеют очень большой разброс. Взятые из литературных источников значения собраны в табл. 1.1.

Как можно видеть из приведенного сравнения, указанные в литературе значения занижены: Дерр при замерах сопротивления [1.36] для автомобиля Эверлинга одновременно работал с серийным автомобилем фирмы Мерседес-Бенц "ДБ 170 В" ("*DB* 170 *V*"), площадь лобовой поверхности которого $A = 2{,}10$ м^2, для него был получен коэффициент

1.1. Сравнение опубликованных значений коэффициента аэродинамического сопротивления автомобилей Эверлинга и Камма

Вид измерения	Эверлинг, 1938 г.	Камм К-5, 1939 г.	*DB 170 V*
			
	$A = 2{,}24$ м²	$A = 2{,}17$ м²	
Модель Ожидаемое значение для легкового автомобиля	$c_W = 0{,}15$ $c_W = 0{,}24$		
Метод свободного выбега	$c_W = 0{,}31$	$c_W = 0{,}24$	$c_W = 0{,}48$
Испытание в аэродинамической трубе, 1:1		$c_W = 0{,}37$	$0{,}52 < c_W < 0{,}55$ $\bar{c}_W = 0{,}55$

$c_W = 0{,}48$. Для автомобилей с тем же кузовом Уайтом [1.37] при исследованиях в аэродинамической трубе Научно-исследовательской ассоциации автомобильной промышленности (*MIRA*) были получены значения $0{,}52 < c_W < 0{,}58$. Если пересчитать результаты, полученные Каммом при испытаниях свободным выбегом с учетом соотношения между средним значением $c_W = 0{,}55$ по [1.37] и значением, измеренным Дерром для "*DB* 170 *V*" $c_W = 0{,}48$, то полученное для автомобиля Эверлинга значение коэффициента аэродинамического сопротивления $c_W = 0{,}36$ кажется правдоподобным. Для автомобиля Камма пересчет дает $c_W = 0{,}28$, это значение еще можно считать заниженным. Буххайм в 1979 г. провел замеры в аэродинамической трубе фирмы "Фольксваген" для сохранившегося в замке Лангебурга автомобиля Камма выпуска 30-х годов; он получил следующие результаты: площадь лобовой поверхности $A = 2{,}10 м^2$; коэффициент аэродинамического сопротивления $c_W = 0{,}37$. Сравнение этого результата с приведенными в табл. 1.1 данными показывает, как осторожно нужно обращаться с приведенными в литературных источниках цифрами.

Если в начале развития аэродинамики автомобиля основное внимание уделялось сопротивлению при движении в условиях отсутствия ветра (симметричное обтекание), то позднее исследователи обратили внимание на проблемы обтекания при боковом ветре, а также проблемы охлаждения и вентиляции. Клемперер в [1.26] приводил результаты измерений при продувке потоком, направленным под углом к продольной плоскости симметрии автомобиля, т.е. при боковом ветре. В то время как для угловатых автомобилей (рис. 1.25) с высоким коэффициентом сопротивления воздуха сила в направлении движения автомобиля с увеличением угла натекания потока оставалась примерно такой же, для об-

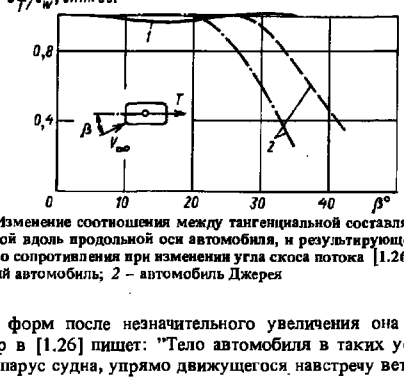


Рис. 1.25. Изменение соотношения между тангенциальной составляющей (сила *T*), направленной вдоль продольной оси автомобиля, и результирующей силой аэродинамического сопротивления при изменении угла скоса потока [1.26]:
1 – обычный автомобиль; *2* – автомобиль Джерси

текаемых форм после незначительного увеличения она уменьшалась. Клемперер в [1.26] пишет: "Тело автомобиля в таких условиях ведет себя как парус судна, упрямо движущегося навстречу ветру". Выводов по результатам измерения боковой силы и поворачивающего момента, компонентов результирующей аэродинамической силы, влияющих на чувствительность автомобиля к боковому ветру, Клемперер, по-видимому, не делал. В пп. 4 и 8 подробнее рассказано о процессе изменения сопротивления под воздействием бокового ветра. После ознакомления с ними станет понятно, что рис. 1.25 воспроизводит слишком оптимистичный процесс влияния бокового ветра на аэродинамическое сопротивление. Углы натекания потока, при которых становится заметным описанный Клемперером "парусный эффект", на практике встречаются только при малых скоростях движения, когда сопротивление воздуха и без того не имеет существенного значения. С другой стороны, в области малых углов натекания потока возникают намного большие дополнительные сопротивления, чем можно видеть на рис. 1.25.

Курсовая устойчивость при боковом ветре с увеличением скоростей движения приобретает все большее значение. Оказалось, что автомобили с малым аэродинамическим сопротивлением обладают плохими свойствами по устойчивости при боковом ветре (см. работу Камма [1.38]). Позднее установили, что это высказывание верно только для тех автомобилей, для которых малое значение коэффициента аэродинамического сопротивления достигается за счет плавно опускающейся линии задней части. Напротив, для автомобилей, у которых малый коэффициент аэродинамического сопротивления достигается за счет обрезанной формы задней части (форма Камма), не отмечался большой нестабильный поворачивающий момент (см. п. 5). Установкой сзади килей можно было бы обеспечить стабильные характеристики моментов. Хорошую эффективность задних килей показали пробеговые испытания для автомобиля Камма (см. работу Заватски [1.39]). Кили нашли применение только для стабилизации движения рекордных автомобилей, а также для мотоцик-

лов; для использования на легковых автомобилях серийного производства они оказались непригодными. В отдельных случаях в качестве стилистических элементов использовались псевдокили; но даже относительно большой киль автомобиля "Татра тип 87" (см. рис. 1.19) дал очень несущественное улучшение устойчивости.

Угроза автомобилю и водителю со стороны бокового ветра заключается прежде всего в его внезапности. К естественному порыву добавляется кажущийся, когда обдувающий движущийся автомобиль боковой ветер местами меняет свою силу и направление из-за особенностей рельефа местности, растительности, построек. Об этом было указано очень давно (см. работу Губера [1.40]); при соответствующем оформлении трасс дорог и прилегающей местности опасность от воздействия на автомобиль внезапного порыва бокового ветра можно уменьшить, но этому вопросу и сегодня уделяется мало внимания.

С началом систематических работ по аэродинамике автомобиля были подняты и проблемы протекания потока внутри автомобиля. Уже Клемперер [1.26] обращал внимание в своих экспериментах с моделями на потоки системы охлаждения и указывал, что обтекание радиатора связано с появлением дополнительного сопротивления движению автомобиля. Фидлер и Камм [1.40] показали целый ряд возможностей уменьшения этой дополнительной силы сопротивления воздуха. В школе Камма процессы протекания потока в радиаторе были тщательно изучены; Шмитт [1.42] и Эккерт [1.43], рассматривая совместно автомобиль, радиатор и вентилятор, подробно изложили этот вопрос в своих работах. Основы вентиляции пассажирского салона были подробно разработаны Каммом и его учениками. Неисследованным оставался вопрос взаимосвязи между внешним обтеканием автомобиля и внутренними потоками. Организация потока в салоне, его оптимизация с целью получения микроклимата, отвечающего комфортным условиям, стали предметом исследования в более поздний период времени, о чем подробно изложено в п. 10.

Хотя, как отмечалось выше, "обтекаемые формы" – под этим обозначением понимаются только те, которые специально были разработаны с целью улучшения аэродинамики – для серийных автомобилей были пригодны только отчасти, отдельные выводы Джерея, Лэя, Эверлинга, Камма были учтены на серийных моделях. Но большой потенциал, который скрывается в "обтекаемой форме", не исчерпан. В то время было еще очень рано делать следующий шаг на пути к меньшему аэродинамическому сопротивлению, и тем не менее предпринимались попытки получить для автомобиля названное Клемперером [1.26] для "полутела вращения" значение коэффициента c_W.

Перси [1.44] в 1922 г. в Берлине собрал автомобиль, который был разработан на базе полутела вращения. Двигатель был размещен в измененной задней части автомобиля. Значения замеренных величин для этого автомобиля неизвестны. Позднее, с 1930 г., автомобилем с кузовом в форме полутела вращения занимались некоторые американские авторы;

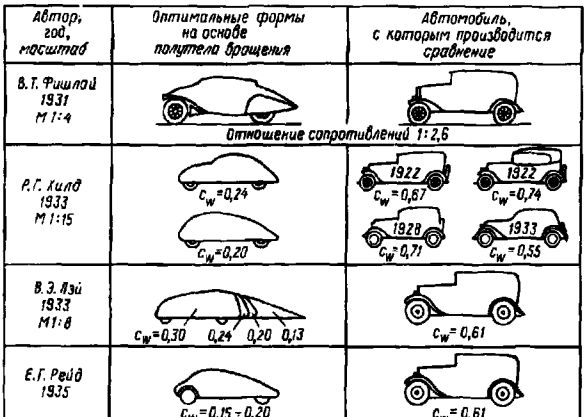


Рис. 1.26. Тела, обладающие малым аэродинамическим сопротивлением, в сравнении с существовавшими в то время в США легковыми автомобилями

но эти работы дальше этапа моделирования не пошли. Полученные *Фишлаем* [1.45], Хилдом, Лэем [1.33] и Рейдом [1.47] результаты собраны на рис. 1.26. Чтобы оценить полученные для моделей разного масштаба и качества выполнения результаты, каждой форме в виде полутела вращения противопоставлено значение коэффициента аэродинамического сопротивления, замеренное тем же автором для лимузинов, существовавших в то время. Если исключить из рассмотрения исследуемую Лэем форму с очень длинной задней частью, то для всех оптимизированных моделей в форме полутела вращения коэффициент аэродинамического сопротивления составляет примерно 1/3 коэффициента для лимузина, с которым производилось сравнение.

Разработка ходового автомобиля с кузовом в форме полутела вращения с 30-х годов велась в институте аэродинамических исследований (г. Геттинген) под руководством Прандтля. Анализ обтекания автомобиля Ланге (см. рис. 1.20), выполненный Гансеном и Шлером [1.48], завершился разработкой модели, показанной на рис. 1.27. Продольное среднее сечение образуется двумя крыловидными профилями, оба имеют одинаковый коэффициент аэродинамического сопротивления c_W = = 0,125. Поперечные сечения выполнены в форме, близкой к полутелу вращения, таким образом, что все тело автомобиля при большом объеме салона хорошо обтекается. На рис. 1.28 представлены результаты измерений, выполненные для этого автомобиля и для масштабных моделей;

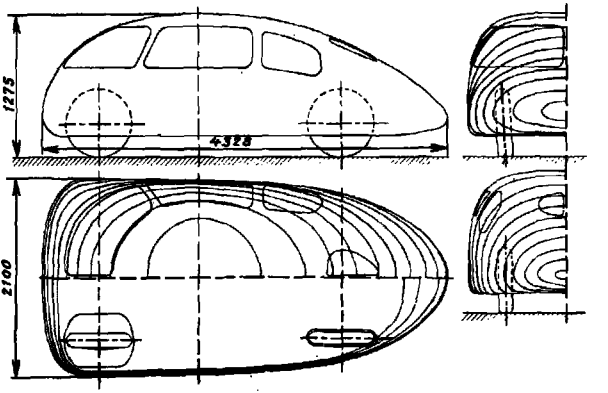


Рис. 1.27. Внешний вид экспериментального автомобиля института аэродинамических исследований г. Геттингена (по Гансену и Шлеру [1.48]), 1937 г.

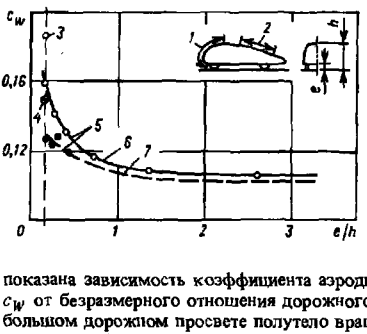


Рис. 1.28. Коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля Шлера. Измерения для модели 1:5 – Институт аэродинамических исследований; для модели 1:4 – завод "Фольксваген"; для автомобиля в натуральную величину – Институт аэродинамических исследований:
1 – профиль 571; *2* – профиль 570; *3* – днище обычное; *4* – модель 1:4, измерения фирмы "Фольксваген"; *5* – днище ровное; *6* – автомобиль в натуральную величину; *7* – модель 1:5

показана зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления c_W от безразмерного отношения дорожного просвета e к высоте h. При большом дорожном просвете полутело вращения имеет лучшее значение c_W, чем профиль, из которого автомобиль был образован. С уменьшением дорожного просвета значение c_W становится больше. Полученное автором и его коллегами при испытаниях модели 1:4 (днище ровное) значение $c_W = 0{,}15$ (неопубликованные данные) довольно хорошо совпадает со значением, полученным Институтом по аэродинамическим исследованиям для модели, выполненной в натуральную величину с ровным днищем. В большой аэродинамической трубе института с эллиптическим соплом (7 × 4,5 м) для готового автомобиля с характерным для него дорожным просветом был измерен коэффициент аэродинами-

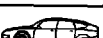
	Год выпуска	A	c_W
 „ID 19"	1956	2,14	0,36
 „GS"	1970	1,77	0,37
 „CX 2000"	1974	1,96	0,40

Рис. 1.29. Ряд типичных форм автомобиля "Ситроен"; площадь лобового сопротивления A – в м^2

ческого сопротивления $c_W = 0{,}186$; испытания свободным выбегом, которые были проведены затем Высшей технической школой (г. Ганновер), дали практически то же самое значение ($c_W = 0{,}189$). Недостатком автомобиля Шлера была необычно большая площадь лобового сопротивления $A = 2{,}54$ м^2, что являлось следствием большой ширины, равной 2,10 м. Большая ширина, в свою очередь, была необходима, чтобы обеспечить для полностью закрытых передних колес необходимый угол поворота. Большую площадь лобового сопротивления следует рассматривать как присущий этой концепции недостаток.

Автомобилем Шлера завершилось развитие кузовов в форме полутел вращения; такая форма кузова не нашла применения на серийных моделях. К работам с так называемыми полутелами вращения вернулись в более поздний период времени, и постановка задач была другой (см. п. 4). Эти тела, которые называют теперь основными телами, не используются непосредственно в качестве проекта формы кузова; они служат в качестве исходной базы для последовательного создания правильных форм автомобиля, которые позволяют получить очень малое сопротивление воздуха. Этим объединяются направления развития, обозначаемые словами "обтекаемый кузов" и "полутело вращения".

К разработке обтекаемых серийных автомобилей, прерванной второй мировой войной, снова вернулись, но работы велись разобщенно. Такое направление развития показывают автомобили фирмы "Ситроен" (рис. 1.29).

В то время как в кузове "*ID*19" просматриваются идеи Джерея – формообразование на основе сопряжения двух обтекаемых профилей – *GS* и *CX* в большей степени олицетворяли на идею Камма – обрезанная форма задней части. Все три типа по сравнению с конкурентами имели довольно малое значение коэффициента аэродинамического сопротивления.

Вопреки встречающемуся мнению, на примере автомобиля *NSU RO* 80 (рис. 1.30) хорошо видно, что придание кузову автомобиля обтекаемой формы не приводит к однообразию внешних форм автомобиля.

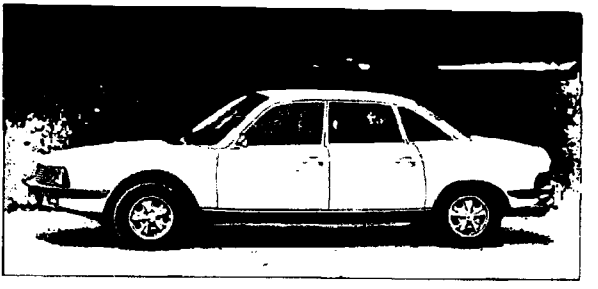


Рис. 1.30. Автомобиль "*NSU Ro* 80", 1976 г.; площадь лобового сопротивления 1,99 м^2, $c_W = 0{,}38$ (фото "Фольксваген")

	Год выпуска	A	c_w
 „356 A"	1950	Данные измерений отсутствуют	
 „356 B"	1959	1,61 м^2	0,39-0,40 По данным „ фирмы Порше "
 „911 S"	1976	1,77 м^2	0,40

Рис. 1.31. Модельный ряд фирмы "Порше"

Следует обратить внимание на последовательную работу фирмы "Порше" по аэродинамическому оформлению спортивных автомобилей, модельный ряд которых можно увидеть на рис. 1.31. В то время как в основу более старых моделей "365 *A*" и "356 *B*" положены идеи Джерея, "Порше 911" скорее напоминает форму Ланге (см. рис. 1.20). Более новые модели "Порше 924" и "Порше 928" также свидетельствуют об отдаленном родстве с автомобилем Ланге.

1.2.4. ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ

Несмотря на достигнутые успехи по созданию современных обтекаемых форм, аэродинамика до сегодняшнего дня не стала доминирующим критерием при проектировании кузовов. Поэтому изыскивались возможности как можно лучше приспособить аэродинамику к техническим данным автомобиля, в частности к требованиям стиля, удобства исполь-

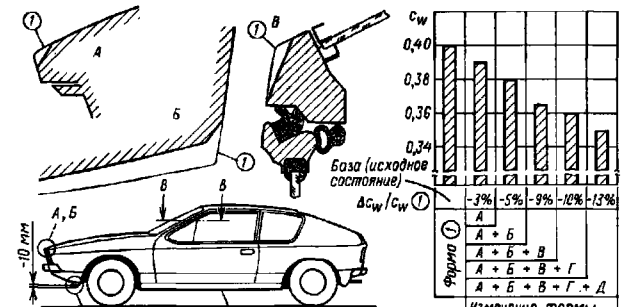


Рис. 1.32. Пример разработки формы по методу оптимизации



Год выпуска: 1969
A = 1,51 ; c_w = 0,41

Год выпуска: 1974
A = 1,73 ; c_W = 0,41

Рис. 1.33. Сравнение коэффициента аэродинамического сопротивления автомобилей "Опель *GT*" и "*VW* Сирокко"

зования и технологии его изготовления. Одно из направлений работ указывает разработанный Гухо, Янссеном, Эммельманном [1.14] метод оптимизации формы. Так как он подробно представлен в п. 4, то в данном разделе приводятся лишь заложенные в его основу идеи.

Исходным для разработки аэродинамических решений автомобиля является дизайнерский проект внешней формы; изменения формы автомобиля проводятся таким образом, чтобы его дизайнерская концепция оставалась неизменной. Последовательно, а если необходимо, то и одновременно, изменяются отдельные детали формы, такие, как переходы, выступы, спойлеры (рис. 1.32), с целью предотвратить отрыв или изменить поток таким образом, чтобы сила сопротивления воздуха была минимальной. Практика показала, что таким путем можно получить существенное уменьшение сопротивления по сравнению с исходной формой. Наглядный пример эффективности этого метода оптимизации формы дает рис. 1.33. Коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля "*VW* Сирокко" был уменьшен со значения c_W = 0,50 в исход-

ном состоянии до $c_W = 0{,}41$. Несмотря на подчеркнуто "угловатый" стиль разработки, смогли получить такой же коэффициент аэродинамического сопротивления, какой имел обтекаемый автомобиль "Опель *GT*". Пределы указанного метода оптимизации формы и возможности дальнейшего уменьшения аэродинамического сопротивления показаны в следующем разделе после рассмотрения технических тенденций развития автомобиля.

1.3. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

1.3.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АВТОМОБИЛЯ

Внутри отдельных классов габаритные размеры европейских легковых автомобилей укладываются в тесные границы. Пространство, занимаемое силовым агрегатом, объем салона и багажника определяются обозначенными на рис. 1.34 основными размерами [1.49]. Занимаемое автомобилем пространство, "объем автомобиля", определяемый его длиной l, высотой h и шириной b, не может быть полностью использован при формообразовании автомобиля. Формы кузовов по своим основным пропорциям аналогичны друг другу. Об этом наглядно свидетельствуют рис. 1.35 – 1.37, на которых изображены наложенные друг на друга контуры среднего продольного сечения автомобилей трех основных европейских классов [1.49]. В нижнем среднем классе* (например, "*VW* Гольф", "Опель Кадет") имеются два варианта формы: классическая форма со ступенчатой задней частью (кузов, состоящий из трех объемов) и "хэтчбэк" (форма кузова, состоящая из двух объемов), рис. 1.35. Для второго типа кузовов характерные отличия заключаются в угле наклона поверхности задней части автомобиля, об этом подробнее рассказывается в п. 4. Для автомобилей среднего класса** (например, "Ауди-80", "Форд Таунус", "Опель Аскона") (см. рис. 1.36) также характерны две различных формы задка; наряду со ступенчатой задней частью в этом классе уже давно существует форма с плавно спускающейся задней частью. Формы кузова типа "хэтчбэк" в этом классе не являются доминирующими. Большие легковые автомобили, например, "Мерседес 240" (*W* 123) или "Ауди-100", особенно близки по своим силуэтам друг к другу; на это указал Гетц [1.50] в 1971 г.

Если легковые автомобили сгруппировать по их снаряженной массе и проследить, как изменялись габаритные размеры кузова с течением времени, то можно установить, что длина l, ширина b и база a в последние 20 лет почти не изменялись***. При рассмотрении изменения высоты (рис. 1.38 по [1.55]) заметна следующая тенденция: легковые автомоби-

* По классификации СССР – малый класс. – *Прим. перев.*

** По классификации СССР – малый класс, III группа. – *Прим. перев.*

*** Следует иметь в виду, что за последние 20 лет произошло существенное видоизменение структуры классов легковых автомобилей, и их группировка только по массе в данном случае не совсем корректна. – *Прим. перев.*

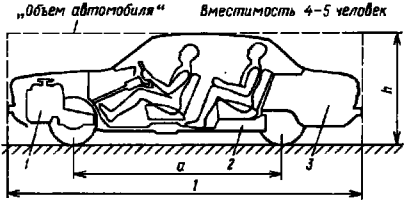


Рис. 1.34. Основные размеры легкового автомобиля, стандартное расположение двигателя, салона и багажника [1.49]: *1* – двигатель; *2* – топливный бак; *3* – багажник

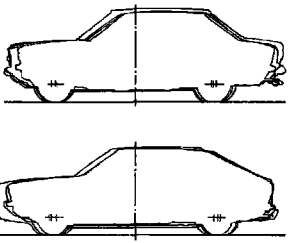


Рис. 1.35. Среднее продольное сечение европейских легковых автомобилей нижнего среднего класса [1.49]

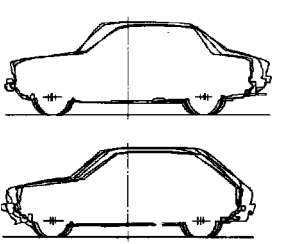


Рис. 1.36. Среднее продольное сечение европейских легковых автомобилей среднего класса [1.49]

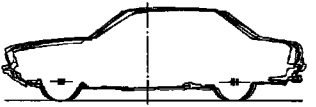


Рис. 1.37. Среднее продольное сечение европейских легковых автомобилей класса "Ауди 100" и "Даймлер Бенц 240" [1.49]

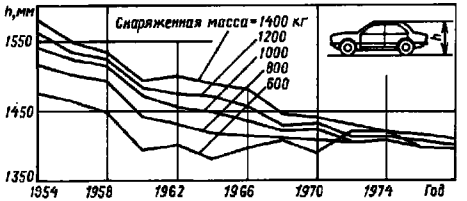


Рис. 1.38. Изменение габаритной высоты европейских автомобилей с течением времени [1.55]

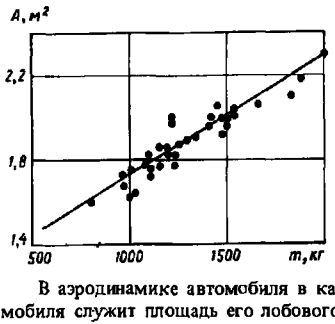


Рис. 1.39. Зависимость между площадью лобового сопротивления A и снаряженной массой m для европейских легковых автомобилей [1.49]

ли становились все более низкими. Все автомобили, независимо от массы, стремятся к одинаковой высоте и, видимо, приближаются уже к эргономическому пределу *.

В аэродинамике автомобиля в качестве показателя размеров автомобиля служит площадь его лобового сопротивления A**, определение которой дано на рис. 1.3. То, что она хорошо характеризует величину автомобиля, показывает рис. 1.39. Между площадью лобового сопротивления A и снаряженной массой m для европейских легковых автомобилей существует хорошая корреляция. В будущем показанная на рис. 1.39 прямая $A(m)$ может пойти более круто; в то время, как площадь лобового сопротивления A, являющаяся параметром, влияющим на удобство размещения в салоне, для отдельных классов достигла предела и будет, видимо, оставаться постоянной, снаряженная масса будет уменьшаться ***.

Отношение массы автомобиля к мощности устанавливаемого на него двигателя в последние 20 лет постоянно уменьшается. На рис. 1.40 для автомобилей с разной снаряженной массой нанесены кривые, характеризующие изменение отношения снаряженной массы к мощности двигателя с течением времени. Тенденция к повышению мощности двигателя постепенно затухает. Наблюдаемые для автомобилей малой массы изломы, совпадающие по времени с энергетическим кризисом зимой 1973–1974 гг. в будущем не ожидаются. Можно предположить, что в будущем отношение массы автомобиля к мощности будет оставаться постоянным ****.

Тенденция развития отношения массы к мощности как в зеркале отражается на изменении максимальной скорости автомобиля (рис. 1.41). Для автомобилей малой массы начиная с 1964 г. наблюдается стабилизация максимальной скорости; для более тяжелых легковых автомобилей

---

* В последние годы на европейском рынке появилась группа моделей, отличающаяся увеличенной высотой. – *Прим. перев.*

** Называемая также "площадью миделя". – *Прим. перев.*

*** Следует учитывать, что постоянное ужесточение требований безопасности и стремление к увеличению вместимости автомобилей приводит к некоторому росту массы автомобилей. Например, автомобили "Остин Маэстро", "Опель Кадет II", "*VW* Гольф II" тяжелее своих предшественников "Остин Аллегро", "Опель Кадет I", "*VW* Гольф I". – *Прим. перев.*

**** Анализ, проведенный на ВАЗе, показывает, что в малом классе существует тенденция к увеличению энергонасыщенности автомобилей. – *Прим. перев.*

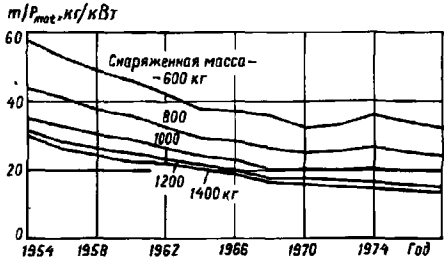


Рис. 1.40. Изменение отношения снаряженной массы автомобиля к мощности устанавливаемого на него двигателя для европейских автомобилей с течением времени [1.55]

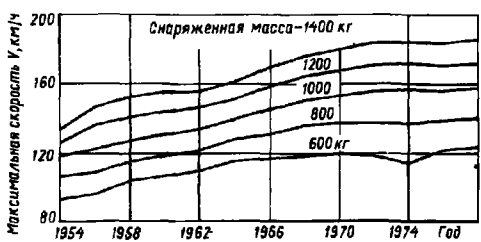


Рис. 1.41. Изменение максимальной скорости европейских автомобилей с течением времени [1.55]



Рис. 1.42. Изменение средней скорости движения на дорогах и автобанах ФРГ с течением времени

эта ситуация наступила примерно десятью годами позже. Более мощные двигатели, устанавливаемые на автомобили, привели к увеличению реальной скорости движения. Изменение средней скорости движения легковых автомобилей на дорогах и автобанах ФРГ показано на рис. 1.42 (по данным Крелля [1.51]). Вследствие законодательного ограничения максимальной скорости на дорогах, а также рекомендаций по поддержа-

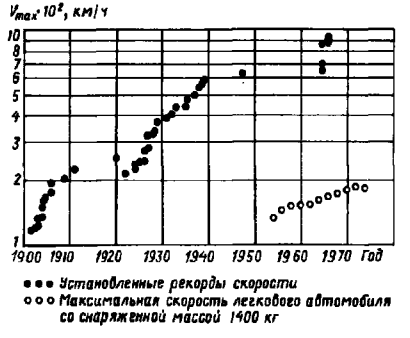


Рис. 1.43. Официально зарегистрированные рекорды скорости для автомобилей и максимальная скорость легкового автомобиля со снаряженной массой 1400 кг

нию правильной скорости на автобанах, можно предположить, что эта тенденция тоже близка к "насыщению".

Максимальные и средние скорости, имеющие место при движении по дорогам общего пользования и в автомобильном спорте, сильно отличаются от технически возможных для автомобиля максимальных скоростей. На рис. 1.43 (см. [1.20]) показаны рекордные скорости (по годам). "Голубая мечта", движение со скоростью, большей скорости звука, достигнута в декабре 1979 г. в официально непризнанных гонках; но этот рекорд скорости не имеет видимой связи с практическими требованиями, предъявляемыми к автомобилю.

1.3.2. АЭРОДИНАМИКА АВТОМОБИЛЯ

Описанная в п. 1.3.1 большая аналогия среди европейских легковых автомобилей ни в коем случае не относится к их аэродинамическому сопротивлению. Это хорошо видно по представленным на рис. 1.44 данным замеров. Приведенные на рисунке значения относятся к 91-му серийно выпускаемому автомобилю. Снятые с производства модели в данном случае не рассматривались. Все без исключения замеры осуществлялись в климатической аэродинамической трубе завода "Фольксваген" (см. п. 11), поэтому они, несомненно, могут быть сопоставлены друг с другом.

Среднее значение коэффициента аэродинамического сопротивления составляет $c_W = 0{,}46$. Если рассматривать только автомобили выпуска 1971–1978 гг. (их число $N = 86$), то среднее значение уменьшается до 0,44. Самые плохие значения коэффициента c_W примерно на 40 % выше самых хороших. Эта разность позволяет понять, на сколько можно уменьшить коэффициент аэродинамического сопротивления только за счет тщательной доводки деталей, не предпринимая мер по коренному изменению форм.

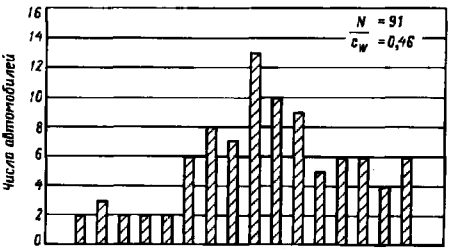


Рис. 1.44. Коэффициенты аэродинамического сопротивления c_W для европейских автомобилей выпуска 1968–1976 гг.

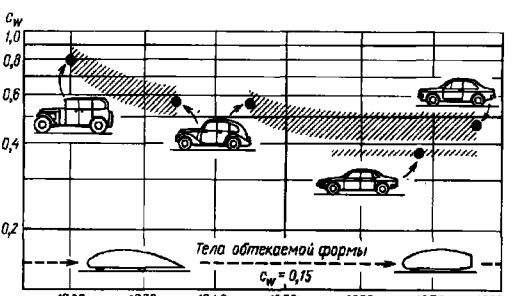


Рис. 1.45. Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления c_W для европейских автомобилей с течением времени [1.14]

На рис. 1.45 предпринята попытка показать тенденцию изменения аэродинамического сопротивления легковых автомобилей. Необходимо отметить, что точные значения коэффициентов аэродинамического сопротивления можно было найти только для автомобилей более позднего периода. Такой же тщательный анализ, который был проведен для габаритных размеров, массы и отношения массы к мощности, провести затруднительно. Для этого по каждому модельному году необходимо было иметь подбор данных аналогично данным рис. 1.44. К тому же при определении среднего значения и разброса значения c_W нужно было выбирать модели, ориентируясь на рынок. Такие обширные данные отсутствуют; изменение c_W по годам можно было привести лишь с большими погрешностями (см. работу Гухо, Янссена, Эммельманна [1.14]).

Из рассмотренных в п. 1.2.3 исследовательских и конструкторских работ только отдельные выводы и результаты были использованы для автомобилей серийного производства. Очень трудно установить, что оказало большое влияние на снижение аэродинамического сопротивления: накопленные данные аэродинамических исследований; прогрессивные технологические методы изготовления кузовов, позволяющие получать плавные обводы методом глубокой вытяжки, или новые направления в дизайнерских решениях кузова.

Уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления со значения $c_W \approx 0{,}8$ для автомобилей 20-х годов до среднего значения $c_W \approx 0{,}45$ для современных легковых автомобилей происходило в два этапа. На первом, охватывающем период между двумя мировыми войнами, автомобили, сохраняя свои отличительные признаки, такие, как выступающие крылья и фары, становились более вытянутыми и скругленными. Наряду с получением меньшего коэффициента аэродинамического сопротивления $c_W \approx 0{,}55$ стал заметен сдвиг в сторону меньших площадей лобового сопротивления, так что в сумме получилось заметное уменьшение аэродинамического сопротивления.

Второй шаг по пути улучшения аэродинамического сопротивления был сделан при введении понтонных кузовов с возможными вариантами формы задней части: ступенчатая, плавноспускающаяся, типа "универсал". За счет объединения отдельно выступающих крыльев и фар в единую закрытую форму кузова обтекание автомобиля существенно улучшилось. В зависимости от исполнения отдельных элементов коэффициент аэродинамического сопротивления достиг значения $0{,}4 < c_W < 0{,}5$. Эта полоса разброса примерно с 1960 г. остается неизменной. С появлением специальных форм, как например, автомобилей фирмы "Ситроен" (см. рис. 1.29), стали встречаться и более низкие значения коэффициента c_W; однако для основной группы европейских автомобилей в последние 15 лет нельзя заметить тенденции к дальнейшему систематическому уменьшению сопротивления. Дистанция, отделяющая нас от названного впервые Клемперером и позднее многократно подтвержденного другими "наилучшего значения" все еще велика, так что существенное улучшение значений коэффициента c_W для серийных легковых автомобилей возможно*. В конце п. 4 обсуждается вопрос о том, как этого добиться.

Повышающиеся цены на топливо составляют косвенный потенциал, побуждающий конструкторов по-новому относиться к проблеме снижения аэродинамического сопротивления автомобилей. В будущем можно предполагать два направления развития: прежде всего нужно использовать возможности оптимизации формы. За счет этого среднее значение коэффициента аэродинамического сопротивления будет все ближе и ближе стремиться к $c_W = 0{,}4$, это значение можно рассматривать в ка-

* С момента издания книги в ФРГ по настоящее время на рынке появилось много автомобилей с $c_W = 0{,}28 \div 0{,}34$. Это "Опель Кадет *E*" (0,32), "Пежо 309" (0,34), "Рено 25" (0,28), "Форд Сьерра" (0,33). – *Прим. перев.*

expert22 для http://rutracker.org

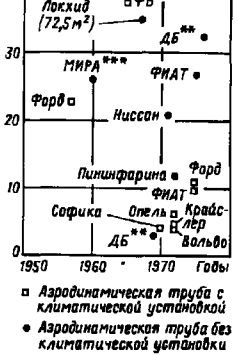
честве нижней границы этого метода. Для достижения более низких значений коэффициента аэродинамического сопротивления необходимо спроектировать кузов с учетом аэродинамических аспектов. Это приводит к имевшему ранее место этапу создания "обтекаемых форм", но возрождение мыслей о таких формах кузовов происходит на качественно новом уровне. Развивая формы автомобиля из "базовых тел", обладающих весьма малым аэродинамическим сопротивлением, уже сегодня для легковых автомобилей без всякого ущерба можно получить $c_W = 0{,}3$. Со временем станет возможным и получение значения $c_W = 0{,}2$.

Все большее и большее внимание уделяется уменьшению аэродинамического сопротивления грузовых автомобилей, этому вопросу посвящен п. 8. Коэффициенты сопротивления воздуха для небольших грузовиков с кузовами-фургонами лежат в диапазоне $0{,}4 < c_W < 0{,}5$. Без уменьшения полезного объема можно получить значение $c_W = 0{,}4$. Коэффициенты аэродинамического сопротивления для тяжелых грузовиков составляют $0{,}6 < c_W < 1$. Большой разброс значений объясняется большим разнообразием форм кузовов. За счет соответствующего оформления кабин водителя и направляющих устройств можно существенно уменьшить значение коэффициента аэродинамического сопротивления. Значение $c_W = 0{,}4$ может рассматриваться как реально достижимое значение для грузовых автомобилей и автобусов.

1.3.3. ЗАТРАТЫ НА РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО УЛУЧШЕНИЮ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЯ

Развитие работ по улучшению аэродинамики автомобиля связано с большими затратами. С одной стороны, должны вкладываться средства на испытательное оборудование – прежде всего, это аэродинамические трубы и климатические камеры. С другой стороны, требуются существенные затраты на проведение самих работ. И наконец, в связи с аэродинамическими и теплотехническими исследованиями может увеличиться время разработки автомобиля. О том, какие усилия предпринимает автомобильная промышленность для улучшения аэродинамических свойств своих автомобилей, можно судить по большому количеству аэродинамических труб, которые были сооружены исключительно только для этой цели. Те трубы, площадь поперечного сечения потока в рабочей части которых больше площади миделя исследуемых в них автомобилей, указаны на рис. 1.46. За исключением большой аэродинамической трубы фирмы "Локхид-Джорджия" речь идет о специальных автомобильных аэродинамических трубах; почти все крупные автомобилестроительные фирмы имеют такие трубы или начали их строить. В п. 11 аэродинамические трубы описаны подробно и анализируются особенности их применения. С целью повышения точности и достоверности результатов исследований повышаются требования к качеству применяемой аэродинамической трубы. Одновременно с повышением точности получаемых результатов, как правило, увеличиваются затраты на проведение работ.

Для получения коэффициента сопротивления воздуха $c_W = 0{,}5$ на



□ *Аэродинамическая труба с климатической установкой*

● *Аэродинамическая труба без климатической установки*

* *Сокр. от „Фольксваген" (примеч. переводчика)*

** *Сокр. от „Даймлер Бенц" (примеч. переводчика)*

*** *МИРА - сокр. от „Научно-исследовательская ассоциация автомобильной промышленности (примеч. переводчика)*

Рис. 1.46. Аэродинамические трубы и климатические аэродинамические трубы, используемые в автомобильной промышленности; показана площадь поперечного сечения потока на входе в рабочую часть и год введения аэродинамической трубы в эксплуатацию

аэродинамические исследования затрачиваются весьма незначительные средства. Если верить опубликованным в литературе сведениям, то, поставив такую консервативную цель, можно вообще не заниматься исследованиями в аэродинамической трубе. Нескольких замеров в малой аэродинамической трубе для моделей в масштабе 1:4 или даже 1:5 достаточно, чтобы обеспечить получение такого коэффициента. Время на разработку такого нового автомобиля не увеличивается. Чтобы получить коэффициент аэродинамического сопротивления $c_W = 0{,}4$, потребуются уже гораздо большие затраты. В этом случае не обойтись без испытаний в большей аэродинамической трубе тщательно изготовленных моделей в натуральную величину. Причем эти испытания могут продолжаться в течение многих недель. Предложения по изменению формы необходимо согласовать с дизайнерами, конструкторами, технологами; процесс разработки нового автомобиля заметно растягивается по времени. Если же нужно получить $c_W = 0{,}3$, то разработке автомобиля должна предшествовать разработка формы его кузова, которая при современном уровне развития аэродинамики автомобиля затягивается на несколько месяцев. В этом случае также необходимо проведение испытаний моделей автомобилей в натуральную величину в большой аэродинамической трубе. Величина затрат в каждом случае индивидуальна, поэтому назвать общие цифры нельзя.

Увеличению затрат на проведение работ, связанных с аэродинамикой автомобиля, можно противодействовать, проведя предварительно углубленный анализ уже имеющейся информации и используя теоретические методы обоснования принимаемых решений. Для части задач, таких, например, как проектирование системы отопления или системы охлаждения, такие методы уже имеются, они описаны в пп. 9 и 10. Методы расчета обтекаемости автомобиля, как уже было указано в п. 1.1.2, все еще несовершенны и в процессе разработки автомобиля не используются. В рамках этой книги они освещены очень кратко. В будущем методы рас-

чета будут совершенствоваться, но полностью заменить экспериментальные работы не могут. Они будут способствовать лучшей подготовке к испытаниям и позволят целенаправленнее анализировать результаты. Тогда можно будет приостановить увеличение затрат – как в отношении стоимости проведения работ, так и в отношении их длительности по времени.

1.4. ОБОЗНАЧЕНИЯ

A – площадь лобового сопротивления, рис. 1.3;
A – площадь поперечного сечения потока в рабочей части аэродинамической трубы, рис. 1.46;
A_k – фронтальная площадь подачи охлаждающего воздуха, рис. 1.5;
P – мощность привода;
P_{mot} – мощность двигателя;
Q – тепловой поток, уравнение (1.3);
T – тангенциальная сила, рис. 1.25;
V_∞ – скорость потока, рис. 1.25;
V_F – скорость автомобиля;
W – сила сопротивления воздуха;
a – база автомобиля, рис. 1.34;
b – ширина автомобиля;
c_W – коэффициент аэродинамического сопротивления, уравнение (1.2);
c_T – коэффициент тангенциальной силы, рис. 1.25;
e – дорожный просвет, рис. 1.28;
h – высота автомобиля, рис. 1.28, 1.34;
l – длина автомобиля, рис. 1.34;
m – масса автомобиля;
Λ – отношение отрезков;
α – угол атаки;
β – угол скоса потока, рис. 1.25;
ρ – плотность воздуха.

2. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИКИ ОБТЕКАНИЯ

Дитрих Гуммель

2.1. СВОЙСТВА НЕСЖИМАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ

2.1.1. ПЛОТНОСТЬ

Под плотностью ρ понимают отношение массы вещества к занимаемому им объему. Для жидкостей* в общем случае она зависит от давления p и температуры T. Наибольшие скорости движения, достигаемые наземными транспортными средствами (см. рис. 1.43), имеют значение порядка скорости распространения звука в воздухе a_∞ = 340 [м/с] = = 1225 км/ч. При обтекании тел, движущихся с такими скоростями, весьма существенное значение имеет сжимаемость воздуха, т.е. измене-

* Здесь и далее понятия "жидкость" и "воздух" отождествляются. Случаи, где эти две среды будут иметь принципиальные различия в свойствах, в тексте будут оговариваться отдельно. – *Прим. ред. пер.*

ние его плотности вследствие изменения давления и температуры. Максимальные скорости движения автомобилей, в том числе спортивных и гоночных, составляют примерно 1/3 скорости звука, т.е. потоки, обтекающие автомобиль, имеют скорость $V_\infty < a_\infty/3$.

Во всей этой области скоростей возникающие в поле обтекания изменения давления и температуры по сравнению с окружающей средой относительно малы, поэтому соответствующим изменением плотности можно пренебречь, т.е. обтекающая автомобиль среда вполне может считаться несжимаемой. Таким образом, плотность среды принимается постоянной. Для воздуха при нормальных условиях ($p =$ 1 атм*, $T =$ $= 0°C$) она составляет $\rho = 1{,}251$ кг/м^3.

2.1.2. ВЯЗКОСТЬ

Под вязкостью жидкости понимают ее свойство передавать касательные напряжения между слоями жидкости, а также между жидкостью и ограничивающими стенками. Это свойство связано с наличием внутреннего (молекулярного) трения. По закону Ньютона

$$\tau = \mu du/dy, \tag{2.1}$$

т.е. Напряжение сдвига τ пропорционально градиенту скорости (рис. 2.1). Коэффициент пропорциональности μ характеризует свойства среды, он называется динамическим коэффициентом вязкости. В общем случае он зависит от температуры (см. работу Шлихтинга [2.1]). Часто при рассмотрении жидкостей используется отношение

$$\nu = \mu/\rho, \tag{2.2}$$

называемое кинематическим коэффициентом вязкости. Он зависит от давления и температуры. Для несжимаемых жидкостей коэффициенты μ и ν зависят только от температуры. При нормальных условиях ($p =$ $= 1$ ат, $T = 0°C$) их значения составляют:

$$\mu = 1{,}717 \cdot 10^{-5} \text{ Н·с/м}^2;$$

$$\nu = 1{,}373 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Вязкость жидкости является физической причиной возникновения сопротивления трения при наличии градиента скорости относительно стенок**.

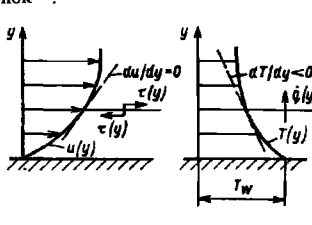


Рис. 2.1. Схема распределения скоростей и температур в потоке вдоль стенки

* 1 атм = 0,1 МП. – *Прим. ред. пер.*

** Далее в тексте поток жидкости за пределами пограничного слоя, где градиент сорости равен нулю и, следовательно, отсутствуют силы трения между отдельными слоями жидкости, для краткости будем называть потоком, не обладающим вязкостью. – *Прим. ред. пер.*

2.1.3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Под теплопроводностью жидкости понимают ее способность передавать теплоту от одного слоя к другому, а также от жидкости к ограничивающим стенкам. По закону теплопроводности Фурье:

$$\dot{q} = -\lambda dT/dy, \qquad (2.3)$$

т.е. плотность теплового потока $\dot{q}$ (количество теплоты, передаваемой через единицу площади, перпендикулярной к тепловому потоку, в единицу времени) пропорциональна градиенту температуры (см. рис. 2.1). Коэффициент пропорциональности λ также характеризует свойства среды, он называется коэффициентом теплопроводности и зависит от температуры. Для воздуха при нормальных условиях ($T = 0°C$)

$$\lambda = 0{,}0242 \text{ дж/м·с градус} = \text{Н/с градус}.$$

Теплопроводность жидкости является физической причиной передачи тепла при наличии разности температур обтекаемых стенок.

2.2. ВОПРОСЫ МЕХАНИКИ ОБТЕКАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

В механике обтекания автомобилей можно выделить две большие группы, а именно:

обтекание автомобиля в целом и его отдельных элементов;

прохождение потоков в карбюраторе, двигателе, глушителях, радиаторе, салоне и т.д. (см. также п. 1.1.1).

2.2.1. ВНЕШНЕЕ ОБТЕКАНИЕ АВТОМОБИЛЯ

При обтекании автомобиля (рис. 2.2) речь идет о потоке относительно тела, которое обдувается воздухом со скоростью V_∞ и располагается в непосредственной близости от экранирующей плоскости (в данном случае это полотно дороги), которая перемещается под телом со скоростью движения автомобиля. До тех пор, пока обтекание тела происходит без отрыва потока, вязкость обтекающей среды оказывает существенное влияние лишь в тонком слое δ толщиной несколько миллиметров в непосредственной близости от обтекаемых поверхностей; этот слой называется пограничным. Вне пограничного слоя поток ведет себя как поток жидкости, не обладающий внутренним трением. Давление этого потока, в котором не проявляется внутреннее трение, влияет на при-



Рис. 2.2. Схема обтекания автомобиля потоком

легающий к поверхности пограничный слой. В пограничном слое скорость уменьшается от значения скорости во внешнем потоке до нуля на поверхности. Жидкость как бы прилипает к поверхности. Если рассматривать полотно дороги, то речь идет о движущейся с автомобилем плоской стенке. Перед автомобилем не существует относительной скорости между потоком и полотном дороги, а значит, отсутствует пограничный с дорогой слой.

Названная структура поля обтекания имеет место только тогда, когда безразмерный коэффициент

$$\mathrm{Re}_L = V_\infty L/\nu > 10^4. \qquad (2.4)$$

Этот коэффициент называется числом Рейнольдса. Его значение зависит от скорости движения V_∞, коэффициента кинематической вязкости ν и характерного линейного размера тела (например, длины автомобиля, см. рис. 2.2).

Режим течения обладающего вязкостью потока относительно тела зависит от безразмерного числа Рейнольдса. Потоки вокруг геометрически подобных тел, для которых имеет место равенство чисел Рейнольдса, независимо от геометрических размеров тела и физических параметров обтекающей среды являются механически подобными. Это утверждение является основой техники моделирования. Результаты экспериментов с уменьшенными или увеличенными моделями можно применять для оригинала, если потоки механически подобны, т.е. имеют одинаковые числа Рейнольдса, см. также п. 11.4.2.

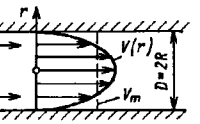
При различных числах Рейнольдса могут иметь место совершенно различные состояния потока. Поэтому число Рейнольдса характеризует режим течения жидкости. Если исследуется поток вокруг отдельного элемента автомобиля, например, вокруг зеркала заднего вида, то при определении режима обтекания следует брать характерный линейный размер этого отдельного элемента и при необходимости уточненное значение скорости обтекания в месте установки этого элемента, которая в общем случае может отличаться от скорости движения автомобиля. Подсчитанное для этого случая число Рейнольдса характеризует состояние потока, обтекающего рассматриваемый элемент.

2.2.2. ПРОХОЖДЕНИЕ ПОТОКА В КАНАЛЕ

Особенности течения определяются тем, что поток со всех сторон ограничен неподвижными стенками. Типичным примером является течение жидкости в трубе. Эпюра скоростей потока для этого примера приведена на рис. 2.3. В этом простейшем случае линии тока параллельны оси трубы.

При рассмотрении задачи движения жидкости в канале в общем случае нельзя выделить отдельно пограничный, примыкающий к стенкам слой и поток, свободный от сил трения. Влияние вязкости жидкости распространяется на все поперечное сечение трубы. Пограничные слои всех стенок смыкаются друг с другом. В этом случае число Рейнольдса

Рис. 2.3. Распределение скоростей потока, протекающего в трубе



$$\mathrm{Re}_D = V_m D/\nu$$

определяется значением средней скорости потока в трубе V_m и диаметром трубы D и оказывает большое внимание на режим течения жидкости в канале. В зависимости от значения этого коэффициента имеют место различные состояния потока.

2.3. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ВНЕШНЕГО ОБТЕКАНИЯ

2.3.1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ НЕСЖИМАЕМОГО И НЕ ОБЛАДАЮЩЕГО ВЯЗКОСТЬЮ ВНЕШНЕГО ПОТОКА

Режим течения свободного от сил трения потока, прилегающего к наружной границе пограничного слоя, определяет распределение давления на обтекаемое тело. Поэтому необходимо сначала подробнее рассмотреть закономерности, характеризующие этот поток.

Для этого потока имеет силу закон сохранения массы. В упрощенном виде для несжимаемого потока (ρ = const.) закон имеет вид:

$$w \cdot f = \text{const}. \qquad (2.5)$$

В этом уравнении:

f – площадь местного поперечного сечения трубки тока (см. рис. 2.2.); w – постоянная местная скорость потока в поперечном сечении трубки тока.

Из уравнения (2.5) следует, что в местах с большей скоростью потока w линии тока располагаются близко друг к другу, и наоборот (см. рис. 1.1.).

Для этого потока справедлив также закон механики Ньютона: произведение массы тела на ускорение равно сумме действующих на него сил. Применительно к жидкости, не обладающей вязкостью, это означает, что силы инерции и силы давления находятся в состоянии равновесия. Для жидкости, не обладающей вязкостью, вдоль одной линии тока верно уравнение:

$$g = p + \rho w^2/2 = \text{const}, \qquad (2.6)$$

где:

p – статическое давление; $\rho w^2/2$ – скоростной напор; g – полное давление.

Приведенная зависимость носит название уравнения Бернулли и отражает связь между давлением p и скоростью w для одной линии тока. Физический смысл данного уравнения заключается в том, что вдоль одной линии тока сумма статического давления и скоростного напора пос-

тоянна и равна полному давлению. Из уравнения (2.6) следует, что в местах с более высокой скоростью потока w имеет место меньшее статическое давление p, и наоборот. Если же поток в так называемой точке полного торможения потока останавливается (например, на передней стороне обтекаемого тела), т.е. в этой точке $w = 0$, то статическое давление p равно полному давлению g. Это максимальная величина давления, которое может возникнуть в поле потока. При обтекании автомобиля (см. рис. 2.2) все линии тока начинаются в области, где имеют место скорость V_∞ и статическое давление p_∞. Согласно уравнению (2.6) полное давление g для всех линий тока одинаково:

$$g = p_\infty + \rho V_\infty^2/2 = \text{const}. \qquad (2.7)$$

Величину g называют также константой Бернулли для поля потока.

2.3.2. ПРИМЕРЫ

Описанные выше закономерности для потока, свободного от сил трения, можно использовать для решения некоторых задач.

Рассмотрим значительно упрощенное двухмерное обтекание контура автомобиля (рис. 2.4). На верхнем рисунке приведен характер линий тока, обтекающих контур. Существуют три точки полного торможения потока: спереди, перед ветровым стеклом и на задней кромке автомобиля. Распределение давления по контуру автомобиля представлено в виде функции $c_p(x/L)$. Величина c_p представляет собой безразмерный коэффициент давления

$$c_p = (p - p_\infty)/(\rho V_\infty^2/2) \ . \qquad (2.8)$$

Применяя уравнения (2.6) и (2.7), можно записать:

$$p + \rho w^2/2 = p_\infty + \rho V_\infty^2/2,$$

подставив в уравнение (2.8), получим:

$$c_p = (p - p_\infty)/(\rho V_\infty^2/2) = 1 - (w/V_\infty)^2. \qquad (2.9)$$

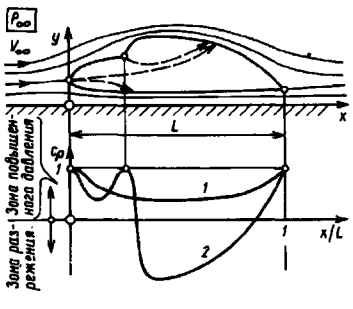


Рис. 2.4. Схема обтекания автомобиля и распределение давления по контуру автомобиля в идеальном, не обладающем вязкостью потоке: *1* – днище автомобиля; *2* – верхняя часть автомобиля

В точке полного торможения ($w = 0$) $c_p = 1$. Вдоль нижнего контура автомобиля имеет место равномерно изменяющееся избыточное давление. При очень малых значениях величины дорожного просвета

вдоль нижнего контура может иметь место пониженное давление. По верхнему контуру автомобиля перед ветровым стеклом возникает высокое избыточное давление, а в зоне сопряжения лобового стекла и крыши, наоборот, пониженное. Вдоль контура задней части автомобиля происходит сильное увеличение давления до максимального значения, соответствующего давлению в точке полного торможения потока. Именно в этой области происходят самые существенные изменения режима течения реального потока. Рассматриваемый здесь поток, лишенный сил вязкого трения, становится потоком, обладающим трением. Распределение давления, показанное на рис. 2.4, позволяет отметить, что суммарное давление по верхнему контуру существенно меньше, чем по нижнему. Таким образом, возникает действующая на автомобиль подъемная сила. Если сложить составляющие сил давления в направлении оси x, то получится, что сила сопротивления $W = 0$. Это так называемый парадокс Даламбера, согласно которому в несжижаемом, не обладающем трением двухмерном потоке сопротивление отсутствует. В действительности же сопротивление существует, но объяснить его наличие невозможно, рассматривая обтекание потоком жидкости, лишенной вязкости.

Приведенное распределение давлений позволяет также установить, где на автомобиле должны размещаться отверстия для забора и выпуска воздуха, чтобы мощности вентилятора системы охлаждения двигателя и вентилятора ситемы отопления и вентиляции салона были минимально возможными. Забор воздуха должен производиться в областях высокого давления, т.е. в передней чати автомобиля и в зоне перед ветровым стеклом, а выброс в местах пониженного давления. За счет этого для нужд систем охлаждения и вентиляции обеспечивается большой перепад давлений. Примеры практического применения можно найти в гл.6.

Другим примером использования основных уравнений потока не обладающей вязкостью жидкости является измеритель скорости. В пьезометрической трубке Прандтля (рис. 2.5) тупой носовой частью корпуса в точке полного торможения воздушного потока воспринимается полное давление g. На некотором расстоянии от носовой части в корпусе выполнены отверстия, воспринимающие статическое давление окружающей среды. Эти отверстия должны быть достаточно удалены от переднего конца прибора и от держателя. Используя уравнение (2.6), можно получить выражение

$$w = \sqrt{2(g-p)/\rho}. \qquad (2.10)$$

Измерив разность давлений $(g - p)$ в этом устройстве с помощью манометра, можно по уравнению (2.10) вычислить скорость потока w. Пьезо-

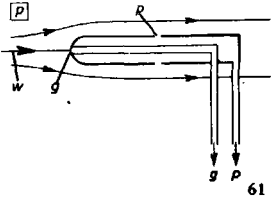


Рис. 2.5. Пьезометрическая трубка Прандтля для измерения скоростей потока

метрическая трубка Прандля очень часто используется для измерения скоростей потока. Ее можно использовать также для измерения только полного давления g (зонд Пито) или только статического давления (статический зонд). В этих случаях отдельные давления измеряются относительно базового давления. Следует обратить внимание на то, что зонды должны располагаться параллельно потоку, при обдуве отверстий прибора под углом возникают отклонения в значениях давлений g и p; подробнее это будет рассмотрено в п. 12.1.2.

2.3.3. ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ

Несмотря на то что прилегающий к поверхности пограничный слой имеет толщину несколько миллиметров, характер потока в этом пограничном слое, где проявляются силы вязкого трения жидкости, в значительной мере влияет на режим всего потока. Возникновение сопротивления в двухмерном несжимаемом потоке можно объяснить только с помощью трения жидкости.

Образование пограничного слоя (переход от ламинарного состояния потока к турбулентному). Эпюра распределения скорости потока в пограничном слое для простого случая продольного обтекания пластины показана на рис. 2.6. В этом случае скорость во внешнем потоке V_∞, а значит, и давление p_∞ постоянны. Обладающий вязким трением поток прилипает к поверхности стенки. Первоначально вектор скорости потока параллелен стенке, и поток находится в стационарном состоянии. Такой режим течения потока называется ламинарным. Толщина пограничного слоя, т.е той области, в которой наблюдается влияние вязкого трения, увеличивается в направлении перемещения потока по закону:

$$\delta \sim \sqrt{(\nu / V_\infty) x^{1/2}}. \qquad (2.11)$$

То есть толщина пограничного слоя δ увеличивается от переднего края обтекаемой поверхности к заднему, и это увеличение тем больше, чем меньше скорость набегающего потока V_∞ и больше коэффициент кинематической вязкости ν.

Стабильность ламинарного режима течения потока в пограничном слое достигается только при определенных условиях в отношении шероховатости поверхности. По мере увеличения длины обтекаемой поверхности по ходу потока $x > x_u$ наблюдается переход режима течения в пог-



Рис. 2.6. Схематическое изображение пограничного слоя при обтекании пластины в продольном направлении (размеры по оси *y* сильно увеличены)

раничном слое в так называемое турбулентное состояние. Большое значение для такого перехода имеет число Рейнольдса. Для рассмотренного случая обтекания пластины, расположенной вдоль потока переход ламинарного режима течения в пограничном слое в турбулентный происходит при числе Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_{x_u} \approx V_\infty x_u/\nu = 5\cdot 10^5,$$

зависящем от длины обтекаемой поверхности по ходу потока. Это относится только к случаю, когда отсутствует градиент давления вдоль пластины. При наличии градиента давления в направлении распространения потока уменьшение давления вызывает стабилизацию ламинарного пограничного слоя, в то время как увеличение давления ведет к очень быстрому переходу его в турбулентное состояние. Помехи ламинарному потоку, например, шероховатость стенок, ускоряют процесс перехода (см. об этом в работе Шлихтинга [2.1]). В общем случае можно констатировать, что переход от ламинарного режима течения потока к турбулентному происходит в зоне минимального давления, если число Рейнольдса при этом имеет не слишком малое значение.

После перехода поток в принципе имеет нестационарное состояние. В нестационарной зоне поток хотя еще прилегает к стенке и параллелен ей, но к средней скорости u прибавляются скорости пульсаций u', V', w' во всех трех направлениях осей координат. Для параллельной стенке компоненты скорости (см. рис. 2.6) имеет силу следующее выражение:

$$u(y,t) = \bar{u}(y) + u'(y,t), \tag{2.12}$$

где

$$\bar{u}(y) = (1/\Delta t)\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} u(y,t)\mathrm{d}t. \tag{2.13}$$

Такой режим течения потока называется турбулентным. Вследствие пульсаций в пограничном слое происходит интенсивная диффузия. В результате этого дополнительного к касательному напряжению, возникающему из-за молекулярного трения (см. уравнение (2.1)), добавляется касательное напряжение вследствие турбулентных взаимодействий:

$$\tau_{turb} = -\rho\overline{u'v'}. \tag{2.14}$$

В этом уравнении u' и v' – скорости пульсаций соответственно в направлении осей координат x и y. Поперечная черта означает, что речь идет о средних за бесконечно малый промежуток времени значениях скоростей (пульсаций в соответствии с уравнением (2.13)). τ_{turb} всегда имеет положительное значение. Следовательно, турбулентные пульсации действуют так же, как заметное повышение вязкости обтекающей среды. А значит, толщина пограничного слоя для показанной на рис. 2.6 пластины в направлении распространения потока после точки перехода увеличивается быстрее, чем до нее. Закон изменения толщины пограничного слоя после перехода его в турбулентное состояние имеет вид:

$$\delta \sim \sqrt[5]{(\nu/V_\infty)}x^{4/5}. \tag{2.15}$$

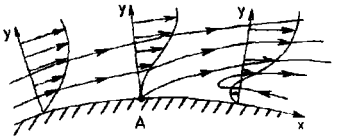


Рис. 2.7. Схема отрыва потока от стенки в пограничном слое

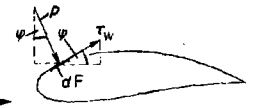


Рис. 2.8. Схема для определения силы сопротивления трения (на примере двухмерного потока)

Из-за диффузии эпюра скоростей при турбулентном потоке в пограничном слое более выпуклая, чем при ламинарном потоке (см. рис. 2.6).

Отрыв. Ламинарный и турбулентный режимы течения в пограничном слое сильно зависят от изменения давления во внешнем потоке. При возрастании давления в направлении движения потока, особенно вблизи стенки, может иметь место его значительное замедление и в связи с этим появление обратных потоков. Схематично это представлено на рис. 2.7, из которого видно, что линия тока отрывается от стенки. Этот процесс называется отрывом. Для точки отрыва A имеет силу выражение

$$(du/dy)_w = 0 \text{ (отрыв)}. \qquad (2.16)$$

По сравнению с ламинарным пограничным слоем турбулентный выдерживает более сильные повышения давления, не приводящие к его отрыву. Это объясняется тем, что благодаря присущей турбулентному состоянию потока диффузии близким к стенкам слоям подводится усиленный извне импульс. При понижении давления опасность отрыва потока отсутствует.

Сопротивление трения. При наличии градиента скорости вблизи стенки в любом месте обтекаемого тела (рис. 2.8) вследствие молекулярной вязкости тангенциальное напряжение τ_w, определяемое уравнением (2.1), передается от обтекающей среды на стенку. Если суммировать компоненты элементарных сил в направлении потока

$$W_R = \oint \tau_w \cos\varphi \, dF, \qquad (2.17)$$

то получится так называемое сопротивление трения W_R. До тех пор, пока не возникли отрывы потока, эта сила является одной из самых весомых составляющих общего аэродинамического сопротивления тела при двухмерном потоке, это хорошо поясняют два приведенных ниже примера.

Рис. 2.9 дает представление об изменении аэродинамического сопротивления плоской пластины, установленной вдоль потока (см. рис. 2.6). Чтобы характеристика носила более общий характер и не зависела от размеров пластины (ширины b и длины L) и условий обтекания (давление $q_\infty = \rho V_\infty^2/2$), можно использовать безразмерный коэффициент сопротивления

$$c_W = W/[(\rho V_\infty^2/2)bL] \qquad (2.18)$$

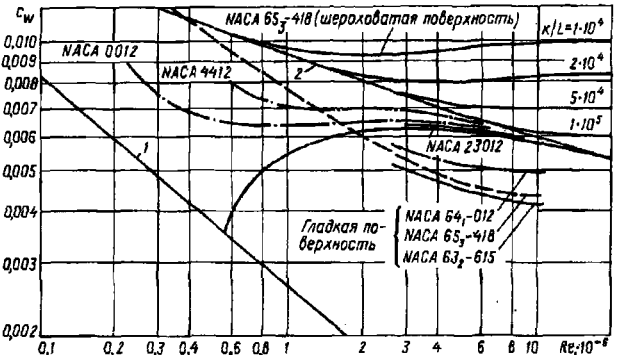


Рис. 2.9. Полученная экспериментальным путем зависимость коэффициента сопротивления плоских пластин и крыловидных профилей от числа Рейнольдса [2.1]: *1* – ламинарное состояние потока, обтекающего плоскую пластину; *2* – турбулентное состояние потока, обтекающего плоскую гладкую пластину

В рассматриваемом случае обтекания пластины сопротивление трения относится к обеим сторонам пластины ($W = W_R$). Базовой площадью в данном случае является площадь пластины в плане (bL). Коэффициент сопротивления пластины (см. рис. 2.9) представлен функцией от числа Рейнольдса, зависящего от длины пластины ($\mathrm{Re}_L = V_\infty L/\nu$).

В случае, если в пограничном слое на поверхности пластины имеет место ламинарный режим течения, зависимость $c_W = f(\mathrm{Re})$ имеет вид:

$$c_W = 2{,}656\sqrt{\mathrm{Re}_L} \text{ для } \mathrm{Re}_L < 5\cdot10^5, \tag{2.19}$$

при переходном от ламинарного к турбулентному режиму течения в пограничном слое:

$$c_W = 0{,}148\sqrt[5]{\mathrm{Re}_L} \text{ для } 5\cdot10^5 < \mathrm{Re}_L < 10^7. \tag{2.20}$$

При больших значениях числа Рейнольдса

$$c_W = 0{,}91/(\log \mathrm{Re}_L)^{2{,}58} \text{ при } \mathrm{Re}_L > 10^7, \tag{2.21}$$

в этом случае коэффициент аэродинамического сопротивления изменяется по асимптотическому закону.

Следует отметить, что если в передней части пластины имеет место ламинарный пограничный слой, а в задней части – турбулентный, то получается показанная на рисунке кривая перехода. Оказывается, что при турбулентном режиме течения в пограничном слое сопротивление трения гораздо больше, чем при ламинарном. Это объясняется тем, что более выпуклые эпюры скоростей в пограничном слое при турбулентном режиме течения проявляются в увеличении градиента скорости вдоль стенки по сравнению с ламинарным. На рис. 2.9 показано, что шерохо-

ватость стенки существенно увеличивает сопротивление трения. Коэффициент сопротивления сильно увеличивается с возрастанием относительной шероховатости k/L и при этом почти не зависит от числа Рейнольдса. Обтекание пластины, имеющей значительную шероховатость, можно рассматривать как обтекание комбинации из угловатых плохообтекаемых тел. Подробнее с этим можно познакомиться в специальных учебниках [2.1] ÷ [2.7] и справочниках [2.8], [2.9].

Тела с конечной толщиной также обладают сопротивлением трения. Их аэродинамическое сопротивление может иметь малое значение, если удается избежать срывов потока. Этого добиваются за счет пологих форм задней части автомобиля, которые имеют весьма незначительный градиент давления в направлении потока. Это же относится к крыловидным профилям и обтекаемым телам, обладающим малым аэродинамическим сопротивлением. На рис. 2.9 показаны коэффициенты сопротивления для некоторых крыловидных профилей. Профили *NACA 0012, 4412, 23012* имеют в основном турбулентные пограничные слои и ведут себя аналогично пластине, в передней части которой существует турбулентный пограничный слой. Профиль *NACA 6* имеет на больших участках ламинарные пограничные слои и в отношении аэродинамического сопротивления существенно лучше.

Сопротивление давления. Плохообтекаемые тела, такие, как круглый цилиндр, шар или установленная поперек потока пластина, имеют совершенно иной механизм возникновения аэродинамического сопротивления. При обтекании потоком с обратной стороны таких тел во внешнем потоке возникает столь существенное повышение давления, что это приводит к отрыву потока (см. рис. 1.2). В результате эпюра распределения давления по поверхности тела по сравнению с теоретическим случаем обтекания потоком, не обладающим вязким трением, очень существенно изменяется. В качестве примера на рис. 2.10 представлено распределение давления по поверхности круглого цилиндра. На передней, обращенной к потоку стороне распределение давления в основном соответствует теоретическому распределению давления при обтекании потоком невязкой жидкости, в то время как на обратной стороне вызванное отрывом изменение структуры потока приводит к значительному снижению давления. Эпюра распределения давления относительно оси y становится несимметричной. Суммируя составляющие элементарных сил давления в направлении потока, можно записать (см. рис. 2.8):

$$W_D = \int p \sin\alpha \, \mathrm{d}F. \tag{2.22}$$

Определяемая по формуле (2.22) величина W_D называется сопротивлением давления. Хотя тангенциальные напряжения, действующие на стенку, вызывают появление сопротивления трения W_R, однако для плохообтекаемых тел сопротивление давления является преобладающим. Полное аэродинамическое сопротивление движению тела складывается из суммы указанных составляющих:

$$W = W_D + W_R. \tag{2.23}$$

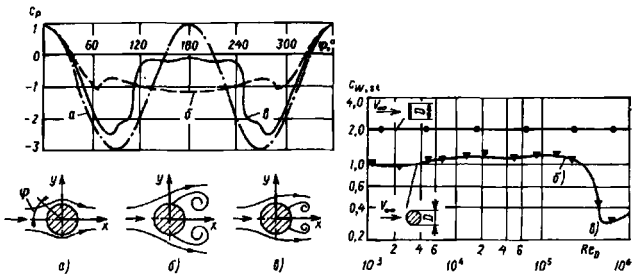


Рис. 2.10. Распределение давления и характер линий тока для круглого цилиндра при различных числах Рейнольдса:
а – идеальный, не обладающий вязкостью, поток, $Re_D \to \infty$; *б* – ламинарный пограничный слой в предкритическом состоянии, $Re_D = 1{,}9 \cdot 10^5$; *в* – турбулентный пограничный слой в послекритическом состоянии, $Re_D = 6{,}7 \cdot 10^5$

Рис. 2.11. Коэффициенты аэродинамического сопротивления тел в зависимости от числа Рейнольдса (для случаев б и в, показанных на рис. 2.10, поток двухмерный)

Коэффициент сопротивления определяют как отношение силы W к скоростному напору $\rho V_\infty^2/2$ и площади лобового сопротивления F_{st}:

$$c_{W_{st}} = W/([\rho V_\infty^2 / 2) F_{st}]. \qquad (2.24)$$

На рис. 2.11 показана зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Рейнольдса $Re_D = V_\infty D/\nu$ для круглого цилиндра и для установленной поперек потока пластины. За исключением области очень малых чисел Рейнольдса отрыв потока, обтекающего пластину, всегда происходит одинаково, и коэффициент c_W не зависит от числа Рейнольдса. В отличие от тел, имеющих острые кромки, отрыв потока от поверхностей тел, имеющих скругления, не зафиксирован. Положение места срыва потока определяется состоянием пограничного слоя. При малых значениях числа Рейнольдса пограничный слой ламинарный (сравните случай "*б*" на рис. 2.10 и 2.11). Отрыв происходит очень близко к максимальному сечению тела. Возникающая зона вихревого следа широкая, и коэффициент аэродинамического сопротивления имеет большое значение. При критическом значении числа Рейнольдса $Re_{D,\,krit} = 5 \cdot 10^5$ происходит внезапное преобразование потока. Турбулентный пограничный слой дольше прилегает к поверхности обтекаемого тела (сравните случай "*в*" на рис. 2.10 и 2.11). Возникающая зона вихревого следа узкая, и коэффициент аэродинамического сопротивления резко уменьшается.

За исключением особых случаев при проектировании автомобиля стремятся предотвратить внезапное изменение коэффициента c_W в зависимости от числа Рейнольдса. Поэтому для отрыва потока предус-

матривают определенные места, например, в начале скоса контура задней части автомобиля. Формообразование до места срыва потока направлено на то, чтобы при любых условиях осуществить по возможности продолжающееся повышение давления. Чтобы аэродинамическое сопротивление оставалось небольшим, образующаяся зона вихревого следа должна быть по возможности меньше. С учетом площади лобового сопротивления коэффициенты аэродинамического сопротивления современных европейских автомобилей (исключая спортивные автомобили), по данным Гухо [2.10], находятся в пределах $0{,}37 \leqslant c_W \leqslant 0{,}52$. В общем случае коэффициенты аэродинамического сопротивления этих автомобилей весьма несущественно зависят от числа Рейнольдса и не имеют резких колебаний при его изменении. Это значит, что преобладающей частью полного аэродинамического сопротивления этих автомобилей является сопротивление давления. Для некоторых обтекаемых форм согласно данным Гухо [2.10] коэффициенты аэродинамического сопротивления имеют значения $0{,}15 \leqslant c_W \leqslant 0{,}27$. Для таких автомобилей относительная часть сопротивления давления существенно меньше, поэтому в общем аэродинамическом сопротивлении такого автомобиля увеличивается доля сопротивления трения и, как следствие, коэффициенты аэродинамического сопротивления сильно зависят от числа Рейнольдса (см. также [2.10]).

Рассматривая срывное обтекание, можно выделить два различных типа отрывов, приводящих к появлению сопротивления давления. Если кромка отрыва расположена поперечно к направлению потока, то согласно рис. 2.12 сначала позади тела возникают вихри, оси которых, в основном перпендикулярны к внешнему потоку. Компоненты скорости в направлении осей вихрей очень малы. Представленное на рис. 2.12 симметричное поле потока в области отрыва имеет место только при очень малых значениях числа Рейнольдса (для круглого цилиндра при $Re_D < 60$, см. работу Шлихтинга [2.1]. При больших числах Рейнольдса происходит периодический отрыв вихрей. Поток в области срыва стано-



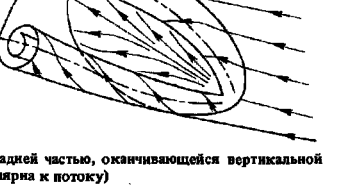


Рис. 2.12. Отрыв потока от тела с задней частью, оканчивающейся вертикальной стенкой (кромка отрыва перпендикулярна к потоку)

Рис. 2.13. Отрыв потока от тела со скошенной формой задней части (кромка отрыва расположена под углом к потоку)

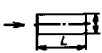
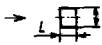
вится нестационарным. Имеющаяся в начальный момент кинетическая энергия поля завихрения за счет сильной диффузии очень быстро рассеивается и необратимо преобразуется в теплоту. Это проявляется в сильной потере давления позади тела, а потеря энергии соответствует мощности, необходимой для преодоления сопротивления давления. За телом образуется вихревой след, внутри которого в определенный момент времени существуют довольно равномерно распределенное пониженное давление и очень малые скорости потока.

Другой тип отрыва потока имеет место, если кромка отрыва (рис. 2.13) наклонена относительно направления потока. В этом случае также образуются вихри, но их оси имеют направление, примерно совпадающее с направлением кромки отрыва. В вихревом поле оторвавшегося потока имеет место значительная по значению составляющая скорости в направлении кромки отрыва, т.е. в направлении оси вихря. За счет этого получается упорядоченный стационарный объемный отрыв. Он также вызывает появление с обратной стороны тела пониженного давления, а значит, ведет к возникновению сопротивления давления. На наклонной поверхности образуется также упорядоченный прилегающий поток. Распределение давления на такой поверхности в области завихрения имеет значительные минимумы пониженного давления. Этот тип отрыва потока очень хорошо известен в авиации в связи с обтеканием треугольных крыльев, подробно этот вопрос освещен Гуммелем [2.11]. В поле потока сзади тела потери полного давления относительно малы. Поле завихрения обладает достаточно большой кинетической энергией, которая соответствует мощности, необходимой для преодоления сопротивления давления.

Между двумя описанными типами отрыва потока позади плохообтекаемого тела существует тесная взаимосвязь, которая в авиации уже хорошо изучена (см. работы Твейтса [2.12], Гуммеля [2.11]). С увеличением угла установки треугольного крыла (что соответствует уменьшению скоса задней части автомобиля, см. рис. 2.13) наблюдается изменение структуры в вихрях, которое называется срывом вихря. Процесс во всех его подробностях до сих пор еще не познан до конца. Но он ведет к разрушению упорядоченного объемного вихревого потока изнутри вихря, что в итоге приводит к образованию беспорядочного вихревого следа. Систематические исследования для автомобилей со скошенной формой задка проведены Янссеном, Гухо [2.13] и Морелем [2.14]. При этом рассмотрены оба типа отрывов. При переходе одной формы потока в другую получаются характерные изменения сопротивления давления, известные из рассмотрения треугольного крыла.

В заключение рассмотрения вопроса об аэродинамическом сопротивлении тела следует отметить, что формообразование тела до его максимального поперечного сечения оказывает лишь относительно малое влияние на полное аэродинамическое сопротивление. Более существенное значение для силы сопротивления воздуха имеет оформление части тела, следующей за максимальным сечением. Ее формообразование в

2.1. Коэффициенты аэродинамического сопротивления для различных тел ($c_W = W/\varepsilon_\infty F_{st}$)

Тела	Положение тела относительно потока	Коэффициент c_W
Круглая пластина		1,17
Шар (сфера)		0,47*
Полусфера		0,42*
Конус (с углом при вершине 60°)		0,50
Куб		1,05*
Куб		0,80*
Круглый цилиндр $L/D > 2$		0,82
Круглый цилиндр $L/D > 1$		1,15
Обтекаемое тело $L/D = 2,5$		0,04
Полукруглая пластина, поставленная на основание		1,19
Полутело вращения, поставленное на основание ($L/D = 2,5$)		0,09

* Поток в предкритическом состоянии, по Гернеру [2.9].

большей степени определяет силу аэродинамического сопротивления. Вопрос не столько в том, чтобы хорошо распределить набегающий поток, гораздо большее значение имеет то, каким образом разделенный телом поток сольется вместе позади него. Наилучшим решением являются обтекаемые тела с очень вытянутой задней частью. В табл. 2.1 приведено сравнение коэффициентов аэродинамического сопротивления для тел различных форм.

Силы и моменты, действующие на автомобиль. Рассмотренные выше механизмы возникновения аэродинамического сопротивления определяют действующие на автомобиль аэродинамические силы и моменты, схематично показанные на рис. 2.14. При симметричном обтекании ($\beta = 0$) кроме силы сопротивления воздуха W на автомобиль действует подъемная сила A, как следствие приведенного на рис. 2.4 распределения давления. Кроме того, возникает действующий относительно поперечной оси автомобиля (ось y) продольный момент M (момент галопирования). Благодаря трем компонентам A, W и M результирующая аэродинамическая сила однозначно определена по величине, направлению действия и точке ее приложения. Зная положение центра тяжести относительно передней и задней осей автомобиля, можно определить изменение нагрузок на оси, являющееся результатом обтекания автомобиля потоком воздуха.

При несимметрично набегающем потоке ($\beta \neq 0$) имеет место несимметричное обтекание автомобиля. Результатом этого является прежде всего появление боковой силы Y. Кроме того, возникают действующий относительно продольной оси автомобиля (ось x) поперечный момент L и относительно вертикальной оси (ось z) поворачивающий момент (момент рыскания) N. В этом случае шесть компонентов (A, W, M, Y, L, N) однозначно определяют результирующую аэродинамическую силу. Зная положение центра тяжести, можно определить различную аэродинамическую нагрузку на левую и правую стороны автомобиля, а также распределение боковой силы на переднюю и заднюю оси.

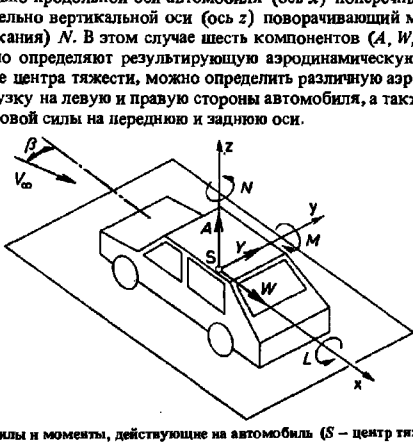


Рис. 2.14. Силы и моменты, действующие на автомобиль (*S* – центр тяжести)

Названные силы и моменты можно определить в аэродинамической трубе путем непосредственного измерения сил, действующих на автомобиль в натуральную величину или на модель, выполненную в масштабе. При этом различают трех- и шестикомпонентные измерения. Чтобы результаты эксперимента с масштабной моделью можно было применить для автомобиля в натуральную величину, необходимо соблюдать закон подобия Рейнольдса, т.е. для модели и для автомобиля число Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_L = V_\infty L/\nu$$

должно быть одинаково. Чтобы не зависеть от действительных размеров модели или автомобиля, вводятся безразмерные коэффициенты аналогично коэффициенту аэродинамического сопротивления:

$$c_A = A/[(\rho V_\infty^2/2)F_{st}] \text{ (коэффициент подъемной силы);}$$

$$c_W = W/[(\rho V_\infty^2/2)F_{st}] \text{ (коэффициент аэродинамического сопротивления);}$$

$$c_M = M/[(\rho V_\infty^2/2)F_{st}L] \text{ (коэффициент продольного момента);} \quad (2.25)$$

$$c_Y = Y/[(\rho V_\infty^2/2)F_{st}] \text{ (коэффициент боковой силы);}$$

$$c_L = L/[(\rho V_\infty^2/2)F_{st}L] \text{ (коэффициент поперечного момента);}$$

$$c_N = N/[(\rho V_\infty^2/2)F_{st}L] \text{ (коэффициент поворачивающего момента).}$$

Все коэффициенты представляют собой отношение соответствующих сил и моментов к скоростному напору и площади лобового сопротивления F_{st} автомобиля, а коэффициенты моментов дополнительно к характерной длине автомобиля L.

Безразмерные аэродинамические коэффициенты, в свою очередь, могут зависеть от параметров поля потока вокруг обтекаемого тела, т.е., например, от числа Рейнольдса Re_L, от угла скоса потока β. Зависимость аэродинамических коэффициентов от угла скоса потока приводит к необходимости решения проблемы устойчивости, суть которой можно очень просто пояснить на примере автомобиля, обдуваемого потоком воздуха, направленным под углом к продольной плоскости симметрии автомобиля (см. п. 5.2.3). При наличии угла скоса потока на автомобиль действует поворачивающий аэродинамический момент N (момент рыскания). Соответствующий коэффициент поворачивающего момента обозначается c_N. Этот момент стремится повернуть автомобиль относительно его вертикальной оси (ось z). Свойства автомобиля в отношении поворачивающего момента называются стабильными, если возникающий поворачивающий момент стремится уменьшить угол увода автомобиля, т.е. устранить причину, вызывающую его появление. Если принять обозначения в соответствии с рис. 2.14, то это тот случай, когда

$$\mathrm{d}c_N/\mathrm{d}\beta > 0. \quad (2.26)$$

И наоборот, автомобиль считается неустойчивым, если

$$\mathrm{d}c_N/\mathrm{d}\beta < 0. \quad (2.17)$$

Так же как на аэродинамическое сопротивление, на все остальные силы и моменты, приложенные к автомобилю, можно влиять за счет соответствующего формообразования автомобиля. Не вдаваясь в подробности, перечислим некоторые возможности. Оформление нижней части автомобиля (днища) оказывает сильное влияние на подъемную силу. Благодаря малым местным дорожным просветам и ровному днищу между автомобилем и полотном дороги можно создать высокие скорости потока, а значит, зону пониженного давления, так что подъемная сила сохранит малые значения (см. п. 7.1.2.). И наоборот, отрывы потока по днищу в форме упорядоченных вихрей (рис. 2.13) в сочетании со скошенными формами задней части увеличивают подъемную силу. Аналогично благодаря соответствующему формообразованию можно влиять на свойства автомобилей в отношении боковой силы (см. работу Гухо [2.15]). При малых значениях угла скоса потока может допускаться существенное увеличение поворачивающего момента $dc_N/d\beta$, в то время как его абсолютное значение еще мало. В этом случае основное внимание уделяется сохранению малого аэродинамического сопротивления. При больших углах скоса потока от малого аэродинамического сопротивления приходится отказаться, на первый план выдвигается требование по ограничению поворачивающего момента (подробнее это рассматривается в п. 5.2.3.). Таким образом, за счет правильного формообразования можно обеспечить хорошие аэродинамические свойства [2.15].

Температурный пограничный слой. Температурное поле вблизи обтекаемого тела имеет характер пограничного слоя. Так, например, исходящее от нагретого тела повышение температуры ограничивается тонким слоем вблизи тела. Такой температурный пограничный слой показан на рис. 2.15 для простейшего случая продольного обтекания пластины. Соответствующий пограничный слой потока представлен на рис. 2.6. Пусть температура поверхности T_W нагретой пластины остается постоянной. Внутри температурного пограничного слоя толщиной δ_T температура уменьшается до постоянного значения, соответствующего температуре во внешнем потоке T_∞.

При ламинарном потоке согласно уравнению (2.11) толщина пограничного слоя потока $\delta \sim \sqrt{\nu}$. Для несжимаемого потока ($\rho = \text{const}$) $\delta \sim \sqrt{\mu}$. Аналогично для толщины температурного пограничного слоя $\delta_T \sim \sqrt{\lambda}$.

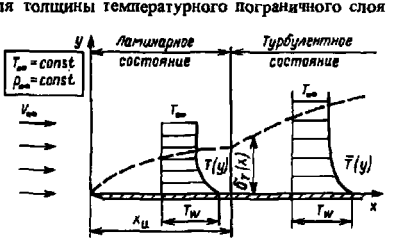


Рис. 2.15. Температурный пограничный слой при обтекании пластины в продольном направлении (размеры по оси *y* сильно увеличены)

Отношение значений толщин пограничных слоев равно

$$\delta/\delta_T = \sqrt{\mu c_p/\lambda} = \sqrt{Pr} \quad . \tag{2.28}$$

В этом выражении c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении. Если рассматривается жидкость, то используется ее удельная теплоемкость c. Отношение $\mu c_p/\lambda$ является безразмерной величиной и называется числом Прандтля:

$$Pr = \mu c_p/\lambda. \tag{2.29}$$

Число Прандтля зависит только от коэффициентов вязкости и теплопроводности материала. Оно характеризует их соотношение. Для воздуха $Pr = 0{,}7$, поэтому пограничный слой потока и температурный пограничный слой имеют примерно одинаковую толщину. В приближенных расчетах можно считать $Pr = 1$. Для других жидкостей существуют другие соотношения. Для масел с высокой вязкостью $Pr = 10\,000$, т.е. $\delta \gg \delta_T$. Для воды $Pr = 7$, т.е. $\delta > \delta_T$.

В несжимаемом потоке теплота сжатия и теплота внутреннего трения, возникающая из-за рассеивания кинетической энергии, не имеют первостепенного значения на распределение температур в пограничном слое. Определяющей является передача теплоты благодаря теплопроводности в соответствии с уравнением (2.3) и благодаря конвекции. Отсюда следует, что температурное поле зависит от поля скоростей потока. Но ни в коем случае не наоборот! Самые простые и наглядные соотношения между полем скоростей и температурным полем для гладкой плоской пластины приведены на рис. 2.6 и 2.15 при постоянном давлении p_∞ и при $Pr = 1$. При ламинарном потоке эпюры скорости $u(y)$ и температуры $T(y)$ идентичны в безразмерной форме:

$$u(y)/V_\infty = [T(y) - T_\infty]/(T_W - T_\infty). \tag{2.30}$$

Эта зависимость представлена на рис. 2.16. Таким образом, существует внутренняя взаимосвязь между градиентом скорости вдоль стенки $(du/dy)_W$, т.е. тангенциальным напряжением по уравнению (2.1), с одной стороны, и градиентом температуры вдоль стенки $(dT/dy)_W$, т.е. теплопроводностью в соответствии с уравнением (2.3), с другой. После преобразования левой и правой частей из уравнения (2.30) следует:

$$Nu(x) = (1/2)c_f'(x)\mathrm{Re}_x, \tag{2.31}$$



в этом выражении

$$c_f' = \tau_W(x)/(\rho V_\infty^2/2) \tag{2.32}$$

Рис. 2.16. Распределение скоростей и температур в ламинарном пограничном слое при обтекании пластины в продольном направлении, $Pr = 1$ ($\delta = \delta_T$)

означает относительное тангенциальное напряжение вдоль стенки;

$\mathrm{Re}_x = V_\infty x/\nu$ – число Рейнольдса (x – линейный размер вдоль перемещения потока);

$$Nu(x) = \dot{q}_W(x)x/[\lambda(T_W - T_\infty)] \tag{2.33}$$

– плотность теплового потока вдоль стенки, называемая числом Нуссельта.

Уравнение (2.31) называют аналогией Рейнольдса между тангенциальным напряжением вдоль стенки и теплопроводностью. В п. 9.5 показано, что результаты испытаний для водяных радиаторов очень хорошо систематизируются при помощи определяемого по уравнению (2.33) числа Нуссельта.

При турбулентном потоке вследствие сильных диффузионных процессов аналогично τ_{turb} по уравнению (2.14) возникает дополнительная плотность теплового потока:

$$\dot{q}_{turb} = \rho c_p \overline{v'T'}. \tag{2.34}$$

Возникающие в турбулентном потоке тангенциальные напряжения и плотности теплового потока определяются по уравнениям:

$$\tau = \mu \mathrm{d}\bar{u}/\mathrm{d}y - \rho \overline{u'v'} = (\mu + A_\tau)\mathrm{d}\bar{u}/\mathrm{d}y; \tag{2.35}$$

$$\dot{q} = -\lambda \mathrm{d}\bar{T}/\mathrm{d}y + \rho c_p \overline{v'T'} = -(\lambda + c_p A_q)\mathrm{d}\bar{T}/\mathrm{d}y. \tag{2.36}$$

В этих выражениях поперечная черта означает мгновенное среднее значение в соответствии с урав. (2.13), а u', v', T' – величины случайных отклонений от средних значений (так называемые пульсации) согласно уравнению (2.12). Введение в уравнения (2.35) и (2.36) коэффициентов диффузии A_τ и A_q равносильно условному увеличению коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности. Аналогично числу Прандтля для ламинарных обменных процессов по уравнению (2.30) отношение коэффициентов диффузии

$$Pr_{turb} = A_\tau / A_q \tag{2.37}$$

называют числом Прандтля для турбулентных обменных процессов. В турбулентных потоках это число Прандтля с достаточной степенью точности считают равным единице ($Pr_{turb} = 1$). Это означает, что для условных увеличенных коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности в турбулентном потоке наблюдаются одинаковые закономерности. Для случая $Pr = 1$ и $Pr_{turb} = 1$, что примерно соответствует значениям для воздуха, имеет силу приведенное выше заключение о том, что между эпюрами скорости и температуры существует зависимость, выраженная уравнением (2.30). И выражение (2.31), называемое аналогией Рейнольдса, верно для турбулентных пограничных слоев пластины, показанных на рис. 2.6 и 2.15.

Если в уравнении (2.31) вернуться к имеющим размерность величинам, то плотность теплового потока определяется выражением

$$\dot{q}_W = [\lambda(T_W - T_\infty)/\delta][\mathrm{d}(u/V_\infty)_W/\mathrm{d}(y/\delta)]. \qquad (2.38)$$

Отсюда видно, что теплопередача стенки пропорциональна коэффициенту теплопроводности жидкости λ и разности температур $(T_W - T_\infty)$. В начале пластины, где пограничный слой потока тонкий, имеет место сильный теплообмен. После перехода режима течения в пограничном слое из ламинарного в турбулентный толщина пограничного слоя увеличивается быстрее. Однако преобладает нарастание градиента скорости, так что при турбулентном пограничном слое в общем случае имеет место более сильный теплообмен, чем при ламинарном пограничном потоке.

При рассмотрении многих технических проблем соотношения для определения плотности теплового потока установить не так легко, как при рассмотрении продольного обтекания пластины. Очень часто формулу (2.38) используют в виде:

$$\dot{q}_W = \alpha(T_W - T_\infty). \qquad (2.39)$$

Тогда проблема заключается в правильном подборе коэффициента теплопередачи α, значение для которого в зависимости от условий можно взять из литературных источников, например из [2.16].

2.3.4. ОСОБЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Аэродинамический шум. При обтекании автомобиля возникает так называемый аэродинамический шум, см. п. 6.5. Физическая причина этого явления заключается в отрывах вихрей (почти всегда периодических) от деталей автомобиля, таких, как например, водосточные желобки, зеркала заднего вида, антенна. Такого типа периодический отрыв вихрей от поверхности круглого цилиндра схематично показан на рис. 2.17. Он имеет место только в области $60 \leqslant \mathrm{Re}_D \leqslant 5000$.

При меньших значениях числа Рейнольдса возникает непериодическая симметричная спутная струя (см. рис. 2.10), при больших числах Рейнольдса имеет место турбулентное завихрение, и далее дискретные отдельные вихри не существуют. При периодическом отрыве потока с обеих сторон образуются вихри, которые попеременно отрываются от тела и перемещаются назад. Они продолжают существовать в течение довольно длительного промежутка времени после отрыва. Их закономерное расположение в относительной системе координат называется "вихревой дорожкой Кармана" Из-за периодического отрыва вихрей все поле потока становится в принципе нестационарным. В любой точке поля потока параметры потока изменяются с частотой n отрыва вихрей от тела. Безразмерная частота

$$S = nD/V_\infty \qquad (2.40)$$

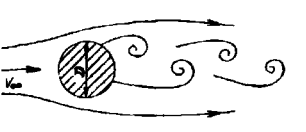


Рис. 2.17. Схематичное изображение периодических отрывов вихрей позади круглого цилиндра

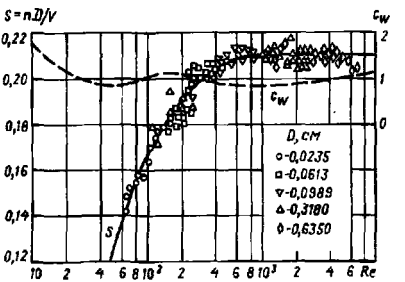


Рис. 2.18. Зависимость числа Струхаля от числа Рейнольдса для потока, обтекающего круглый цилиндр, по Шлихтингу [2,1]

является важной характеристикой потока. Она называется числом Струхаля. Число Струхаля является однозначной функцией числа Рейнольдса, которая представлена на рис. 2.18 для круглого цилиндра. Для значений $Re > 10^3$ число Струхаля практически не зависит от числа Рейнольдса и имеет величину $S = 0{,}21$. Простой расчет для

$D = 4$ мм;

$V_\infty = 5$ м/с;

$\nu = 1{,}373 \cdot 10^{-5}$ м^2/с;

$Re = V_\infty D/\nu = 5 \cdot 0{,}004/1{,}373 \cdot 10^{-5} = 1450$;

$n = SV_\infty/D = 0{,}21 \cdot 5/0{,}004 = 262$ 1/с

показывает, что имеющие место в данном случае обтекания частоты лежат в зоне слышимости.

Поэтому колебания давления нестационарного поля потока заметны в виде шума.

Мероприятия по пресечению такого вида шумов в основном заключаются в предотвращении отрывов освобождающихся вихрей и в препятствии образованию спутных струй. Накопленные знания о шуме, создаваемом потоком, кратко изложены Геллером и Добржинским в [2.17].

Аэроупругий эффект. Эти проблемы возникают из-за того, что аэродинамические силы действуют на упругие тела, которые под воздействием этих сил упруго деформируются.

Прежде всего выделяют проблему статической аэроупругости, при которой из-за аэродинамической нагрузки происходит деформация тела, а затем из-за измененной геометрии, в свою очередь, изменяются аэродинамические силы. Примером из области автомобильной техники служит статическая деформация радиоантенны под воздействием силы воздуха. Изменение аэродинамических сил происходит из-за того, что вследствие деформации антенны воздушный поток направлен не перпендикулярно к оси антенны. При определенной скорости движения антенна ломается.

Но гораздо труднее решаются проблемы динамической аэроупругос-

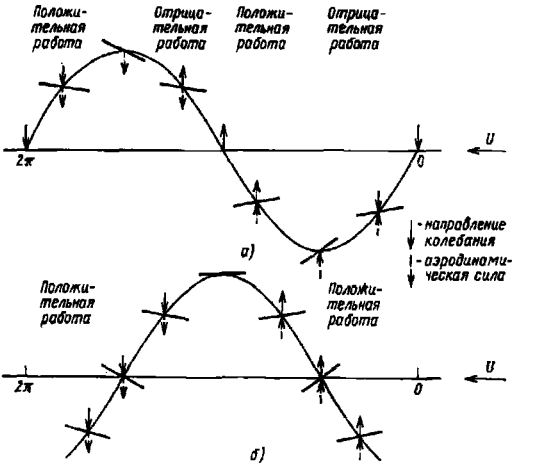


Рис. 2.19. Схема энергетического баланса аэродинамических сил, действующих на пластину, при комбинированном поступательно-вращательном движении, по Фершингу [2.18]:
а – разность по фазе 0°; общая работа равна нулю; *б* – разность по фазе 90°; общая работа положительная

ти. Если обтекаемое тело колеблется с определенной частотой, то соответствующие аэродинамические силы периодически изменяются с той же частотой. В процессе колебательного движения аэродинамические силы могут действовать в направлении колебательного движения или против него. Если колеблющаяся система в среднем за весь период движения не получит энергии из потока для колебательного движения, то опасности возникновения автоколебаний не существует. Например, на рис. 2.19 показано комбинированное поступательно-вращательное движение пластинчатого профиля. При отсутствии смещения по фазе, т.е. при совпадении максимального отклонения пластины от среднего положения и максимального поворота пластины относительно оси качания, сила воздуха часть цикла действует в направлении колебательного поступательного движения, а часть – против направления этого движения. За период колебаний положительная и отрицательная работы, совершаемые аэродинамической силой, равны, и суммарная работа силы воздуха в колебательной системе равна нулю. Но есть и другие случаи, когда в колебательную систему привносится энергия извне. На втором примере рис. 2.19 вращательное движение опережает поступательное на 90°. Поворот

пластины относительно оси качания максимальный, когда ее отклонение от среднего положения равно нулю. В этом случае сила воздуха постоянно действует в направлении колебательного поступательного движения. Колебательное движение получает дополнительную энергию от набегающего потока, и возникают автоколебания. Этот процесс называется рысканием. Через очень короткий промежуток времени внутреннего демпфирования упругой системы уже будет недостаточно, происходит дестабилизация, которая ведет к разрушению.

В рассматриваемых примерах возбуждающая сила воздуха возникает из-за нестационарного, прилегающего к пластине потока. Но бывают рыскания, обусловленные действием возбуждающей силы воздуха, происходящей от периодических отрывов потока позади тела. Здесь мы не останавливаемся на подробностях. Эти проблемы тщательно рассмотрены Фершингом [2.18].

Инородные включения в потоке воздуха. Обтекающий автомобиль поток может содержать различнейшие включения, например, капли дождя, частички грязи, насекомых. Свойства таких включений, находящихся в поле потока, имеют большое значение в условиях практической эксплуатации автомобиля, см. пп. 6.4 и 8.6.

С точки зрения физики речь идет о движении частичек в поле потока, причем их плотность иная, чем плотность обтекающей среды. Принципиальные соотношения приведены на рис. 2.20. Траектории движения частиц и направление линий тока не совпадают. В любой точке поля скорость потока $\vec{V}_s$ касательна к линии тока в этой точке, а скорость частички $\vec{V}_t$ касательна к траектории частички. Следовательно, поток обтекает частичку с относительной скоростью

$$\vec{V}_{rel} = \vec{V}_s - \vec{V}_t. \qquad (2.41)$$

В направлении вектора относительной скорости действует сила сопротивления воздуха W. Поперечная сила, возникающая вследствие несимметричной формы частички, не учитывается. На частичку действует сила веса G. Так как плотность воздуха по сравнению с плотностью частицы очень мала, то выталкивающей силой по закону



Рис. 2.20. Движение частички (обладающей плотностью, отличной от плотности среды) в поле потока:
а – векторы скоростей; *б* – действующие силы

W – сила аэродинамического сопротивления
G – вес частички
T – сила инерции

Архимеда на частицу, можно пренебречь. Траектория движения частички и вектор скорости частички располагаются таким образом, что возникающая результирующая сила инерции T уравновешивает силу сопротивления воздуха и вес частички. Следовательно, говоря о траектории движения частички, имеется в виду баллистическая траектория полета.

Проблема определения траекторий частиц в поле потока до сих пор очень слабо отражена в литературе. Некоторые сведения можно найти у Бруна [2.19], изучавшего проблему обледенения, связанную с движением частиц тумана в поле потока крыла. Однако это лишь частный случай, не самый характерный, так как частицы тумана практически имеют очень незначительную вертикальную скорость, которой можно пренебречь. То есть они не обладают относительной скоростью по отношению к потоку, обтекающему автомобиль. В большинстве случаев, например, при падающих сверху каплях дождя или совершающих вихревое движение частицах грязи, в набегающем на автомобиль потоке существуют довольно большие относительные поперечные скорости этих частиц.

Необходимым условием для определения траектории частиц, например при решении проблемы загрязнения деталей автомобиля, является наличие данных по распределению скоростей воздуха в поле потока. Но до сегодняшнего дня не существует подробно разработанной теории по этому вопросу, в связи с этим основной упор делается на экспериментальные исследования. Эксперименты могут проводиться как в реальных дорожных условиях, так и в аэродинамической трубе. При испытаниях масштабных моделей возникает вопрос возможности использования результатов экспериментов для автомобилей в натуральную величину, т.е. о законах подобия. Для получения механически подобного потока необходимо соблюдать закон подобия Рейнольдса:

$$\mathrm{Re}_L = (V_\infty L)/\nu = \text{const}. \qquad (2.42)$$

Одинаковые траектории движения частиц будут иметь место, если для эксперимента с масштабной моделью и для автомобиля коэффициент

$$\psi = (\rho/\rho_t)(L/d) = \text{const}. \qquad (2.43)$$

В этом уравнении ρ/ρ_t – отношение плотности обтекающей среды к плотности частицы; L/d – отношение характерной длины автомобиля к характерному размеру частицы.

Если выполняются оба требования одновременно, то при одинаковых средах ($\nu_1 = \nu_2$) и при масштабе уменьшения L_1/L_2 (индекс "1" относится к автомобилю в натуральную величину, а индекс "2" – к масштабной модели) можно записать:

$$V_{\infty 2} = (L_1/L_2)V_{\infty 1}. \qquad (2.44)$$

Если для эксперимента с моделью и для автомобиля в натуральную величину выбраны частички одинакового типа, т.е. $\rho/\rho_t = \text{const}$, то диаметр частички

$$d_2 = (L_2/L_1)d_1. \qquad (2.45)$$

Из уравнения видно, что для испытания масштабных моделей необходимо использовать более мелкие частички. Но это требование выполнить весьма сложно.

2.4. ПРОБЛЕМЫ ПРОХОЖДЕНИЯ ПОТОКА В КАНАЛЕ

2.4.1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ НЕСЖИМАЕМОГО ПОТОКА

Как уже объяснялось в п. 2.2.2, при рассмотрении проблем прохождения потока в канале в общем случае не различают внешнего, расположенного на достаточном удалении от стенок и не обладающего трением потока и приближенного к стенкам потока пограничного слоя. Поэтому при выводе основных уравнений следует учитывать силы трения.

Для потока, показанного на рис. 2.3, прежде всего имеет силу закон сохранения массы:

$$\rho \int_{(F)} V \mathrm{d}F = \mathrm{const}. \tag{2.46}$$

Он гласит, что масса потока, протекающего через поперечное сечение площадью $F(x)$ в единицу времени в любом месте x постоянна. Если среднюю скорость потока записать в виде выражения

$$V_m = (1/F) \int_{(F)} V \mathrm{d}F, \tag{2.47}$$

то уравнение (2.46) по аналогии с уравнением (2.5) примет вид:

$$\rho V_m F = \mathrm{const}. \tag{2.48}$$

При постоянной плотности ρ в местах с меньшей площадью поперечного сечения скорость потока увеличивается, и наоборот.

При рассмотрении проблем прохождения потока в канале имеет силу основной закон Ньютона. К силам давления добавляются силы трения. Их действие можно увидеть на простом примере потока в трубе (рис. 2.21). Эпюра скорости вниз по течению потока не изменяется. Поток не ускоряется. Силы инерции не возникают. Давление в поперечном сечении имеет постоянное значение. Из-за наличия сил трения должна существовать разность давлений $p_1 - p_2 > 0$, счет которой жидкость перемещается по трубе, преодолевая сопротивление трения. Вследствие дейст-

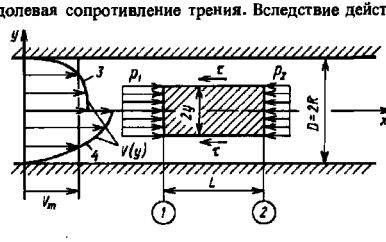


Рис. 2.21. Ламинарный (4) и турбулентный (3) потоки в трубе

вия трения возникает падение давления в направлении потока, которое называется потерей давления Δp_V на трение. Если учитывать эту потерю давления, то в случае реального, обладающего трением потока уравнение Бернулли в расширенном по сравнению с выражением (2.6) виде можно записать:

$$p_1 + (\rho/2)V_{m1}^2 = p_2 + (\rho/2)V_{m2}^2 + \Delta p_V. \qquad (2.49)$$

В данном случае поток принимается одномерным, т.е. давление p и средняя скорость V_m по поперечному сечению F постоянны, так что все параметры зависят только от длины хода x. Уравнение (2.49), как, впрочем, и (2.6), справедливо только для тех потоков, для которых характерно отсутствие изменений ординат линий токов или эти изменения весьма незначительные. Принимая это во внимание, для более общего случая необходимо к обеим частям равенства (2.49) добавить компонент, являющийся следствием действия основного закона гидростатики:

$$p_1 + (\rho/2)V_{m1}^2 + \rho g h_1 = p_2 + (\rho/2)V_{m2}^2 + \rho g h_2 + \Delta p_V. \qquad (2.50)$$

Здесь h_1 и h_2 являются геодезическими высотами трубок тока в местах, обозначенных цифрами 1 и 2. В обладающем вязкостью реальном потоке сумма статического давления ($p + \rho g h$) и скоростного напора $\rho V_m^2/2$ не является постоянной. Полное давление уменьшается вниз по направлению движения потока на величину потери давления на трение Δp_V.

Потерю давления Δp_V в общем случае можно отнести к скоростному напору $\rho V_{m1}^2/2$ (или $\rho V_{m2}^2/2$). Таким образом, получают безразмерный коэффициент потери давления ζ_V:

$$\zeta_V = \Delta p_V/[(\rho/2)V_{m1}^2]. \qquad (2.51)$$

Коэффициент потери давления ζ_V при решении различных задач, связанных с прохождением потока в канале, неодинаков и зависит от режима потока, т.е. от числа Рейнольдса. Он используется для оценки потери напоров жидкости и воздуха в радиаторах системы охлаждения, см. пп. 9.4.1 и 9.5.1.

Ниже более подробно рассмотрены несколько важных примеров течения в канале.

2.4.2. ХАРАКТЕРНЫЕ ПРИМЕРЫ ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ

Ламинарный и турбулентный поток в трубе постоянного сечения. Эпюра скоростей потока в трубе на некотором расстоянии от входа, называемом начальным участком, стабилизируется и далее по ходу потока остается неизменной. Такое состояние потока называется течением в трубе. Оно показано на рис. 2.21. Если выполняется уравнение неразрывности (2.48) и $V_{m1} = V_{m2}$, а $h_1 = h_2$, т.е. рассматривается горизонтально расположенная труба постоянного сечения, то из уравнения (2.50) можно получить:

$$p_1 - p_2 = \Delta p_V. \qquad (2.52)$$

Силы инерции отсутствуют. Из условия равновесия сил давления и трения (см. рис. 2.21) можно записать:

$$\tau(y) = [(p_1 - p_2)/(2L)]y. \qquad (2.53)$$

Следовательно, касательное напряжение в поперечном сечении изменяется по линейному закону. Этот вывод имеет силу для ламинарного и турбулентного потоков.

При $\mathrm{Re}_D = V_m D/\nu < 2300$ в трубе имеет место ламинарный режим течения потока. По закону трения Ньютона уравнение (2.1) примет вид:

$$\tau = -\mu(\mathrm{d}V/\mathrm{d}y) \qquad (2.54)$$

(обозначения соответствуют рис. 2.21).

Интегрируя уравнение (2.53), предварительно подставив выражение для τ из (2.54), получим уравнение для эпюры скоростей, которая представляет собой параболу:

$$V(y) = [(p_1 - p_2)/(4\mu L)](R^2 - y^2), \qquad (2.55)$$

средняя скорость в этом случае по уравнению (2.47) будет:

$$V_m = [(p_1 - p_2)/(32\mu L)]D^2. \qquad (2.56)$$

Коэффициент потери давления в трубе ζ_{VR} можно получить, используя уравнение (2.52):

$$\zeta_{VR} = \Delta p_V/[(\rho/2)V_m^2] = 64[\mu/(\rho V_m D)](L/D). \qquad (2.57)$$

В трубе коэффициент потери давления прямо пропорционален длине L и обратно пропорционален диаметру трубы D. Существует метод расчета, по которому для расчета потерь давления на трение в трубе используют коэффициент сопротивления λ, не зависимый от длины и диаметра трубы и называемый коэффициентом гидравлического трения:

$$\lambda = (D/L)\zeta_{VR}. \qquad (2.58)$$

В этом случае для ламинарного потока

$$\lambda = 64/\mathrm{Re}_D. \qquad (2.59)$$

Закон изменения $\lambda(\mathrm{Re}_D)$ представлен на рис. 2.22. Он хорошо совпадает с данными измерений.

При $\mathrm{Re}_D > 2300$ в трубе имеет место турбулентный режим течения потока. Как и в случае рассмотрения обтекания плоской пластины, эпюра скоростей при этом более выпуклая. Вывести для нее уравнение очень сложно, поскольку касательные напряжения изменяются не по закону (2.54), а по другому более сложному закону. Выражения для расчета коэффициента гидравлического трения λ, определяемого по уравнению (2.58), имеют вид (см. работу Шлихтинга [2.1]):

$$\lambda = 0{,}3164/\sqrt[4]{\mathrm{Re}_D}; \qquad (2.60)$$

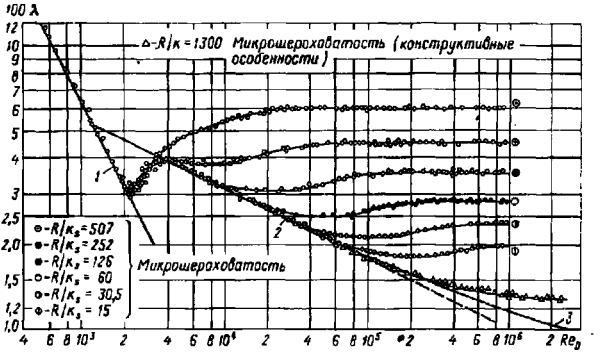


Рис. 2.22. Закономерность изменения коэффициента гидравлического трения в трубах [2.1]:
1 – ламинарный поток, уравнение (2.59); 2 – турбулентный поток, уравнение (2.60); 3 – турбулентный поток, уравнение (2.61)

$$1/\sqrt{\lambda} = 2\log\left(\mathrm{Re}_D\sqrt{\lambda}\right) - 0{,}8. \qquad (2.61)$$

Эти законы также представлены на рис. 2.22.

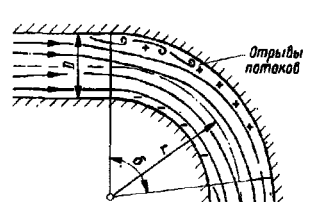
Говоря о потоке в прямой трубе постоянного сечения, мы имеем дело с безотрывным потоком. Следовательно, имеется чистое сопротивление трения. Аналогично обтеканию плоской пластины продольным потоком имеет место сильная зависимость коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса. На рис. 2.22 приведены коэффициенты гидравлического трения для шероховатых труб. Как и в случае обтекания плоской пластины, оказывается, что, во-первых, с увеличением шероховатости увеличивается потеря давления на трение, во-вторых, коэффициент гидравлического трения с уменьшением шероховатости стенок все меньше начинает зависеть от числа Рейнольдса. При относительно большой высоте микронеровностей они в принципе могут рассматриваться как совокупность выступающих над поверхностью тел, каждое из которых вызывает появление микроотрывов потока (см. также рис. 2.11). Подробнее с этим можно познакомиться в книгах с [2.1] по [2.9].

Поток в трубе с некруглым сечением может рассматриваться как поток в круглой трубе с эквивалентным диаметром. При заданных размерах сечения некруглой трубы (площадь F и периметр U) можно определить эквивалентный диаметр трубы с круглым сечением:

$$D_{aeq} = 4F/U. \qquad (2.62)$$

Колено трубы. При течении по трубе жидкости или газа могут иметь место отрывы потока. Одним из примеров является течение в колене

Рис. 2.23. Схема течения в колене трубы



трубы, рис. 2.23. Поворот потока вследствие поворота ограничивающих его стенок приводит к тому, что градиент давления направлен перпендикулярно к линиям тока. В колене трубы с наружной относительно центра изгиба стороны давление потока выше, а с внутренней – ниже, чем в потоке до колена и после него. Следовательно, опасным в отношении возникновения отрывов из-за повышения давления в направлении движения потока является поток, прилежащий к наружной относительно центра изгиба стороне трубы на входе в колено и прилежащий к внутренней стороне трубы на выходе из колена. Указанные эффекты проявляются тем сильнее, чем меньше радиус изгиба трубы r и чем больше угол изгиба δ. Коэффициент потери давления* ζ_{VK}, имеющий место из-за отрывов потока, в соответствии с уравнением (2.51) почти не зависит от числа Рейнольдса. В этом случае имеет силу квадратичный закон изменения сопротивления, который известен для потока, отрывающегося от выступающих тел. Числовые значения коэффициентов потери давления согласно [2.8] приведены в табл. 2.2.

2.2. Коэффициенты потери давления в коленах труб по данным работы [2.8], обозначения приведены на рис. 2.23

	δ	0	15°	22,5°	45°	60°	90°
ζ_{VK}	$r/D = 1$	0	0,03	0,045	0,14	0,19	0,21
	$r/D = 2$	0	0,03	0,045	0,09	0,12	0,14
	$r/D = 4$	0	0,03	0,045	0,08	0,10	0,11
	$r/D = 6$	0	0,03	0,045	0,075	0,09	0,09

Отсюда ясно, что для сохранения малых потерь давления нужно предусматривать угол поворота трубы 45° при максимально возможном значении радиуса закругления.

Входы в канал. Оформление входов в каналы (рис. 2.24) также существенно влияет на потери давления. Входы, имеющие острые края, способствуют появлению заметных отрывов потока, и коэффициенты потери давления на входе ζ_{VE} согласно уравнению (2.51) имеют большие

* В отечественной литературе этот коэффициент обычно называют коэффициентом местных сопротивлений. – *Прим. ред. пер.*



Форма	ξ_{VE}
Края острые	0,50
Края притуплены	0,25
Края хорошо закруглены	0,05

Рис. 2.24. Схема потока и коэффициента потерь давления на входе в канал [2.8]



Положение задвижки h/D	ξ_{VS}
0	0
0,25	0,26
0,50	2,1
0,75	17,0
0,87	98,0

Положение заслонки $\delta°$	ξ_{VKL}
0	0
10	0,52
20	1,54
40	10,8
60	110
70	751

Рис. 2.25. Схема потока и коэффициенты потерь давления при прохождении потока через местные сужения поперечного сечения канала [2.8]:
а – задвижка; *б* – заслонка

значения. Из таблицы, приведенной на рис. 2.24, видно, что наименьшие потери давления на входе будут, если края входа закруглить.

Местные сужения поперечного сечения каналов. Сужения поперечных сечений каналов в форме запорных устройств, например, задвижек, заслонок и т.п., используются для регулирования потоков в трубопроводе, например, в системе отопления и вентиляции, см. п. 10.4.4. На рис. 2.25 приведены два примера. В месте сужения поперечного сечения согласно уравнению неразрывности потока (2.46) существует более высокая скорость потока, а в соответствии с уравнением (2.49) – меньшее давление. С обратной стороны заслонки, служащей для сужения поперечного сечения, возникают сильные отрывы потока. На прилежащих стенках от самого узкого места вниз по течению потока возникает зона повышенного давления, и поток в этом месте также имеет склонность к появлению отрывов. Коэффициент потерь давления в этом случае очень высок, в особенности когда запорное устройство почти полностью перекрывает сечение канала.

Местные сужения поперечного сечения можно использовать для измерения расхода. Примером служит расходомерная диафрагма, которая вызывает кольцеобразное сужение поперечного сечения, и поток приобретает характер, аналогичный потоку, показанному на рис. 2.25 для задвижки. Коэффициент потери давления ζ_{VB} очень сильно зависит от соотношения размеров диафрагмы и от оформления ее кромок. Этот коэффициент в достаточно большом диапазоне не зависит от числа Рейнольдса. При известном коэффициенте потери давления ζ_{VB} для диафрагмы, измерив потерю давления Δp_V, по уравнению (2.51) можно определить среднюю скорость потока V_m, а затем и расход. Подробные сведения по этому вопросу можно найти в специальной литературе, например, в [2.3], [2.6], [2.8].

Местные расширения поперечного сечения каналов. Местные расширения (рис. 2.26) в соответствии с уравнением неразрывности

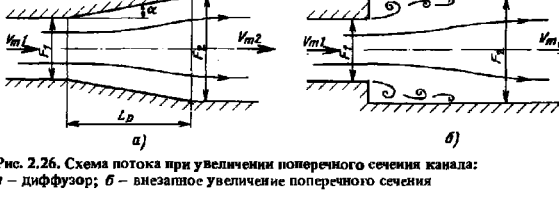


Рис. 2.26. Схема потока при увеличении поперечного сечения канала: *а* – диффузор; *б* – внезапное увеличение поперечного сечения

$$V_{m2} = (F_1/F_2)V_{m1} \tag{2.63}$$

приводят к уменьшению скорости потока. Как следствие возникает повышение давления в направлении движения потока, такие потоки приобретают склонность к возникновению отрывов. В идеальном потоке, не имеющем потери давления на трение ($\Delta p_V = 0$), согласно уравнению (2.50) и с учетом соотношения (2.63) максимально возможное повышение давления равно

$$p_2' - p_1 = (\rho/2)V_{m1}^2[1 - (F_1/F_2)^2]. \tag{2.64}$$

Из-за наличия трения при различных видах расширений поперечного сечения имеет место незначительное снижение прироста давления, вызванного этими расширениями. То есть возникает потеря давления:

$$\Delta p_V = p_2' - p_2. \tag{2.65}$$

При общепринятых формах расширения поперечного сечения в виде диффузоров с малым углом расширения $2\alpha < 8^\circ$ поток прилегает к стенкам. Потеря давления в этом случае примерно пропорциональна максимально возможному повышению давления в идеальном потоке:

$$\Delta p_V/[(\rho/2)V_{m1}^2] = \zeta_{VD} =$$

$$= \epsilon[(p_2' - p_1)/[(\rho/2)V_{m1}^2], \tag{2.66}$$

где $\epsilon = 0{,}5$ до $0{,}3$. Используя уравнение (2.64), можно записать:

$$\zeta_{VD} = \epsilon[1 - (F_1/F_2)^2]. \tag{2.67}$$

Коэффициент потери давления диффузора зависит от соотношения площадей поперечных сечений F_1/F_2, от относительной длины диффузора L_D/D_1, от формы диффузора и от распределения скоростей потока на входе. Для расчета прилегающего к диффузору потока существует хорошо разработанная теория (см. по этому вопросу работы Труккенбродта [2.7] и Шлихтинга, Герстена [2.20]). Большой объем измерений для диффузора был выполнен в более позднее время Шпренгером [2.21].

При больших углах расширения диффузоров возникают отрывы потока. Потери давления сильно возрастают. Предельный случай – внезапное расширение поперечного сечения – показан на рис. 2.26. Для не-

го также существует теоретическая база (см. работу Труккенбродта [2.7]), правда, трением о стенки пренебрегают. Действительное повышение давления

$$p_2 - p_1 = \rho V_{m2}(V_{m1} - V_{m2}). \qquad (2.68)$$

Используя уравнения (2.65) и (2.64), можно записать:

$$\Delta p_V = (\rho/2)(V_{m1} - V_{m2})^2. \qquad (2.69)$$

Коэффициент потери давления при внезапном расширении поперечного сечения:

$$\zeta_{VP} = \Delta p_V/[(\rho/2)V_{m1}^2] = [1 - (F_1/F_2)]^2. \qquad (2.70)$$

На самом деле потеря давления несколько больше, поскольку в расчете не учтено трение о стенки. Действительное значение коэффициента потери давления

$$\zeta_{VP} = \beta[1 - (F_1/F_2)]^2, \qquad (2.71)$$

где β = 1,1 до 1,2. Если сравнить результаты расчетов по уравнениям (2.67) и (2.71), то можно увидеть, что для расширений поперечного сечения в форме диффузоров при грубых расчетах можно пользоваться расчетной формулой для случая внезапного расширения поперечного сечения. Чтобы получить малые потери давления в потоке при переходе его в канал с большей площадью поперечного сечения, необходимо тщательно продумать геометрические соотношения диффузора. Как правило, при проектировании автомобиля в распоряжении конструктора имеется очень мало места для того, чтобы в полной мере воспользоваться этим советом (см. п. 9.4.1).

2.5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВНЕШНЕГО ПОТОКА, ОБТЕКАЮЩЕГО АВТОМОБИЛЬ, И ВНУТРЕННЕГО ПОТОКА, ПРОХОДЯЩЕГО ЧЕРЕЗ АВТОМОБИЛЬ

Внешний поток, обтекающий автомобиль, и внутренний поток, протекающий через автомобиль (см. рис. 2.4) очень тесно связаны друг с другом. Например, объемный расход воздуха для охлаждения двигателя определяется разностью давления в зоне полного торможения внешнего потока в передней части автомобиля и давления со стороны днища автомобиля (см. п. 9.4.1). Это же относится и к приточной вентиляции салона автомобиля, для которой используется перепад между давлениями в зоне перед ветровым стеклом и в месте расположения вытяжных вентиляционных отверстий в задней верхней части салона (см. пп. 6.2.2 и 10.4.1).

Появляющиеся в результате обтекания автомобиля воздухом перепады давления пропорциональны квадрату скорости движения V_∞. То есть они отсутствуют, когда автомобиль неподвижен, а при максимальной скорости они имеют наибольшие значения. При рассмотрении проб-

лем прохождения воздуха через автомобиль встает вопрос о его объемном расходе, поэтому суммарный перепад давления в отдельных частях автомобиля равнозначен располагаемой разности давлений. В этом случае объемный расход воздуха сильно зависит от скорости движения. О том, что внешний, обтекающий автомобиль, и внутренний, протекающий через него, потоки тесно связаны друг с другом, свидетельствует тот факт, что давление в местах впуска и выпуска воздуха может рассматриваться равным образом как среди проблем обтекания автомобиля, так и среди проблем прохождения воздуха через него. Из-за перемещения массы воздуха через автомобиль, в зависимости от обстоятельств, происходят изменения внешнего потока. В месте забора воздух отсасывается из внешнего потока, а в месте выпуска он вновь возвращается в него. В зависимости от массы протекающего через автомобиль воздуха могут возникнуть явления интерференции, которые не всегда носят негативный характер. Например, выход воздуха при хорошо оформленных выпускных отверстиях может оказать положительное влияние на поток в пограничном слое.

Зависимость разности давлений от скорости является весьма существенным недостатком, поскольку при малых скоростях движения возникающие потоки имеют малый объемный расход. Поэтому и в системе охлаждения двигателя (см. пп. 9.4.3 и 9.5.3), и в системе вентиляции салона (см. п. 10.4.3) устанавливаются дополнительно вентиляторы. Даже если автомобиль не движется, они обеспечивают определенный расход массы воздуха, равный произведению ρQ. Перепад давлений, который необходим для компенсации всех потерь давления, обеспечивается вентилятором. Необходимая для этого мощность

$$P = Q \cdot \Delta p, \tag{2.72}$$

где Q – объемный расход воздуха, м^3/с. Для того чтобы эта мощность оставалась по возможности малой, необходимо стремиться к уменьшению значений всех коэффициентов потерь давления для потока, проходящего через автомобиль. Введение вентилятора может острее поставить проблему интерференции внешнего потока и потока, проходящего через автомобиль.

2.6. ОБОЗНАЧЕНИЯ

a – скорость звука;
b – ширина пластины, уравн. (2.18);
c_f' – относительное тангенциальное напряжение вдоль стенки, уравнение (2.32);
c_p – коэффициент давления, уравнение (2.8);
c_p' – удельная теплоемкость при постоянном давлении, уравнение (2.29);
c_A – коэффициент подъемной силы;
c_L – коэффициент поперечного момента;
c_M – коэффициент продольного момента;
c_N – коэффициент поворачивающего момента;
c_W – коэффициент аэродинамического сопротивления;
c_Y – коэффициент боковой силы;

d – размер частички, уравнение (2.43);
f – площадь местного сечения трубки тока, уравнение (2.5);
g – полное давление;
h – геодезическая высота трубки тока, уравнение (2.50);
k – высота микронеровностей, рис. 2.9;
n – частота колебаний;
p – статическое давление;
q – давление напора (скоростной напор);
$\dot{q}$ – плотность теплового потока, уравнение (2.3);
r – радиальная координата, рис. 2.3;
t – время;
u, v – компоненты скорости в направлении осей x, y;
u', v', w' – случайные отклонения скоростей от средних значений (пульсации), уравнение (2.12);
w – местная скорость потока, уравнение (2.5);
x, y, z – координаты в прямоугольной системе координат;
A – подъемная сила, рис. 2.14;
A_T, A_q – коэффициенты диффузии, уравнение (2.35) и (2.36);
D – диаметр ($D = 2R$);
D_{aeq} – эквивалентный диаметр трубы, уравнение (2.62);
F – площадь;
L – длина тела, рис. 2.2;
L – поперечный момент, рис. 2.14;
M – продольный момент, рис. 2.14;
N – поворачивающий момент, рис. 2.14;
Nu – число Нуссельта, уравнение (2.33);
P – мощность, уравнение (2.72);
Pr – число Прандтля, уравнение (2.29);
Q – объемный расход;
R – радиус;
Re – число Рейнольдса;
Re_D – число Рейнольдса, когда в качестве характерного линейного размера принимается диаметр ($Re_D = V_\infty D/\nu$ – для внешнего потока; $Re_D = V_m D/\nu$ – для внутреннего потока);
Re_l – число Рейнольдса, когда в качестве характерного линейного размера принимается длина в направлении перемещения потока ($Re_l = V_\infty L/\nu$);
Re_x – число Рейнольдса, когда в качестве характерного линейного размера принимается текущее значение линейного размера вдоль потока ($Re_x = V_\infty x/\nu$);
S – число Струхаля, уравнение (2.40);
T – абсолютная температура;
T' – случайное отклонение температуры от среднего значения, аналогично уравнение (2.12);
U – длина окружности трубы;
V – скорость потока;
V_m – средняя скорость потока в канале, рис. 2.3 и уравнение (2.47);
W – полное аэродинамическое сопротивление, уравнение (2.23);
W_D – сопротивление давления, уравнение (2.22);
W_R – сопротивление трения, уравнение (2.17);
Y – боковая сила, рис. 2.14;
α – коэффициент теплоотдачи, уравнение (2.39);
β – угол скоса потока, рис. 2.14;
δ – толщина пограничного слоя, рис. 2.6;
ζ_V – коэффициент потери давления, уравнение (2.51);
λ – коэффициент теплопроводности, уравнение (2.3);
λ – коэффициент гидравлического трения, уравнение (2.58);
μ – динамический коэффициент вязкости, уравнение (2.1);

ν – кинематический коэффициент вязкости, уравнение (2.2);
ρ – плотность жидкости;
τ – касательное напряжение, уравнение (2.1);
φ – угол, рис. 2,8 и 2.10;
Δ – разность;
ψ – коэффициент, уравнение (2.43).

Индексы

∞ – параметры, относящиеся к невозмущенному потоку;
krit – критическое значение;
rel – относительная величина;
s – величина, действующая по касательной к линиям тока;
St – параметры, относящиеся к площади лобового сопротивления;
t – величина, действующая по касательной к траектории движения частички;
turb – параметры, относящиеся к турбулентному состоянию потока;
u – параметры, относящиеся к переходу от ламинарного состояния потока к турбулентному;
w – параметры процессов, имеющих место на стенке ($y = 0$);
B – диафрагма;
D – диффузор;
E – вход;
K – колено (изгиб) трубы;
Kl – заслонка;
P – внезапное расширение поперечного сечения;
R – труба;
S – задвижка;
T – параметры, относящиеся к температурному пограничному слою;
V – потеря (расходуемая на преодоление сопротивления);
$\rightarrow$ – вектор;
$\overline{}$ – мгновенное среднее значение, уравнение (2.13).

3. МОЩНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ И АВТОМОБИЛЕЙ-ФУРГОНОВ

Ганс-Йоахим Эммельманн

3.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Из параметров, характеризующих мощностные показатели автомобиля, в центре внимания длительное время оставались максимальная скорость и время разгона. Ощутимый рост цен на топливо привел к тому, что особое внимание стали уделять расходу топлива. При разработке нового автомобиля одной из важнейших целей является получение малого расхода топлива.

Ниже, исходя из уравнения суммарной силы сопротивления движению, характеризуются ее отдельные составляющие, исследуется их влияние на различные параметры, определяющие мощностные свойства автомобиля. Подробно изложены вопросы, связанные с расходом топлива.

Сведения, приведенные в этой главе, относятся только к легковым автомобилям и автомобилям-фургонам; о грузовых автомобилях и автобусах речь идет в п. 8. Естественно, что названное уравнение силы сопротивления движению справедливо как для легковых автомобилей, так

и для грузовых, но значения отдельных составляющих силы сопротивления для двух групп автомобилей различны, поэтому требуется отдельное рассмотрение.

3.2. СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ

3.2.1. УРАВНЕНИЕ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ

При движении автомобиль преодолевает следующие силы сопротивления:

силу сопротивления воздуха W_L;
силу сопротивления качению W_R;
силу сопротивления подъему W_S;
силу сопротивления разгону W_B.

Сила тяги Z (Н) на ведущих колесах, необходимая для преодоления сил сопротивления, определяется уравнением:

$$Z = W_L + W_R + W_S + W_B \text{ . (Н)} \tag{3.1}$$

Необходимая для преодоления сил сопротивления мощность двигателя:

$$P_{Mot} = [(ZV_F)/(\eta_G \eta_A)]10^{-3} \text{ . (кВт)} \tag{3.2}$$

где η_G – коэффициент полезного действия коробки передач; η_A – коэффициент полезного действия главной передачи.

3.2.2. АНАЛИЗ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ

Сила сопротивления воздуха. Сила сопротивления воздуха определяется условиями обтекания и аэродинамическими характеристиками кузова:

$$W_L = (\rho/2)V_\infty^2 c_T F \text{ . (Н)} \tag{3.3}$$

где ρ – плотность воздуха, $\rho = 1{,}22$ кг/м^3; V_∞ – результирующая скорость потока, м/с; $c_T(\beta)$ – коэффициент тангенциальной силы ($c_{T\beta=0} = c_W$)*; F – площадь лобового сопротивления автомобиля, м^2.

Результирующая скорость потока V_∞ получается сложением векторов скорости движения V_F и скорости ветра V_S. Вектор результирующей скорости потока образует с направлением движения угол β – угол натекания воздушного потока (рис. 3.1, вверху).

При встречном ветре или попутном уравнение (3.3) примет вид:

$$W_L = (\rho/2)(V_F \pm V_S^2)c_W F. \tag{3.4}$$

При отсутствии ветра (штиль):

$$W_L = (\rho/2)\, V_F^2 c_W F. \tag{3.5}$$

---

* Коэффициент сопротивления воздуха при несимметричном обтекании. – *Прим. ред. пер.*

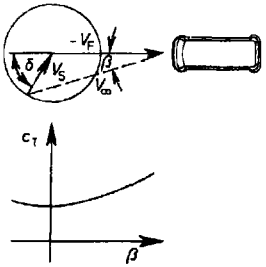


Рис. 3.1. Определение среднего коэффициента аэродинамического сопротивления c_W с учетом действия бокового ветра [3.1]

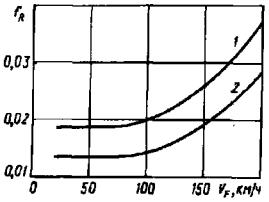


Рис. 3.2. Коэффициент сопротивления качению $f_R(V_F)$ для диагональных (*1*) и радиальных (*2*) шин

Случай полного штиля встречается весьма редко, поэтому при типичном характере действия тангенциальной силы (см. рис. 3.1) в процессе эксплуатации автомобиля необходимо считаться с более высоким значением силы сопротивления воздуха, чем при отсутствии ветра. При заданных значениях скорости автомобиля, скорости и направления ветра можно определить коэффициент тангенциальной силы c_T и средний коэффициент аэродинамического сопротивления с учетом действия бокового ветра c_W^* (см. рис. 3.1, а также пп. 4.5.2 и 8.4.3):

$$c_T(\beta) = T(\beta)/[(\rho/2)V_\infty^2 F];$$

$$c_W^* = W^*/[(\rho/2)V_F^2 F];$$

$$c_W^* = (1/\pi)\int_0^\pi c_T(\beta)[(V_\infty/V_F)(\delta)]^2 \mathrm{d}\delta;$$

$$c_W^* = (1/\pi)\int_0^\pi c_T(\beta)[1 + (V_S/V_F)^2 + 2(V_S/V_F)\cos\delta]\mathrm{d}\delta.$$

Сила сопротивления качению. Сила сопротивления качению шин автомобиля зависит от нормальной (перпендикулярной опорной поверхности) нагрузки на колеса, размера и конструкции шин, давления воздуха в них, а также от углов установки колес – схождения и развала.

Если исходить из того, что заводы-изготовители предписывают давление в шинах в соответствии с нагрузкой и что для заданного соотношения нагрузки и давления в шинах получаются приблизительно одинаковые коэффициенты сопротивления качению, то значение сопротивления качению (Н) для автомобиля в целом можно рассчитать по формуле:

$$W_R = f_R G_N \ , (\mathrm{H})$$

где G_N – нормальная сила, соответствующая весу автомобиля; f_R – коэф-

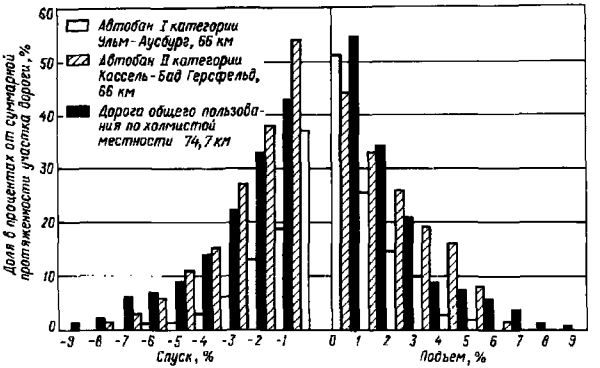


Рис. 3.3. Распределение подъемов и спусков для трех рассматриваемых участков дорог [3.2]

фициент сопротивления качению, зависящий от конструкции и размера шин.

На рис. 3.2 представлены типичные значения коэффициентов сопротивления качению для радиальных и диагональных шин. Влияние развала и схождения колес не учитывается.

Сила сопротивления подъему. Сила сопротивления подъему определяется уравнением

$$W_S = \sin\varphi G 9{,}81. \qquad (3.6)$$

Как подробнее изложено в п. 3.4, сила сопротивления подъему не принимается в расчет при вычислениях расходов топлива как при установившемся движении, так и при движении по различным циклам. Это связано с тем, что до сих пор не разработаны циклы движения, учитывающие продольный наклон дорог. Исследований, выполненных Шубертом [3.2] по определению относительных частот подъемов на определенных участках автобанов и дорог общего пользования (рис. 3.3), не достаточно для того, чтобы сделать общий вывод по данному вопросу.

Сила сопротивления разгону. Сила сопротивления разгону определяется уравнением

$$W_B = \dot{V}m(1 + \epsilon_i) 9{,}81, \qquad (3.7)$$

где ϵ_i учитывает влияние вращающихся масс при включении соответствующей передачи. Ориентировочные значения для легковых автомобилей (по Бюссиену [3.3]):

1-я передача $\epsilon_1 = 0{,}25$;

2-я передача $\epsilon_2 = 0{,}15$;
3-я передача $\epsilon_3 = 0{,}10$;
4-я передача $\epsilon_4 = 0{,}075$.

При точных расчетах необходимо определить моменты инерции всех вращающихся деталей и отнести их к массе автомобиля.

3.3. МОЩНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

3.3.1. ТЯГОВЫЙ БАЛАНС АВТОМОБИЛЯ

По тяговому балансу в зависимости от скорости автомобиля наряду со значением силы тяги при полной нагрузке двигателя можно определить способность автомобиля преодолевать подъем, а также необходимую на различных передачах мощность двигателя (рис. 3.4). На дополнительной диаграмме (рис. 3.4, внизу) показаны соответствующие частоты вращения двигателя.

По точке пересечения кривой сопротивления движению, полученной путем сложения сил сопротивления качению и сопротивления воздуха, и силы тяги при полной нагрузке на высшей передаче может быть определена максимальная скорость автомобиля. При заданной скорости движения разность между значением силы тяги при полной мощности двигателя и силой сопротивления движению (равной сумме сил сопротивления качению и сопротивления воздуха) в соответствии с уравнением (3.1) может использоваться как для преодоления подъема, так и для разгона.

3.3.2. ВРЕМЯ РАЗГОНА И СКОРОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗГОНА

Если в уравнении (3.7) силу сопротивления разгону W_B заменить названной выше разностью сил ΔZ, то можно вычислить ускорение ($м/с^2$) и скорость (км/ч):

$$\dot{V} = \Delta Z/[m(1 + \epsilon_j) \cdot 9{,}81]; \tag{3.8}$$

$$V = 3{,}6 \int_0^t \dot{V} dt. \tag{3.9}$$

Обычно время разгона с переключением передач от $V_F = 0$ до 100 км/ч задается как величина, характеризующая приемистость автомобиля. Время разгона от $V_F = 40$ км/ч до 100 км/ч на высшей передаче (т.е. при других ограничивающих условиях) называется эластичностью*.

На рис. 3.5 показана зависимость скорости движения от времени разгона для автомобиля, тяговый баланс и технические данные которого приведены на рис. 3.4.

---

* В отечественной литературе нет специального термина, характеризующего этот показатель автомобиля. Обычно его называют скоростной характеристикой разгона на прямой передаче, и он служит для оценки приемистости автомобиля на прямой передаче. – *Прим. ред. пер.*

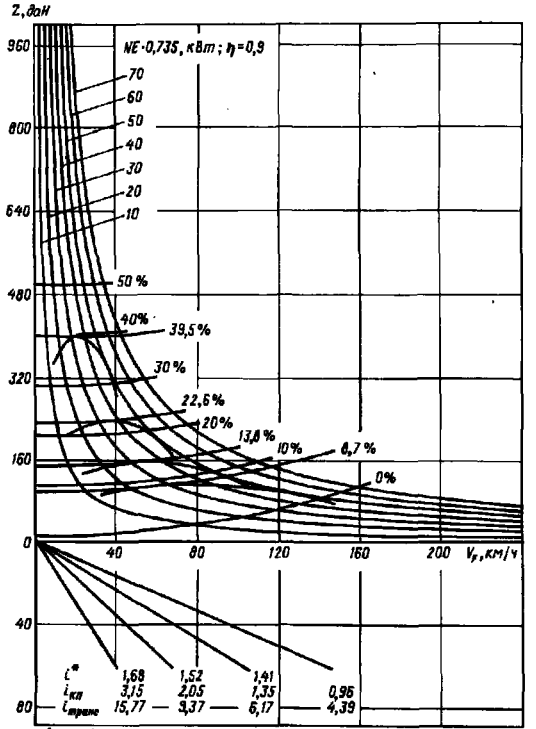


Рис. 3.4. Тяговый баланс и диаграмма чисел оборотов двигателя для легкового автомобиля. Данные: рабочий объем двигателя – 1,1 л; вес автомобиля 975 кг; площадь лобового сопротивления 1,84 м^2; значение $c_W = 0{,}42$; шины 145 *SR* 13; динамический радиус 0,274 м; передаточное число главной передачи $i_A = 4{,}571$

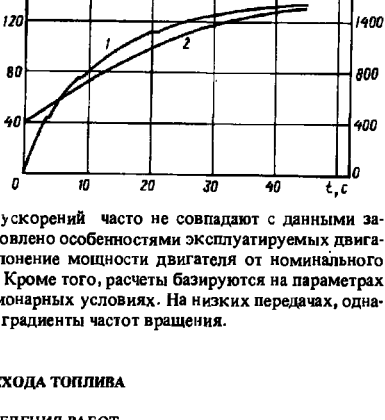


Рис. 3.5. Время разгона и характеристика разгона автомобиля на прямой передаче на примере автомобиля нижнего среднего класса (по классификации СССР – малого класса – *Прим. ред. пер.*):
1 – время разгона с места с учетом переключения передач; *2* – время разгона на высшей передаче от 40 км/ч

Результаты расчетов ускорений часто не совпадают с данными замеров. Отчасти это обусловлено особенностями эксплуатируемых двигателей – очень часто отклонение мощности двигателя от номинального значения составляет ±5 %. Кроме того, расчеты базируются на параметрах двигателя, снятых в стационарных условиях. На низких передачах, однако, имеют место большие градиенты частот вращения.

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА

3.4.1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ

В процессе разработки нового автомобиля нужно провести тщательный сравнительный анализ затрат и эффективности внедрения отдельных мероприятий, влияющих на расход топлива. Для этого необходимо с учетом интересов покупателя рассчитать расход топлива в зависимости от всех основных влияющих на него параметров. Применяемая в этом случае модель расчета может принимать во внимание любые предварительно заданные режимы движения (так называемые циклы). При определении удельной расходной характеристики двигателя предпочтение отдается экспериментальной характеристике, полученной путем замеров. Для стационарных режимов движения, как правило, такие характеристики имеются. При нестационарных режимах движения во время разгонов в расчет вводят поправку в сторону увеличения расхода, значение которой определяется в следующем разделе.

3.4.2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАСХОДА ДВИГАТЕЛЯ

Расход топлива автомобилем в значительной степени определяется удельным расходом топлива двигателя, установленного на него; а он, в свою очередь, зависит от нагрузки двигателя (крутящий момент, частота вращения). Расход топлива двигателем обычно приводится в виде так называемой универсальной характеристики удельного расхода топлива. Точность расчетов расхода топлива автомобилем зависит от того, насколько хорошо известна такая универсальная характеристика. Поэтому

при вычислении расхода топлива необходимо использовать характеристику того двигателя, который предусмотрен для установки на рассматриваемый автомобиль.

Очень часто возникает ситуация, когда конкретная универсальная характеристика не известна, например, в рамках предварительных исследований обсуждается возможность установки двигателей с различной номинальной мощностью, т.е. когда двигатель еще не выбран. В этом случае расчет расхода топлива ведется по нормированной характеристике, которая перед этим строится по имеющимся данным двигателя. Нормированная универсальная характеристика удельного расхода топлива получается путем нормирования среднего эффективного давления и частоты вращения со значениями при номинальной мощности. Универсальная характеристика условного двигателя выводится из следующих соображений:

удельный расход $b_S = b_{S0}$; (3.10)

среднее эффективное давление $PME = PME_0 \times$

$\times (P_{Nenn}/P_{Nenn0})$; (3.11)

частота вращения $n = n_0(n_{Nenn}/n_{Nenn0})$. (3.12)

В этих выражениях индексом "0" обозначены величины, относящиеся к ненормированной, а экспериментально полученной универсальной характеристике, взятой в качестве исходной для нормирования.

Такие нормированные универсальные характеристики удельного расхода, полученные путем аффинного преобразования экспериментальных универсальных характеристик, для двигателя Отто и дизельного двигателя показаны на рис. 3.6.

Расход топлива на холостом ходу и при необходимости количество

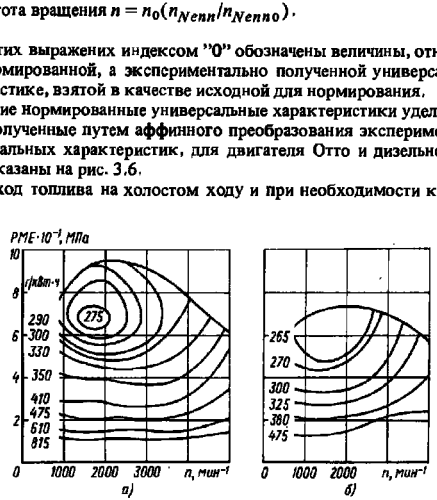


Рис. 3.6. Универсальные характеристики удельного расхода топлива для двигателя Отто с рабочим объемом 2,0 л (*а*) и дизельного двигателя с рабочим объемом 2,7 л (*б*), полученные при расчете путем нормирования [3.7]

топлива, впрыскиваемое ускорительным насосом, определяются с учетом рабочего объема соответствующего двигателя:

расход на холостом ходу

$$B_L = B_{L0}\,(V_{H0}/V_{H0}); \qquad (3.13)$$

количество топлива, впрыскиваемое ускорительным насосом,

$$B_E = B_{E0}\,(V_H/V_{H0}). \qquad (3.14)$$

3.4.3. СОГЛАСОВАНИЕ ПЕРЕДАЧ

Обычно трансмиссии легковых автомобилей и автомобилей-фургонов имеют такую конструкцию, что на высшей передаче максимальная частота вращения двигателя примерно на 100 мин$^{-1}$ больше частоты вращения при номинальной мощности (для автомобилей-фургонов на 400 мин$^{-1}$). Параметры остальных передач выбираются с учетом выполнения требований в отношении разгона и преодоления подъемов, причем, само собой разумеется, должно быть обеспечено достаточное перекрытие по оборотам двигателя для соседних передач.

Если для новой модели существующего ряда автомобилей стремятся снизить сопротивление воздуха, то необходимо произвести согласование передаточных чисел трансмиссии в соответствии с новой максимальной скоростью. На рис. 3.7 показано, что же будет, если пренебречь этим советом и не осуществить такое согласование. Для наглядности приведен пример уменьшения значений c_W со значения 0,5 до 0,4 и 0,3.

Значению $c_W = 0{,}5$, отвечающему исходному состоянию автомобиля, соответствует кривая сопротивления, показанная сплошной линией. Кривые сопротивлений для этого же автомобиля при $c_W = 0{,}4$ и $c_W = 0{,}3$ изображены соответственно пунктирной и точечной линиями. Из диаграммы видно, что при одном и том же значении передаточного числа $i = 3{,}98$ и одинаковой частоте вращения двигателя, т.е. при той же скорости движения, кривым более низких значений c_W соответствуют более высокие значения удельных расходов по сравнению с $c_W = 0{,}5$. Это может, как будет показано ниже, привести к тому, что в нижней области частичных нагрузок, несмотря на меньшую мощность, будет иметь место повышенный расход топлива. Новые значения максимальной скорости приведут к частотам вращения двигателя, которые превышают допустимую максимальную частоту вращения.

Если изменить передаточное отношение таким образом, что на данной диаграмме названное условие для частоты вращения при максимальной скорости будет выполняться, то точки нагрузки на кривых одинаковой мощности (на диаграмме они имеют вид гипербол) сместятся на кривую для $c_W = 0{,}5$. Кривые сопротивлений, построенные в зависимости от частоты вращения, для различных значений c_W совпадут.

Это означает, что в точке полной нагрузки будет иметь место одинаковый удельный расход для всех трех кривых, соответствующих различным значениям c_W. Так как точкам нагрузки исходной кривой и кривым нагрузок с учетом согласования передаточных чисел и необхо-

димости перекрытия соответствуют различные значения скоростей движения (см. рис. 3.7, внизу), то имеют место показанные на рис. 3.8 кривые изменения удельного расхода в зависимости от скорости движения. Для лучшей наглядности показаны зависимости только для исходного состояния при $c_W = 0{,}5$ и для $c_W = 0{,}3$.

Из приведенных зависимостей видно, что с помощью согласования передаточных чисел трансмиссии, как описано выше, нельзя получить такие же удельные расходы при частичной нагрузке, как в исходном состоянии. В нижней области частичных нагрузок удельные расходы существенно выше, поэтому, несмотря на меньшие мощности, имеет место более высокий удельный расход топлива, чем для $c_W = 0{,}5$.

При рассмотрении ездовых циклов должны согласовываться пере-



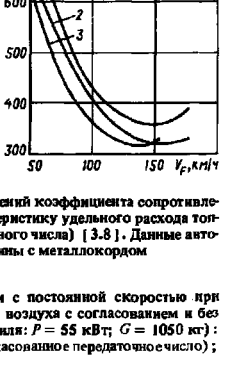


Рис. 3.7. Кривые сопротивления для различных значений коэффициента сопротивления воздуха, наложенные на универсальную характеристику удельного расхода топлива (с учетом и без учета согласования передаточного числа) [3.8]. Данные автомобиля: $P = 55$ кВт; $F = 1{,}77$ м^2; $G = 1060$ кг; шины с металлокордом

Рис. 3.8. Удельный расход топлива при движении с постоянной скоростью при различных значениях коэффициента сопротивления воздуха с согласованием и без согласования передаточного числа (данные автомобиля: $P = 55$ кВт; $G = 1050$ кг): $1 - c_W = 0{,}3$, $i_4 = 3{,}98$; $2 - c_W = 0{,}3$, $i_4 = 3{,}46$ (согласованное передаточное число); $3 - c_W = 0{,}5$, $i_4 = 3{,}98$

даточные числа трансмиссии для всех ступеней коробки передач. Целесообразно осуществлять следующий порядок согласования:

а) изменение передаточного числа главной передачи – это в равной степени отразится на передаточном отношении трансмиссии на всех ступенях коробки передач;

б) ступенчатое согласование передаточных чисел трансмиссии для всех ступеней коробки передач (1-я передача без изменения, 2-я передача на 33 %, 3-я передача на 67 %, 4-я и 5-я передачи на 100 % отнесенные к виду согласования "а";

в) ступенчатое согласование передаточных чисел трансмиссии для всех ступеней коробки передач, принимая во внимание вес автомобиля и мощность устанавливаемого на него двигателя.

Приведенная последовательность отражает накопленный практический опыт. Проще всего реализовать мероприятие, обозначенное буквой "в", и за счет этого можно получить максимальное улучшение в отношении расхода топлива, но это ведет к ухудшению динамики разгона на низших передачах. При увеличении максимальной скорости на 10 % (что примерно соответствует уменьшению силы сопротивления воздуха на 30 %) время разгона, например от 0 до 100 км/ч, увеличивается на 10 %. Если это неприемлемо, то согласование нужно проводить в соответствии с пунктом "б".

При решении задачи уменьшения расхода топлива, когда наряду с силой сопротивления воздуха в широких пределах изменяется вес автомобиля, а время разгона должно оставаться примерно тем же, предусмотрено согласование по пункту "в". Согласование с измененной силой сопротивления воздуха происходит, как в случае "б".

Для первой передачи при изменении веса автомобиля или мощности двигателя вычисляется коэффициент согласования, обеспечивающий примерно такое же время разгона, как и для исходного автомобиля. Вторая и третья передачи согласовываются ступенчато. Не осуществляется согласование для четвертой (и, возможно, для ускоряющей) передачи при изменении веса или мощности, см. также табл. 3.1.

При согласовании по пунктам "б" и "в" необходимо проверить, обеспечивают ли рассчитанные передаточные числа коробки передач достаточное перекрытие частот вращения соседних передач.

3.1. Виды согласования коробки передач

Передача	1	2	3	4	5 (ускоряющая)
Согласование в зависимости от сопротивления воздуха, %	0	33	67	100	100
Согласование в зависимости от веса или мощности, %	100	67	33	0	0

3.4.4. ЕЗДОВЫЕ ЦИКЛЫ

Раньше в ФРГ согласно стандарту *DIN*70030 (старая редакция) расход топлива для автомобилей задавался при постоянной скорости движения 110 км/ч. Учитывая неблагоприятные условия окружающей среды, для замеряемого значения допускалось отклонение в сторону увеличения до 10 %. При таком методе измерения влияние массы автомобиля почти не учитывалось, а влияние сопротивления воздуха, наоборот, переоценивалось. Невозможно было сделать вывод о влиянии усовершенствований, вводимых в автомобиль, на его экономические показатели. В этом случае требовался анализ величин сил, действующих на автомобиль. Новая редакция *DIN* 70030 этого не предусматривает. Наряду с расходами топлива при скоростях движения 120 км/ч и 90 км/ч задается расход по так называемому европейскому циклу (ЕЭК ООН). Однако следует отметить, что хотя такой искусственный цикл (рис. 3.9) очень хорошо подходит для контроля токсичности выхлопных газов на испытательных стендах, но по интенсивности нарастания скоростей и по их уровню он не отражает среднее городское движение, а в лучшем случае имитирует движение в центре больших городов.

В процессе совершенствования методов оценки внешнего шума автомобиля было установлено, что среднее городское движение крупного европейского города* примерно равнозначно городскому циклу США. Так как в ФРГ движение в городах с населением свыше 500 тыс. человек составляет весьма незначительную часть всего внутригородского движения, то городской цикл США не следует рассматривать как характерный режим всего внутригородского движения, это лишь самый неблагоприятный случай.

Для получения условного расхода топлива, имеющего важное значение для владельца автомобиля, предлагается два способа. Первый заключается в рассмотрении неофициального "среднего" цикла (*Euromix*), который дает среднее значение трех значений расходов, оговоренных в *DIN* 70030:

$$B_{Eumix} = 1/3(B_{ECE} + B_{90} + B_{120}). \qquad (3.15)$$

Второй сводится к тому, что согласно замерам *DIN* 70030 (новая редакция) 50 % от B_{ECE} суммируется с 25 % от каждого из расходов при постоянных скоростях.

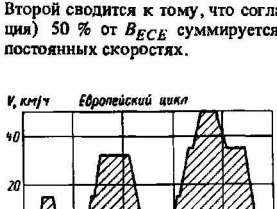
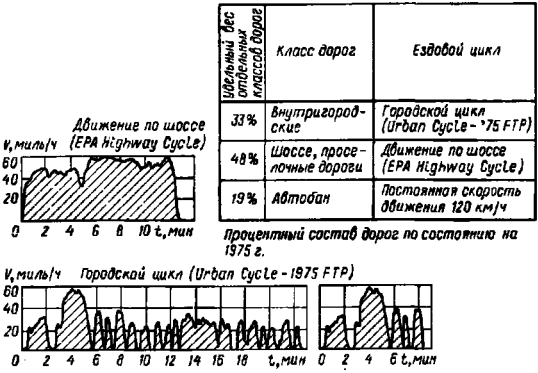


Рис. 3.9. Искуственно созданный европейский ездовой цикл

* Внутригородские дороги в крупных городах ФРГ с населением свыше 500 тыс. чел. составляют только 6 % в общей сети внутригородских дорог. Протяженность городских дорог в городах с населением менее 500 тыс. чел. неизвестна.

expert22 для http://rutracker.org



Удельный вес отдельных классов дорог	Класс дорог	Ездовой цикл
33%	Внутригородские	Городской цикл (Urban Cycle - '75 FTP)
48%	Шоссе, проселочные дороги	Движение по шоссе (EPA Highway Cycle)
19%	Автобан	Постоянная скорость движения 120 км/ч

Процентный состав дорог по состоянию на 1975 г.

Рис. 3.10. Официальный ездовой цикл; движения легковых автомобилей в ФРГ

Расход B_{ECE} определяется на испытательном стенде независимо от того, имеются ли данные по сопротивлению воздуха, и при массе автомобиля, равной среднему значению массы для данного класса автомобилей. Уменьшение массы при таком цикле только тогда ведет к снижению замеряемого расхода топлива, когда масса становится ниже пределов, оговоренных для данного класса. Уменьшение сопротивления воздуха и коэффициента сопротивления качению в основном не учитываются.

В США определение расхода осуществляется по комбинации циклов, которая согласована с особенностями движения в стране. Так называемый *Combined Fuel Economy** состоит из 55 % движения по городскому циклу и 45 % движения по шоссе (*Highway*).

Официальной, согласованной с заинтересованными сторонами программы испытаний для определения расхода топлива, учитывающей особенности движения в ФРГ или Европе, до сих пор не существует. Для вычислений расходов используется указанный на рис. 3.10 цикл движения с учетом классификации дорог, установленных в ФРГ переписью 1975 г. для движения легковых автомобилей. Согласно этой классификации 33 % дорог являются внутригородскими. Расход определяется по программе испытаний, предназначенной для определения токсичности выхлопных газов – так называемый городской цикл Ведомства по охране окружающей среды США (*Urban Cycle* или *Citi Cycle – EPA*). Следующие 48 % дорог относятся к шоссейным или проселочным дорогам. За основу берется программа движения по шоссе (*Highway Cicle – EPA*), 19 % дорог составляют автобаны, расход определяется при пос-

* Комбинированный цикл топливной экономичности (англ.).

тояниой скорости движения 120 км/ч. Суммарный расход определяется следующим образом :

$$B_{E_{75}} = 0{,}33B_{City} + 0{,}48B_{Highw.} + 0{,}19B_{120}.$$

Индекс $E'75$ указывает на то, что положенная в основу определения расхода комбинация циклов базируется на данных 1975 г. Такой цикл для определения расхода впервые был предложен Янссеном и Эммельманном на основании данных 1970 г. [3.4]. Поскольку увеличилось число скоростных дорог (автобанов) в процентном отношении, то формула несколько изменилась.

При расчетах расхода топлива не стоит использовать только стендовые испытания с присущими им недостатками. Можно имитировать дорожное движение с заданными изменениями скоростей.

3.4.5. ТОЧКИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Для городского цикла (*City Cycle – EPA*) и цикла движения по шоссе (*Highway Cicle – EPA*) предписываются следующие точки переключения передачи на более высокую:

$1 \rightarrow 2$ при $V_F = 24{,}0$ км/ч;
$2 \rightarrow 3$ при $V_F = 40{,}0$ км/ч;
$3 \rightarrow 4$ при $V_F = 64{,}0$ км/ч.

В случае наличия в коробке передач пятой передачи за неимением предписаний на этот счет можно рекомендовать переключение с 4-й передачи на 5-ю при скорости $V_F = 73{,}6$ км/ч.

Эта дополнительная точка переключения ведет к тому, что, например, в городском цикле (*City Cycle*) доля 4-й передачи в общем цикле уменьшается с 14,9 до 1 % и оставшиеся 13,9 % цикла приходятся на движение на 5-й передаче. При замедлениях автомобиля (торможение) передачи остаются включенными до тех пор, пока частота вращения двигателя не станет равной частоте вращения холостого хода.

Точки переключения для европейского цикла (ЕЭК ООН) приведены в табл. 3.2.

3.5. РАСХОД ТОПЛИВА И МОЩНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

3.5.1. СРАВНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА И СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ

При установившемся движении по горизонтальному участку дороги сопротивление движению складывается из силы сопротивления воздуха и силы сопротивления качению (см. уравнение (3.1)). В зависимости от скорости движения доля каждой из составляющих в общем сопротивлении различна. Это наглядно показано на рис. 3.11 (см. также работы Гухо и Эммельманна [3.7]).

На графике показано изменение отношения силы сопротивления

3.2. Точки переключения по европейскому циклу

№	Наименование режимов работы	Этап испытания	Ускорение, м/с²	Скорость, км/ч	Продолжительность каждого режима работы, с		Суммарное время, с	Используемая передача при наличии механической коробки передач
					Составная часть режима	Режим работы в целом		
1.	Холостой ход	1	–	–	11	11	11	6 с *РМ* + 5 с K_1*
2.	Разгон	2	1,04	0 – 15	4	4	15	1
3.	Постоянная скорость	3	–	15	8	8	23	1
4.	Замедление		– 0,69	15 – 10	2		25	1
5.	Замедление с выключенным сцеплением	4	– 0,92	10 – 0	3	5	28	K_1
6.	Холостой ход	5	–	–	21	21	49	6 с *РМ* + 5 с K_1
7.	Разгон		0,83	0 – 15	5		54	1
8.	Переключение передач	6	–	–	2	12	56	
9.	Разгон		0,94	15 – 32	5		61	2
10.	Постоянная скорость	7	–	32	24	24	85	2
11.	Замедление		– 0,75	32 – 10	8		93	2
12.	Замедление с выключенным сцеплением	8	– 0,92	10 – 0	3	11	96	K_2
13.	Холостой ход	9	–	–	21	21	117	16 с *РМ* + 5 с K_1
14.	Разгон		0,83	0 – 15	5		122	1
15.	Переключение передач		–	–	2		124	
16.	Разгон	10	0,62	15 – 35	9	26	133	2
17.	Переключение передач		–	–	2		135	
18.	Разгон		0,52	35 – 50	8		143	3
19.	Постоянная скорость	11	–	50	12	12	155	3
20.	Замедление	12	– 0,52	50 – 35	8	8	163	3
21.	Постоянная скорость	13	–	35	13	13	176	3
22.	Переключение передач		–	–	2		178	
23.	Замедление		– 0,86	32 – 10	7	12	185	2
24.	Замедление с выключенным сцеплением	14	– 0,92	10 – 0	3		188	K_2
25.	Холостой ход	15	–	–	7	7	195	7 с *РМ*

Примечание. *РМ* – рычаг перемены передач в нейтральном положении при включенном сцеплении K_1K_2 – включена первая или вторая передача, сцепление выключено.

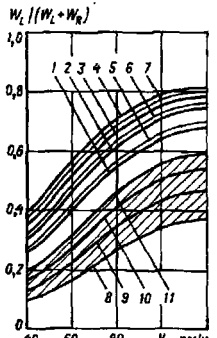


Рис. 3.11. Доля силы сопротивления воздуха W_L в суммарном внешнем сопротивлении $W_L + W_R$ для автомобилей-фургонов (*1–4*), легковых автомобилей (*5–7*) и грузовых автомобилей грузоподъемностью 32 т (*8–11*) [3.7]:
1 – $c_W = 0{,}3$; *2* – $c_W = 0{,}4$; *3* – $c_W = 0{,}5$; *4* – $c_W = 0{,}6$; *5* – $c_W = 0{,}3$; *6* – $c_W = 0{,}4$; *7* – $c_W = 0{,}5$; *8* – $c_W = 0{,}4$; *9* – $c_W = 0{,}6$; *10* – $c_W = 0{,}8$; *11* – $c_W = 1$

воздуха W_L к общему сопротивлению движению $(W_L + W_R)$ в зависимости от скорости движения V_F; параметром семейства кривых является коэффициент c_W. Рассматриваются легковые автомобили, автомобили-фургоны и тяжелые грузовые автомобили. Уменьшение сопротивления качению имеет значение прежде всего для движения с малыми скоростями (городское движение) и для тяжелых автомобилей. Переход от диагональных шин к радиальным способствовал существенному прогрессу в снижении сопротивления качению.

3.5.2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМОБИЛЕЙ К ПОСЛЕДУЮЩИМ РАССУЖДЕНИЯМ О РАСХОДЕ ТОПЛИВА

Потенциал снижения расхода топлива, как видно из рис. 3.11, сильно зависит от класса автомобиля. Нижеследующие исследования проведены для четырех основных классов легковых автомобилей. Классы автомобилей определены в табл. 3.3. О тяжелых грузовиках речь пойдет в п. 8, автомобили-фургоны обсуждаются в п. 3.5.7.

При составлении табл. 3.3 самые малые автомобили и автомобили "люкс", а также спортивные автомобили и автомобили типа "купе" не принимались во внимание, их доля на рынке легковых автомобилей весьма мала. Приведенные в таблице классы автомобилей от А до Г охватывают примерно 95 % всех допущенных к эксплуатации легковых автомобилей в ФРГ, т.е. они хорошо отражают рынок легковых автомобилей. Для наглядности в каждом классе названы типичные автомобили. Выбранная здесь классификация отличается от приведенной в п. 4.5.4.

В каждом из четырех классов был определен "условный" автомобиль, имеющий усредненные значения основных параметров автомобилей данного класса (см. работу Янссена, Эммельманна [3.4]). Параметры "условных" автомобилей в таблице выделены рамкой. Чтобы лучше охватить имеющийся материал, для "условного" автомобиля были применены не средние значения параметров, а значения, изменяющиеся на постоянную величину при переходе от одного класса автомобилей к следу-

3.3. Определение типовых классов автомобилей по данным работы [3.4]

$G = G_{DIN}$ снаряж. + 136 кг	G, кг	P, кВт	P/G, Вт/кг	F, м^2	c_W –	$c_W F$ м^2
(А) *VW* Поло	821	29	35			
Рено *R5TL*	911	32	35			
Форд Фиеста *L*	859	39	45			
Малые автомобили	825	33	40	1,80	0,46	0,83
(Б) *VW* Пассат	996	40	40			
Опель Аскона	1031	55	53			
Форд Таунус	1156	50	43			
Средний класс	1075	54	50	1,90	0,46	0,87
(В) Ауди 100	1221	65	53			
Опель Рекорд	1231	66	54			
Форд Гранада	1366	92	67			
Верхний средний класс	1325	80	60	2,00	0,46	0,92
(Г) Мерседес 230	1486	80	54			
BMW 2500	1496	110	74			
Пежо 604	1591	100	63			
Комфортабельные автомобили	1575	110	70	2,10	0,46	0,97

ющему. Для веса автомобиля G такое значение, например, составляет 250 кг при переходе от класса к классу.

При установлении мощности двигателя исходили из периодического изменения по классам удельной мощности двигателя P/G, т.е. мощности двигателя, отнесенной к массе автомобиля. Для класса А была определена *удельная мощность* 40 Вт/кг, которая в классе комфортабельных автомобилей Г возросла до 70 Вт/кг. Это хорошо отражает тот факт, что большие автомобили имеют более мощные двигатели, т.е. обладают лучшей динамикой разгона.

Третий влияющий фактор – сопротивление воздуха. Для характеристики сопротивления воздуха движению автомобиля необходима информация о размерах автомобиля, выраженная в виде площади проекции автомобиля на плоскость, перпендикулярную к его продольной оси, и информация о форме автомобиля, выраженная коэффициентом аэродинамического сопротивления c_W. Площадь лобового сопротивления F изменяется от 1,8 м^2 для самого малого из рассматриваемых автомобилей до 2,1 м^2 для самого большого.

В качестве коэффициента аэродинамического сопротивления для всех классов за основу было взято значение c_W = 0,46 (уровень 1978 г.), это среднее из значений, полученных при испытаниях в большой аэродинамической трубе ф. "Фольксваген" девяносто одного полностью

оснащенного серийного легкового автомобиля (см. рис. 1.44). При рассмотрении вопросов расхода топлива важное значение имеет произведение площади F на коэффициент сопротивления – $c_W F$, которое изменяется от 0,83 м² до 0,97 м²*. Самый большой из рассматриваемых автомобилей имеет большее на 17 % значение аэродинамического сопротивления по сравнению с самым малым автомобилем.

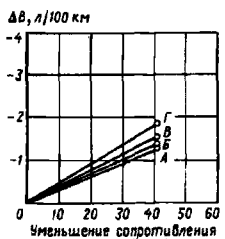
3.5.3. СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Влияние уменьшения силы сопротивления воздуха на расход топлива по циклу *ECE*75 показано на рис. 3.12. Для расхода, конечно, не имеет значения, уменьшилась ли сила сопротивления воздуха за счет уменьшения площади F или за счет коэффициента c_W. Предел возможного уменьшения аэродинамического сопротивления на 41 % установлен с учетом следующих соображений:

коффициент аэродинамического сопротивления c_W можно снизить со значения $c_W = 0{,}46$ до $c_W = 0{,}30$, т.е. на 35 %;

площадь лобового сопротивления во всех классах можно уменьшить на 10 %, но это связано с ухудшением комфорта.

Как показано на рис. 3.12, уменьшая силу сопротивления воздуха, можно получить существенное снижение расхода топлива. В предельном случае это уменьшение расхода составляет примерно 1,2 л/100 км для класса малых автомобилей А и 1,8 л/100 км для класса комфортабельных автомобилей Г. Если на автомобиль установлен дизельный двигатель, то снижение может быть еще весомее вследствие лучшей характеристики в области частичных нагрузок.

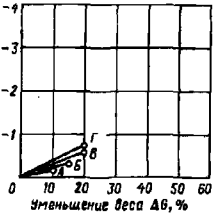


$c_W F$, м²	$\Delta(c_W F)$, %	$(c_W F)_{экв}$, м²
Малые автомобили		
0,83	-41	0,49
Средний класс		
0,87	-41	0,51
Верхний средний класс		
0,92	-41	0,54
Комфортабельные автомобили		
0,97	-41	0,57

Рис. 3.12. Снижение расхода топлива при движении по циклу *ECE*75 в зависимости от уменьшения силы сопротивления воздуха для различных классов автомобилей [3.4] (с двигателями Отто)

---

* В отечественной литературе этот показатель называют "фактором обтекаемости". Он характеризует аэродинамическое сопротивление автомобиля. – *Прим. ред. пер.*



G, кг	ΔG %	ΔG кг	G_{min}, кг
Малые автомобили			
825	-10	-83	742
Средний класс			
1075	-15	-161	914
Верхний средний класс			
1325	-20	-265	1060
Комфортабельные автомобили			
1575	-20	-315	1260

$G = G_{BIN\ снаряж} + 136$ кг

Рис. 3.13. Снижение расхода топлива при движении по циклу ЕЭС 75 в зависимости от уменьшения веса автомобиля для различных классов автомобилей [3.4] (с двигателями Отто)

3.5.4. ВЛИЯНИЕ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА, ВЕСА* И МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ

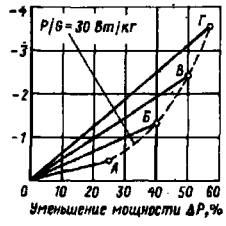
На рис. 3.13 показана зависимость уменьшения расхода топлива ΔB от уменьшения веса автомобиля ΔG. Не останавливаясь подробно на технических возможностях реализации уменьшения веса, нужно отметить, что европейская автомобильная промышленность по мере сил стремится к созданию облегченной конструкции автомобиля. Но дальнейшее снижение веса с учетом выполнения требований безопасности из-за внедрения новых, более дорогих, материалов ведет к увеличению затрат на изготовление автомобиля.

Как видно из рис. 3.13, в классе А за счет 10 %-ного уменьшения веса можно снизить расход топлива всего лишь на 0,2 л/100 км. Даже в классе комфортабельных автомобилей Г, в котором вес автомобиля можно уменьшить на 20 % (что составляет 315 кг), уменьшение расхода топлива составляет всего 0,8 л/100 км. Эти значения существенно меньше приведенных в американских публикациях. Связано это, во-первых, с тем, что потенциал уменьшения веса для так называемых *Full – Size – Cars*** существенно выше, чем указано на рис. 3.13, и, во-вторых, приводимые значения часто относятся к городскому циклу, при котором влияние веса на расход гораздо сильнее, чем при смешанном движении в реальных условиях. Кроме того, нередко пренебрегают тем, что мощность, используемая для разгона, при последующих замедлениях в форме накопленной кинетической энергии может использоваться для преодоления силы сопротивления воздуха и силы сопротивления качению, если она не преобразована в теплоту в процессе торможения.

---

* В отечественной литературе в данном случае используется термин "масса". – *Прим. ред. пер.*

** Полноразмерный автомобиль (англ.).



P_1, кВт	ΔP %	ΔP кВт	P_{min}, кВт
Малые автомобили			
33	-25	-8	25
Средний класс			
54	-40	-22	32
Верхний средний класс			
80	-50	-40	40
Комфортабельные автомобили			
110	-57	-63	47

Рис. 3.14. Снижение расхода топлива при движении по циклу Е"75 в зависимости от уменьшения номинальной мощности двигателя для различных классов автомобилей [3.4] (с двигателями Отто)

Возможность снижения расхода топлива за счет установки на автомобиль двигателей с меньшей мощностью показана на рис. 3.14. Мощность двигателей для всех классов автомобилей была снижена до получения удельной мощности 30 Вт/кг. Это значение было принято в качестве нижнего предельного значения с учетом транспортного потока в городах. Для сравнения можно назвать некоторые автомобили со столь малым значением удельной мощности: "Мерседес 200" с дизельным двигателем имеет значение 29 Вт/кг; "Фольксваген Жук" при установке на него самого маломощного двигателя 34 л.с. (25 кВт) имел удельную мощность 28 Вт/кг.

В классе А малых автомобилей возможно относительно небольшое уменьшение мощности двигателя, примерно на 25 %, чтобы получить указанное предельное значение 30 Вт/кг. Снижение расхода топлива в этом случае составит 0,5 л/100 км. С учетом существенно больших потенциальных возможностей уменьшения мощности в остальных классах автомобилей получаются более высокие значения снижения расходов топлива, в классе Г, например, до 3,5 л/100 км.

В отличие от рассмотренного выше уменьшения веса мощность можно уменьшить без каких бы то ни было трудностей, при этом одновременно несколько снизились бы затраты на изготовление автомобиля. Но готов ли покупатель добровольно отказаться от привычных для него ездовых свойств — это весьма сомнительно. Так, например, для комфортабельного автомобиля класса Г предлагаемое уменьшение мощности привело бы к увеличению времени разгона от 0 до 100 км/ч с 11 с до 21 с. Максимальная скорость уменьшилась бы со 167 до 138 км/ч.

Приведенный пример показывает, что уменьшение мощности двигателя без одновременного уменьшения веса автомобиля и силы сопротивления воздуха катастрофически изменит ездовые качества.

Обобщающее сравнение рассмотренных выше мероприятий по снижению расхода топлива при установке на автомобили обычного двигате-

Рис. 3.15. Сравнение различных мероприятий, направленных на уменьшение расхода топлива по циклу *ЕЭ75* [3.4]. Классификация автомобилей в соответствии с табл. 3.3

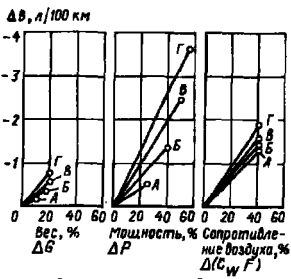
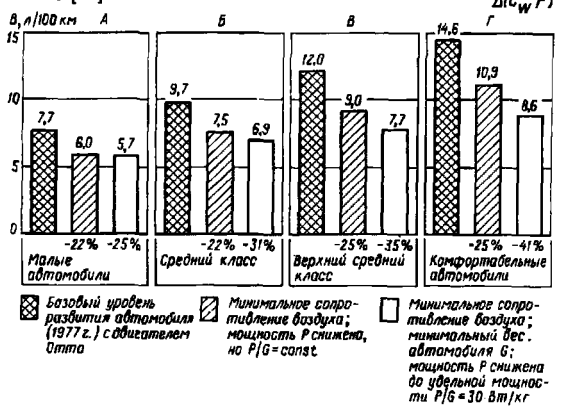


Рис. 3.16. Расход топлива по циклу *ЕЭ75* при реализации предельного уменьшения силы сопротивления воздуха, веса автомобиля и номинальной мощности двигателя для автомобилей различных классов, оснащенных двигателем Отто [3.4]



ля Отто приведено на рис. 3.15. Это сравнение наглядно показывает, что дифференцирование автомобилей по классам целесообразно.

Какие улучшения в отношении уменьшения расхода топлива возможны за счет комбинирования рассмотренных отдельных мероприятий показывает рис. 3.16 (для автомобилей с двигателями Отто). Базовые автомобили (на рис. 3.16 столбцы с надписью "базовый уровень") характеризуются числовыми значениями табл. 3.3, выделенными рамкой. Эти базовые автомобили (столбцы диаграммы окрашены в темный цвет) сравниваются с двумя другими автомобилями, оптимизированными в отношении расхода топлива разными способами.

1. (Столбики заштрихованы):

   сопротивление воздуха уменьшено до предельного значения согласно рис. 3.12;

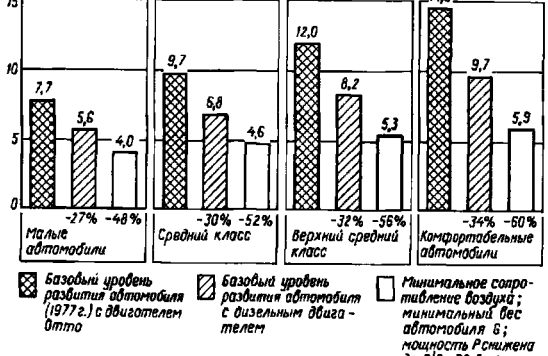


Рис. 3.17. Расход топлива по циклу *E*'75 при реализации предельного уменьшения силы сопротивления воздуха, веса автомобиля и номинальной мощности двигателя для автомобилей различных классов, оснащенных дизельным двигателем [3.4]

вес уменьшен до возможного предельного значения согласно рис. 3.13;

мощность двигателя уменьшена на такую величину, чтобы P/G оставалось неизменным, т.е. $P/G = \text{const}$.

2. (Столбики диаграммы не заштрихованы):

Удельная мощность уменьшена до 30 Вт/кг, остальное как в пункте 1.

Как видно из диаграммы, если удастся реализовать мероприятия, перечисленные в пункте 2, то уменьшение расхода топлива составит от 25 до 41 % в зависимости от класса автомобилей.

Аналогичное сравнение проведено на рис. 3.17 для автомобилей с дизельными двигателями. Установка на автомобиль дизельного двигателя без каких-либо других изменений снижает расход топлива от 27 % для класса А малых автомобилей до 34 % для класса Г комфортабельных автомобилей. Если автомобиль оптимизировать за счет уменьшения аэродинамического сопротивления, веса и мощности двигателя, то расход топлива снизится на 48 – 60 % в зависимости от класса автомобилей. Установка дизельного двигателя связана, однако, с заметным увеличением затрат.

Снижение расходов топлива по циклу *E*'75, достигаемое только за счет уменьшения силы сопротивления воздуха при весе автомобиля примерно $G = 1000$ кг, можно вычислить с помощью следующих уравнений:

двигатель Отто

$$\Delta B/B_0 = 0{,}35\ (\Delta c_W/c_{W0}); \qquad (3.17)$$

дизельный двигатель

$$\Delta B/B_0 = 0{,}40\ (\Delta c_W/c_{W_0})\ . \qquad (3.18)$$

3.5.5. МАКСИМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ

Максимальная скорость при оценке мощностных показателей автомобиля в сравнении с расходом топлива в настоящее время не столь важна, как прежде. При разработке новых автомобилей снижение силы сопротивления воздуха используется не для увеличения максимальной скорости (при постоянной мощности двигателя), а для получения меньшего расхода топлива при сохранении неизменного значения максимальной скорости за счет использования двигателя меньшей мощности.

Максимальная скорость и сила сопротивления воздуха связаны между собой следующим выражением:

$$V_{max} = 100\sqrt[3]{N/(16{,}5\ c_W F)}\ . \qquad (3.19)$$

В этой формуле мощность N нужно подставлять в кВт.

На рис. 3.18 графически представлена зависимость, выраженная уравнением (3.19). Соображения по поводу эффективности снижения расхода топлива за счет уменьшения силы сопротивления воздуха высказаны Фиала [3.5] еще в 1956 г.

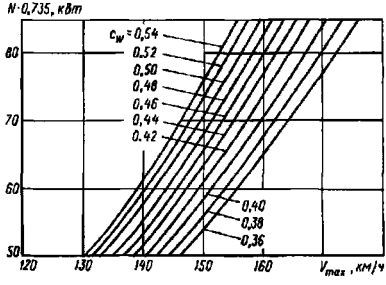


Рис. 3.18. Мощности, необходимые для достижения предварительно заданных максимальных скоростей при различных значениях коэффициента сопротивления воздуха (F = 1,77 м²; G = 1060 кг)

3.5.6. ОПТИМАЛЬНАЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА КОНЦЕПЦИЯ АВТОМОБИЛЯ

На сегодняшний день автомобилестроителей никто не вынуждает обеспечивать минимальный расход топлива за счет отказа от высокой мощности двигателя и от ездового комфорта. Задача проектов будущих автомобилей заключается в том, чтобы, по меньшей мере, сохранить достигнутый уровень указанных выше свойств при одновременном снижении расхода топлива. Уменьшение мощности двигателя может осуществляться только тогда, когда можно компенсировать его отрицательное воздействие на динамические показатели за счет уменьшения силы сопротивления воздуха и веса.

Если поставлена задача снизить расход топлива и при этом необходимо выполнить требование по сохранению максимальной скорости и времени разгона, то рекомендуется следующий порядок действий, осуществляемый в три этапа.

1. Уменьшение аэродинамического сопротивления.

2. Уменьшение мощности двигателя (для того чтобы исключить повышение максимальной скорости вследствие проведения 1-го этапа работ, однако при неизменном весе автомобиля время разгона следовало бы уменьшить).

3. Уменьшение веса автомобиля (чтобы компенсировать увеличение времени разгона вследствие проведения 2-го этапа работ).

Основываясь на соотношении сил сопротивления движению (см. п. 3.2), можно констатировать, что процентное изменение силы сопротивления воздуха на величину x требует осуществить следующее изменение мощности двигателя и веса:

x, % – сила сопротивления воздуха;

$0{,}8x$, % – мощность двигателя;

$0{,}8x$, % – вес автомобиля.

Тогда снижение расхода топлива может быть определено по следующему уравнению:

$$-\Delta B = -x(\partial B/\partial c_W) - 0{,}8x\,(\partial B/\partial P) - 0{,}8x\,(\partial B/\partial G). \qquad (3.20)$$

В то время как снижение мощности двигателя не представляет больших трудностей (например, исключение обогащения смеси при полной нагрузке, т.е. без механических изменений), уменьшение веса обусловлено скорее технологическими пределами. Следовательно, вовсе не всякое уменьшение силы сопротивления воздуха по указанному выше способу можно компенсировать адекватным уменьшением веса. Это означает, что при достижении нижнего предельного значения веса дальнейшее уменьшение мощности двигателя без ухудшения динамических показателей невозможно.

Как уже указывалось в п. 3.5.4, установлены следующие пределы уменьшения веса: 10 % для класса автомобилей А; 15 % для класса автомобилей Б; 20 % для классов В и Г, а это соответствует тому, что снижение силы сопротивления воздуха, позволяющее снизить мощность

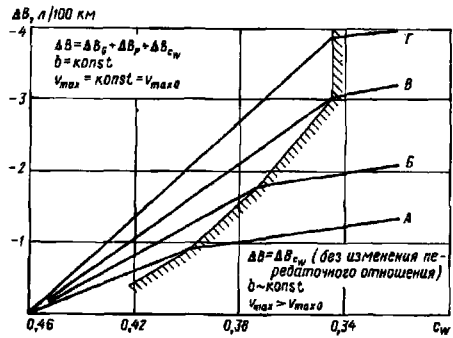


Рис. 3.19. Концепция автомобиля, оптимальная с точки зрения расхода топлива

двигателя, соответственно составит 8, 12 и 16 % в зависимости от рассматриваемого класса автомобилей.

Дальнейшее снижение расхода топлива возможно только за счет уменьшения силы сопротивления воздуха при неизменных значениях мощности двигателя и веса автомобиля, поэтому уравнение (3.20) примет вид:

$$-\Delta B = -x(\partial B/\partial c_W). \qquad (3.21)$$

Эти зависимости представлены на рис. 3.19 для автомобиля с базовым средним значением коэффициента $c_W = 0{,}46$.

Уменьшение коэффициента сопротивления воздуха до $c_W = 0{,}39$ (для класса А), $c_W = 0{,}37$ (для класса Б), $c_W = 0{,}35$ (для класса В и Г) можно считать оптимальным в том случае, если для рассматриваемых "условных" ("базовых") автомобилей стоит задача сохранения динамических показателей неизменными по сравнению с сегодняшним уровнем. Дальнейшее уменьшение коэффициента сопротивления воздуха c_W за линию, отмеченную штрихами, ведет к уменьшению расхода топлива. Однако эффективность снижения аэродинамического сопротивления, если вес и мощность не изменяются, существенно хуже (см. уравнение (3.20)).

Пределы изменения коэффициента c_W, показанные на рис. 3.19, конечно же, не определены однозначно, они могут быть иными для любого проекта нового автомобиля в соответствии с уровнем развития технологии и в зависимости от базового значения коэффициента сопротивления воздуха.

Если наряду с описанными мероприятиями с помощью вновь разра-

батываемых бесступенчатых коробок передач удастся сместить соответствующие точки нагрузки в области с оптимальными удельными расходами, то в будущем можно ожидать еще более весомого уменьшения расхода топлива легковыми автомобилями.

3.5.7. РАСХОД ТОПЛИВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ-ФУРГОНОВ

Влияние силы сопротивления воздуха на расход топлива для автомобилей-фургонов подробно исследовано Гухо и Эммельманном [3.7]. В таблице 3.4 представлены основные параметры рассматриваемого автомобиля; для сравнения значения параметров приведены для двух вариантов – с двигателем Отто и дизельным двигателем. Расход топлива для такого автомобиля (при неизменном общем передаточном числе трансмиссии для различных значений c_W) в зависимости от скорости движения показан на рис. 3.20.

Параметром семейства кривых является коэффициент сопротивления воздуха c_W; все кривые построены для "половинной нагрузки", т.е. для нагрузки, предписываемой для определения расхода топлива по стандарту *DIN*. Результаты расчета хорошо совпадают с данными измерений, как это показано Гухо, Янссеном и Шварцом [3.6] для легковых автомобилей. Из графиков хорошо видно, что при установке дизельного двигателя получаемые значения расходов топлива ниже, и прежде всего в области малых частичных нагрузок. Сопротивление воздуха оказы-

3.4. Параметры автомобиля-фургона, используемые при расчете расхода топлива, по данным работы [3.7]

Наименование	Двигатель Отто	Дизельный двигатель
Площадь лобового сопротивления F, м²	4	
Снаряженный вес G_L, Н	16000	
Допустимый общий вес G_V, Н	30000	
Шины	195R14C	
Коэффициент полезного действия трансмиссии η	0,9	
Мощность двигателя N, кВт	50	
Номинальная частота вращения двигателя n_{Nenn}, мин⁻¹	4300	3600
Рабочий объем двигателя V_H, см³	2000	2700
Общее передаточное число трансмиссии в исходном состоянии:		
i_1	24,39	18,32
i_2	12,31	9,24
i_3	7,61	5,39
i_4	4,87	3,67
Коэффициент сопротивления качению f_R	От 0,0130 до 0,0145 в зависимости от скорости движения	

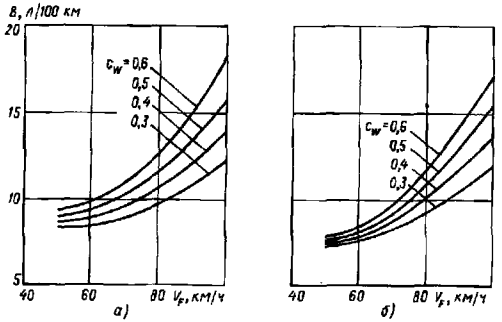


Рис. 3.20. Расход топлива автомобиля-фургона при движении с постоянной скоростью и при различных значениях коэффициента сопротивления воздуха без согласования передач [3.4]:
а – для автомобиля, оснащенного двигателем Отто, общее передаточное число i = = 4,87; *б* – для автомобиля, оснащенного дизельным двигателем, общее передаточное число i = 4,15

вает заметное влияние на расход топлива; в случае установки двигателя Отто при установившемся движении это влияние выражено более четко, чем в случае установки дизельного двигателя. При согласовании со значением c_W передаточных чисел трансмиссии снижение силы сопротивления воздуха ведет к еще большему уменьшению расходов топлива.

В качестве измерительного цикла для оценки расхода топлива автомобилями-фургонами использовалась программа езды, представляющая собой комбинацию из 45 % езды по шоссе (*Highway Cycle*) и 55 % городского движения (*City-Cycle*). Выбор такого цикла обосновывается тем, что автомобили-фургоны движутся в тех же условиях, что и легковые автомобили, и хорошо вписываются в транспортный поток; в зависимости от назначения они эксплуатируются в городском и пригородном сообщении. Данные о доле пробега таких автомобилей по автобану в их суммарном пробеге отсутствуют, поэтому движение по автобану не учитывается. По этой же причине (см. п. 3.2.2) не принимается во внимание движение на подъемах.

Расход топлива для такого цикла показан на рис. 3.21 как функция коэффициента сопротивления c_W. Исходным значением для рассмотрения является среднее значение c_W = 0,46, определенное Гухо и Эммельманном [3.7] при измерениях, проведенных для 17 автомобилей-фургонов, т.е. оно совпадает со значением для легковых автомобилей (см. также рис. 1.44). Для этих автомобилей общее передаточное число трансмиссии на прямой передаче согласовано таким образом, что при "половинной нагрузке" максимальная скорость автомобиля достига-

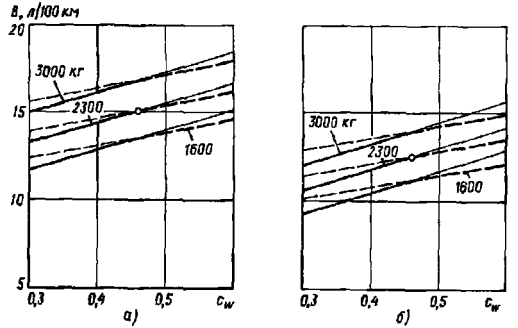


Рис. 3.21. Расход топлива автомобилей-фургонов при движении по комбинированному циклу (*"Combined Fuel Economy"*, см. рис. 3.10 вверху слева) [3.7]:
а – для автомобиля, оснащенного двигателем Отто; *б* – для автомобиля, оснащенного дизельным двигателем

ется при частоте вращения двигателя, равной номинальной частоте плюс 400 мин$^{-1}$. Если при снижении силы сопротивления воздуха осуществлено согласование передаточных чисел трансмиссии, то имеет место изменение расхода, показанное на графике сплошной жирной линией. Снижение расхода топлива в этом случае примерно на 50 % выше, чем в случае, когда передаточные числа трансмиссии не согласованы (тонкая штриховая линия). Так как автомобили-фургоны имеют существенно меньшую удельную мощность (отнесенную к площади лобового сопротивления и весу автомобиля) по сравнению с легковыми автомобилями, то для них точки нагрузки, предварительно заданные в соответствии с циклом движения, в поле удельного расхода топлива смещаются к кривой полной нагрузки, где удельные расходы меньше. Это ведет к *относительно меньшим абсолютным расходам.* В этой области характеристики рост удельного расхода при уменьшенной нагрузке выражен не так сильно, как при более низкой частичной нагрузке, потому что влияние уменьшения силы сопротивления воздуха на абсолютный расход ослабляется из-за увеличивающегося удельного расхода меньше. Таким образом, эффективность снижения аэродинамического сопротивления для автомобилей-фургонов выше, чем для легковых.

Эффективность снижения коэффициента c_W для расхода топлива B в случае согласованных передаточных чисел трансмиссии и при "половинной нагрузке" составляет:

для двигателя Отто

$$\Delta B/B_0 \approx 0{,}40\ (\Delta c_W/c_{W0}); \qquad (3.20)$$

для дизельного двигателя

$$\Delta B/B_0 = 0{,}50\ (\Delta c_W/c_{W0}). \qquad (3.21)$$

В этих формулах B_0 и c_{W0} – значения расхода топлива и коэффициента сопротивления воздуха до улучшения значения коэффициента на величину Δc_W. Эффективность снижения коэффициента c_W для автомобилей с дизельным двигателем выше, чем для автомобилей с двигателем Отто. Это объясняется тем, что по предлагаемому циклу автомобили эксплуатируются в основном в этой области характеристики двигателя, где различие между удельным расходом (имеется в виду различие между абсолютным значением удельного расхода и его градиентом при уменьшении нагрузки) для автомобилей с двигателем Отто и с дизельным двигателем выражено особенно явно.

Если снизить значение коэффициента c_W в среднем со значения $c_W = 0{,}46$ до $c_W = 0{,}30$, то в рассматриваемом примере это привело бы к уменьшению расхода топлива для автомобилей с двигателем Отто на 14 %, а с дизельным двигателем на 17 %.

3.6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Истощение ресурсов земного шара ведет к тому, что цены на топливо постоянно растут. Альтернативные виды топлива на основе угля или спирта мало изменяют ситуацию, они лишь несколько демпфируют увеличение цены на бензин. Малый расход топлива становится важным аргументом при сбыте продукции автомобилестроения.

Автомобили, имеющие меньший расход топлива, в изготовлении будут дороже современных автомобилей. Дальнейшее развитие облегченных конструкций приведет к внедрению более дорогих материалов; требования аэродинамики, как например, более выгнутые стекла или приклеивание стекол без уплотнителей, также ведут к увеличению производственных затрат.

При решении вопроса о том, какие производственные затраты приемлемы для достижения уменьшенного расхода топлива и как прореагирует на это рынок сбыта, необходимо произвести ориентированную на потребителя калькуляцию затрат и оценку их эффективности. Имеют смысл только те конструктивные решения, которые делают автомобиль экономичным в руках потребителя.

3.7. ОБОЗНАЧЕНИЯ

W_L – сила сопротивления воздуха;
T – тангенциальная сила;
W_R – сила сопротивления качению;
W_S – сила сопротивления подъему;
W_B – сила сопротивления разгону;
Z – сила тяги;
G_N – нормальная сила;

G – вес;
m – масса;
V_F – скорость движения автомобиля;
V_∞ – результирующая скорость потока;
V_S – скорость бокового ветра;
$\dot{V}$ – ускорение;
c_W – коэффициент сопротивления воздуха;
c_T – коэффициент тангенциальной силы;
F – *площадь лобового сопротивления*;
c_W^* – средний коэффициент сопротивления воздуха с учетом бокового ветра (см. рис. 3.1);
f_R – коэффициент сопротивления качению;
P_{Mot} – мощность двигателя;
P_{Nenn} – номинальная мощность двигателя;
B_L – расход топлива на холостом ходу;
B_E – количество топлива, впрыскиваемое ускорительным насосом;
n – число оборотов;
n_{Nenn} – номинальная частота вращения двигателя;
b_S – удельный расход топлива;
PME – среднее эффективное давление;
η_G – коэффициент полезного действия коробки передач;
η_A – коэффициент полезного действия главной передачи;
ρ – плотность воздуха;
δ – угол между векторами скорости автомобиля и бокового ветра;
β – *результирующий угол натекания потока (угол скоса потока)*;
φ – угол подъема;
e_i – коэффициент, учитывающий влияние инерции вращающихся масс;
N – мощность двигателя (см. уравнение (3.19)*);
$i_{КП}$ – передаточное число коробки передач (КП), рис. 3.4*;
$i_{транс}$ – общее передаточное число трансмиссии, рис. 3.4*;
$i^* = i_{транс} / i_{транс}\,(j+1)$, рис. 3.4*;
j – соответствующий номер передачи КП*.

4. СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА ПРИ ДВИЖЕНИИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Вольф-Генрих Гухо

4.1. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ В РЯДУ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДРУГИХ ТЕЛ

Вопрос о сопротивлении воздуха движению автомобиля до сегодняшнего дня нельзя считать закрытым. И не только потому, что отсутствуют теоретические методы расчета силы аэродинамического сопротивления, но и из-за того, что накопленный большой объем экспериментальных данных должным образом не систематизирован и не позволяет провести количественную оценку аэродинамического сопротивления тела заданной формы. Такая количественная оценка силы сопротивления воздуха необходима, чтобы использовать имеющийся потенциал (см. п.1,

* В оригинале в перечне обозначений отсутствует. – *Прим. перев.*

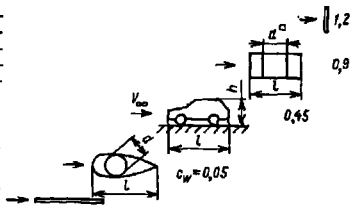


Рис. 4.1. Сравнение коэффициента аэродинамического сопротивления легкового автомобиля с коэффициентом аэродинамического сопротивления других тел

рис. 1.45) для снижения аэродинамического сопротивления в процессе разработки автомобиля массового пользования.

Почему так трудно провести оценку аэродинамического сопротивления легкового автомобиля в указанном выше смысле, станет понятно, если расположить легковой автомобиль по его аэродинамическому сопротивлению в ряду других известных тел. Это сделано на рис. 4.1. Сравниваются тела с одинаковым отношением длины к высоте l/h или длины к диаметру l/d (это отношение иногда называют коэффициентом полноты тела); фактор близости основания (т.е. поверхности дороги) при таком рассмотрении может не учитываться.

Аэродинамическое сопротивление тела вращения ($c_W \approx 0{,}05$) состоит преимущественно из сопротивления трения; предельный случай чистого сопротивления трения имеет место при продольном обтекании плоской пластины. Для этого вида сопротивления имеется хорошая теоретическая база, и в п. 2.3.3 для этого вида сопротивления приведены важнейшие выводы. Влияние вязкости воздуха заметно только в очень тонкой, прилежащей к стенкам зоне, называемой пограничным слоем. Основываясь на экспериментально определенных законах распределения касательных напряжений вдоль стенок, можно рассчитать характеристики этого пограничного слоя, например его толщину, касательное напряжение вдоль стенки, место отрыва, для этого лишь необходимо, чтобы был предварительно рассчитан внешний поток, который в данном случае рассматривается как идеальный, т.е. не обладающий вязкостью. Таким образом, можно провести оптимизацию, например, тела вращения, т.е. для тела с предварительно заданным отношением l/h и предварительно заданным объемом можно рассчитать форму, обеспечивающую минимальное аэродинамическое сопротивление (подробности изложены Шлихтингом в [4.1]). В дальнейшем можно, используя теоретические преобразования, пересчитать полученные для этого тела результаты применительно к телу, напоминающему автомобиль. Однако с уменьшением коэффициента полноты l/d сопоставимость теоретических расчетов с экспериментальными данными ухудшается. Причина этого заключается в отличие давлений, рассчитанных теоретически и имеющих место в реальных условиях, в области отрываемого потока (базовое давление*).

Аэродинамическое сопротивление прямоугольного параллелепипеда,

* В отечественной литературе этот параметр часто называют донным давлением. – *Прим. ред. пер.*

обтекаемого продольным потоком ($c_W \approx 0{,}9$) является в основном сопротивлением давления, см. п. 2.3.3; в чистой форме этот вид сопротивления имеет место при обтекании плоской пластины, расположенной поперечно к потоку. Но даже в этом простом случае – простом в смысле того, что место отрыва однозначно определено острыми кромками – сопротивление давления в интересующем нас случае турбулентного потока в вихревом следе за пластиной не поддается расчету. Обратное действие области возмущенного потока, в которой существенно влияние трения, на идеальный, не обладающий вязкостью внешний поток гораздо сильнее, чем в случае пограничного слоя. Общепризнанной модели для вихревого следа за телом, несмотря на интенсивные работы по ее созданию (см. диссертацию Таннера [4.2] и указанные в ней работы), до сих пор нет. Итеративное рассмотрение идеального, не обладающего вязкостью, а затем реального, обладающего вязкостью, потока – как в случае пограничного слоя – невозможно. Решение полных уравнений движения, так называемых уравнений Навье-Стокса, возможно только для ламинарного потока, когда закон изменения касательных напряжений известен; в случае турбулентного потока из-за отсутствия подходящего закона изменения касательных напряжений, не говоря уже о проблемах вычисления, такого решения нет (см. работу Хирта и Рэмшоу [4.3]).

Легковой автомобиль, несмотря на меньшее по сравнению с параллелепипедом аэродинамическое сопротивление, по механике потока ближе к параллелепипеду и сильно удален от тела вращения. Как видно из приведенных ранее рис. 1.1 и рис. 1.2 и как будет показано в двух последующих разделах, обтекание автомобиля сопровождается отрывами, а его аэродинамическое сопротивление является преимущественно сопротивлением давления.

Так как аэродинамическое сопротивление не поддается расчету, то были предприняты попытки каталогизировать его в зависимости от основных параметров формы (см. п. 4.4). Можно сказать, что эти усилия до сегодняшнего дня безуспешны. Число параметров, описывающих геометрию легкового автомобиля, слишком велико, и отдельные поля потоков находятся в весьма сложном взаимодействии друг с другом.

Таким образом, в п.4 физическая суть процесса обтекания рассматривается только с качественной стороны; кроме того, приведен ряд выводов, которые относятся к конкретным случаям, и обобщать их необходимо с большой осторожностью. С учетом этих аспектов в п. 4 предлагается метод проведения работ, который является ничем иным, как стратегией опробирования. Оценка направлений развития форм будущего, обеспечивающих малое аэродинамическое сопротивление, завершает 4-ю главу, посвященную изучению силового взаимодействия легкового автомобиля с обтекающим его потоком воздуха.

4.2. ПОЛЕ ПОТОКА ВОКРУГ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Как правило, набегающий на автомобиль поток несимметричен. По скорости движения V_F и скорости естественного ветра v_S можно получить скорость набегающего потока V_∞, вектор которой располагается под углом β (угол скоса потока) к направлению движения (рис. 4.2). Для упрощения далее речь идет лишь о симметричном обтекании; влияние бокового ветра на аэродинамическое сопротивление рассматривается в п. 4.5.2. Несимметричное поле обтекания подробно описано в п. 5 в связи с рассмотрением вопроса об аэродинамической устойчивости автомобиля.

В целом поле потока вокруг автомобиля изучено недостаточно. Поэтому картину обтекания автомобиля можно представить только благодаря суммированию отдельных сведений по этому вопросу. Они получены в результате измерений скоростей потока, распределения давления и наблюдения обтекания как на поверхности автомобиля, так и в прилегающем к нему пространстве; подробнее об этом рассказано в п. 6.

Полученное таким образом поле потока для легкового автомобиля представлено на рис. 4.3 и 4.4. Поле потока характеризуется многочисленными отрывами. Места, в которых может иметь место отрыв потока, показаны отдельно. Как уже отмечалось в п. 2.3.4, можно выделить два типа отрывов (см. рис. 2.12 и 2.13). Там, где на рис. 4.3 и 4.4 линии тока показаны волнистыми линиями или области отрыва затемнены, характер отрыва очень близок к двухмерному. Линия отрыва в этом случае проходит преимущественно перпендикулярно к местному направлению потока. Если имеет место повторное прилегание потока, то образуются так называемые обратные потоки (циркулирующие потоки). Такие вихри могут возникать в следующих местах: на передней кромке капота; сбоку на крыльях; в зоне, образованной пересечением капота и ветрового стекла; на переднем спойлере и, возможно, в зоне излома при ступенчатой форме задней части автомобиля. Зоны, в которых оторвавшийся поток представляет собой близкое к двухмерному вихревое движение (зоны "спокойной воды") чаще всего образуются с обратной стороны задка автомобиля*. В зависимости от структуры поля потока за

---

* В данном случае речь идет об отрыве, сопровождающемся образованием вихрей, для которых характерно малое значение вектора поперечной составляющей скорости по сравнению с векторами продольной и вертикальной составляющих скоростей. В этом смысле такой вихрь близок к двухмерному. Употребляемое в оригинале выражение, в буквальном переводе означающее "зона спокойной воды", подразумевает турбулентный след за телом, состоящий из таких вихрей. Аналогия со "спокойной водой" заключается в том, что движение последней также характеризуется наличием двух составляющих вектора скорости – вдоль и поперек водоема. Движение "неспокойной воды" характеризуется наличием волн на поверхности, а значит, и третьей, вертикальной составляющей вектора скорости. Далее в тексте для краткости такого типа вихри будем называть двухмерными, а поле потока, состоящее из таких вихрей – двухмерным вихревым следом. И только в отдельных случаях будет использоваться дословный перевод этих понятий. – *Прим. ред. пер.*

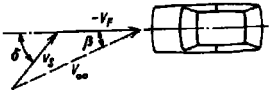


Рис. 4.2. Треугольник скоростей, образованный векторами скорости движения автомобиля V_F и скорости v_S естественного атмосферного бокового ветра

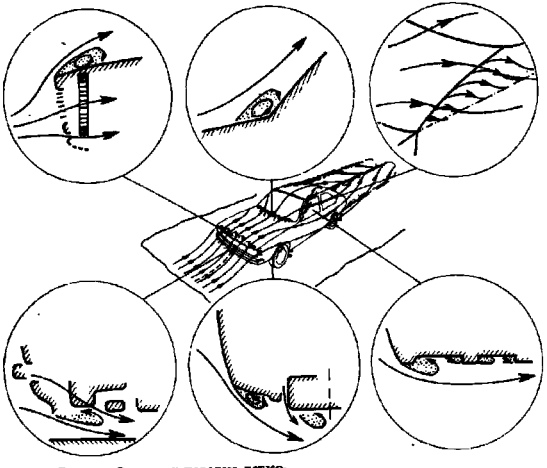


Рис. 4.3. Схемы обтекания передка легкового автомобиля и его элементов

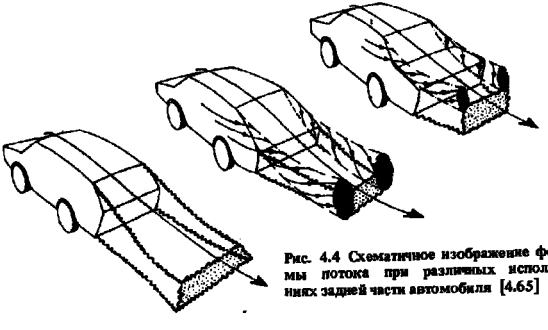


Рис. 4.4 Схематичное изображение формы потока при различных исполнениях задней части автомобиля [4.65]

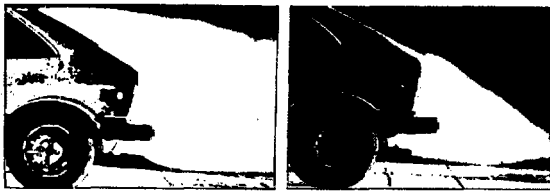


Рис. 4.5. Длинная открытая спутная струя и короткая закрытая зона "спокойной воды" при различных формах задней части автомобиля [4.4]

автомобилем образуется длинный, сильно вытянутый назад открытый или короткий замкнутый вихревой след (см. рис. 4.5 (по данным Гухо [4.4])).

Оторвавшиеся потоки совершают циркулирующие движения, оси которых, как правило, проходят перпендикулярно к набегающему невозмущенному потоку и параллельно к линии отрыва. Движение вихрей, вращающихся поперечно к набегающему потоку внутри двухмерного вихревого следа, показано Ахмедом и Баумертом [4.5] (см. также работу Ахмеда [4.6]). На рис. 4.6 для каждой из трех форм задней части автомобиля показана пара вихрей, вращающихся навстречу друг другу. Нижний вихрь вращается в направлении против часовой стрелки; именно он переносит частицы грязи на обратную сторону автомобиля (см. п. 6.4). Верхний вихрь вращается в противоположную сторону, т.е. по часовой стрелке. Ахмед и Баумерт наблюдали, что после отрыва потока в вихревом следе образуется пара противоположно вращающихся продольных вихрей, которая в случае формы задка "универсал" индуцирует восходящий поток, а при плавно спускающейся и ступенчатой формах задка – нисходящий поток в вихревом следе. Векторные диаграммы на рис. 4.7 позволяют четко увидеть эти вихри. Они подтверждают приведенные раньше Говеллом [4.7] данные, полученные им при замерах поля

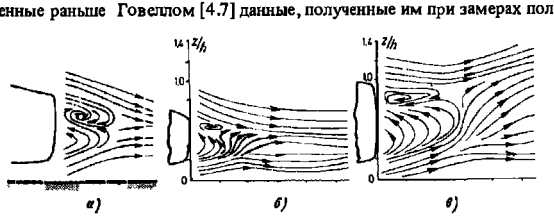


Рис. 4.6. Вращающиеся навстречу друг другу поперечные вихри в вихревом следе за автомобилями, имеющими различную форму задка [4.5]:
а – ступенчатая форма задка; *б* – плавно спускающаяся форма задка; *в* – круто спускающаяся форма задка

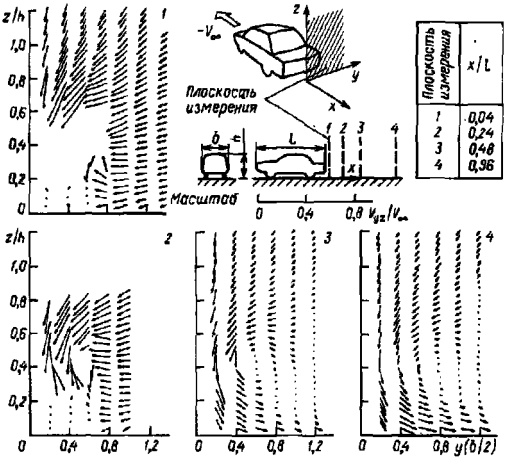

z/h
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
1
2
3
4
$-V_\infty$
z
y
x
Плоскость измерения
b
h
L
x
Масштаб
0
0,4
0,8
V_{yz}/V_∞
0,4
0,8
1,2
$y(b/2)$
Плоскость измерения
x/L
0,04
0,24
0,48
0,96
а)
б)



Рис. 4.7. Поля поперечных скоростей в спутной струе за моделями легковых автомобилей [4.5]:
а – ступенчатая форма задка; б – плавно спускающаяся форма задка; в – круто спускающаяся форма задка

нисходящего потока для ступенчатой формы задней части автомобиля. При форме задка "универсал" пара вихрей поднимется в направлении потока и перемещается к плоскости симметрии. При плавно спускающейся и ступенчатой формах задка вихри вдоль потока опускаются к дороге и перемещаются наружу. Можно предположить, что эти продольные вихри являются продолжением описанных выше поперечных вихрей. При рассмотрении вихрей обращает на себя внимание уменьшение скорости с приближением к центру вихря (см. рис. 4.7). Из-за рассеяния энергии продольные вихри в направлении распространения потока постепенно угасают, как видно из рис. 4.8, а также согласно данным Ахмеда и Баумерта [4.5].

Второй тип отрыва имеет трехмерный характер; эти отрывы на рис. 4.3 и 4.4 отмечены штрихпунктирными линиями или заштрихованными зонами. Вихревые трубки образуются на наклонно обтекаемых острых кромках, совершенно так же, как на треугольном крыле самолета. Такая пара вихрей образуется на правой и левой стойках ветрового стекла, так называемых стойках *А* (см. п. 6.5). В районе верхнего конца стоек указанная пара вихрей изгибается по направлению к крыше; их дальнейшее взаимодействие с потоком в районе задней части автомобиля еще не изучено. Ярко выраженная пара вихревых трубок образуется позади автомобиля при определенном наклоне линии задка (см. рис. 4.4). Эти

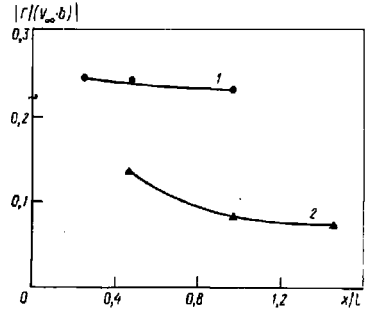


Рис. 4.8. Уменьшение циркуляции скорости в продольных вихрях спутной струи [4.5]:
1 – при плавно спускающейся форме задка автомобиля;
2 – при круто спускающейся форме задка автомобиля

вихри взаимодействуют с внешним потоком и с двухмерным вихревым следом. Они в значительной степени аналогичны кромочным вихрям крыла конечного размаха; для таких крыльев замеры вихрей были осуществлены Гуммелем [4.8]. Указанные вихревые трубки в пространстве между их осями индуцируют поле нисходящего потока, которое определяет расположение линии отрыва потока, обтекающего тело. Этот механизм становится понятным, если рассмотреть рис. 4.5. На правой фотографии существует пара сильных вихрей; на левой фотографии образование такой пары искусственным путем предотвращено. В первом случае индуцированный парой вихревых трубок нисходящий поток способствует тому, что линия отрыва расположена очень низко, и это приводит к образованию небольшого замкнутого вихревого следа. Во втором случае поток отрывается от задней кромки крыши, вихревой след так сильно вытянут, что оканчивается вне пространства, имеющегося для наблюдений (длина рабочей части аэродинамической трубы, см. п. 11). Следует указать на то, что Ахмед и Баумерт [4.5] на своей модели автомобиля с плавно спускающейся формой задка не наблюдали описанные выше продольные вихревые трубки; другие измерения, о которых рассказано в п. 4.3.2, явно показали существование этой пары вихрей. Указанное несоответствие лишний раз подтверждает, что этот процесс формирования потока за автомобилем изучен еще не в полной мере.

Особенно плохо изучен поток со стороны днища автомобиля. Поле этого потока в первом приближении можно рассматривать как поле потока в канале, стенки которого имеют большую шероховатость. До сих пор остается неясным вопрос о структуре потока в колесных нишах и вокруг вращающихся колес. С другой стороны, довольно сложный процесс течения охлаждающего воздуха системы охлаждения двигателя, в котором участвуют решетка радиатора, радиатор, вентилятор и моторный отсек, хорошо описывается методами гидравлики (см. п. 9). Существуют некоторые частные проблемы, например распределение скорости воздуха по телу радиатора, которые в настоящее время неразрешимы.

4.3. АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА

4.3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Аэродинамическое сопротивление тела, обтекаемого потоком воздуха, можно, как указано в п. 2.3.3, разложить на составляющие: сопротивление давления и сопротивление трения. Это разложение представлено на рис. 4.9. Поле обтекающего потока образует по поверхности автомобиля поле нормальных давлений и касательных напряжений. Там, где на пути потока встречаются зоны с очень резким повышением статического давления, он отрывается от обтекаемого контура. Механизм отрыва был объяснен в п. 2.3.3 (см. рис. 2.7). На рис. 4.9 для упрощения считается, что отрыв происходит только в задней части тела. Вследствие этого в зависимости от ширины тела распределение давления в этом месте отличается от распределения давления при обтекании идеальным (не обладающим вязкостью) потоком. То, что это изменение распределения давления имеет решающее значение для возникновения аэродинамического сопротивления, показывает кривая давления вверху справа на рис. 4.9.

Касательные напряжения уменьшаются с увеличением толщины пограничного слоя, и в месте отрыва их величина равна нулю. Если проин-

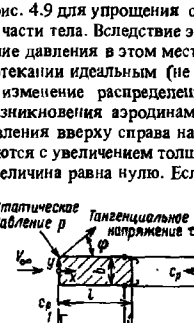


Рис. 4.9. Коэффициенты сопротивления давления и сопротивления трения удобовытых тел [4.4]:
1 – реальный поток, $D_0 \neq 0$; *2* – идеальный поток, $D_0 = 0$; *3* – отрыв; *4* – идеальный и реальный потоки на передней поверхности тела; идеальный поток на задней поверхности тела; *5* – реальный поток на задней поверхности тела

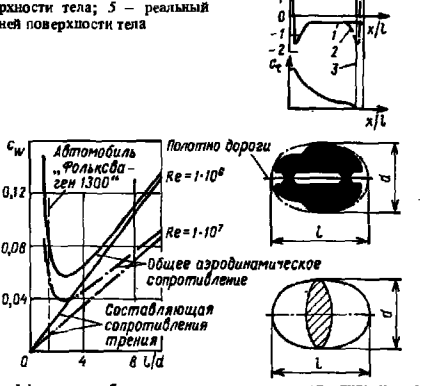


Рис. 4.10. Коэффициенты общего аэродинамического сопротивления и сопротивления трения эллипсоида вращения

тегрировать давления и касательные напряжения по всей поверхности тела, получится сопротивление давления и сопротивление трения, а если их сложить, то получится общее аэродинамическое сопротивление. Оно включает в себя и так называемое индуктивное сопротивление, на котором в дальнейшем необходимо будет остановиться отдельно.

$$c_p = (p - p_\infty)/[(\rho/2)V_\infty^2]$$

$$c_\tau = \tau_0/[(\rho/2)V_\infty^2]$$

$$D_p = \int p \sin\varphi \, dA$$

$$D_F = \int \tau_0 \cos\varphi \, dA$$

$$D_0 = D_p + D_F$$

(для угловатых плохообтекаемых тел $D_F \ll D_p$).

Представленным на рис. 4.9 методом определения аэродинамического сопротивления для легковых автомобилей и для тел более простых форм до сих пор пока не пользуются. Данные о величинах отдельных составляющих аэродинамического сопротивления, которые можно найти в литературе (см., например, работу Барта [4.9]), базируются скорее на предположениях, чем на результатах расчетов. Оценка составляющей трения в общем аэродинамическом сопротивлении осуществляется, как показано на рис. 4.10. Рассматривается тело вращения, поверхность которого огибает автомобиль и его зеркальное отображение. В зависимости от отношения l/d такого тела в литературе можно найти значения коэффициента аэродинамического сопротивления (см., например, работу Гернера [4.10]). Сопротивление трения такого тела определяется с помощью расчета пограничного слоя (см. работу Гухо [4.11]). Согласно этому способу при наиболее существенных для легковых автомобилей числах Рейнольдса $Re = V\,l/\nu = 10^7$ сопротивление трения составляет 10 – 15 % в общем значении аэродинамического сопротивления. На примере переднего спойлера в пп. 4.3.2 и 4.5.4 показано, что вполне возможно, снижая сопротивление трения, существенно уменьшить общее аэродинамическое сопротивление. Однако при современных формах автомобилей наибольшего эффекта можно добиться за счет снижения сопротивления давления.

Зачастую, говоря в аэродинамике автомобиля об *индуктивном* сопротивлении, проводят аналогию с аэродинамикой самолета, и общее аэродинамическое сопротивление рассматривают так, как принято в теории крыла. Как показано ниже, практически это неприемлемо.

Коэффициент сопротивления крыла c_W складывается из коэффициентов сопротивления профиля c_{Wo} и индуктивного сопротивления c_{Wi}:

$$c_W = c_{Wo} + c_{Wi}. \qquad (4.1)$$

Коэффициент сопротивления профиля, в свою очередь, состоит из составляющих давления и трения. Он измеряется или вычисляется при условии

двухмерного обтекания и с учетом влияния вязкости обтекающей среды (см. также п. 2.3.3). Коэффициент индуктивного сопротивления c_{Wi} вычисляется с помощью потенциальной теории, т.е. для идеального, не обладающего вязкостью потока (см. работу Шлихтинга и Трукенбродта [4.12]). Индуктивное сопротивление создается системой свободных вихрей, а она, в свою очередь, тесно связана с подъемной силой крыла. Имеют место следующие соотношения:

$$c_{Wi} \sim c_A^2/\Lambda; \tag{4.2}$$

$$\Lambda = b^2/F. \tag{4.3}$$

Но разделение общего коэффициента c_W на составляющие согласно уравнению (4.1) возможно только тогда, когда оба поля, создающие сопротивление профиля при двухмерном потоке и индуктивное сопротивление при трехмерном поле свободных вихрей, не интерферируют друг с другом. Как известно, это возможно только для крыла большого удлинения Λ, т.е. для таких крыльев, у которых квадрат размаха b очень большой по сравнению с площадью крыла в плане F (см. уравнение (4.3)). Описание такого типа полей является предметом теории крыла (см. работу Шлихтинга и Трукенбродта [4.12], особенно том II). Определяемый уравнением (4.3) показатель удлинения крыла Λ для автомобилей очень мал ($\Lambda \approx 0{,}3$) поэтому разделение поля потока на двухмерную и трехмерную области невозможно. Влияние поля вихрей невозможно отделить от *остального* поля потока, как это имеет место в теории крыла.

Зависимость между коэффициентом индуктивного сопротивления и коффициентом подъемной силы (уравнение (4.2)) была получена для случая обтекания вблизи основания. В аэродинамике автомобиля используется соотношение, выведенное Визельсбергером [4.13] (см. также работы Морелли [4.14], [4.41], Поттхоффа [4.15]) при замерах нисходящего потока для выпуклых тел вблизи основания. Он определил коэффициент пропорциональности в уравнении (4.2), равный $0{,}5/\pi$. Измерения на автомобилях, которые были объединены в три группы по типам кузовов – со ступенчатой, плавноспускающейся формами задка и формой "универсал" – показывают хорошее совпадение с уравнениями (4.1), (4.2) (см. рис. 4.11).

Но отсюда следует, что коэффициент сопротивления профиля при различных формах задней части автомобиля имеет одинаковую величину, это выглядит неубедительно. Как показано на рис. 4.12 (согласно Гухо [4.4], подробнее об этом рассказано в п. 4.3.2), при переходе от формы задней части автомобиля "универсал" к форме с плавно спускающейся линией задней части изменяется положение линии отрыва потока, т.е. изменяется основное свойство профиля. А значит, изменяется и сопротивление профиля.

Известны результаты измерений, при которых увеличение коэффициента подъемной силы сопровождалось уменьшением коэффициента сопротивления воздуха. Пример приведен на рис. 4.13 (согласно дан-

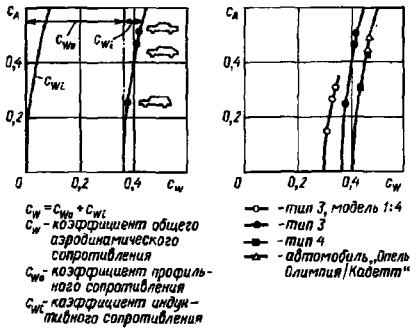
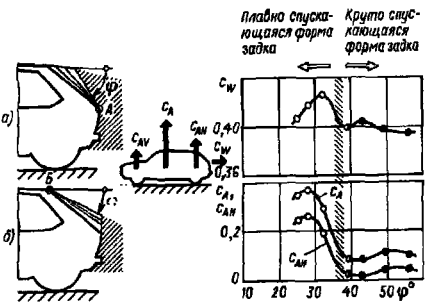


Рис. 4.11. Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления автомобилей с тремя типами кузовов (со ступенчатой, плавно спускающейся и круто спускающейся формами задней части), поляры автомобилей



	c_W	c_A
А Исходная модель	0,34	0,38
Б Спойлер задка	0,33	0,18
В Боковой спойлер	0,38	0,48
Г Спойлер передка	0,38	0,29

Рис. 4.12. Коэффициенты подъемной силы и аэродинамического сопротивления, а также форма отрыва при различных углах наклона поверхности задка φ [4.4]:
а – фиксированное положение точки A (-•-)б – фиксированное положение точки B (-•-)

Рис. 4.13. Значения коэффициентов аэродинамического сопротивления и подъемной силы, полученные при установке различных навесных элементов [4.4]
(А – исходная модель; Б – установлен спойлер задка; В – установлены спойлеры передних крыльев; Г – установлен спойлер передка)

ным Гухо [4.4]). Для базового автомобиля "Фольксваген 1600" со ступенчатой формой задка, ровным днищем и без бамперов, подготовленного для сравнительных испытаний в аэродинамической трубе, с помощью различных видов спойлеров менялись режимы обтекания. В случае "А" – автомобиль бех указанных навесных элементов – получался примерно такой же коэффициент аэродинамического сопротивления, что и в случае "Б" с задним спойлером. Но во втором случае коэффициент подъемной силы был почти вдвое меньше, чем в первом. В случае "В" – автомобиль оснащен парой спойлеров передних крыльев – и в случае "Г" – на автомобиль установлен обыкновенный передний спойлер – коэффициенты аэродинамического сопротивления оказались совершенно одинаковыми, а коэффициенты подъемной силы сильно отличались. И наконец, если сравнить случаи "А" и "Г", то видно, что в случае "А" коэффициент аэродинамического сопротивления меньше, и в то же время коэффициент подъемной силы больше, чем в случае "Г". Следовательно, в одних случаях коэффициент подъемной силы и коэффициент силы сопротивления воздуха увеличиваются одновременно, а в других имеет место обратное явление.

С помощью уравнения (4.1) результаты таких измерений объяснить невозможно, это было бы можно сделать, если исходить из того, что $c_{W0} \neq \text{const}$. Но при $c_{W0} = c_{W0}(c_A)$ разложение коэффициента аэродинамического сопротивления на составляющие согласно уравнению (4.1) теряет смысл.

Джонс [4.16] вообще отрицает связь между подъемной силой и силой сопротивления воздуха для тел, помещенных вблизи основания. С другой стороны, Морелли, Фьераванти и Коготти [4.43] разработали тела, обладающие очень малым аэродинамическим сопротивлением; при их формообразовании они следовали постулату Морелли [4.41] о том, что аэродинамическое сопротивление тела вблизи основания тогда имеет минимальное значение, когда действующая на него подъемная сила равна нулю (см. п. 4.4.2).

Однозначного объяснения наличия и величины *индуктивного сопротивления* для автомобиля на сегодняшний день еще нет. Непосредственное использование уравнений (4.1) и (4.2) для автомобилей неприемлемо.

Остается отметить тот факт, что возникающие продольные вихревые трубки на поверхностях, расположенных вблизи от них, индуцируют малые давления. Появляющуюся в результате этого составляющую аэродинамического сопротивления, являющуюся частью сопротивления давления, можно назвать сопротивлением, индуцированным вихрем.

4.3.2. СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И ЧАСТЕЙ АВТОМОБИЛЯ

Порядок рассмотрения темы. Ниже будут рассмотрены процессы обтекания отдельных поверхностей автомобиля, показанных на рис. 4.3 и 4.4, и возникающие при этом силы сопротивления. При рассмотрении внимание будет уделяться двум вещам: во-первых, самому механизму

аэродинамического сопротивления в рассматриваемом месте, во-вторых, влиянию поля потока в этом месте на соседние области. При этом недостаточно рассмотреть только те явления, которые происходят в направлении распространения потока (т.е. вниз по течению потока); из-за того, что речь идет об области дозвуковых скоростей, возмущения в одном месте влияют на все поле потока, т.е. и в направлении против течения потока.

Возникновение сопротивления давления объясняется наличием отклонений в распределении давления для реального и идеального потоков, возникновение сопротивления трения объясняется характером изменения касательных напряжений вдоль стенки или связанной с ним потерей импульса. Рассуждения преимущественно носят качественный характер, и зачастую они весьма схематичны, поскольку лишь для некоторых элементов поверхности имеются количественные оценки влияния их изменения. Например, распределение давления в зависимости от изменения формы. Сравнение распределения давления для измененных форм, которые по отношению к основной форме имеют другое аэродинамическое сопротивление, не дает таких точных данных, как, например, сравнение между идеальным и реальным распределением давления для основной формы. Однако для объяснения механизма сопротивления давления в качественном отношении этим принципиальным различием можно пренебречь.

Передок автомобиля. Поток, обтекающий переднюю часть автомобиля (сначала рассматривается более простой случай, когда доступ охлаждающему воздуху в подкапотное пространство закрыт) характеризуется наличием точки полного торможения воздушного потока и областью высокого давления (см. рис. 2.4, а также работу Шлихтинга и Труккенбродта [4.12]). Вниз по течению поток вдоль капота, крыльев и нижней панели передка сильно изменяет свое направление. На рис. 4.14 по-

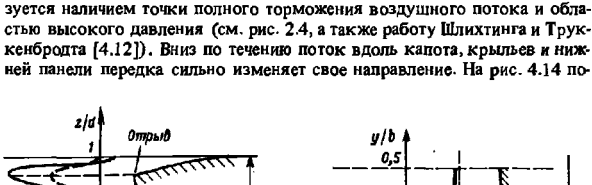


Рис. 4.14. Схематичное изображение распределения давления в среднем продольном сечении передка автомобиля:
1 – идеальный поток; *2* – реальный поток

Рис. 4.15. Распределение давления в горизонтальном сечении автомобиля-фургона "Фольксваген":
$r/b = 0{,}085$ – по углам отсутствует отрыв потока, $c_{p\,y} = 0{,}40$; $r/b = 0$ – имеет место отрыв потока по углам, $c_{p\,y} = 0{,}45$

казан случай отрыва потока в передней части капота. В реальном потоке разрежение на *кромке* капота существенно меньше, чем в идеальном, не обладающем вязкостью; *максимальное разрежение* меньше. Избыточное давление в зоне выше точки полного торможения воздушного потока, напротив, в реальном потоке несколько больше, чем в идеальном. В точке полного торможения воздушного потока в обоих случаях $c_p = 1$. Поэтому сила, действующая на передок автомобиля в направлении потока в реальном потоке больше, чем в идеальном. Показанные на рис. 4.15 (по данным Гухо [4.17]) данные измерений (с учетом принятого в п. 4.3.2 условия) подтверждают правильность схемы распределения давления, приведенной на рис. 4.14. На графике показана зависимость коэффициента давления c_p, измеренного на высоте поясной линии, от ширины автомобиля-фургона "Фольксваген", параметром является радиус перехода от передней к боковой поверхности. При хорошо закругленном угле ($r/b = 0{,}085$) отрывов не наблюдается, образуется сильный пик разрежения. При незакругленном угле ($r/b = 0$) появляется отрыв; пик разрежения уменьшается, давление на переднюю панель увеличивается. В рассматриваемом примере это приводит к увеличению коэффициента аэродинамического сопротивления на значение $\Delta c_W = 0{,}05$, а это составляет более 10 % всего коэффициента аэродинамического сопротивления модели. Возрастание разрежения *перед* местом отрыва является наглядным примером тому, как нарушение режима потока в направлении его течения (в данном случае имеется в виду отрыв) оказывает обратное воздействие на распределение давления в зонах поля, расположенных выше по течению потока.

Из рассмотрения рис. 4.14 можно также отметить, что отрыв потока на передней кромке капота оказывает отрицательное влияние не только на значение аэродинамического сопротивления. В зависимости от силы отрыва и длины капота уменьшается давление в зоне, образованной капотом и ветровым стеклом, из которой осуществляется забор свежего воздуха для системы отопления и вентиляции. Как правило, в среднем сечении указанной зоны коэффициент избыточного давления $c_p = 0{,}4$ (при круто установленных ветровых стеклах его значение больше, при полого установленных стеклах – меньше), при отрыве потока в передней части капота коэффициент давления уменьшается до $c_p \approx 0$. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в п. 6.2.2.

Зона, образованная капотом и ветровым стеклом, ветровое стекло, стойка ветрового стекла (стойка А). Если переднюю кромку капота поток обтекает без отрыва, то в зоне сопряжения капота с ветровым стеклом это ведет к отрыву с последующим прилеганием потока к ветровому стеклу (см. рис. 4.3). В случае плоского, т.е. не обладающего кривизной, ветрового стекла этот процесс был изучен Скибор-Рыльским [4.18]. Для продольного осевого сечения автомобиля на рис. 4.16 показано, как с увеличением угла наклона ветрового стекла точка отрыва потока S смещается вперед, а точка прилегания потока R сдвигается назад. В продольных сечениях, расположенных ближе к краю автомобиля, точка отрыва потока и точка его прилегания могут сближаться друг с другом.

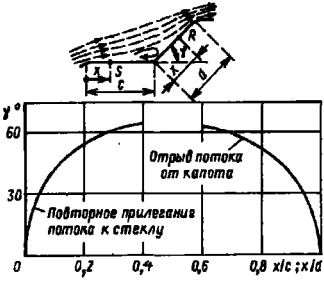


Рис. 4.16. Влияние угла наклона γ плоского ветрового стекла на положение точки отрыва потока S и точки повторного прилегания потока R [4.18]

Положение и форма трехмерных отрывных потоков сильно зависят от поперечной кривизны ветрового стекла. При встречающихся на практике конфигурациях лобового стекла, определяемых углом наклона и поперечной кривизной, отрывные потоки редко совпадают с полученными Скибор-Рыльским данными для *плоского* стекла.

Каким образом зависимые от названных геометрических параметров процессы отрыва и повторного прилегания потока отражаются на силе сопротивления воздуха, неизвестно. В диапазоне имеющих место на практике углов наклона ветрового стекла $30° < \gamma < 40°$ и при обычных значениях кривизны ветрового стекла не представляется возможным установить однозначное влияние наклона ветрового стекла на силу аэродинамического сопротивления см. п. 4.7.2. Влияние состояния потока в зоне сопряжения ветрового стекла с капотом, а также вдоль ветрового стекла на дальнейший режим потока, в особенности в задней части автомобиля, до сих пор тщательно не изучено, а результаты принципиальных исследований Лэя [4.19] по этому вопросу, кратко изложенные в п. 4.4.3, для автомобилей все еще не подтверждены.

При современных довольно существенных значениях поперечной кривизны ветрового стекла в районе стойки ветрового стекла (стойки A) имеет место отрыв в форме трехмерной вихревой трубки (см. рис. 4.3), независимо от того, имеется ли на стойке водосточный желобок или же она ровная. Форма возникающего потока имеет существенное сходство с потоком, обтекающим треугольное крыло. Поток, обтекающий стойку ветрового стекла (стойку A) исследовался Ватанабе и



Рис. 4.17. Схематичное изображение характера обтекания стойки ветрового стекла (стойки A) [4.20]

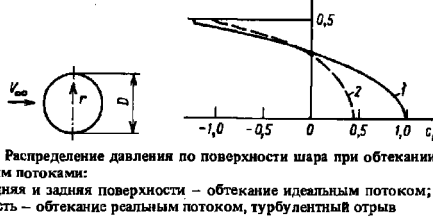


Рис. 4.18. Распределение давления по поверхности шара при обтекании идеальным и реальным потоками:
1 – передняя и задняя поверхности – обтекание идеальным потоком; *2* – задняя поверхность – обтекание реальным потоком, турбулентный отрыв

другими [4.20] с помощью простой модели, показанной на рис. 4.17. Однако предметом изучения было возникновение аэродинамических шумов (см. п. 6.5.2) и связь с аэродинамическим сопротивлением не рассматривалась.

Задняя часть автомобиля. Как показано на рис. 4.4, в задней части автомобиля имеют место два различных типа отрыва: близкий к двухмерному в форме зоны "спокойной воды" и трехмерной в форме пары продольных вихревых трубок*. Зачастую существуют одновременно обе формы отрыва. Двухмерный отрыв появляется потому, что течение в пограничном слое не подчиняется теории потенциальных потоков, согласно которой при обтекании задней части автомобиля должно иметь место резкое повышение давления, а в реальных условиях поток отрывается от контура. При обтекании реальным потоком с обратной стороны автомобиля значение среднего коэффициента давления c_p существенно ниже, чем при обтекании идеальным, не обладающим вязкостью, потоком. В качестве классического примера этому можно рассмотреть обтекание шара, см. рис. 4.18 [4.12]. В отличие от общепринятых графиков на этом рисунке показано изменение коэффициента давления в направлении, перпендикулярном к потоку. Поэтому возникновение силы сопротивления шара (а для него это почти что исключительно сопротивление давления) особенно наглядно объясняется разностью давлений.

Для призматических тел базовое давление в реальном потоке зависит от коэффициента полноты l/d_h, где в качестве величины, характеризующей линейные размеры поперечного сечения, выбран эквивалентный гидравлический диаметр $d_h = 4A/U$**, где A – площадь поперечного сечения тела, U – периметр этого сечения. Результаты исследования по этому вопросу представлены Гернером [4.10]; некоторые данные можно найти у Накагуси [4.21]. Для автомобилей с круто обрезанной формой задка – автомобили типа "универсал" или автомобили-фургоны – среднее значение коэффициента базового давления $c_p = -0{,}2$.

* В дальнейшем иногда для краткости будем называть просто парой кромочных вихрей. – *Прим. ред. пер.*

** В оригинале книги в этом выражении допущена опечатка, приведена формула $d_h = 4U/A$. – *Прим. ред. пер.*

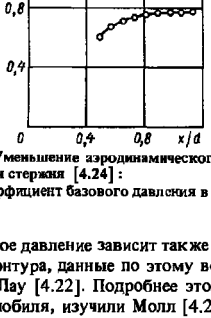


Рис. 4.19. Уменьшение аэродинамического сопротивления при конусном сужении задней части стержня [4.24]:
$c_{p,A}$ – коэффициент базового давления в сечении A (для $x = 0$)

Базовое давление зависит также от угла, под которым поток отрывается от контура, данные по этому вопросу можно найти у Таннера [4.2], Рожко и Лау [4.22]. Подробнее этот вопрос, имеющий важное значение для автомобиля, изучили Молл [4.23] и Мэй [4.24]. Полученное ими соотношение приведено на рис. 4.19. Для длинного цилиндрического стержня в случае $x = 0$, т.е. без конусообразного конца, Мэй [4.24] получил значение коэффициента базового давления $c_{p,A} = -0{,}165$. В идеальном потоке аэродинамическое сопротивление этого тела было бы равно нулю. Следовательно, коэффициент сопротивления воздуха этого тела, помещенного в реальный поток, если не учитывать составляющую трения, будет больше на значение $\Delta c_W = 0{,}165$ по сравнению со случаем обтекания идеальным потоком*. Полученное при конусообразном вытягивании конца изменение коэффициента аэродинамического сопротивления было отнесено к этому наилучшему значению и в качестве фактора f показано на рис. 4.19 в зависимости от параметра конусного сужения x/d. Фактор $f = \Delta c_W / |c_{p,A}|$, где $c_{p,A}$ – базовое давление в плоскости A (при $x = 0$). Для исследованного в работе [4.24] варианта конуса с углом раскрытия β при $x/d = 1$ значение фактора f асимптотически приближается к значению $f = 0{,}75$, и дальнейшее сужение на конус не дало лучшего результата.

Конусное сужение задней части стержня, сопровождающееся удлинением на величину x, не должно отождествляться с удлинением тела, так как общая длина стержня имела достаточное значение, чтобы исключить взаимное влияние на распределение давления по обоим концам стержня.

Полная картина влияния конусного сужения имела бы место в том случае, если бы было известно не только изменение коэффициента аэродинамического сопротивления, но и характер распределения давления и касательного напряжения, однако такие измерения еще не проводились.

---

* $\Delta c_W = |c_{p,A}| = 0{,}165$ в данном случае максимально возможное изменение c_W, так как эта разность соответствует двум крайним состояниям обтекания задней части стержня: первое – отрывное при максимальном сечении отрыва; второе – безотрывное, характерное для идеального потока. То есть фактор f показывает, во сколько раз уменьшается коэффициент сопротивления при различных значениях параметров конической части стержня по отношению к случаю, когда имеет место безотрывное обтекание. *Прим. ред. пер.*

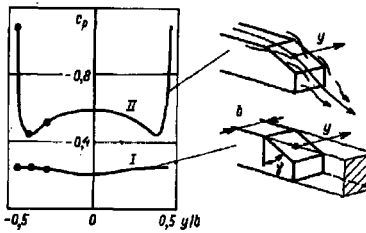


Рис. 4.20. Сравнение распределения давления на наклонной поверхности задней части тела при трехмерном и близком к двухмерному отрывах [4.25]

Распределение давления в задней части автомобиля совершенно различно в зависимости от того, образуется или нет пара вихревых трубок в зоне за автомобилем. Морель [4.25] приводит результаты измерений для скошенной формы задней части автомобиля, для которой при угле наклона $\gamma = 60^\circ$ оба типа отрыва оказываются стабильными (бистабильными). В случае двухмерного вихревого следа в рассматриваемом сечении имеет место приблизительно постоянное значение коэффициента давления c_p (см. рис. 4.10 , кривая *I*). Если же образуются кромочные вихревые трубки, то возникают сильные разрежения прежде всего вблизи края базовой поверхности (кривая *II*). В этом случае распределение давления в значительной степени напоминает распределение давления для неизолированного крыла малого удлинения. Абсолютное значение давления зависит от угла наклона γ поверхности задка автомобиля. Численные значения, характеризующие это влияние, отсутствуют; но можно считать, что распределение давления в зависимости от угла наклона γ изменяется аналогично распределению давления на крыле такого же удлинения с углом атаки α, равным $\alpha = (90^\circ - \text{угол наклона } \gamma)$. Образование второго продольного вихря, имеющего форму *II*, наблюдал Джордж [4.6] при форме днища, поднимающейся в области задка.

При наклонной задней части автомобиля с последующим вертикальным срезом в зависимости от угла наклона γ могут одновременно возникать оба типа отрыва; на наклонной поверхности образуется пара вихревых трубок, а вдоль вертикальной плоскости, которой оканчивается задок – двухмерный отрыв (см. рис. 4.4). Оба поля потока взаимодействуют друг с другом. Эти процессы впервые наблюдались при разработке автомобиля "Фольксваген Гольф" (см. работу Янссена и Гухо [4.26]); более тщательный анализ был проведен позднее Морелем [4.25]. Важнейшие результаты этого исследования представлены на рис. 4.21. Размеры исследуемого тела приведены в работе Мореля [4.25]. Размеры наклонной поверхности задней части автомобиля при всех углах γ остаются неизменными: соотношение размеров боковых сторон (протяженность) этой плоскости составляла $\Lambda = B/L_s = 1{,}5$.

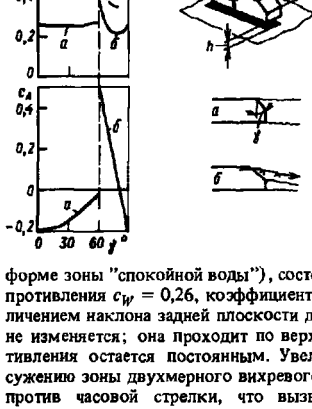


Рис. 4.21. Форма потока и коэффициент аэродинамического сопротивления для круто и плавно спускающихся задних частей кузова [4.25]:
1 – кривая, полученная Янссеном и Гухо; *а* – круто спускающаяся форма задней части кузова (типа "универсал"); *б* – плавно спускающаяся форма задней части кузова

Если ограничивающая тело сзади плоскость вертикальна, т.е. $\gamma=0^\circ$, то имеет место двухмерный отрыв (вихревой след в форме зоны "спокойной воды"), состояние потока "а", коэффициент сопротивления $c_W = 0{,}26$, коэффициент подъемной силы $c_A = -0{,}2$. С увеличением наклона задней плоскости до $\gamma = 60^\circ$ положение линии отрыва не изменяется; она проходит по верхней кромке; коэффициент сопротивления остается постоянным. Увеличение угла γ может привести к сужению зоны двухмерного вихревого следа и ее небольшому повороту против часовой стрелки, что вызывает уменьшение коэффициента подъемной силы; но о таких наблюдениях Морель не сообщал [4.25].

При $\gamma = 60^\circ$ форма потока переходит в состояние "б"; образуются два кромочных вихря. Линия отрыва двухмерного вихревого следа смещается на нижнюю кромку наклонной поверхности, так как кромочные вихри образуют сильное поле нисходящего потока, которое способствует повороту основного потока, обтекающего верхнюю кромку, вниз. Коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы сильно увеличиваются вследствие показанных на рис. 4.20 (кривая "б") высоких значений разрежений, индуцированных вихрями. При дальнейшем увеличении угла γ, т.е. при более пологом положении поверхности задка коэффициенты подъемной и силы аэродинамического сопротивления уменьшаются – по аналогии с крылом, как на это уже указывалось. При $\gamma = 80^\circ$ коэффициент аэродинамического сопротивления достигает своего минимального значения; c_W в этом случае существенно ниже, чем в случае образования двухмерных вихрей от верхней кромки (случай "а"). Индуцированное вихрями разрежение на наклонной поверхности задка мало, об этом можно судить по уменьшению коэффициента подъемной силы. С другой стороны, можно предполагать, что давление на вертикальной базовой поверхности относительно высокое, так как в этом случае внешний поток аналогичен потоку, обтекающему длинный стержень с конусообразной вытянутой задней частью. Для угла $\gamma > 80^\circ$ давление на вертикальной базовой поверхности, площадь которой увеличивается, снова уменьшается. Давление на наклонной поверхности задка, напротив, становится больше. Коэффициенты подъемной силы и аэроди-

намического сопротивления при $\gamma = 90^\circ$ вновь приобретают те же значения, что и при $\gamma = 0$. Эти обе геометрические конфигурации идентичны в ародинамическом отношении.

Своеобразный характер изменения коэффициента сопротивления $c_W(\gamma)$ можно объяснить следующим образом.

Общее аэродинамическое сопротивление W складывается из составляющих сил сопротивлений наклонной поверхности задка W_T и базовой поверхности W_D:

$$W = W_T + W_D. \tag{4.4}$$

Сначала следует рассмотреть каждую из составляющих сил аэродинамического сопротивления. Наклонная поверхность задка рассматривается как крыло; при таком условии коэффициент сопротивления определяется уравнением

$$c_{WT} = W_T/q_\infty BL_s. \tag{4.5}$$

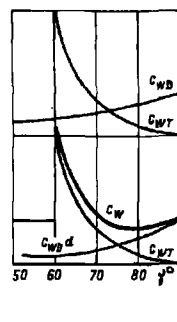
Изменение коэффициента c_{WT} в зависимости от угла наклона γ показано вверху на рис. 4.22 (рассматривается только состояние потока "б" согласно рис. 4.21). С увеличением угла атаки (что соответствует уменьшению угла γ) прогрессивно возрастает значение c_{WT}.

Коэффициент сопротивления вертикальной базовой поверхности:

$$c_{WD} = W_D/(q_\infty BD) \tag{4.6}$$

Изменение c_{WD} в зависимости от угла наклона γ также показано вверху на рис. 4.22. Для значения $\gamma = 90^\circ$ коэффициент c_{WD} можно взять, например, из работы Накагуси [4.21]. Уменьшение коэффициента c_{WD} с уменьшением γ является предположением; экспериментальных данных о давлении на вертикальной базовой поверхности в зависимости от относительного удлинения сужающейся задней части для рассматриваемой здесь конфигурации нет.

Безразмерный коэффициент общего аэродинамического сопротивле-



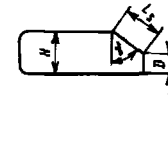


Рис. 4.22. Схема получения коэффициента общего аэродинамического сопротивления задней части тела путем сложения коэффициентов сопротивления наклонной поверхности задка и базовой вертикальной плоскости [4.65]:
B – ширина тела, $L_s/H = 1$ (по Морелю), $D/H = d, d = 1 - \cos\gamma$

ния можно записать как отношение общей силы сопротивления воздуха к площади проекции BH

$$c_W = W/(q_\infty BH). \tag{4.7}$$

Преобразовав уравнения (4.4) – (4.7), можно получить выражение

$$c_W = c_{WT}(L_S/H) + c_{WD}(D/H). \tag{4.8}$$

Для частного случая, когда $L_S = H$, рассмотренного в [4.25] Морелем, можно записать

$$c_W = c_{WT} + c_{WD}d, \tag{4.9}$$

где (см. рис. 4.22): $D/H = d$; $d = 1 - \cos\gamma$.

На рис. 4.22 внизу показана зависимость произведения $c_{WD}d$ от угла наклона γ, c_{WT} можно взять без какого-либо пересчета с верхнего графика. Коэффициент аэродинамического сопротивления для сложной конфигурации получается по уравнению (4.9). В области $65° < \gamma < 80°$ сопротивление W_T наклонной поверхности уменьшается быстрее, чем возрастает сопротивление W_D базовой вертикальной поверхности, поэтому здесь имеет место минимум $c_W(\gamma)$. Для геометрических конфигураций, имеющих $L_S \neq H$, следует пользоваться уравнением (4.8). Таким образом, принципиально возможно получить форму задней части автомобиля, имеющую минимальное сопротивление. Для этого прежде всего необходимо установить зависимость коэффициента сопротивления базовой поверхности c_{WD} от величины относительного удлинения сужающейся задней части, которая определяется экспериментальным путем.

Рассчитать аэродинамическое сопротивление задней части можно только для тел простой конфигурации, например призматических. Обтекание передка автомобиля, выпуклость крыши, радиус перехода от крыши к поверхности задка, выпуклость боковых поверхностей кузова – все эти факторы в настоящее время учесть не представляется возможным.

Ступенчатую форму задка можно рассматривать аналогичным образом. За счет излома увеличивается число переменных (рис. 4.23, а) и поток существенно усложняется (см. рис. 4.4). Принципиально обтекание поверхности стекла задка можно рассматривать как обтекание неизолированного крыла, точно так же, как наклонную поверхность стекла зад-

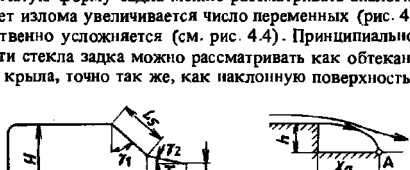


Рис. 4.23. Ступенчатая форма задней части кузова (B – ширина тела, отношение сторон стекла в задней части кузова $B/L_S = 3 \div 4$):
а – геометрические параметры; б – двухмерное обтекание ступенчатой формы

ка при плавно спускающейся форме задка. Так как его протяженность $B/L_s \approx 3$ существенно больше, чем при плавно спускающейся форме задней части автомобиля, то при том же угле наклона γ_1 на поверхности стекла индуцируются в среднем меньшее разрежение и меньшая подъемная сила, чем в случае плавно спускающейся формы. К тому же, место излома поверхности может стать местом отрыва вихря, так как оно накладывает отпечаток на поток в виде положительного градиента давления. Поэтому разрежение на стекле задка и скорости нисходящего потока становятся еще меньше.

Прямоугольные изломы ($\gamma_1 = 0$) были исследованы Арнольдом [4.28] с помощью двухмерных моделей (рис. 4.23, б). В процессе исследования определялось изменение расстояния от линии излома до точки A повторного прилегания потока, отнесенное к высоте ступеньки h в зависимости от параметров пограничного слоя. Чем толще пограничный слой потока, тем позднее поток прилегает к поверхности позади линии излома. Применительно к автомобилю это означает: толстый пограничный слой, существующий из-за неблагоприятного обтекания передней части автомобиля (капот, ветровое стекло, крыша), затрудняет повторное прилегание потока к поверхности задней части автомобиля. Результаты для $\gamma_1 > 0$ неизвестны, однако можно предполагать, что благодаря нисходящему потоку, индуцированному кромочными вихрями, возникающими при обтекании наклонного стекла задка автомобиля, точка повторного прилегания A смещается вперед.

Днище кузова и боковые поверхности. Элементы днища и боковые поверхности кузова в отношении механики обтекания рассматриваются как *шероховатые* поверхности (см. п. 2.3.3). Повышенная шероховатость ускоряет переход пограничного слоя от ламинарного режима к турбулентному и при турбулентном пограничном слое увеличивается сопротивление трения. Эти связи были тщательно исследованы для ровной пластины (см. работу Шлихтинга [4.1]). Зависимость сопротивления трения от *конструктивных* шероховатостей, появляющихся из-за выступов, поперечных канавок и желобков, была рассмотрена Вигхардтом [4.29] и Гернером [4.10]. Исследование влияния специфических для автомобиля *конструктивных* неровностей еще не проводилось, поэтому нельзя сказать, за счет каких факторов сопротивление трения этих поверхностей больше, чем сопротивление трения ровных пластин.

До сегодняшнего дня сопротивлению трения уделялось очень мало внимания. Как указано в п. 4.1, основную часть общего аэродинамического сопротивления составляет сопротивление давления, поэтому подобное пренебрежение было вполне правомерно. Но с развитием прогрессивных форм кузова, обладающих малым аэродинамическим сопротивлением, в основном за счет снижения сопротивления давления, сопротивление трения приобретает все большее значение.

Колеса и ниши колес. Обтекание свободнокатящегося колеса исследовалось Морелли [4.30], а также Стэплфордом и Карром [4.31]. Механизм обтекания катящегося колеса, частично помещенного в нишу, известен плохо. Некоторые исследования были проведены Скибор-Рыльс-

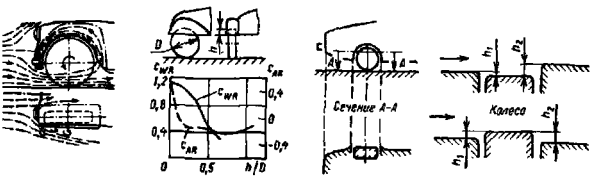


Рис. 4.24.. Поток вокруг колеса внутри арки колеса; влияние "глубины погружения" h на коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы колеса [4.18]

Рис. 4.25. Геометрическая схема расположения колеса относительно арки

ким [4.18]. На рис. 4.24 показано наблюдаемое им поле потока. При замерах силы сопротивления воздуха и подъемной силы Скибор-Рыльский варьировал глубину погружения колеса h в нишу колеса; коэффициенты c_{AR} и c_{WR} относятся к заштрихованной площади лобового сопротивления колеса. Коэффициент аэродинамического сопротивления колеса уменьшается, в первую очередь, из-за прикрытия колеса кузовом. Приведет ли увеличение прикрытия колеса при большой глубине его погружения в нишу к увеличению вентиляционных потерь – об этом сказать с уверенностью нельзя.

При формообразовании кузова существует известная свобода в отношении вписывания колеса в контур автомобиля (рис. 4.25). Влияние толщины колеса, выступания колеса спереди и сзади h_1 и h_2 и, наконец, формы дисков колес на характер потока, а значит, и на коэффициент аэродинамического сопротивления и загрязнение автомобиля до сих пор подробно не исследовано. Прикрытие колеса сбоку, практикуемое для задних колес, способствует уменьшению силы сопротивления воздуха в случае, если автомобиль имеет очень хорошую обтекаемость. То же самое можно сказать и об использовании плоских декоративных накладок на диски колес, которые уменьшают шероховатость боковой поверхности. Но эффект уменьшения силы сопротивления воздуха наблюдается только в том случае, когда в рассматриваемой области существует прилегающий к поверхности поток.

При более тщательном изучении обтекания колеса необходимо учитывать его вращение. О проблемах, связанных с проведением экспериментальных исследований по этому вопросу, рассказывается в п. 11.

Спойлер передка. С помощью спойлера передка уменьшается сопротивление трения нижней части автомобиля. Одновременно уменьшается действующая на передок автомобиля подъемная сила и увеличивается объемный расход воздуха в систему охлаждения двигателя. Каким образом спойлер способствует уменьшению аэродинамического сопротивления, видно из рис. 4.26. Суммарная сила аэродинамического сопротивления спойлера и днища W_B складывается из отдельных сил сопротивления спойлера W_S и днища F_B.

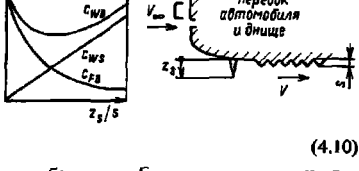


Рис. 4.26. Влияние спойлера передка на коэффициент сопротивления днища; s – высота равномерной шероховатости

$$W_B = W_S + F_B \,. \tag{4.10}$$

Сила сопротивления днища обозначена F_B, поскольку речь идет о сопротивлении трения. Спойлер же, напротив, создает сопротивление давления. Если рассматривать спойлер как прямоугольную пластину, поставленную поперек потока перпендикулярно к стенке, то значение коэффициента c_W для него можно вычислить следующим образом:

$$c'_{WS} = W_S / [(\rho/2)\, V_F^2\, A_S] \approx 1{,}2. \tag{4.11}$$

Для этого коэффициента в качестве характерной площади была выбрана площадь лобовой поверхности спойлера A_S, а скорость обтекающего спойлер потока была принята равной скорости движения автомобиля V_F. Определенный таким образом коэффициент c'_{WS} можно считать не зависимым от высоты спойлера z_S. Если же силу сопротивления спойлера отнести к поверхности лобового сопротивления автомобиля A, т.е.

$$c_{WS} = W_S / [(\rho/2)\, V_F^2\, A] = c'_{WS}\,(A_S/A), \tag{4.12}$$

то коэффициент сопротивления c_{WS} увеличивается прямо пропорционально с увеличением высоты спойлера z_S. На графике рис. 4.26 высота спойлера z_S отнесена к высоте эквивалентной равномерной шероховатости s панели днища.

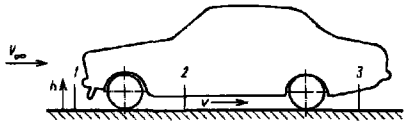
Сопротивление трения шероховатой поверхности днища определяется первоначально как обычно, по его гидравлически гладкой поверхности O и по скорости V на краю пограничного слоя:

$$c'_{FB} = F_B / [(\rho/2)\, V^2 O] \,. \tag{4.13}$$

Площадь гидравлически гладкой поверхности O жестко связана с площадью лобового сопротивления A автомобиля. Скорость V пропорциональна скорости движения V_F. В зависимости от формы автомобиля и расстояния от днища автомобиля до дороги отношение V/V_F может быть больше или меньше единицы (см. работу Гухо, Янссена, Шварца [4.32]); в общем случае скорость V не постоянна по длине днища автомобиля.

Можно принять, что коэффициент сопротивления трения c'_{FB}, определяемый уравнением (4.13), не зависит от скорости V; на самом деле (см. рис. 2.9), при большой шероховатости коэффициент сопротивления трения пластины c_f не зависит от числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = Vl/\nu$ (где l – длина пластины, ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха).

Скорость V зависит от высоты спойлера: с увеличением высоты спойлера z_S скорость V уменьшается. В количественном отношении функция



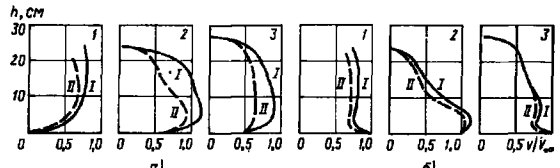


Рис. 4.27. Распределение скорости потока под автомобилем при наличии спереди спойлера и без него [4.33]:
I – без спойлера; *II* – со спойлером; *а* – испытания с моделью в масштабе 1:5; *б* – испытания автомобиля в дорожных условиях

$$V/V_F = f(z_S/s) \tag{4.14}$$

пока неизвестна.

На рис. 4.26 показана зависимость коэффициента сопротивления трения днища c_{FB}, пересчитанного относительно площади лобового сопротивления A автомобиля и его скорости V_F, от отношения z_S/s:

$$c_{FB} = c'_{FB}\,(O/A)\,(V/V_F)^2. \tag{4.15}$$

С учетом того, что вид функции (4.14) неизвестен, характер кривой $c_{FB} = f(z_S/s)$ предположителен. На основании уравнения (4.10) общий коэффициент сопротивления c_{WB} днища и спойлера

$$c_{WB} = c_{WS} + c_{FB}. \tag{4.16}$$

Коэффициент сопротивления трения c_{FB} днища сначала с увеличением высоты спойлера уменьшается быстрее, чем увеличивается коэффициент сопротивления давления c_{WS} спойлера. Но спойлер, имеющий большую высоту, может привести к увеличению коэффициента c_{WB}. При установке большого по высоте спойлера сопротивление днища будет больше, чем без него.

Уменьшение скорости V под днищем автомобиля за счет установки спойлера передка показывают приведенные на рис. 4.27 данные измерений Крамера и других [4.33]. К сожалению, данные измерений для модели в масштабе 1:5 и для автомобиля в реальных условиях сильно различаются [4.33]. Влияние спойлера передка на распределение давления было изучено Шенкелем [4.34] (рис. 4.28). Из рисунка видно, что при установке спойлера разрежение в передней части днища автомобиля значительно возрастает. Однако следует иметь в виду, что на основании имеющегося увеличения разрежения ни в коем случае нельзя сделать

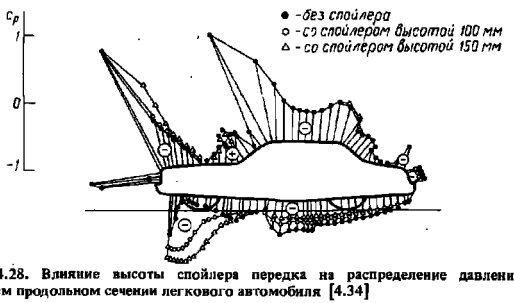


Рис. 4.28. Влияние высоты спойлера передка на распределение давления в среднем продольном сечении легкового автомобиля [4.34]

вывод о том, что в этом месте существуют высокие скорости. Позади спойлера речь идет об оторвавшемся потоке, поэтому константа Бернулли (см. п. 2.3.1) в этой области отличается от ее значения в *нормальном* внешнем потоке. В распределении давления по поверхности верхней части автомобиля наблюдаются весьма небольшие изменения.

Благодаря спойлеру передка уменьшается подъемная сила, действующая на переднюю часть автомобиля. Кроме того, более низкое давление со стороны днища автомобиля в области моторного отсека вызывает увеличение объемного расхода охлаждающего воздуха. Установка спойлера передка приводит к увеличению толщины пограничного слоя и уменьшению запаса энергии потока. Поэтому участок днища, несколько поднимающийся за задним мостом и выполняющий функции диффузора, при возникающем в этом случае положительном градиенте давления вдоль потока может привести к отрыву потока от днища. Из-за этого выигрыш в аэродинамическом сопротивлении, полученный благодаря установке спойлера, частично снижается. Взаимное влияние спойлера, шероховатости днища и диффузорообразной задней части днища еще не исследовалось.

Спойлер задка. Действие спойлера задка принципиально отличается от действия переднего спойлера. Его влияние на обтекаемость было изучено Отани и другими [4.35], при этом спойлер задка приравнивался к закрылку крылового профиля. В то время как для крыла с целью увеличения подъемной силы закрылок выдвигается вниз, то в данном случае для уменьшения силы сопротивления воздуха и подъемной силы он выдвигается вверх. На рис. 4.29 показана используемая Отани с соавторами плоская модель. Крыло воспроизводится плоской пластиной, установленной под углом α к потоку. Это очень напоминает продольное сечение плавноспускающейся задней части автомобиля. Длина закрылка l_2 очень мала по сравнению с длиной пластины l_1. Но даже в случае, если не ограничиваться условием $l_2/l_1 \leqslant 1$, эта модель с точки зрения теории совершенно правомерна (см. работу Шлихтинга и Трук-

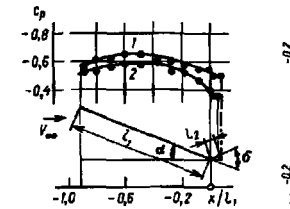


Рис. 4.29. Плоская модель крыла с закрылком к рассмотрению вопроса о заднем спойлере [4.35]: *1* – без спойлера (δ = 0); *2* – со спойлером

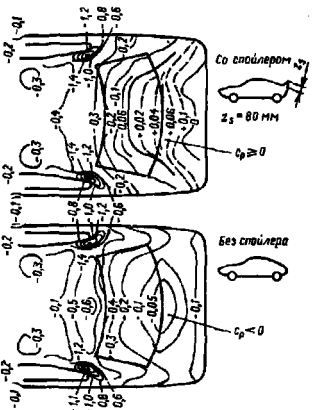


Рис. 4.30. Изобары по поверхности задка автомобиля (со спойлером и без него) [4.35]

кенбродта [4.12]). Распределение давления, измеренное при заданных параметрах угла атаки крыла α и угла отклонения закрылка δ показано на рис. 4.29. Из приведенных графиков хорошо заметно, что использование закрылка приводит к уменьшению разрежения на верхней стороне пластины. Изобары на рис. 4.30, построенные на основе данных измерений для спортивного автомобиля со спойлером и без него, см. также работу Отани и других [4.35], подтверждают результат, полученный для плоской модели. В то время как при отсутствии спойлера почти на всей поверхности задка существует разрежение, $c_p < 0$, установка спойлера приводит к образованию зон повышенного давления, $c_p > 0$. Если построить кривую распределения давления по высоте автомобиля z/h (см. рис. 4.31), то влияние спойлера двери задка будет заметно еще отчетливее. Установка заднего спойлера не оказывает влияния на распределение



Рис. 4.31. Распределение давления для легкового автомобиля с плавно спускающейся формой задка при установке спойлера сзади и без него [4.35]: *а* – в передней части автомобиля; *б* – в задней части автомобиля

давления в передней части автомобиля. Что касается давления в задней части, то оно при установке спойлера повышается даже в зоне двухмерного вихревого следа. То, что спойлер уменьшает подъемную силу, действующую на заднюю часть автомобиля, видно из рис. 4.30.

Распределение давления по поверхности автомобиля со ступенчатой формой задней части при установленном спойлере было исследовано Шенкелем [4.34], но описания характера обтекания для этого случая в столь законченном виде, как это имеет место в случае плавноспускающейся формы задка, еще нет. Отдельные результаты приведены в п. 4.5.5.

Навесные элементы. Навесные элементы, такие, как наружные зеркала заднего вида или антенна, имеют высокое значение коэффициента c_W, если рассчитывать его для их собственной поверхности лобового сопротивления. Если W_M – аэродинамическое сопротивление зеркала, A_M – площадь его поверхности лобового сопротивления, то для зеркала можно записать:

$$c'_{WM} = W_M / [(\rho/2)\, V^2 A_M] = 1{,}2, \qquad (4.17)$$

если зеркало плоское и круглой формы, для других зеркал см. работу Гернера [4.10]. Скорость потока V в данном случае не равна скорости движения V_F, она должна определяться путем измерений.

Коэффициент аэродинамического сопротивления для антенны, если W_A – сила ее аэродинамического сопротивления, A_A – площадь лобового сопротивления антенны:

$$c'_{WA} = W_A / [(\rho/2)\, V^2 A_A] = 1{,}2. \qquad (4.18)$$

В области существующих скоростей движения поток, обтекающий антенну, характеризуется числом Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = (Vd)/\nu < 3 \cdot 10^5,$$

где d – диаметр антенны, т.е. можно рассматривать случай отрыва ламинарного потока от круглого цилиндра. Площади лобовых сопротивлений указанных навесных элементов очень малы по сравнению с площадью лобового сопротивления автомобиля. Так, например, площадь наружного зеркала заднего вида составляет менее 0,5 % площади лобового сопротивления автомобиля. Часть общего коэффициента аэродинамического сопротивления, приходящаяся на зеркало, если приблизительно принять $V = V_F$, определяется следующим образом:

$$c_{WM} = c'_{WM}(A_M/A) = 1{,}2 \cdot 0{,}005 = 0{,}006. \qquad (4.19)$$

Это примерно 1 % общего значения коэффициента c_W при условии хорошего согласования размеров зеркала с размерами автомобиля. Вклад антенны в общее аэродинамическое сопротивление примерно того же порядка.

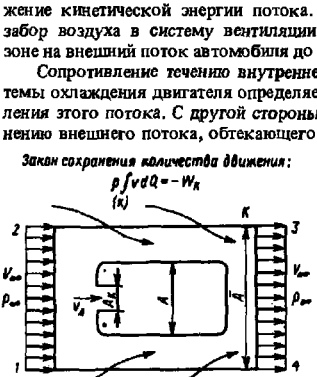
В приведенных рассуждениях не учитывается обратное действие навесных элементов на поле потока автомобиля. При обтекании наружных зеркал заднего вида за ними образуется широкий и длинный вихревой след, который нарушает поток вдоль боковых поверхностей автомобиля. Количественных данных о влиянии турбулентного следа за зеркалом

на процесс обтекания автомобиля нет. Отрицательное воздействие наружного зеркала особенно сильно может отразиться на коэффициенте аэродинамического сопротивления автомобилей с хорошо обтекаемыми формами. Для таких автомобилей рассматриваемый вопрос требует повышенного внимания.

Аэродинамическое сопротивление внутренних потоков. На легковом автомобиле имеется два вида внутренних потоков: воздушный поток системы охлаждения двигателя и воздушный поток систем отопления и вентиляции салона. Существенное влияние на общее аэродинамическое сопротивление оказывает только поток через радиатор системы охлаждения двигателя, так как объемный расход воздуха системы вентиляции салона на порядок меньше объемного расхода воздуха системы охлаждения двигателя. Как правило, забор воздуха для системы вентиляции салона осуществляется в зоне сопряжения капота с ветровым стеклом. Для этой зоны характерно наличие отрыва (см. рис. 4.3) и снижение кинетической энергии потока. Из этого потока и производится забор воздуха в систему вентиляции. Влияние отсоса воздуха в этой зоне на внешний поток автомобиля до сих пор не изучено.

Сопротивление течению внутреннего потока воздушной трассы системы охлаждения двигателя определяется, с одной стороны, потерей давления этого потока. С другой стороны, наличие канала приводит к изменению внешнего потока, обтекающего автомобиль. Суммарное действие этих явлений приводит, как правило, к увеличению аэродинамического сопротивления автомобиля.

Зависимость между внутренними потерями системы, по которой протекает воздух, и ее экстремальным сопротивлением была изучена в процессе оптимизации масляных радиаторов самолетов. Обзор этих работ можно найти у Гернера [4.10]. В предельном случае, когда весь поток охлаждающего воздуха на выходе из системы имеет импульс в направлении движения, равный нулю, сила сопро-



Баланс масс и количества движения

	Изменение массы	Изменение количества движения
1-2	$-\rho \bar{A} V_\infty$	$-\rho \bar{A} V_\infty^2$
3-4	$\rho \bar{A} V_\infty$	$\rho \bar{A} V_\infty^2$
2-3 1-4	$-\rho A_K v_A$	$-\rho A_K v_A V_\infty$
	$-\rho A_K v_A$	$-\rho A_K v_A V_\infty$

$$W_K = \rho A_K v_A V_\infty$$

$$c_{WK} = W_K / [(\rho/2) V_\infty^2 A_K] = 2 v_A / V_\infty$$

Рис. 4.32. Вычисление коэффициента сопротивления воздуха системы охлаждения с помощью закона сохранения количества движения

тивления охлаждающего воздуха была рассчитана с использованием закона сохранения количества движения (рис. 4.32). Коэффициент сопротивления, определяемый отношением силы сопротивления охлаждающего воздуха к площади лобового сопротивления A в этом случае будет:

$$c_{WK} = W_K / [(\rho/2)\, V_F^2 A] = 2(v_A/V_F)\ (A_K/A), \qquad (4.20)$$

где A_K – площадь лобового сопротивления радиатора; v_A – средняя скорость потока на входе в радиатор, она берется с учетом внутреннего сопротивления канала, подводящего воздух к радиатору (см. п. 9.3.1).

Для встречающихся обычно значений v_A/V_F и A_K/A (см. работу Эмменталя и Гухо [4.36]) согласно уравнению (4.20) получаются следующие предельные значения изменения коэффициента сопротивления охлаждающего воздуха: $0{,}02 < c_{WK} < 0{,}06$. Тщательно доведенная система охлаждения вызывает увеличение аэродинамического сопротивления автомобиля примерно на 2 %; в общем случае увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления может превысить 10 %.

4.4. ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

4.4.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При рассмотрении истории развития автомобильной аэродинамики в п. 1.2 было указано на ряд исследовательских работ, выполненных в прошлом. В дополнение к ним в данной главе приводятся результаты более поздних исследований и рекомендации по созданию автомобилей, обладающих хорошими аэродинамическими свойствами. В современных исследованиях по снижению аэродинамического сопротивления можно выделить два направления работ.

1. Продолжаются работы, направленные на изучение свойств хорошо обтекаемых тел, помещенных вблизи основания, о которых сообщалось в п. 1.2.3. Как было указано в этом разделе, хотя и предпринималась попытка непосредственного использования формы таких тел для автомобильных кузовов, но она не увенчалась успехом. Если же форму такого тела взять в качестве исходной для разработки формы автомобиля, то это позволит, как будет показано в п. 4.7, получить очень низкое значение коэффициента аэродинамического сопротивления.

2. Продолжаются работы по улучшению аэродинамики за счет оптимизации параметров кузова. Среди них можно указать на работы, освященные в п. 4.5.4, а также на работы по созданию кузовов на базе обтекаемых тел (см. выше).

Характерным является то, что оба направления работ ведутся с учетом специальных требований и ограничений, предъявляемых к автомобильной технике, в отличие от более ранних работ, указанных в п. 1.2, которые этого не учитывают.

4.4.2. ХОРОШО ОБТЕКАЕМЫЕ ТЕЛА, ПОМЕЩЕННЫЕ ВБЛИЗИ ОСНОВАНИЯ

Исследования хорошо обтекаемых тел, помещенных вблизи основания, начатые Клемперером [4.37] и продолженные Каммом и его сотрудниками (цитируется по Кениг-Фахзенфельду [4.38]), а также Гансеном и Шлером [4.39] (см. п. 1.2) продолжались и в более позднее время. Столлери и Бернс [4.40] исследовали влияние расстояния от тела до основания и угла установки тела* на силу сопротивления воздуха и подъемную силу. Изменяя форму передка таких тел, Морелли, Фьераванти и Коготти [4.41], [4.42], [4.43] получали тела, имеющие различную выпуклость, и исследовали влияние выпуклости тела, помещенного вблизи основания, на коэффициент аэродинамического сопротивления. В результате работы была сформулирована гипотеза образования тел с минимальным аэродинамическим сопротивлением. Кэрр [4.44] варьировал такие параметры как относительные толщина и выпуклость тела, расстояние до основания и угол установки, и по результатам наблюдений дал рекомендации для проектирования форм, обеспечивающих малое аэродинамическое сопротивление.

Важнейшие результаты исследований, выполненных Столлери и Бэрнсом [4.40], приведены ниже. На рис. 4.33 показано, что при угле установки $\alpha = 0$ коэффициент аэродинамического сопротивления симметричного тела с приближением его к основанию увеличивается; это хорошо совпадает с результатами измерений Гансена и Шлера [4.39] (см. рис. 1.28). При угле установки $\alpha > 0$ эта тенденция четко не выражена.

Коэффициент подъемной силы с приближением к основанию сильно уменьшается, но при этом интенсивность его возрастания с увеличением α ($dc_A/d\alpha$) больше. При малых и отрицательных углах установки наблюдается обратная тенденция; к сожалению, именно в этой области измерения не были продолжены. Эти изменения тенденций в области, близкой к $\alpha = 0$, показывают, насколько проблематично использовать полученные на основании измерений общие выводы для формообразования автомобилей.

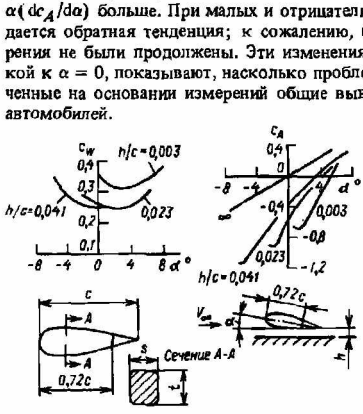


Рис. 4.33. Хорошо обтекаемое симметричное тело, установленное вблизи основания [4.40]; относительная высота тела $t/c = 0{,}21$; относительная ширина тела $s/c = 0{,}365$

* Имеется в виду угол в вертикальной плоскости, аналогичный углу атаки крыла самолета. – *Прим. ред. пер.*

expert22 для http://rutracker.org

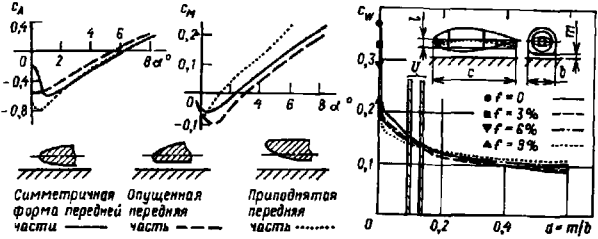


Рис. 4.34. Влияние формы передней части тела на коэффициенты подъемной силы и продольного момента; расстояние от основания $h/c = 0{,}003$ (см. также рис. 4.33) [4.40]

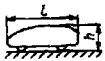
Рис. 4.35. Влияние относительной выпуклости тела ($f = l/c$) на его коэффициент аэродинамического сопротивления при продувке вблизи основания; U – область обычных величин дорожного просвета для легковых автомобилей [4.41]

За счет изменения формы передней части тела Столлери и Бернс [4.40] получали несимметричные тела; влияние этих изменений на коэффициент подъемной силы и продольного момента показано на рис. 4.34. Если передняя часть вытянута вниз, то, с одной стороны, увеличивается кривизна верхней поверхности – следствием этого должно было быть увеличение подъемной силы; с другой стороны, при этом уменьшается эффективный угол установки α – за счет этого подъемная сила уменьшается. Оба этих эффекта уравновешиваются, за исключением области, близкой к $\alpha = 0$. Вблизи $\alpha = 0$ вытянутая вверх передняя часть приводит к получению минимальной подъемной силы, но одновременно к максимальному продольному моменту, т.е., если говорить об автомобиле, к сильной разгрузке передней оси. Поэтому спортивные автомобили предусматриваются с вытянутой вниз передней частью (см. рис. 7.1). Связанное с такой формой передка увеличение значения подъемной силы, действующей на автомобиль, компенсируется за счет других мероприятий, например благодаря использованию спойлера задка (см. п. 7.12).

Морелли и другие [4.41], [4.43] установили, что при небольшом расстоянии от днища автомобиля до основания и неизменном угле установки α коэффициент аэродинамического сопротивления с увеличением относительной выпуклости тела уменьшается, в то время как при большом расстоянии до основания наблюдается совершенно обратная картина. Как видно на рис. 4.35, названный эффект выражен слабо. Так как в [4.41] не приведены данные по значениям коэффициента подъемной силы, то рис. 4.35 нельзя использовать для оценки гипотезы Морелли о том, что при такой форме автомобиль будет иметь минимальное аэродинамическое сопротивление и действующая на него суммарная подъемная сила будет равна нулю. Согласно этой гипотезе Морелли раз-

работал ряд "базовых" тел, которые имеют весьма малое значение коэффициента аэродинамического сопротивления. В табл. 4.1. представлены два таких тела в сравнении с "базовыми" телами Клемперера [4.37], Гухо, Янссена и Эммельманна [4.53].

4.1. Сравнение коэффициентов сопротивления различных "базовых" тел

"Базовое" тело	Литературный источник	c_W	l/h	Примечание
	[4.37]	0,15	4,0	Установлены колеса
	[4.53]	0,16	3,0	Установлены колеса
	[4.43]	0,07	3,1	Без колес
		0,18		С колесами
	[4.42]	0,05	3,9	Без колес

Из [4.42] следует, что представленные Морелли тела имеют самое высокое значение коэффициента полноты. Так, для исследуемого в [4.42] тела отношение длины l к высоте h автомобиля составляет примерно $l/h \approx 3{,}9$, в то время как отношение указанных величин для автомобиля среднего класса*, на габаритные размеры которого ориентируется описанная в [4.53] модель, $l/h = 3{,}0$. Вопрос о том, является ли предельно малое значение $c_W = 0{,}05$ в большей степени следствием повышенного значения коэффициента полноты и особой формы задка или же разработанной Морелли теории, остается открытым.

Результаты измерений, выполненных Кэрром [4.44] для "базовых" тел, представлены на рис. 4.36, где показано влияние относительных толщины и выпуклости, а также угла установки α на коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы. По сравнению с легковыми автомобилями исследуемые "базовые" тела сильно вытянуты. Относительная толщина, т.е. отношение толщины d к длине l изменялось в пределах $0{,}09 < d/l < 0{,}26$. Для легковых автомобилей это значение (отношение высоты к длине) составляет примерно 0,30.

При переносе полученных для "базовых" тел результатов на реальные автомобили требуется особое внимание. Непосредственно пользоваться результатами измерений можно лишь тогда, когда поле потока в обоих случаях одинаково или, по крайней мере, аналогично. Для исследованных Кэрром тел [4.44] этого не наблюдается. Приведенные на

* По классификации СССР – малый класс, III группа. – *Прим. перев.*

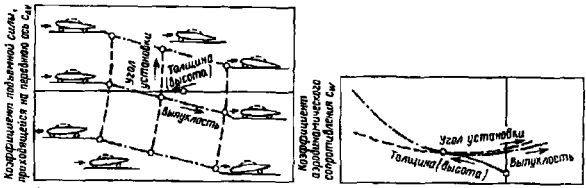


Рис. 4.36. Влияние относительных выпуклости, высоты и угла установки на коэффициенты подъемной силы, приходящейся на переднюю и заднюю оси автомобиля, и коэффициент аэродинамического сопротивления; положение осей соответствует 11% и 65% общей длины [4.44]

рис. 4.36 данные могут использоваться в качестве руководства при проектировании спортивных и рекордных автомобилей (см. п. 7).

Резюмируя изложенное выше, можно сказать, что значение приведенных выше результатов исследований для "базовых" тел, как уже упоминалось в п. 4.4.1, состоит в том, что они могут использоваться при разработке "базовых" тел, обладающих малым аэродинамическим сопротивлением, которые, в свою очередь, могут служить исходным телом для разработки формы автомобиля.

4.4.3. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ КУЗОВА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ АВТОМОБИЛЯ

Влияние на аэродинамическое сопротивление важнейших принципиальных для формы автомобиля параметров изучалось еще в 1933 г. Лэем [4.19]. Полученные результаты представлены на рис. 4.37. Измерения Лэя особенно хорошо раскрывают взаимодействие между передней и задней частями автомобиля. Для формы, обладающей очень малым коэффициентом аэродинамического сопротивления, например, при сильно вытянутой сужающейся форме задка, оформление передка имеет большое значение. Если поток при круто поднимающемся ветровом стекле отрывается, то это приводит к сильному увеличению коэффициен-

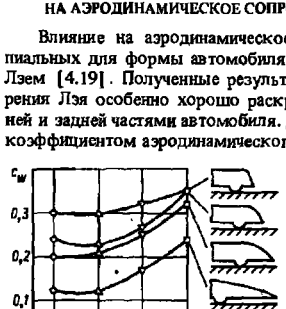


Рис. 4.37. Влияние основных принципиальных геометрических параметров формы на коэффициент аэродинамического сопротивления модели легкового автомобиля [4.19]

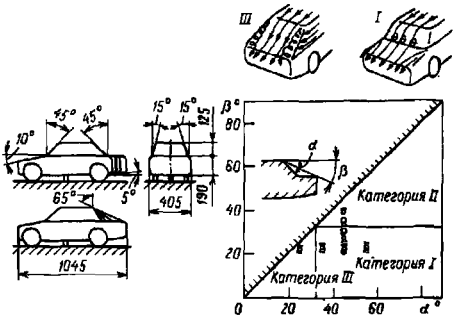


Рис. 4.38. Эскиз геометрических параметров ступенчатой формы задка [4.27]

та *аэродинамического сопротивления*. При форме задка, обладающей высоким коэффициентом аэродинамического сопротивления, за счет неблагоприятного обтекания передка сила сопротивления воздуха увеличивается незначительно. Модели Лэя, которые получались комбинированием различных отдельных деталей, имели параллельные плоские боковины и острые кромки. Этим объясняется относительно высокое значение коэффициента c_W, прежде всего, для форм, имеющих ступенчатую заднюю часть. Поэтому приведенные выше высказывания об интерференции передка и задка могут служить только для качественного сравнения.

Обширнейшие исследования влияния изменений геометрических параметров кузовов легковых автомобилей были проведены Кэрром и результаты опубликованы в ряде сообщений МИРА (*MIRA*)* (см. [4.45], [4.46], [4.47]). На рис. 4.38 приведены результаты исследований различных форм задней части автомобиля (см. работу Кэрра [4.27]). В зависимости от угла наклона заднего стекла и длины багажника (при ступенчатой форме задка) Кэрр выделяет три категории форм задней части автомобиля.

Категория I – ступенчатая форма задка. Аэродинамическое сопротивление и подъемная сила, приходящаяся на заднюю ось, относительно высоки; боковая сила, приходящаяся на заднюю ось, имеет небольшое значение (*при* $\beta \neq 0$).

Категория II – форма задка типа "универсал". Аэродинамическое сопротивление и подъемная сила, приходящаяся на заднюю ось, невелики. На заднюю ось приходится относительно высокое значение боковой силы.

**MIRA* – Научно-исследовательская ассоциация автомобильной промышленности. – *Прим. перев.*

Категория III – плавно спускающаяся форма задка. Значение силы сопротивления воздуха и подъемной силы, приходящейся на заднюю ось, малы. Боковая сила, приходящаяся на заднюю ось, имеет большое значение.

Сказанное выше носит относительный характер. Как можно увидеть из рис. 4.21, имеются такие конфигурации плавноспускающейся формы задка, которые по сравнению с формой задка типа "универсал" имеют существенно большее значение коэффициента c_W, и такие, которые имеют меньшее значение.

Уайт [4.48] предпринял попытку на основании результатов исследования Кэрра и многочисленных измерений МИРА разработать для оригинальных легковых автомобилей метод, позволяющий оценить аэродинамическое сопротивление любого легкового автомобиля. Этот метод оценки следует описать здесь, прежде всего потому, что он относительно часто используется для сравнения и критической оценки автомобилей в отношении их аэродинамических свойств (см., например, работу Норбье [4.49]). То, что указанный метод для этого не подходит, можно понять из нижеследующего.

Уайт выбрал девять характерных для обтекания участков кузова, которые показаны на рис. 4.39. Руководствуясь приведенными в [4.48] рекомендациями, аэродинамические свойства каждого из этих участков оцениваются числом баллов p_i. Возможное количество баллов для каждого участка приведено на рис. 4.39; хорошие свойства в отношении аэродинамического сопротивления оцениваются меньшим числом баллов. Особенно неудачные с точки зрения обтекаемости элементы, как, например, отбортованные фланцы, стойки ветрового стекла, используемые в качестве сточного желобка, учитываются дополнительным баллом.

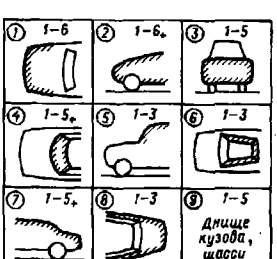


Рис. 4.39. Элементы формы, оказывающие влияние на аэродинамическое сопротивление легкового автомобиля, и их оценка [4.48]

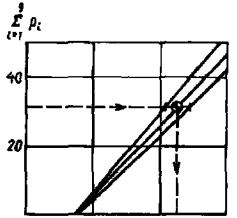


Рис. 4.40. Зависимость коэффициента сопротивления воздуха от суммы баллов (см. рис. 4.39) [4.48]

По оценочным баллам вычисляется значение коэффициента c_W:

$$c_W = a \sum_{i=1}^{9} p_i.$$

Прямая, характеризующая зависимость по уравнению (4.21), представлена на рис. 4.40; по мнению Уайта, погрешность не должна превышать ± 7 %. Уравнение (4.21) не учитывает потока воздуха, протекающего через радиатор системы охлаждения двигателя; сопротивление охлаждающего воздуха можно оценить только средним значением $\overline{\Delta c_{WK}} = 0{,}03$, более точное значение назвать нельзя. Погрешность такой оценки составляет, по меньшей мере, ± 5 % общего значения c_W. Суммарная погрешность составит тогда ±12 %; а в действительности она может достичь величины ±15 %. При этом не учитывается, что другие, не рассматриваемые здесь параметры, например угол установки α и расстояние от днища до основания, зависящие от нагрузки, также оказывают существенное влияние на коэффициент аэродинамического сопротивления. Как видно из рис. 1.44, эта погрешность довольно точно соответствует области разброса значений c_W для всех современных европейских автомобилей серийного производства. Следовательно, используя метод Уайта, автомобили невозможно дифференцировать в отношении их аэродинамического сопротивления. С другой стороны, при составлении оценочной шкалы не учитывались конфигурации тел, обладающие очень малым коэффициентом аэродинамического сопротивления, т.е. их нельзя оценить в соответствии с предложенным методом.

Значение метода, предложенного Уайтом, состоит в том, что им были названы критические с точки зрения обтекаемости области и в известной степени проведено их сравнение (см., например, участки *2* и *5* рис. 4.39). Этим самым обращается внимание дизайнеров и конструкторов на критические места автомобиля и необходимость их оформления с учетом достижения по возможности меньшего значения аэродинамического сопротивления.

4.5. ИЗМЕРЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ НАТУРАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

4.5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Общепринято для рассматриваемого автомобиля давать одно числовое значение коэффициента c_W. В действительности же каждый автомобиль имеет область разброса значений коэффициента аэродинамического сопротивления, поскольку сила сопротивления воздуха зависит не только от формы автомобиля. Положение автомобиля относительно дороги, определяемое дорожным просветом и углом установки, также влияет на силу сопротивления воздуха. И наконец, следует обратить внимание на то, что состояние, в котором эксплуатируется автомобиль – например, с закрытыми окнами или с открытыми, – изменяет значение c_W. Параметры, влияющие на аэродинамическое сопротивление, представлены

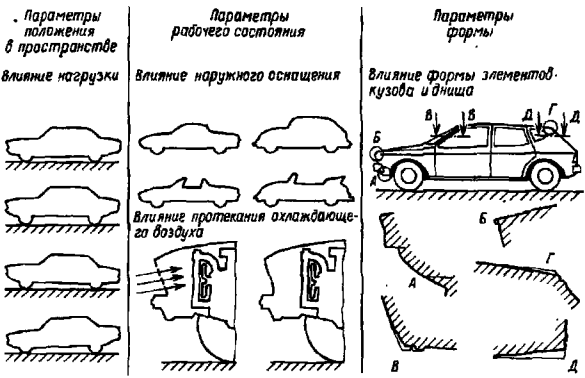


Рис. 4.41. Классификация параметров, влияющих на силу сопротивления воздуха [4.26]

на рис. 4.41 (по работе Янссена, Гухо [4.26]) и разделены на следующие три категории: параметры положения; параметры рабочего состояния; параметры формы. В этой последовательности они рассмотрены ниже. В заключение даны значения коэффициентов аэродинамического сопротивления для большого числа автомобилей серийного производства.

Все без исключения числовые значения, приведенные в этом разделе, получены при испытаниях в аэродинамической трубе концерна "Фольксваген" (37,5 м^2), проводимых при одинаковых условиях (см. п. 11). Поэтому без каких-либо ограничений их можно сравнивать друг с другом. Трудности, возникающие при сравнении результатов измерений, полученных в различных аэродинамических трубах, будут рассмотрены в п. 11.

4.5.2. ПОЛОЖЕНИЕ АВТОМОБИЛЯ В ПРОСТРАНСТВЕ, БОКОВОЙ ВЕТЕР

Влияние различных параметров, характеризующих положение автомобиля в пространстве, на силу сопротивления воздуха и подъемную силу изучалось Янссеном и Гухо [4.50]; приведенные ниже сведения взяты из этой работы. Параметры, определяющие положение автомобиля, представлены на рис. 4.42. Угол установки $\alpha = 0$ взят произвольно; в дальнейшем $\alpha = 0$ означает обусловленное конструкцией положение автомобиля.

Влияние угла установки α на коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы показано на рис. 4.43. Величина дорожного просвета для каждого из автомобилей оставалась постоянной. Коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы

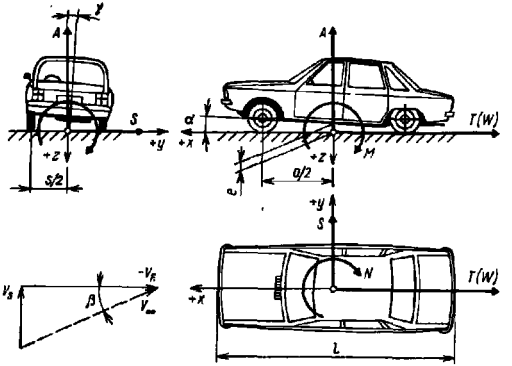
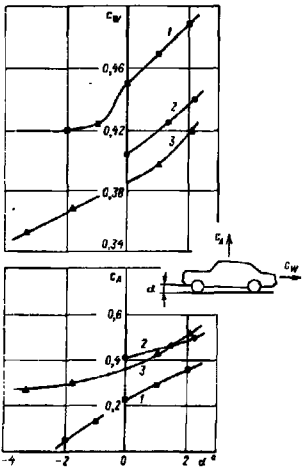


Рис. 4.42. Параметры, определяющие положение автомобиля в пространстве [4.50]

для трех рассматриваемых автомобилей возрастают с увеличением угла установки. Изменение угла установки на 1^0 вызывает изменение коэффициента аэродинамического сопротивления примерно на 2 %. Насколько сильно влияет изменение угла установки при различных вариантах углового положения кузова относительно днища кузова, до сих пор не изучалось. Но можно предполагать, что влияние будет не намного меньше, чем в рассмотренном выше случае. Если дизайнеры сумеют получить отрицательный угол установки до 2^0, то это будет хорошим вкладом в дело уменьшения аэродинамического сопротивления.

Влияние дорожного просвета *e* на силу аэродинамического сопротивления и подъемную силу показано на рис. 4.44. Только для автомобиля "Ситроен *ID* 19" характерно такое же увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления с уменьшением величины дорожного просвета, какое было получено при измерениях, проведенных Гансеном и Шлером [4.39] (см. рис. 1.28), а также Столлери и Бернсом [4.40] (см. рис. 4.33). У остальных автомобилей, один из которых является автомобилем-фургоном, с уменьшением дорожного просвета коэффициент аэродинамического сопротивления снижается, а коэффициент подъемной силы почти не изменяется. В то время как автомобиль "Ситроен *ID* 19" имеет очень гладкое днище, днища остальных автомобилей обладают нормальной неровностью, т.е. сделать общий вывод о тенденции влияния дорожного просвета на силу сопротивления воздуха и подъемную силу нельзя.

В процессе эксплуатации автомобиля угол установки и дорожный просвет не могут изменяться независимо друг от друга; в зависимости от нагрузки одновременно изменяются оба параметра. Насколько боль-



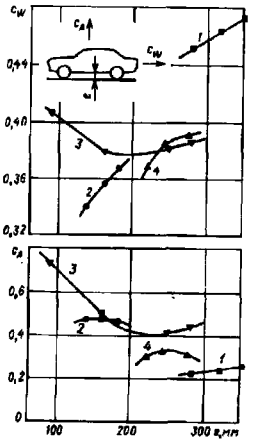


Рис. 4.43. Коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы легковых автомобилей в зависимости от угла установки [4.50]:
1 – "Фольксваген", вариант 411; *2* – "Ауди 100"; *3* – рекордный автомобиль "*F*2–2"

Рис. 4.44. Коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы легковых автомобилей и автомобиля-фургона в зависимости от дорожного просвета *e* [4.50]:
1 – автомобиль-фургон "Фольксваген"; *2* – "Фольксваген Порше 914"; *3* – "Ситроен *ID*19"; *4* – рекордный автомобиль "*F*2–2"

шие изменения коэффициента аэродинамического сопротивления могут иметь место при нагружении автомобиля (с соблюдением предписаний о допустимых нагрузках на оси), видно из рис. 4.45. Исходное значение коэффициента c_{W2} в данном случае соответствует значению при полной нагрузке, но в настоящее время в качестве нормальной нагрузки выбирается величина, равная половине допустимой нагрузки, в соответствии с предписаниями *DIN* 70030 для измерения расхода топлива. Особенно большая разность в коэффициентах аэродинамического сопротивления получается для автомобилей, которые имеют багажник спереди или сзади. Как правило, багажник располагается сзади, и с увеличением нагрузки вследствие связанного с ним изменения угла установки наблюдается рост аэродинамического сопротивления.

При движении автомобиля в естественных условиях, когда, например, существует ветер, поток обтекает автомобиль с углом скоса β

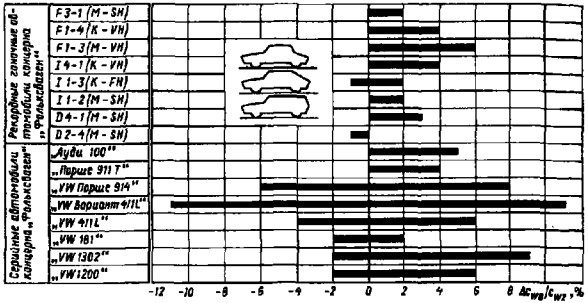


Рис. 4.45. Влияние нагрузки на коэффициенты аэродинамического сопротивления легковых автомобилей [4.50]:
K – автомобили малого класса; *M* – автомобили среднего класса; *SH* – ступенчатая форма задка; *FH* – плавноспускающаяся форма задка; *VH* – круто спускающаяся форма задка (типа "универсал")

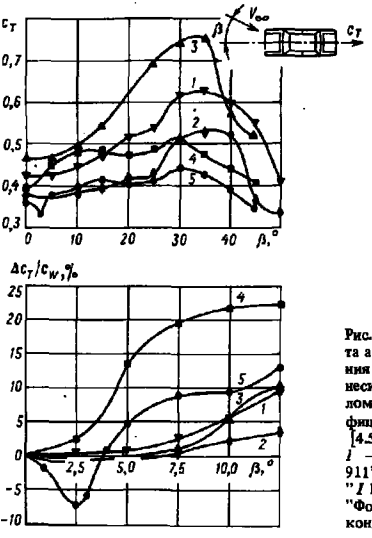


Рис. 4.46. Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления легковых автомобилей при несимметричном обтекании с углом скоса потока β; c_T – коэффициент тангенциальной силы [4.50]:
1 – "Ауди 100"; *2* – "Порше 911"; *3* – рекордный автомобиль "*I* 1–2"; *4* – модель концерна "Фольксваген" "*P*1"; *5* – модель концерна "Фольксваген" "*P*2"

(см. рис. 4.2). Случай $\beta = 0$ встречается крайне редко. Грубая прикидка показала, что для легковых автомобилей в области скоростей свыше $V_K = 80$ км/ч действительный угол скоса потока составляет $\beta \approx 5^0$. Поэтому при разработке формы автомобиля усиленное внимание нужно уделить тому, чтобы сохранить полученное при симметричном обтекании ($\beta = 0$) малое значение c_W для случая обтекания несимметричным потоком, по крайней мере, хотя бы в пределах реальных углов скоса потока. На рис. 4.46 показаны полученные экспериментальным путем кривые $c_T(\beta)$. Индекс "T" указывает на то, что речь идет об аэродинамической силе, действующей в направлении продольной оси автомобиля. На верхнем графике сравниваются абсолютные значения коэффициента c_T в области изменения угла скоса потока до $\beta = 45^0$; на нижнем графике показано изменение относительной величины коэффициента тангенциальной силы в диапазоне малых значений угла скоса, которые встречаются чаще. Бросается в глаза очень резкое увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления для прототипа № 1. Наблюдаемое уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления для прототипа № 2 при очень малых значениях угла β (речь идет об одном из первых прототипов автомобиля "Фольксваген Гольф") указывает на неблагоприятное обтекание при $\beta = 0$, в процессе разработки автомобиля это явление было устранено.

При определении зависимости между силой сопротивления воздуха и расходом топлива (см. п. 3) до сегодняшнего дня исходят из значения коэффициента c_W при $\beta = 0$. Как показывает рис. 4.46, это упрощение, как правило, вполне допустимо. Иные соотношения имеют место для грузовых автомобилей, которые вследствие их меньших средних скоростей движения обтекаются потоком с большим углом скоса β; об этом рассказывается в п. 8.4.3.

4.5.3. ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ АВТОМОБИЛЯ

Открытые окна, убирающиеся фары, опущенная крыша, сложенный тент изменяют характер обтекания и оказывают влияние на силу сопротивления воздуха. Два примера, взятые из работы Янссена и Гухо [4.50], поясняют сказанное. На рис. 4.47 представлено сравнение лимузина и купе с выполненными на их базе кабриолетами, последние рассматриваются с открытым и закрытым тентом. При закрытом тенте в обоих случаях различие по форме кузова между лимузином, купе и соответственно кабриолетами, выполненными на их базе, несущественное, мало отличаются и значения коэффициентов аэродинамического сопротивления. При сложенном тенте увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления в общем случае может достигать 70 %. Если тент выполнен убирающимся или же его форма очень хорошо вписывается в контур кузова, то прирост коэффициента аэродинамического сопротивления существенно меньше. Для точности следует указать, что замеры коэффициента аэродинамического сопротивления при открытом тенте осуществлялись без водителя и пассажиров. "Заполнение" пространства позади

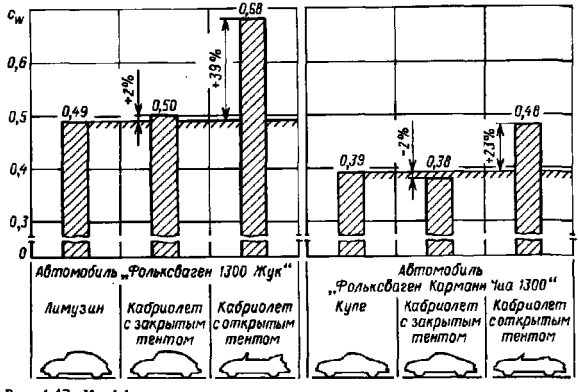


Рис. 4.47. Коэффициенты аэродинамического сопротивления для лимузина, купе и выполненных на их базе кабриолетов (с открытым и закрытым тентом) [4.50]

ветрового стекла в кабриолетах за счет посадки людей положительно влияет на обтекаемость и частично компенсирует увеличение силы сопротивления воздуха.

Отдельное рассмотрение дополнительной составляющей аэродинамического сопротивления, возникающей из-за протекания охлаждающего воздуха в системе охлаждения двигателя, представляет интерес для техники моделирования. На рис. 4.48 представлена в сгруппированном по значению коэффициента дополнительного сопротивления от потока охлаждающего воздуха информация для 76 автомобилей ($N = 76$); шаг изменения коэффициента сопротивления между отдельными группами составляет $\Delta c_{WK} = 001$*; приведенные данные хорошо совпадают с оценкой согласно уравнению (4.20). Высокие значения коэффициен-

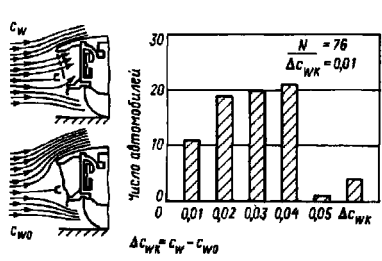


Рис. 4.48. Увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления легковых автомобилей вследствие действия потока охлаждающего воздуха

* В оригинале книги в тексте и на рисунке допущена опечатка, указано значение $\Delta c_{WK} = 0,03$, что не соответствует приведенной на рис. 4.48 диаграмме. – *Прим. перев.*

та сопротивления охлаждающего воздуха имеют место в том случае, когда объемный расход воздуха через решетку радиатора и моторный отсек гораздо больше, чем это необходимо для охлаждения двигателя. Если же через подкапотное пространство протекает только такой объем воздуха, который необходим для охлаждения двигателя, то даже для автомобилей, на которые устанавливаются очень мощные двигатели, можно сохранить значение $\Delta c_{WK} < 0{,}03$.

4.5.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА АВТОМОБИЛЕЙ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В табл. 4.2 приведены значения коэффициентов сопротивления воздуха для ряда серийных автомобилей; все значения были определены в аэродинамической трубе концерна "Фольксваген" при одинаковых условиях измерения. Как сообщается в п. 11, полученные при измерениях в аэродинамической трубе концерна "Фольксваген" значения коэффициентов c_W очень хорошо совпадают со значениями, измеренными в других больших аэродинамических трубах.

Состояние автомобиля, при котором проводились измерения:

половинная нагрузка (два веса по 75 кг на передних сидениях, остальная нагрузка приложена в центре багажника);

свободное подрессоривание;

серийная экипировка (щиток номерного знака, одно наружное зеркало заднего вида, антенна отсутствует);

свободное поступление охлаждающего воздуха в систему охлаждения двигателя;

вход системы вентиляции салона открыт.

Кроме коэффициента c_W в таблице даны значения площади лобового сопротивления A (см. рис. 1.3), произведения $c_W A$, а также составляющей аэродинамического сопротивления, коэффициента Δc_{WK}, обусловленной сопротивлением движению охлаждающего воздуха.

Здесь приведены только те значения коэффициентов c_W, которые уже были опубликованы в литературе (см. работы Вернера [4.59], Хайля [4.60]).

4.5.5. ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ

Передок автомобиля. Работу по снижению аэродинамического сопротивления автомобиля рекомендуется начинать с передней части кузова, а затем уже переходить к остальным элементам кузова в последовательности, соответствующей направлению перемещения потока. Благодаря такому подходу учитывается основная часть интерференции полей потоков; к сожалению, в этом случае не принимается во внимание обратное влияние проводимых в направлении перемещения потока мероприятий на поля потоков предшествующих участков кузова, оно учитывается на втором этапе работ.

Пример оптимизации передней части показан на рис. 4.49, где представлены изменения формы продольного сечения (см. работу Гухо и

4.2. Коэффициенты аэродинамического сопротивления серийных автомобилей. Классификация автомобилей по Хайлю [4.60]

Автомобиль	Год начала выпуска	Коэффициент аэродинамического сопротивления c_W	Площадь лобового сопротивления A, м²	Произведение $(c_W \cdot A)$, м²	Коэффициент сопротивления охлаждающего воздуха Δc_{WK}
Малые автомобили (Особо малый класс; II группа) *					
"Форд Фиеста"	76	0,43	1,71	0,74	0,03
"Форд Эскорт *GL*"	76	0,45	1,80	0,81	0,03
"Мазда 323 де люкс"	78	0,52	1,74	0,90	0,07
"Опель Кадетт Чити"	75	0,52	1,76	0,92	0,06
"Рено *R5 TL*"	73	0,45	1,71	0,77	0,04
"Фольксваген Поло *L*"	78	0,45	1,67	0,75	0,01
"Фольксваген 1200 Жук"	74	0,48	1,80	0,86	–
Нижний средний класс (Малый класс; I и II группы)					
"Альфазуд *Ti*"	76	0,39	1,77	0,69	0,02
"Альфазуд"	73	0,44	1,77	0,78	0,02
"Крайслер Симка Горизон *GL*"	78	0,41	1,88	0,78	0,04
"Ситроен *GS*"	71	0,37	1,77	0,65	0,02
"Фиат Ритмо"	78	0,44	1,86	0,82	?
"Опель Кадетт 1,65"	78	0,49	1,76	0,87	0,05
"Рено *R*14*TL*"	76	0,42	1,83	0,76	0,04
"Фольксваген Гольф *LS*"	78	0,42	183	0,77	0,02
Средний класс (Малый класс; III группа)					
"Ауди 80"	78	0,46	1,77	0,81	0,02
"БМВ 316" (*BMW* 316")	76	0,47	1,82	0,86	0,06
"Крайслер Симка 1307 *GLS*"	76	0,46	1,80	0,83	0,03
"Форд Таунус *L*"	76	0,45	1,90	0,86	0,03

"Опель Аскона"	76	0,46	1,83	0,84	0,04
"Пежо 305 *SR*"	78	0,46	184	0,84	0,05
"Рено *R* 16"	67	0,49	1,86	0,91	0,04
"Фольксваген Пассат *S*/Вариант *S*"	78	0,41	1,77	0,72	0,03
Верхний средний класс (Средний класс)					
"Альфа Ромео Джульетта 1,6"	78	0,43	1,87	0,80	0,03
"Ауди 100 *L* Авант"	78	0,41	2,00	0,82	0,03
"Ауди 100"	78	0,42	2,00	0,84	0,02
"БМВ 520 ("*BMW* 520")	73	0,43	2,00	0,86	0,04
"Ситроен *CX* 2000"	74	0,40	1,96	0,78	0,02
"Форд Гранада *GL*"	77	0,45	2,12	0,95	0,05
"Мерседес 230"	76	0,45	2,08	0,94	0,03
"Опель Рекорд"	77	0,46	1,97	0,90	0,06
"Рено 30 *TS*"	75	0,44	2,02	0,89	0,04
"Вольво 244 *GL*"	75	0,52	2,09	1,09	0,03
Верхний класс (Большой класс)					
"БМВ 728" ("*BMW* 728")	77	0,45	2,12	0,95	0,03
"Ягуар *XJ* 5,3"	77	0,41	2,00	0,82	0,03
"Мерседес 280 *TE*"	77	0,43	2,08	0,89	0,03
"Ровер 3500"	78	0,39	2,05	0,81	0,02
Спортивные автомобили					
"Феррари 308 *GT* 4"	77	0,40	1,76	0,70	0,03
"Опель Манта *GT/E*"	76	0,42	1,76	0,74	0,05
"Порше 924"	76	0,37	1,75	0,64	0,03
"Порше 911"	76	0,39	1,77	0,71	–
"Фольксваген Сирокко *LS*"	78	0,42	1,70	0,71	0,02
"Фольксваген Сирокко *GTI*"	78	0,45	1,71	0,78	0,03

*Указанная классификация примерно соответствует классификации автомобилей, принятой в СССР. Названия соответствующих классов по классификации СССР приведены в скобках. – *Прим. ред. пер.*

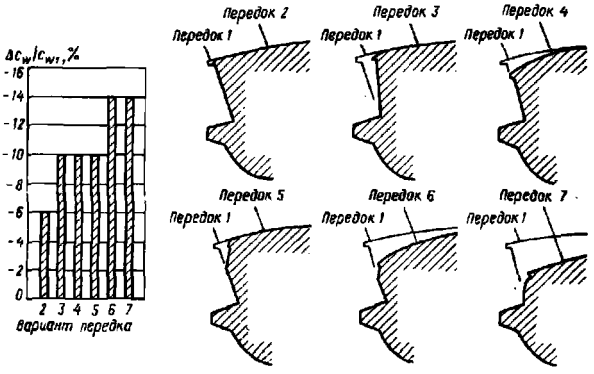


Рис. 4.49. Оптимизация формы передка автомобиля (среднее продольное сечение) [4.51]

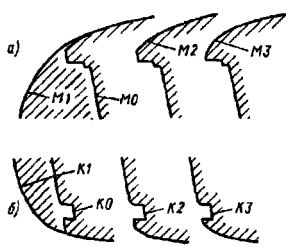


Рис. 4.50. Оптимизация формы передка на примере автомобиля "Фольксваген Гольф" [4.26]:
а – среднее продольное сечение автомобиля; *б* – горизонтальное сечение по центру фар; *в* – влияние элементов формы на уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления

Янссена [4.51]). Исходная форма, обозначенная "передок 1", для сравнения показана для всех вариантов изменения. Диаграмма сбоку дает представление о процентном изменении коэффициента аэродинамического сопротивления относительно сопротивления исходной формы. Небольшая корректировка передней кромки капота уменьшает сопротивление уже на 6 %. Формы передка 3, 4 и 5 являются равнозначными, они уменьшают коэффициент аэродинамического сопротивления на 10 %. Формы 6 и 7 с точки зрения стиля весьма заметно отличаются от исходной формы; они выполнены лишь для того, чтобы показать, каких улучшений можно добиться.

Пример *оптимизации формы передка* (см. п. 4.6.1) приведен на

рис. 4.50, где показаны результаты разработки автомобиля "Фольксваген Гольф" (см. работу Янссена и Гухо [4.26]). Чтобы установить, какое максимальное уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления можно получить за счет оптимальной формы передка, прежде всего, проведено улучшение обтекания передка за счет накладного элемента, форма которого учитывает только аэродинамические аспекты, на его внешний вид внимания не обращается. Поводом к такому подходу, который еще будет описан подробнее, послужила работа Кэрра [4.52]. Целесообразнее такой накладной элемент выполнить из отдельных деталей, чтобы разделить влияние верхнего перехода к капоту двигателя и влияние бокового перехода к крыльям. Благодаря установке обеих деталей – накладного элемента *M1* (переход к капоту двигателя) и *K1* (переход к крылу) – было определено максимальное уменьшение коэффициента сопротивления $\Delta c_W = -0{,}05$. Это значение является предельным, которое можно получить при заданных размерах передка, если не обращать внимание на стилистические требования.

Установка детали *K1*, улучшающей переход к боковине крыла, незначительно снижает коэффициент сопротивления, $\Delta c_W = -0{,}015$, т.е. достигнутое благодаря оптимизации перехода к боковине уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления только 30 % от максимального снижения, которое получено при установке "идеального" накладного элемента. Накладные элементы *M2* и *K2*, придающие кромкам форму обтекаемой поверхности, но не нарушающие стилистического решения передка, позволяют снизить коэффициент аэродинамического сопротивления на $\Delta c_W = -0{,}02$, что составляет 40 % максимально возможного снижения. За счет установки элементов *M3*, *K3* с плавно "размытыми" кромками передка достигается уменьшение $\Delta c_W = -0{,}045$, что составляет уже 90 % возможного уменьшения коэффициента аэродинамического сопротивления. Такое измение формы передка лишь немного изменяет стилистическое решение, габаритные размеры передка при этом сохраняются. Оптимизированный таким образом контур передка с закругленными переходами использовался на автомобилях "Фольксваген Гольф" и "Фольксваген Сирокко". Насколько "чисто" поток обтекает передок автомобиля, имеющий такую форму, показывает характер струек дыма (см. рис. 4.51).

Показанный на рис. 4.50 накладной элемент был выполнен таким образом, чтобы обтекающий передок поток не имел отрывов. Такую форму очень часто называют "оптимальным передком". Безотрывное обтекание можно получить и при других формах, причем некоторые из них обеспечивают достижение еще более низкого значения c_W, чем имеет показанная на рис. 4.50 форма. Приведенные на рис. 4.52 варианты накладных элементов (см. работу Гухо, Янссена, Эммельманна [4.53]) позволяют увидеть, что такие разные на первый взгляд формы в отношении снижения коэффициентов аэродинамического сопротивления отличаются друг от друга несущественно. В качестве "оптимального" можно считать лишь показанный точечной линией контур, другие формы несколько хуже. Тем не менее необходимо отметить, что если в процессе исследова-



Рис. 4.51. Обтекание передка автомобиля "Фольксваген Гольф"

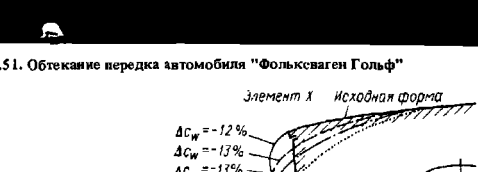


Рис. 4.52. Варианты формы "оптимального передка" [4.53]

ния интуитивно принимается "оптимальным" один из приведенных на рис. 4.52 или близкий к нему контур передка и указывается при этом контуре значение c_W, к которому нужно стремиться, то это вполне допустимо, учитывая, что различия между ними невелики.

Не в каждом случае значение c_W, соответствующее значению для оптимального передка, можно получить за счет столь несущественных изменений формы, как это имело место для автомобилей "Фольксваген Гольф" и "Фольксваген Сирокко". Пример приведен на рис. 4.53. Первоначально автомобиль "Ауди 100" (год выпуска 1975) должен был иметь форму передка, обозначенную буквой А, стилистическое решение которой было заимствовано у предыдущей модели. С помощью установки "оптимального передка" выяснилось, что только за счет хорошо обтекаемого передка можно получить уменьшение коэффициента аэродина-

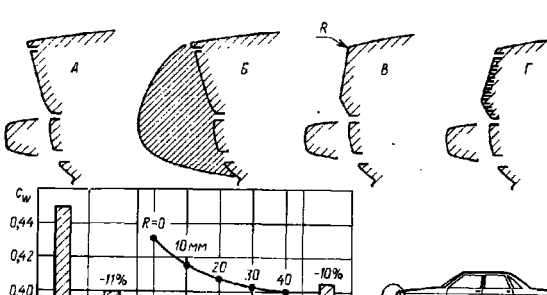


Рис. 4.53. Разработка передка автомобиля "Ауди 100" (1975 г.) [4.65]:
А – исходное состояние; *Б* – "оптимальный передок"; *В* – промежуточная форма передка; *Г* – серийный автомобиль "Ауди 100"

мического сопротивления на 11 %. Такую величину невозможно было получить при незначительном изменении формы А, сохранив ее стилистическое решение. Поэтому была разработана форма В, при которой стало возможным приблизиться к оптимальному значению за счет скругления радиусом *R* передней кромки капота. Такого же хорошего результата, как установил Гухо [4.4], можно добиться благодаря небольшому выдвижению и наклону переднего края капота.

Такая форма переднего края капота была применена при разработке передка автомобиля "Фольксваген Пассат", модели 1978 г. Картина обтекания струйками дыма (рис. 4.55 слева) для предшествующей модели (эскиз на рис. 4.54 слева) позволяет увидеть на поверхности капота отрывной поток, который существенно увеличивал аэродинамическое сопротивление этого автомобиля. Использование "оптимального передка" показало, что существует возможность на 15 % снизить коэффициент аэродинамического сопротивления. Эта возможность была реализована за счет изменения формы капота, одновременно существенно уменьшился коэффициент подъемной силы, приходящейся на переднюю ось. Характер обтекания улучшенного передка показан на рис. 4.55 справа внизу.

С другой стороны, как видно из рис. 4.56 (см. работу Гухо, Янссена, Эммельманна [4.53]), очень часто приблизиться к присущему "оптимальному передку" характеру обтекания можно, прибегая к очень небольшим изменениям формы. По сравнению с исходной формой оптимальный передок (форма Б) обеспечивает уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления на 9 %. Точно такой же результат можно получить, реализовав форму Г, в которой лишь слегка закругле-

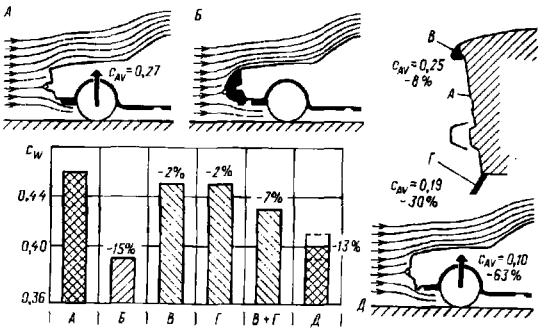


Рис. 4.54. Разработка передка автомобиля "Фольксваген Пассат" (1978 г.):
А – серийный "Пассат" (1977 модельный год); *Б* – "оптимальный передок"; *В* – вариант формы передка

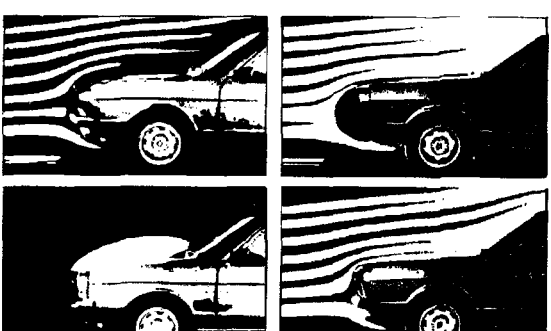


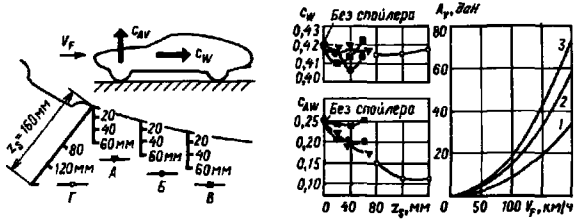
Рис. 4.55. Обтекание передка автомобиля "Фольксваген Пассат":
слева – 1977 модельный год; справа – 1978 модельный год

на передняя часть капота и решетка радиатора установлена параллельно исходному положению и немного выдвинута вперед. С помощью вариантов формы В можно также получить снижение коэффициента аэродинамического сопротивления на величину, составляющую более половины максимально возможного уменьшения коэффициента сопротивления воздуха.

Рис. 4.56. Оптимизация передка за счет согласования формы *капота* и *исполнения* решетки радиатора [4.53]



Рис. 4.57. Разработка спойлера для автомобиля "Фольксваген до Бразиль 1600X" [4.50]:
1 – спойлер *Г* высотой 120 мм; *2* – спойлер *Б* высотой 40 мм; *3* – без спойлера



Еще один пример оптимизации формы передка показан на рис. 6.9.

Спойлер передка. Спойлер передка может выполняться отдельно устанавливаемой деталью кузова либо изготовляться как единое целое с панелью передка, т.е. отштамповываться совместно с ней. В первом случае существует относительно большая свобода в выборе положения, высоты и наклона спойлера. Во втором случае возможности при выборе параметров спойлера меньше, связано это прежде всего с технологическими причинами.

При разработке спойлера передка для автомобиля "*V W* до Бразиль X", спортивного купе, было исследовано несколько вариантов расположения спойлеров (рис. 4.57 [4.50]). В зависимости от положения спойлера по длине автомобиля получалось различное оптимальное значение высоты спойлера z_S. Результаты измерения также показывают, что если задача состоит в получении минимального значения коэффициента подъемной силы, а не возможно меньшего значения коэффициента аэродинамического сопротивления, то значение оптимальной высоты спойлера z_S увеличивается. Эти результаты были подтверждены измерениями Шенкеля [4.34] (рис. 4.58*). В то время как коэффициент подъемной силы, приходящейся на переднюю ось, с увеличением высоты спойлера z_S монотонно уменьшается, коэффициент аэродинамического сопротивления имеет минимальное значение при высоте спойлера примерно z_S = 100 мм, при дальнейшем увеличении высоты спойлера коэффициент c_W снова возрастает (см. также рис. 4.26).

*В оригинале на графиках допущена опечатка. Вместо Δc_{AH}, Δc_W, Δc_{AV} указаны абсолютные значения коэффициентов c_{AH}, c_W, c_{AV}. – *Прим. ред. пер.*

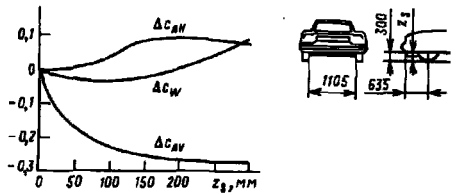


Рис. 4.58. Влияние высоты спойлера передка z_s на коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы легкового автомобиля [4.34]

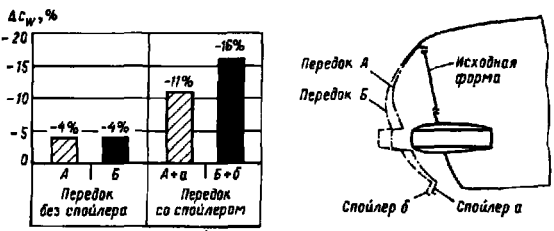


Рис. 4.59. Согласование формы передка и спойлера [4.53]

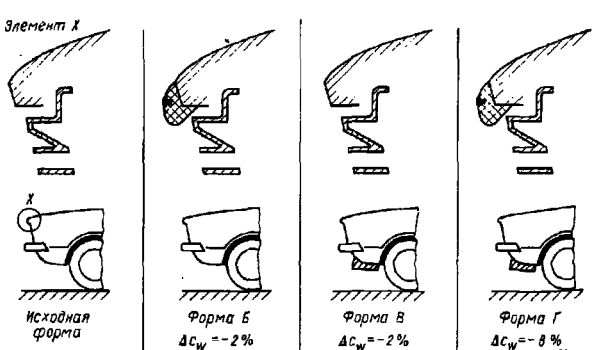


Рис. 4.60. Согласование спойлера передка и оформления передней кромки капота [4.53]

Спойлер передка следует согласовывать с формой передней части автомобиля, необходимость этого поясняется в двух приведенных ниже примерах. Благодаря установке накладного элемента передка (рис. 4.59), имеющего форму А или Б, коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автомобиля был снижен на 4 %, см. [4.53]. Формы А и Б очень незначительно отличаются друг от друга. Для обеих форм была проведена оптимизация спойлера. Передок А со спойлером "а" позволил снизить коэффициент аэродинамического сопротивления на 11 %; передок Б со спойлером "б" – на 16 %.

Результаты, приведенные на рис. 4.60 (также из [4.53]), показывают, как чутко реагирует поток на малейшие изменения формы и их согласование друг с другом. Сначала с помощью установки хорошо закругленного резинового профиля на передний край капота был увеличен его эффективный радиус, форма Б, коэффициент c_W уменьшился на 2 %, коэффициент подъемной силы, приходящейся на переднюю ось – на 8 %. При форме В профиль был снят и установлен спойлер передка. Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления осталось небольшим, всего 2 %, а коэффициент подъемной силы уменьшился очень заметно. В форме Г устанавливались оба элемента одновременно, но результат не равен сумме двух отдельных результатов. Значительное уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления в случае Г может, пожалуй, объясняться образованием пикового разрежения за счет взаимодействия закругленного с помощью профиля переднего края капота и спойлера; такое пиковое разрежение не может существовать при острой кромке капота. Доказательства сказанному, основанные на результатах измерения распределения давления, будут приведены ниже.

Стойка ветрового стекла (стойка А). Влияние стойки ветрового стекла на аэродинамическое сопротивление очень сильно зависит от положения и формы ветрового стекла, а также от формы передка. Решая вопрос снижения аэродинамического сопротивления путем правильного формообразования стойки ветрового стекла, как, впрочем, и любого другого элемента кузова, необходимо учитывать технологические возможности изготовления и ее функциональную нагрузку, которая заключается, например, в защите передних боковых стекол от попадания дождевой воды и грязи, сдуваемой с ветрового стекла, в поддержании приемлемого уровня внешнего аэродинамического шума и др.

На рис. 4.61 (см. работу Янссена и Гухо [4.26]) показано влияние оформления стойки ветрового стекла (стойки *А*) на коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля "Фольксваген Сирокко". Исходная форма *1* с выступающим водосточным желобком с точки зрения технологии является исключительно удачным решением. В качестве недостатка следует отметить сильный отрыв позади стойки, который ведет к очень высокому значению коэффициента аэродинамического сопротивления и к сильному шуму ветра. Показанный на рисунке поток дождевой воды тормозится в водосточном желобке, и при правильном выборе размеров водосточного желобка предотвращается попадание воды на передние боковые стекла.

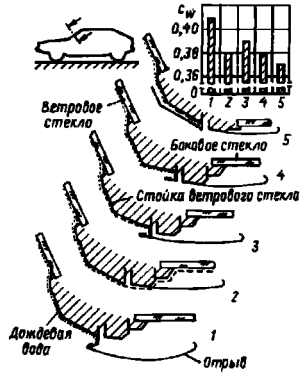


Рис. 4.61. Разработка стойки ветрового стекла (стойки А) для автомобиля "Фольксваген Сирокко" [4.26]

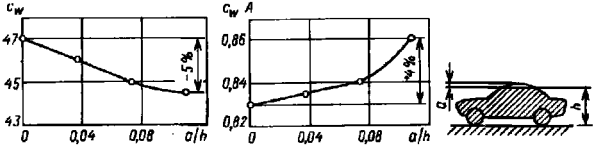


Рис. 4.62. Влияние выпуклости крышки на коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля со ступенчатой формой задка

Форма *2* без водосточного желобка позволяет получить коэффициент сопротивления $c_W = 0{,}38$; по сравнению с формой *1*, имеющей водосточный желобок, коэффициент сопротивления воздуха для этой формы меньше на *7* %. Шум ветра во втором случае тоже меньше. Недостатком формы стойки *2* является то, что дождевая вода с ветрового стекла беспрепятственно попадает со стойки *А* на боковые стекла.

Форма исполнения *3* имеет частично утопленный в стойку водосточный желобок, фланец которого расположен параллельно поверхности стойки ветрового стекла. При такой конструкции стойки коэффициент $c_W = 0{,}39$, что по сравнению с формой *1* на *5* % меньше, а по сравнению с формой *2* без водосточного желобка на 3 % больше. Такая форма стойки во время слабого или среднего дождя препятствует перетеканию воды и грязи с ветрового на боковое стекло. Водосточный желобок стойки ветрового стекла автомобиля "Фольксваген Гольф" примерно соответствует показанной форме *3*.

Если водосточный желобок полностью вписан в стойку, – форма исполнения 4, – то значение $c_W = 0{,}38$ равно значению для конструкции без водосточного желобка. Но это решение по сравнению с конструкцией стойки без водосточного желобка имеет преимущества: оно более техно-

логично, и вода с ветрового стекла не попадает на боковые стекла. В отношении аэродинамического шума формы *4* и *2* в рассматриваемом случае равнозначны. Автомобиль "Фольксваген Сирокко" имеет водосточный желобок, соответствующий форме *4*.

Конструкция стойки ветрового стекла *5* выделяется наличием длинного водосборного кармана и расположением боковых стекол заподлицо с поверхностью автомобиля. Вследствие исключения перепада между поверхностью бокового стекла и стойкой коэффициент c_W составил 0,37, т.е. это на 3 % меньше, чем для конструкции *2* без водосточного желобка, и на 10 % меньше, чем для конструкции *1* с выступающим водосточным желобком. В отличие от форм *3* и *4* водосборный карман при оптимальном оформлении контура наряду с хорошей обтекаемостью даже при высоких скоростях движения и при сильном дожде защищает боковые стекла от малейшего попадания на их поверхность воды с ветрового стекла. Недостатком такого конструктивного решения является высокая стоимость. Аналогичная форме *5* конструкция используется, например, на автомобиле "Порше 924".

Крыша. Увеличение выпуклости крыши может привести к уменьшению коэффициента аэродинамического сопротивления, это показано на рис. 4.62 для автомобилей среднего класса со ступенчатой формой задней части. Увеличение выпуклости на значение a/h более 0,05 относительно уже имеющегося его значения в исходном состоянии считается стилистически неприемлемым. Если увеличение выпуклости сопровождается одновременным увеличением площади лобового сопротивления, то сила сопротивления воздуха ($\sim c_W A$) возрастает. Если же попытаться сохранить первоначальную высоту h, то ветровое и заднее стекла должны будут внедряться в выпуклость крыши, поскольку обзорность ухудшаться не должна. Это ведет к удорожанию стекол, уменьшение же силы сопротивления воздуха в этом случае относительно мало.

Задок автомобиля. На рис. 4.63 (см. работу Янссена, Гухо [4.26]) показано влияние угла наклона панели задка на коэффициент сопротивления воздуха и положение линии отрыва. На автомобилях с круто срезанной задней частью, с углом наклона задней панели к горизонтали φ от 40 до 60^0, линия отрыва потока совпадает с задней кромкой крыши. Кромочные вихри в форме вихревых трубок, которые создают на наклонной поверхности задка разрежение, не возникают (см. рис. 4.4 слева).

В рассматриваемом случае коэффициент аэродинамического сопротивления относительно небольшой: $c_W = 0{,}40$. Если угол наклона поверхности задка φ уменьшать, то можно получить граничное значение угла, при котором линия отрыва переходит с кромки крыши на нижнюю кромку наклонной поверхности задка. Одновременно образуются два сильных вращающихся вовнутрь продольных вихря (см. средний эскиз на рис. 4.4), которые индуцируют на наклонной поверхности задка сильное разрежение (см. рис. 4.20).

Этот процесс сопровождается повышением аэродинамического сопротивления, которое в рассматриваемом случае составляет 10 %.

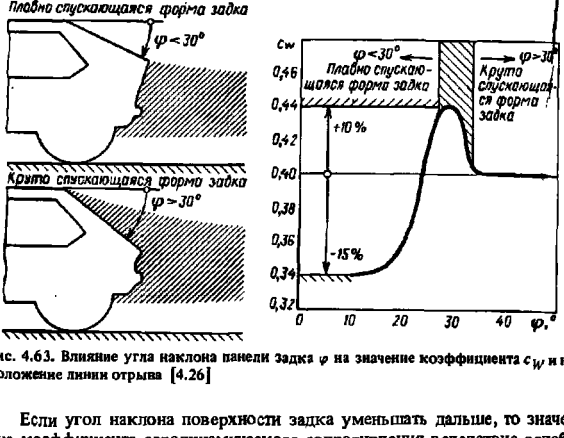


Рис. 4.63. Влияние угла наклона панели задка φ на значение коэффициента c_W и на положение линии отрыва [4.26]

Если угол наклона поверхности задка уменьшать дальше, то значение коэффициента аэродинамического сопротивления вследствие ослабления интенсивности продольных трехмерных вихрей снова уменьшается. При угле наклона $\varphi = 23^0$ получается значение $c_W = 0{,}40$, такое же, как у автомобиля с круто срезанной задней частью. Угол наклона панели задка $\varphi = 23^0$ является предельно допустимым с точки зрения реализации необходимых значений углов видимости, приемлемых для легковых автомобилей серийного производства. Только для более низких спортивных купе допустимы меньшие углы наклона панели задка (до $\varphi = 15^0$), что дает по сравнению с круто срезанной формой задней части уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления почти на 15 %.

Имеющие место на графике характерные точки залома кривой коэффициента аэродинамического сопротивления в зависимости от угла наклона панели задка соответствуют строго зафиксированным значениям угла φ лишь тогда, когда переход от крыши и поверхности задка выполнен в виде острой кромки (без скругления). Если же этот переход выполнен со скруглением радиусом R, то переходная область, характеризующаяся пульсирующим изменением положения линии отрыва, перемещающейся с кромки крыши на нижнюю кромку наклонной панели задка, ограничивается диапазоном $28^0 < \varphi < 32^0$.

Наряду с углом наклона панели задка на коэффициент аэродинамического сопротивления сильно влияет оформление кромок в районе задней части автомобиля. На рис. 4.64 (см. [4.26]) показано влияние оформления кромки крыши и кромки боковины (стойки двери задка – так называемой стойки "C") на коэффициент c_W на примере автомобиля *с круто срезанной формой задка* "Фольксваген Гольф". Показанные

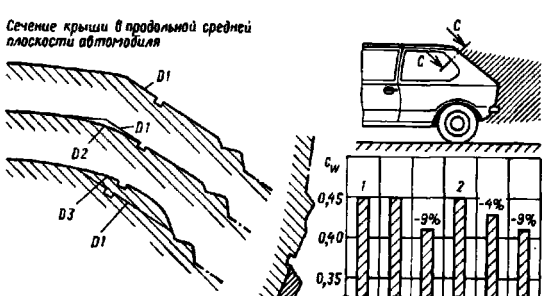


Рис. 4.64. Влияние формообразования кромки крыши и кромки боковин на значение коэффициента c_W для легкового автомобиля с круто спускающейся формой задней части [4.26]:
1, 2 – исходное состояние

изменения формы в данном случае не приводили к изменению характера потока.

Исследование влияния формы прилежащих к кромке крыши поверхностей на коэффициент c_W проводилось при неизменном контуре боковины автомобиля. Если сопряжение крыши с наклонной панелью задка выполнено в виде острой кромки (*D1*), то линия отрыва потока располагается выше разъема двери задка и совпадает с этой кромкой. За счет скругления кромки крыши (*D2*) линия отрыва, хотя и перемещается на линию разъема двери задка, но при этом не сопровождается изменением коэффициента c_W. При сильном скруглении кромки крыши (*D3*) линия отрыва смещается назад и коэффициент c_W уменьшается на 9 %. Уменьшение коэффициента c_W связано с увеличением базового давления в вихревом следе за автомобилем.

На значение коэффициента аэродинамического сопротивления c_W также оказывает влияние форма боковой кромки задней части автомобиля (см. рис. 4.64). Конструктивное оформление задней стойки с перепадом поверхностей, характеризуемым размером a, снижает значение коэффициента c_W. При a = 10 мм c_W уменьшается на 4 %, а вслучае a = = 20 мм снижение c_W составляет 9 %, т.е. точно такое же, какое имело место при сильно скругленной кромке крыши. Комбинация контура крыши (*D3*) с выступанием боковины на a = 20 мм не приводит к дальнейшему уменьшению коэффициента аэродинамического сопротивления

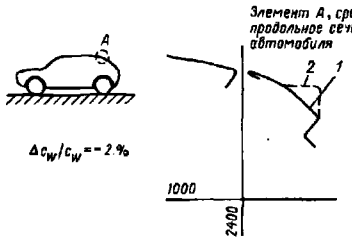


Рис. 4.65. Спойлер крыши автомобиля "Фольксваген Гольф", выполненный как единое целое с панелью двери задка:
1 – первоначальный контур; *2* – новый контур

по сравнению со значениями, достигнутыми для каждого из этих мероприятий в отдельности. Выступание контура боковины $a = 20$ мм имеет место на автомобиле "Фольксваген Гольф".

Дополнительного снижения коэффициента аэродинамического сопротивления можно добиться, выполняя кромку крыши в виде небольшого спойлера. На автомобиле "*VW* Гольф" такой спойлер предусмотрен в верхней части панели двери задка (рис. 4.65). Это дополнительно снизило коэффициент аэродинамического сопротивления на 2 %. Можно предположить, что такой спойлер крыши аналогично нижнему спойлеру двери задка при плавно спускающейся форме задней части автомобиля способствует повышению давления в задней части крыши. К уменьшению коэффициента c_W это ведет, однако, только тогда, когда поверхность задней части крыши имеет тенденцию к снижению, т.е. площадь проекции ее на плоскость, перпендикулярную к направлению движения, не равна нулю. Зачастую при установке подобного спойлера об этом забывают. Точного объяснения механизма действия спойлера крыши до сегодняшнего дня не существует.

На коэффициент аэродинамического сопротивления задка, имеющего ступенчатую форму, может влиять высота багажника. Пример приведен на рис. 4.66 (см. работу Гухо, Янссена, Эммельманна [4.53]). Как показано на рисунке, первоначальное увеличение высоты багажника до $z \approx 100$ мм не отражается на значении c_W. При высоте $z \approx 100$ мм наблюдается резкое скачкообразное уменьшение коэффициента аэродинами-



Рис. 4.66. Влияние высоты и формы поверхности, образующей багажник, при ступенчатой форме задка, на значение коэффициента c_W легкового автомобиля [4.53]:
1 – исходная форма; *2* – форма А ($\Delta c_W \approx -8\%$); *3* – форма Б ($\Delta c_W = -5\%$)

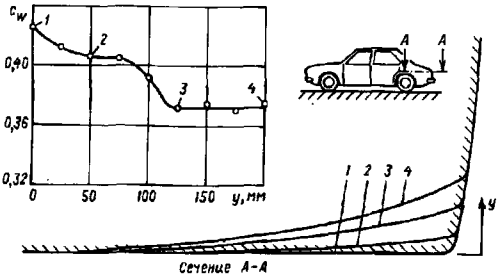


Рис. 4.67. Влияние сближения боковых панелей задка на коэффициент c_W для легкового автомобиля со ступенчатой формой задка [4.53]:
1 – исходная форма; *2* – форма А ($\Delta c_W = -5\%$); *3* – форма Б ($\Delta c_W = -13\%$); *4* – форма В ($\Delta c_W = -13\%$)

ческого сопротивления; дальнейшее увеличение высоты багажника улучшения не дает. Скачкообразное падение значения коэффициента c_W (см. рис. 4.66) может объясняться тем, что при малой высоте z для первоначально плавно спускающейся крышки багажника повторного прилегания потока к ее поверхности не существует; такое повторное прилегание появляется лишь при форме А.

При ступенчатых формах задней части автомобиля с более длинным багажником, как правило, с увеличением высоты наблюдается непрерывное падение коэффициента аэродинамического сопротивления. Лежащий в основе этого явления механизм обтекания до конца еще не изучен (см. также п. 4.3.2).

На рис. 4.67 приведены результаты исследований, где на аналогичной модели при постоянной высоте багажника сужали заднюю часть автомобиля в плане. Исходя из того, что в первоначальном положении боковые панели параллельны друг другу, т.е. $y = 0$, по мере увеличения их кривизны за счет сближения задних кромок до положения, характеризуемого формой Б, наблюдается в среднем монотонное падение коэффициента аэродинамического сопротивления. Дальнейшее увеличение схождения боковых панелей не приводит к снижению коэффициента c_W. По-видимому, при сближении боковых панелей до положения, характеризуемого формой Б, поток остается прилегающим к поверхности; сопровождающееся таким изменением кривизны увеличение давления (см. п. 2.3.3) приводит к падению коэффициента аэродинамического сопротивления. Эта гипотеза требует подтверждения многочисленными измерениями при различных величинах схождения боковых панелей.

Элементы пола. В ходе ряда экспериментов было установлено, что пол кузова в зависимости от конструктивного исполнения и крепящихся к нему деталей весьма по-разному влияет на величину общего аэродина-

мического сопротивления. Влияние различных частей днища на коэффициент аэродинамического сопротивления воздуха пояснил Кэрр [4.54] на следующем примере: были проведены замеры на автомобиле, переднюю, заднюю и среднюю части днища которого можно было закрывать накладной пластиной. Влияние частей днища на значение коэффициента c_W показано в табл. 4.3.

В этом примере удивляет сильное влияние на сопротивление воздуха пластины, закрывающей заднюю часть днища.

4.3. Влияние закрытия частей днища пластиной на коэффициент аэродинамического сопротивления [4.54]

Закрытая часть днища	Δc_W, %
Отсутствует	0 (исходное состояние)
Задняя	−8,7
Задняя + средняя	−7,0
Средняя	+0,7
Передняя	−1,4
Передняя + средняя	−2,3
Передняя + средняя + задняя	−8,9

Спойлер задка. Спойлер задка как при плавно спускающейся, так и при ступенчатой формах задней части автомобиля может использоваться для уменьшения аэродинамического сопротивления и подъемной силы, приходящейся на заднюю ось. На рис. 4.68 (см. работу Янссена, Гухо [4.26]) показан пример разработки спойлера для автомобиля "Фольксваген Сирокко". В процессе исследования был проработан целый ряд формально различных решений, чтобы дать возможность дизайнерам выбрать наилучшее из них, соответствующее их концепции автомобиля. Из всех рассматривавшихся форм на рис. 4.68 показаны только те из них, которые дали максимальное уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления. Во всех случаях линия отрыва располагалась на нижней кромке наклонной плоскости задка.

Первоначально разработанная дизайнерами форма (*1*) после оптимизации передка автомобиля позволила получить $c_W = 0{,}41$. Благодаря смещению вверх (*2*) нижней кромки наклонной поверхности задка на

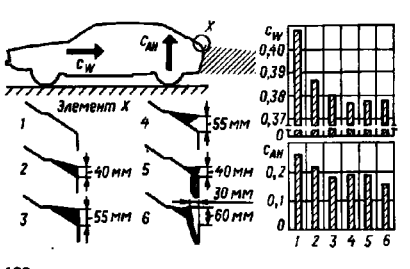
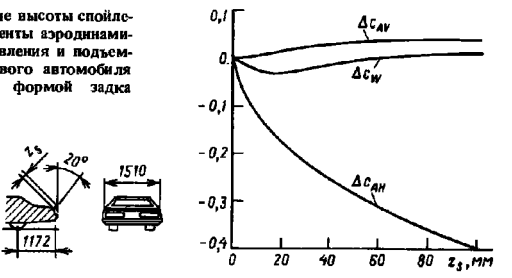


Рис. 4.68. Разработка спойлера задка для легкового автомобиля с плавно спускающейся формой задней части (на примере "Фольксваген Сирокко") [4.26]

Рис. 4.69. Влияние высоты спойлера на коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы легкового автомобиля со ступенчатой формой задка [4.34]



40 мм коэффициент сопротивления уменьшился на 5 % до значения c_W = = 0,39. Одновременно с этим коэффициент подъемной силы, приходящейся на заднюю ось, уменьшился на 15 %. За счет дальнейшего перемещения вверх нижней кромки наклонной поверхности задка до значения 55 мм (*3*) достигается дополнительное уменьшение коэффициента сопротивления до c_W = 0,38, что в сумме составляет уменьшение на 7 % относительно исходного состояния. Подъемная сила, приходящаяся на заднюю ось, также уменьшается, и суммарное снижение коэффициента c_{AH} составляет 30 %.

Спойлер (*4*) высотой 55 мм позволяет получить примерно такие же значения коэффициентов аэродинамического сопротивления и подъемной силы, как и (*3*). Тот же самый результат получается при установке варианта спойлера (*5*), который, однако, имеет высоту всего 40 мм, и варианта спойлера (*6*). Серийный автомобиль "Сирокко" имеет конструкцию формы задней части, соответствующую варианту со спойлером задка (5). В этом случае не ухудшается внешний вид автомобиля, и одновременно повышается жесткость двери задка.

На рис. 4.69 (см. работу Шенкеля [4.34]) показано влияние спойлера на коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъемной силы в случае, когда автомобиль имеет ступенчатую форму задней части. Уменьшение коэффициента c_W имеет место только при относительно малых высотах спойлера z_S. Дальнейшее увеличение высоты спойлера

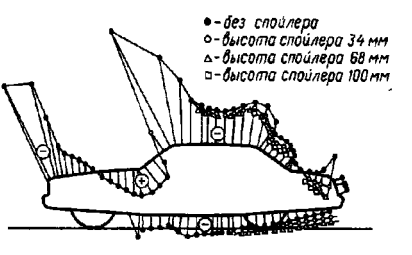


Рис. 4.70. Изменение давления на поверхность легкового автомобиля со ступенчатой формой задка вследствие установки заднего спойлера [4.34]

приводит к возрастанию коэффициента аэродинамического сопротивления. Возникающая в результате увеличения высоты спойлера составляющая подъемной силы, действующей на автомобиль, уменьшается и стремится прижать автомобиль к поверхности дороги*. Благодаря этому ездовые качества могут улучшиться. Интересная особенность заключается в том, что спойлер задка изменяет давление не только в верхней части автомобиля, вызывая его повышение здесь, но и изменяет давление на днище автомобиля, уменьшая его (рис. 4.70). При этом давление на базовой поверхности, в отличие от результатов измерений Отани и других [4.35] (см. рис. 4.31), от спойлера не зависит.

4.6. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО ДОВОДКЕ АЭРОДИНАМИКИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

4.6.1. ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ

На основании приведенных в п. 4.5 результатов экспериментальных исследований можно выделить три характерные функции, отражающие зависимость между коэффициентом сопротивления воздуха и векторами r_i, описывающими форму. Схематично они представлены на рис. 4.71. Каждый элемент формы описывается, по меньшей мере, одним вектором r_i; величина r_i может быть радиусом, высотой, длиной и т.п. В качестве базового параметра была выбрана длина автомобиля l; однако можно было взять и другие базовые параметры, например ширину или высоту автомобиля. Коэффициент c_W был отнесен к значению c_{W0}, соответствующему исходному состоянию перед началом изменений рассматриваемых элементов формы. Если, например, исследуется влияние радиуса скругления угла на значение c_W, то значение c_{W0} берется для исходной формы $r_i = 0$, когда угол не скруглен. Итак, были выведены следующие три характерные функции $c_W(\rho_i)$.

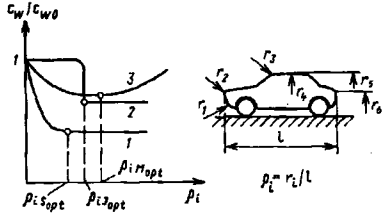


Рис. 4.71. Схематичное изображение типичных зависимостей коэффициента аэродинамического сопротивления от параметров формы [4.65]: *1* – "Насыщение"; *2* – "Скачок"; *3* – "Минимум"

*В оригинале книги на рис. 4.69, как и на рис. 4.58, допущена опечатка: вместо параметров Δc_{AV}, Δc_W, Δc_{AH} на поле графика проставлены c_{AV}, c_W, c_{AH}. Если c_{AV} и c_{AH} в отдельном конкретном случае и могут равняться нулю, что, конечно, маловероятно, то c_W в принципе не может быть равен нулю. – *Прим. ред. пер.*

1. *"Насыщение"* – монотонное снижение с последующей стабилизацией. Такой характер кривой типичен для скругления кромок (см., например, разработку передка для автомобиля "Ауди 100", рис. 4.53). В качестве примера можно также назвать радиус перехода от фронтальной поверхности передка к боковине автомобиля-фургона (см. работу Гухо [4.17], Гухо и Эммельманна [4.55]). Еще один пример приведен на рис. 8.30. Если же радиус скругления угла сразу взят таким большим, что в этом месте не существует отрыва потока, то дальнейшее увеличение указанного радиуса к уменьшению коэффициента аэродинамического сопротивления не приведет.

2. *"Скачок"* – ступенчатая кривая. Такой характер кривой типичен для процесса обтекания, сопровождающегося резким изменением структуры потока при незначительных изменениях элементов поверхности. На рис. 4.66 показан такой скачок. Если перепад между поверхностью крыши и поверхностью задней части автомобиля очень велик, то оторвавшийся от кромки крыши поток вновь к поверхности автомобиля не прилегает, коэффициент аэродинамического сопротивления имеет большое значение. При определенном значении этого перепада имеет место повторное прилегание потока к поверхности, коэффициент аэродинамического сопротивления в этом случае резко уменьшается. Аналогичный характер изменения c_W имеет место при обтекании круто срезанной задней части типа ""универсал" в процессе трансформации ее к плавно спускающейся форме задка автомобиля. Однако в отличие от показанной на рис. 4.66 кривой в этом случае имеет место скачок коэффициента аэродинамического сопротивления и его последующее снижение.

3. *"Минимум"* – плавное изменение c_W с выраженным перегибом кривой, соответствующим минимальному значению c_W. Такой характер кривой имеет место в том случае, когда изменение параметра ρ_i оказывает противоположное влияние на различные составляющие общего аэродинамического сопротивления. В качестве примера можно назвать изменение высоты спойлера передка (см. рис. 4.26 и 4.58).

Решая задачу снижения аэродинамического сопротивления автомобиля, необходимо для данной модели автомобиля определить указанные функции c_W (ρ_i) для всех основных параметров. То, что вследствие взаимодействия отдельных полей потока имеет место итеративный процесс, следует из изложенного в п. 4.2. Практика показала, что для большинства элементов формы (см. рис. 4.71) названное "оптимальным" значение параметра r_i не очень сильно отличается от исходного значения этого параметра. То есть, не изменяя стилистического образа модели, можно получить коэффициент аэродинамического сопротивления, значение которого будет входить в представленную на рис. 1.44 слева область разброса значений c_W для современных автомобилей.

Пример оптимизации автомобиля в целом приведен на рис. 4.72 (см. работу Янссена, Гухо [4.50]). Для каждого элемента формы от А до Д экспериментальным путем была определена функция $c_W(\rho_i)$ и выбраны оптимальные значения параметров. Принимая во внимание взаимное влияние друг на друга отдельных элементов, в рассматриваемом

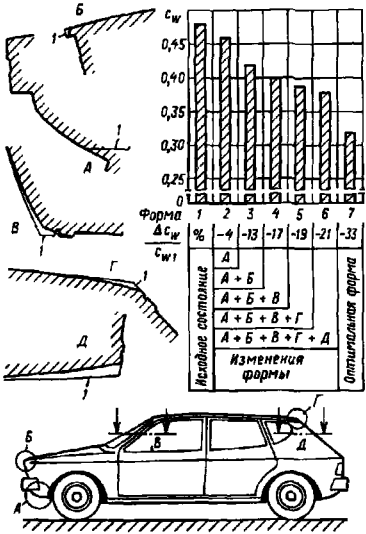


Рис. 4.72. Оптимизация формы легкового автомобиля [4.50]

случае смогли уменьшить аэродинамическое сопротивление по сравнению с исходной формой на 21 %. По внешнему виду оптимизированная модель не отличалась от исходной модели. Форма модели, которой соответствует столбец (7) диаграммы, напротив, значительно отличалась от исходного стилистического решения. Это в определенной степени показывает, чего можно добиться, за счет значительных отклонений от первоначальной стилистической концепции и выйти за рамки "оптимизации".

Рассмотренный выше порядок проведения работ, который базируется на том, что стилистическое решение автомобиля задано, Янссен и Гухо в [4.26] определили общим понятием "оптимизация формы". Многочисленные работы по оптимизации формы согласно рассмотренной выше схеме позволяют утверждать, что при такой стратегии можно получить значения коэффициента до $c_W = 0{,}4$. Меньшее значение c_W для формы (6) на рис. 4.72 объясняется тем, что модель, на которой проводились аэродинамические испытания, не учитывала всех дополнительных источников аэродинамического сопротивления, присущих реальному автомобилю. Значения, меньшие $c_W = 0{,}4$, по предлагаемому методу оптимизации получить нельзя. С другой стороны, $c_W = 0{,}4$ нельзя считать жестким

нижним пределом этого метода; более удачная в аэродинамическом смысле исходная форма может позволить в результате оптимизации получить лучшие результаты.

4.6.2. ИНТЕРАКТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ

Стратегия интерактивной оптимизации формы, направленной на улучшение аэродинамики автомобиля, предусматривает начало работ непосредственно после принятия решения по стилистической концепции автомобиля. Исследуется влияние на аэродинамику изменений параметров формы в достаточно широком пределе, так как процесс работы над стилем автомобиля еще продолжается и на него можно влиять.

Для проведения исследований в аэродинамической трубе лучше всего использовать в этом случае прототип на базе предшествующей разрабатываемому автомобилю модели. Для всех основных элементов формы (см. рис. 4.71) определяются функции $c_W(\rho_i)$, включая и те элементы, для которых такие функции четко не выделяются. Эти зависимости служат основой для проведения обсуждений с дизайнерами. В процессе обсуждения результатов, полученных в аэродинамической трубе, и предложений дизайнеров разрабатываются различные взаимоприемлемые (интерактивные) формы. При их разработке следует обращать внимание на интерференцию между полями потоков.

Строя работу по такому методу, можно получить значения коэффициента сопротивления примерно $c_W = 0{,}35$, и при этом автомобиль не будет выглядеть "обтекаемым" телом. Но и значение $c_W = 0{,}35$, безусловно, не является пределом этого метода.

По сравнению с уровнем развития автомобильной техники, который сегодня характеризуется средним значением коэффициента сопротивления $c_W = 0{,}45$, уже сейчас можно получить существенное улучшение.

4.6.3. СОГЛАСОВАНИЕ НАВЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Методом снижения силы сопротивления воздуха для уже существующих автомобилей являются установка и последующая оптимизация различных навесных элементов. Научно-исследовательская ассоциация автомобильной промышленности (МИРА) недавно разработала соответствующую программу, направленную на уменьшение в ближайшее время расхода топлива (см. работу Кэрра [4.62]). Прежде всего в ней речь идет об оснащении автомобилей передними и задними спойлерами. Их согласование с формой автомобиля было описано в пп. 4.3.2 и 4.5.5.

Навесные элементы, как правило, поставляются смежными отраслями промышленности. Только будучи тщательно подобранными к формам автомобилей, для которых они применяются, навесные элементы выполняют свое назначение. При этом они не должны вызывать побочных явлений, например ухудшения охлаждения масляного картера или тормозов (в случае установки переднего спойлера).

При проектировании автомобилей массового производства по соображениям стоимости стремятся выполнить первоначально предполагае-

мые навесные элементы как единое целое с деталями кузова. Для целого ряда автомобилей, например автомобилей фирм "Форд" и "Опель", передние спойлеры выштампованы как единое целое с нижней панелью передка.

4.7. БУДУЩЕЕ АЭРОДИНАМИКИ АВТОМОБИЛЕЙ

4.7.1. СУЩЕСТВУЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ УЛУЧШЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЕЙ

Описанные выше методы позволяют уменьшить коэффициент аэродинамического сопротивления до значения $c_W = 0{,}35$. Но и это значение более чем в 2 раза выше полученного Клемперером [4.37] в 1922 г. значения $c_W = 0{,}15$, которое позднее было подтверждено на основании исследований тел, имеющих габаритные размеры легкового автомобиля. Среднее значение коэффициента c_W современных легковых автомобилей $c_W = 0{,}45$ втрое больше значения, к которому нужно стремиться.

Но и значение $c_W = 0{,}15$ не является пределом. Тела вращения с таким же коэффициентом полноты (l/h) в свободном потоке, т.е. при большом удалении от основания, имеют коэффициент сопротивления $c_W = 0{,}05$. То есть коэффициент аэродинамического сопротивления тела, движущегося вблизи основания, втрое больше коэффициента аэродинамического сопротивления такого же тела в свободном потоке.

Указанные выше значения коэффициентов аэродинамического сопротивления и контуры тел, которым они соответствуют, приведены на рис. 4.73 (см. [4.56]). Существующие возможности *создания* автомобилей, обладающих весьма малым коэффициентом аэродинамического сопротивления, описаны в п. 4.7.2. В п. 4.7.3 на основании приведенных на рис. 4.73 данных рассматриваются направления *исследований* автомобильной аэродинамики.

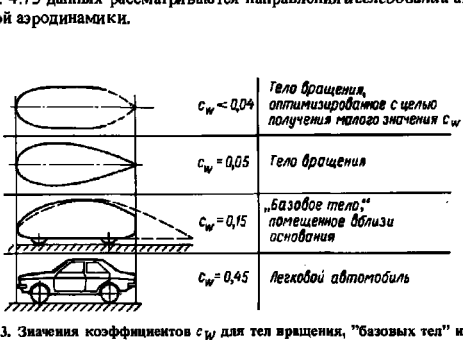


Рис. 4.73. Значения коэффициентов c_W для тел вращения, "базовых тел" и легковых автомобилей [4.56]

4.7.2. СОЗДАНИЕ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ, ОБЛАДАЮЩЕГО ОЧЕНЬ МАЛЫМ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Задача *создания* приемлемых для массового производства форм кузова, обладающих малым аэродинамическим сопротивлением, заключается в разработке этих форм из форм "базовых тел", коэффициент сопротивления которых составляет примерно $c_w = 0{,}15$. Непосредственное использование таких "базовых тел" в автомобилестроении, как было указано в п. 1.2.3, невозможно. При этом возникают два вопроса.

1. Насколько далеко можно отклоняться от формы "базового тела", чтобы с учетом технико-экономических ограничений (функциональность, стиль, стоимость изготовления) получить приемлемую форму автомобиля.

2. Каким значением прироста коэффициента c_w по сравнению с "базовым телом" при этом следует поступиться.

Ответить на эти вопросы можно в два этапа.

Прежде всего на основании анализа форм автомобилей устанавливается эмпирическая зависимость между параметром, характеризующим форму, и коэффициентом аэродинамического сопротивления. По этому соотношению видно, что коэффициент сопротивления $c_w = 0{,}30$ можно получить для форм, которые по сравнению с современными не слишком отличаются по структуре. Ниже приведен пример процесса разработки формы из "базового тела".

На рис. 4.74 вводится (см. работу Гухо [4.57]) параметр контура χ, который в весьма упрощенном виде характеризует структуру кузова. Параметр χ равен интегралу от изменения кривизны по контуру кузова:

$$\chi = l \oint |\, \mathrm{d}r/\mathrm{d}s \,|\, \mathrm{d}s.$$

С целью упрощения интеграл был взят только для изменения кривизны в среднем продольном сечении автомобиля; для более точного рассмотрения следовало бы учитывать другие сечения, существенные с точки зрения обтекаемости.

Тело, обладающее хорошей обтекаемостью, отличается несущественными изменениями кривизны контура в направлении распространения потока; для таких тел параметр контура χ имеет малое значение. Напротив, обычный легковой автомобиль имеет множество мест, в которых кривизна сильно изменяется. Параметр χ для такого автомобиля имеет большое значение. Малое численное значение параметра χ контура является только необходимым, но еще не достаточным условием малого аэродинамического сопротивления.

На рис. 4.74 для целого ряда автомобилей и "базовых тел" приведены замеренные значения коэффициента сопротивления c_W в зависимости от параметра контура χ. При вычислении значения χ не учитываются бамперы и выступающие элементы днища. При этом получается вполне приемлемое соотношение $c_W(\chi)$. Значение $\chi = 800$ относится к автомобилю "Фольксваген *K* 70". Автомобили в диапазоне значений $200 < \chi < 300$ имеют форму, выполненную с учетом требований аэродинамики. В ка-

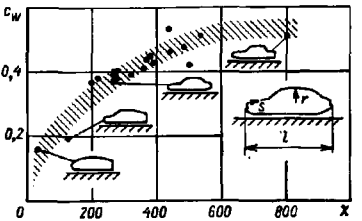
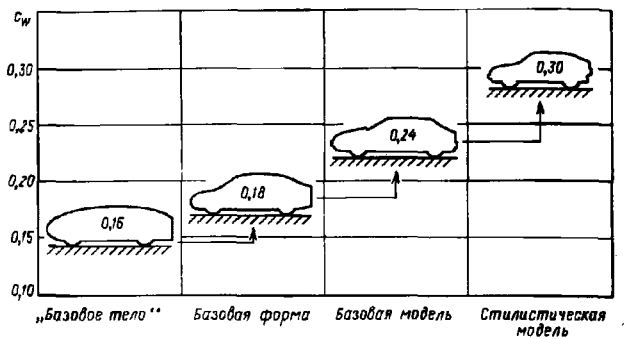


Рис. 4.74. Зависимость между параметром контура χ и коэффициентом аэродинамического сопротивления c_W для легковых автомобилей и "базовых тел", обладающих малым аэродинамическим сопротивлением [4.57]

Рис. 4.75. Создание обладающей малым аэродинамическим сопротивлением формы кузова легкового автомобиля из "базового тела" [4.63]



честве примера можно назвать автомобили "*NSU RO80*", "Порше 924", легковые автомобили фирмы "Ситроен". "Базовое тело" со значением $c_W = 0{,}16$ имеет очень "простой" контур.

Эмпирическая функция $c_W(\chi)$ позволяет сделать вывод о том, что с помощью "базовых форм", которые не намного проще современных серийных легковых автомобилей, обладающих наименьшим аэродинамическим сопротивлением, можно получить значение коэффициента аэродинамического сопротивления $c_W = 0{,}30$. Поскольку в связи с изложенными в п. 4.3 особенностями структуры потока вокруг движущегося автомобиля до сих пор отсутствует законченная теория, связывающая конструктивные параметры формы кузова автомобиля с его аэродинамическим сопротивлением, то соответствующие формы с низким коэффициентом аэродинамического сопротивления должны разрабатываться эмпирическим путем из "базовых тел", обладающих малым аэродинамическим сопротивлением.

Процесс создания такой формы представлен на рис. 4.75 (см. работу Гухо [4.63]). Сначала исходя из "базового тела" разрабатывается базовая форма. Она уже имеет все основные признаки формы кузова легкового автомобиля. Базовая форма характеризуется гладким (без выс-

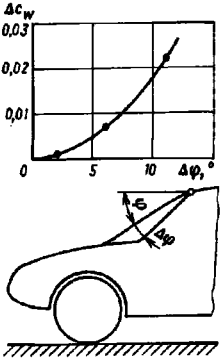


Рис. 4.76. Влияние наклона ветрового стекла на коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автомобиля, обладающего очень малым аэродинамическим сопротивлением [4.64]

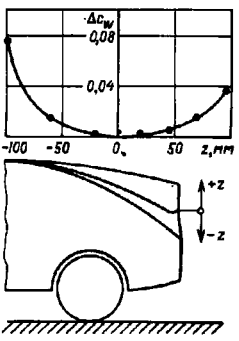


Рис. 4.77. Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления при отклонении формы задка от оптимального положения [4.64]

тупающих элементов и щелей), хорошо закругленным передком, сильно изогнутым ветровым стеклом, значительной кривизной на виде сверху и плавно спускающейся поверхностью задней части. Коэффициент сопротивления $c_W = 0{,}18$ этой базовой формы не намного отличается от коэффициента c_W для "базового тела". На следующем этапе из базовой формы разрабатывается базовая модель, в которой учитываются все конструктивные особенности пригодного к эксплуатации автомобиля. Наличие оконных проемов, стыков поверхностей, водосточных желобков, выступающих элементов, неровностей днища и т.п., а также протекание воздуха через радиатор системы охлаждения и арки колес, приводят к дальнейшему росту коэффициента аэродинамического сопротивления ($c_W = 0{,}24$). Базовая модель является исходной для дизайнера. Чтобы показать, каким образом связаны между собой коэффициент аэродинамического сопротивления воздуха и изменения формы, были проведены исследования влияния основных геометрических параметров формы в рамках приведенных выше этапов работ. Так, например, на рис. 4.76 (см. работу Буххайма, Пиатека, Вальцера [4.64]) показано уменьшение коэффициента сопротивления воздуха с уменьшением угла φ; однако существует предел уменьшения угла φ из-за ухудшения видимости, вызываемой оптическими искажениями стекла. На рис. 4.77 показано, как увеличивается коэффициент аэродинамического сопротивления, если отклоняться от оптимального контура задка.

Увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления, полу-

чаемое в процессе дизайнерской доработки автомобиля, очень сильно зависит от профессионального мастерства дизайнера. В рассматриваемом примере (автомобиль верхнего среднего класса*) приемлемый компромисс был найден при $c_W = 0{,}30$. Это значение достижимо и в нижнем среднем классе. В более высоком классе легковых автомобилей вследствие большей габаритной длины этих автомобилей по описанному методу уже сегодня можно получить коэффициент сопротивления $c_W = 0{,}25$.

В самое ближайшее время перед конструкторами, занимающимися проектированием легковых автомобилей, будет поставлена цель – получение занчения $c_W = 0{,}20$. Достижение этой цели не в последнюю очередь зависит от того, насколько быстро будут расти цены на топливо.

4.7.3. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование предназначено для выполнения двух задач, как это можно понять из рис. 4.73.

1. Как можно точнее объяснить механизм сопротивления воздуха движению автомобиля. Как показал проведенный в п. 4.3 анализ силы сопротивления воздуха, в знаниях об аэродинамическом сопротивлении все еще имеются значительные пробелы; качественный анализ благодаря систематическим экспериментальным работам должен перерастать в количественную информацию.

2. Исследовать обтекание трансформированных с учетом особенностей автомобиля хорошо обтекаемых тел, помещенных вблизи основания, с целью разработки "базовых тел", которые при $c_W < 0{,}15$ будут в большей степени по сравнению с известными сегодня "базовыми телами" подходить в качестве исходной формы для формообразования автомобилей.

При решении обеих задач необходимо учитывать присущие автомобильной технике ограничивающие условия (см. п. 1.3.1). Например, требование максимально возможного использования внутреннего пространства кузова при заданных его габаритных размерах для аэродинамики означает следующее: затупленные тела с зонами, где происходит отрыв потока. Поэтому от исследования различных форм отрыва потока и взаимодействий между ними можно ожидать существенного вклада в процесс познания механизма аэродинамического сопротивления (см. [4.65]).

Поставленные задачи решаются преимущественно экспериментальным путем. И все-таки применение теоретических методов в автомобильной аэродинамике следовало бы очень сильно форсировать. Многие авторы указывают на то, что с помощью имеющихся в настоящее время методов теоретической аэродинамики можно решать многие задачи автомобильной аэродинамики. Введение в эту тематику можно найти в работах Ахмеда и Гухо [4.66], [4.67]. В них также показано, каким путем с помощью теоретических моделей можно разработать

* По классификации СССР – средний класс. – *Прим. перев.*

метод проектирования. От такого метода нельзя ожидать, что он заменит эксперимент. Как и прежде, аэродинамическая труба останется незаменимым инструментом специалиста, занимающегося аэродинамикой автомобиля. Но теоретические методы могут использоваться при подготовке и проведении исследовательских работ (см. п. 1.3.3.).

При создании автомобилей, обладающих малым аэродинамическим сопротивлением, нельзя забывать о чувствительности к боковому ветру. Шлихтинг [4.58] указал на то, что автомобили с малым коэффициентом сопротивления воздуха особенно чувствительны к боковому ветру. Фактически, чем сильнее приближается структура потока в задней части автомобиля к структуре идеального потока, тем больше становится дестабилизирующий поворачивающий аэродинамический момент – (момент рыскания) (см. п. 5.2.3). Для гоночных и рекордных автомобилей этот момент компенсируется килем задка (см., например, работу Либольда и других [4.68]). Для серийных легковых автомобилей этот способ неприемлем.

Для достижения низкого значения коэффициента сопротивления воздуха используется усеченная форма задней части автомобиля – форма Камма. В этом случае коэффициент аэродинамического сопротивления остается небольшим не за счет устранения отрыва, а за счет его "рассеивания". К сожалению, Морель не распространил свои исследования о взаимосвязи наклона панели задка с коэффициентом аэродинамического сопротивления (см. [4.25]) на случай кососимметричного обтекания, поэтому неизвестно, существует ли взаимосвязь между малым аэродинамическим сопротивлением и высокой чувствительностью автомобиля к боковому ветру для усеченных форм задней части. При разработке форм, обладающих малым аэродинамическим сопротивлением, большое внимание следует уделять боковым составляющим.

4.8. ОБОЗНАЧЕНИЯ

Обозначения в основном были взяты без изменения из оригинальных работ. Поэтому некоторые из них повторяются несколько раз. Суть величин подробно объясняется в тексте.

A – площадь лобового сопротивления, рис. 4.1;
A – подъемная сила, рис. 4.42;
A_A – площадь лобового сопротивления антенны, уравнение (4.18);
A_K – площадь лобового сопротивления радиатора системы охлаждения двигателя, уравнение (4.20);
A_M – площадь лобового сопротивления наружного зеркала заднего вида, уравнение (4.17);
B – ширина "базового" тела, рис. 4.21;
D – диаметр;
D_F – сопротивление трения, рис. 4.9;
D_p – сопротивление давления, рис. 4.9;
D_0 – профильное сопротивление, рис. 4.9;
F – площадь крыла на виде в плане, уравнение (4.3);
F_B – сопротивление трения днища, уравнение (4.13);
H – высота "базового" тела, рис. 4.21;

L – поперечный аэродинамический момент (момент крена), рис. 4.42;
L_S – длина наклонной панели задка, рис. 4.21, 4.23;
M – продольный аэродинамический момент, рис. 4.42;
N – поворачивающий аэродинамический момент (момент рыскания), рис. 4.42;
O – эквивалентная площадь гидравлически гладкой поверхности, уравнение (4.13);
Re – число Рейнольдса;
S – боковая сила, рис. 4.42;
T – тангенциальная сила, рис. 4.42;
T – длина крышки багажника на виде в плане, рис. 4.23;
V – местная скорость, рис. 4.26, уравнение (4.14);
V_E – скорость движения автомобиля;
V_∞ – результирующая скорость набегающего потока, рис. 4.2;
W – сила сопротивления воздуха;
W_A – аэродинамическое сопротивление антенны;
W_B – суммарное аэродинамическое сопротивление днища и спойлера, уравнение (4.10);
W_D – аэродинамическое сопротивление базовой поверхности, уравнение (4.6);
W_K – аэродинамическое сопротивление, вызванное течением охлаждающего воздуха, уравнение (4.20);
W_M – аэродинамическое сопротивление наружного зеркала заднего вида;
W_S – аэродинамическое сопротивление спойлера, уравнение (4.11);
W_T – аэродинамическое сопротивление наклонной поверхности задка, уравнение (4.5);
a – коэффициент пропорциональности, уравнение (4.21);
a – выпуклость крыши, рис. 4.62;
a – величина выступания боковины задка за контур наклонной поверхности задка, рис. 4.64;
a – база автомобиля, рис. 4.42;
b – размах крыла, уравнение (4.3);
b – ширина автомобиля, рис. 4.15;
b – ширина "базового" тела, рис. 4.20;
c – длина капота, рис. 4.20;
c – длина хорды, рис. 4.33 и 4.35;
c_A – коэффициент подъемной силы;
c_{AV} – коэффициент подъемной силы, приходящейся на переднюю ось автомобиля;
c_{AH} – коэффициент подъемной силы, приходящейся на заднюю ось автомобиля;
c_{AR} – коэффициент подъемной силы колеса, рис. 4.24;
c_W – коэффициент аэродинамического сопротивления, рис. 4.1;
c_{WO} – коэффициент профильного сопротивления, уравнение (4.1);
c_{WO} – коэффициент аэродинамического сопротивления до изменения параметра, рис. 4.71;
c_{Wi} – коэффициент индуктивного сопротивления, уравнение (4.2);
c_{WR} – коэффициент аэродинамического сопротивления колеса рис. 4.24;
c_{WB} – коэффициент аэродинамического сопротивления днища, уравнение (4.10);
c_{WS} – коэффициент аэродинамического сопротивления спойлера, уравнение (4.12);
c_{FB} – коэффициент сопротивления трения по днищу автомобиля, уравнение (4.13);
c_{WM} – коэффициент аэродинамического сопротивления зеркала, уравнение (4.17);
c_{WA} – коэффициент аэродинамического сопротивления антенны, уравнение (4.18);
c_{WT} – коэффициент аэродинамического сопротивления наклонной панели задка, уравнение (4.5);
c_{WK} – коэффициент аэродинамического сопротивления трассы охлаждающего воздуха, уравнение (4.20);
c_M – коэффициент продольного момента;

c_p – коэффициент давления, рис. 4.9;
c_T – коэффициент тангенциальной силы;
d – диаметр;
d – высота, рис. 4.14;
d – длина ветрового стекла, рис. 4.16;
e – дорожный просвет, рис. 4.42 и 4.44;
f – относительная выпуклость, рис. 4.35;
f – фактор изменения, рис. 4.19;
h – высота автомобиля;
h – высота перепада между ступенями при ступенчатой форме задней части автомобиля, рис. 4.23;
h – расстояние от основания, рис. 4.33;
h_1, h_2 – величина выступания колеса за контур кузова спереди и сзади, рис. 4.25;
h – глубина погружения колеса в арку, рис. 4.24;
l – длина автомобиля;
l_1, l_2 – длины крыла и закрылка, рис. 4.29;
p – статическое давление;
p_∞ – статическое давление невозмущенного набегающего потока;
r – радиус;
s – эквивалентная равномерная шероховатость, рис. 4.26;
s – ширина тела, рис. 4.33;
t – толщина тела, рис. 4.33;
v – местная скорость, рис. 4.27;
v_S – скорость наружного ветра, рис. 4.2;
v_A – средняя скорость воздуха, протекающего по радиатору системы охлаждения;
x, y, z – координаты в прямоугольной системе координат;
z_S – высота спойлера;
Γ – циркуляция скорости, рис. 4.8;
Λ – отношение геометрических размеров, уравнение (4.3);
τ_0 – касательное напряжение вдоль стенки, рис. 4.9;
α – угол установки;
β – угол скоса потока;
β – угол сужения задней части тела, рис. 4.19;
γ – угол крена, рис. 4.42;
γ, γ_1, γ_2 – углы наклона элементов (деталей) кузова;
δ – угол натекания ветра, рис. 4.2;
δ – угол наклона закрылка, рис. 4.29;
χ – параметр контура, рис. 4.74;
ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха;
ρ – плотность воздуха;
ρ – относительный радиус, рис. 4.71;
φ – угол наклона элементов кузова.

5. УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПРИ БОКОВОМ ВЕТРЕ

Ганс-Йоахим Эммельманн

5.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Обтекание движущегося автомобиля потоком воздуха сопровождается возникновением аэродинамических сил и моментов относительно трех осей координат; они оказывают заметное влияние на ездовые свой-

ства автомобиля. Из названных шести компонентов наибольшее внимание уделяется аэродинамическому сопротивлению автомобиля.

Другие пять компонентов результирующей аэродинамической силы, влияющие прежде всего на поперечную динамику автомобиля, будут предметом рассмотрения данной главы. При движении автомобиля в безветренную погоду помимо силы сопротивления воздуха на него действуют подъемная сила и продольный момент. При боковом ветре дополнительно появляются боковая сила, поворачивающий и поперечный моменты (см. рис. 2.14 и 4.42).

Указанные аэродинамические силы и моменты должны уравновешиваться реакциями дороги, приложенными в пятнах контакта колес. Возникающие при этом углы бокового увода приводят к курсовому отклонению автомобиля, что вызывает необходимость корректировки положения автомобиля управляющим воздействием человека.

Описанное явление, определяемое термином "устойчивость к боковому ветру", должно рассматриваться с двух точек зрения – комфортабельности автомобиля и безопасности движения. В "нормальных", наиболее часто встречающихся условиях движения при наличии бокового ветра его воздействие воспринимается водителем как ухудшение ездового комфорта, поскольку он должен реагировать на постоянно изменяющийся боковой ветер поворотами рулевого колеса. При этом комфортабельность езды нельзя считать удовлетворяющей категории "люкс". Такой дискомфорт ведет к перегрузке водителя, которая неизбежно вызывает быструю его утомляемость, что в конечном счете может способствовать возникновению на дорогах опасных ситуаций.

При внезапных сильных порывах бокового ветра, направление которых в начальный момент водителю неизвестно, ухудшение комфортабельности езды перерастает в проблему безопасности движения. Если постоянная времени системы "водитель – автомобиль" не адекватна поворачиваемости при боковом ветре, то это ведет к отклонениям от курса даже при "правильном" ответном действии водителя. Но гораздо чаще в этой ситуации имеет место случай, когда водитель неправильно реагирует на боковой ветер и теряет контроль над своим автомобилем.

Поэтому, если ставится задача дать потребителю автомобиль, обладающий хорошими ездовыми качествами, то при проектировании необходимо учесть оба аспекта чувствительности к боковому ветру – комфорт и безопасность. Ниже показывается, каким образом это можно сделать.

Первоначально приводятся разъяснения об аэродинамических силах и моментах, действующих на автомобиль. Затем устанавливается, каким образом можно на них положительно воздействовать за счет соответствующего формообразования. Боковой ветер при этом рассматривается сильно идеализированным. Далее показывается как аэродинамические силы и моменты влияют на ездовые свойства автомобиля. При этом рассматривается не только механика движения, но и управляющее воздействие человека. Для системы "автомобиль – водитель" приведен ряд моделей.

После рассмотрения близких к реальным условиям случаев движе-

ния при боковом ветре предпринята попытка с помощью математической модели, выраженной в форме простого уравнения, определить влияние на устойчивость движения основных аэродинамических параметров. В конце главы определяется предел, при котором боковое отклонение от заданного курса движения из вопроса ухудшения комфортабельности езды становится вопросом безопасности движения.

В изложенном ниже материале основное внимание уделено описанию применяемых методов исследования, а не количественным результатам, полученным с их помощью.

5.2. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ И МОМЕНТЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА АВТОМОБИЛЬ

5.2.1. ЕСТЕСТВЕННЫЙ АТМОСФЕРНЫЙ ВЕТЕР

Сила и направление ветра постоянно измеряются метеорологическими службами во многих местах, регистрируются и доводятся до сведения по радио или в печати. Сообщаемые данные обычно являются усредненными значениями и относятся к определенной высоте измерения над землей, обычно 10 – 15 м. Из-за ветра вблизи земли образуется пограничный слой, как правило, турбулентный. Степень турбулентности этого потока имеет тот же порядок, что и среднее значение скорости, т.е.

$$Tu = \sqrt{\overline{u'^2}} / V \approx 1.$$

В зависимости от рельефа местности и имеющихся на ней сооружений в рассматриваемой точке, которая, например, может быть выбрана на высоте, равной половине высоты автомобиля, может существовать большая или меньшая скорость ветра относительно значения, приведенного метеорологической службой. Эпюры распределения скорости ветра в пограничном слое в зависимости от расположенных на местности неровностей приведены на рис. 5.1 (см. работу Давенпорта [5.1]).

Толщина пограничного слоя по сравнению с высотой автомобиля гораздо больше; в области, соответствующей высоте автомобиля, имеет место большой градиент скорости. Над ровной поверхностью земли эпюра скорости ветра в пограничном слое изменяется по степенному закону (см. рис. 5.2, *б* (по Битлю [5.2])). На рис. 5.2, *а* приведены также данные о частости (продолжительности в часах в течение года) определен-

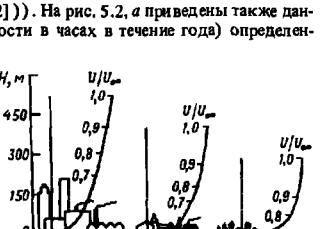


Рис. 5.1. Естественный пограничный слой ветра при различных неровностях на поверхности земли [5.1]



Рис. 5.2. Продолжительность ветров определенной скорости в течение года (*а*) в различных областях ФРГ и характер распределения скорости в пограничном слое ветра (*б*) над ровной поверхностью земли [5.2]:
1 – южная часть ФРГ; *2* – центральная часть ФРГ; *3* – северная часть ФРГ

ных значений скоростей ветра; данные о ветре в зоне движения транспорта приведены Карренбергом [5.3] и Смитом [5.4]. Типичная роза ветров (частость скорости и направления ветров) приведена на рис. 8.9.

5.2.2. АВТОМОБИЛЬ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ БОКОВОМ ВЕТРЕ

Для понимания механизма возникновения боковой аэродинамической силы представляет интерес один из частных случаев, когда на движущийся автомобиль воздействует боковой ветер, имеющий постоянные скорость и направление; в природе такой случай практически не встречается. Его можно воспроизвести в аэродинамической трубе, если не принимать во внимание тонкий пограничный слой на поверхности экрана, моделирующего основание (рис. 5.3). При боковом ветре в естественных условиях эпюра распределения результирующей скорости показана справа. В этом случае довольно своеобразная эпюра результирующей скорости вся имеет характер пограничного слоя. В средней части рисунка схематично показана эпюра распределения результирующей скорости ветра при имитации бокового ветра специальной установкой. О возможности имитации бокового ветра с помощью специальных установок рассказывается в п. 12.2.2.

Боковая аэродинамическая сила, действующая на автомобиль, возникает вследствие разности давлений на поверхностях автомобиля, расположенных с наветренной и подветренной сторон. На рис. 5.4 (по данным Барта [5.5] и Сквайра [5.6]) приведены эпюры распределения давления в горизонтальном сечении легкового автомобиля. С подветренной

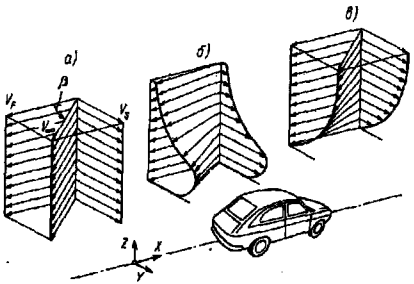


Рис. 5.3. Сравнение различных эпюр распределения скорости бокового ветра и результирующей скорости потока, по Гухо:
а – аэродинамическая труба (без учета пограничного слоя); *б* – имитирующая боковой ветер установка; *в* – боковой ветер в естественных условиях

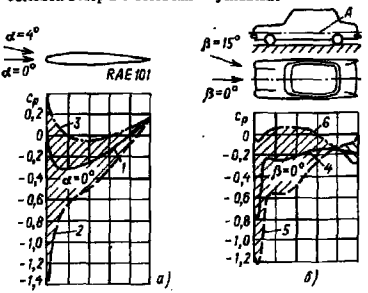


Рис. 5.4. Сравнение эпюр распределения давления по поверхности крыловидного профиля (*а*) и по поверхности автомобиля в горизонтальном сечении (*б*) [5.5] и [5.6]:
A – плоскость измерения; *1* – $\alpha = 0°$; *2* – $\alpha = 4°$, подветренная сторона; *3* – $\alpha = 4°$, наветренная сторона; *4* – $\beta = 0°$; *5* – $\beta = 15°$, подветренная сторона; *6* – $\beta = 15°$, наветренная сторона

стороны вследствие высокой скорости потока в начальной части передка существует большое разрежение, которое первоначально быстро уменьшается в зоне до оси передних колес, далее величина разрежения меняется сравнительно мало. С наветренной стороны, если не считать небольшого разрежения в начальной части передка, возникает небольшое повышенное давление, примерно до середины автомобиля. В задней половине автомобиля можно отметить незначительно увеличивающееся разрежение. Сравнение приведенных эпюр распределения давления на поверхности автомобиля с эпюрами распределения давления по поверхности крылового профиля (рис. 5.4, а) позволяет отметить принципиальное сходство. Угол атаки профиля был выбран таким образом, чтобы уровень давления был примерно такой же, как и для автомобиля. Различие давлений с наветренной и подветренной сторон ведет к появлению боковой силы, которая направлена в подветренную сторону.

5.2.3. АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Неравномерная эпюра распределения пониженного давления (разрежения) с подветренной стороны, особенно в районе передка автомобиля, приводит к возникновению поворачивающего аэродинамического момента (момента рыскания). Для автомобиля он является дестабилизирующим фактором, т.е. если из-за воздействия бокового ветра возникает угол бокового увода автомобиля β, то возникающий при этом аэродинамический поворачивающий момент N стремится увеличить угол β*.

Для рассмотрения вопроса об аэродинамической устойчивости на рис. 5.5 (по Шлихтингу [5.7]) в плане показаны три характерные формы "базовых тел", используемые при формообразовании кузова автомобиля. Приведенное на рис. 5.5 применительно к автомобилю понятие аэродинамической устойчивости справедливо, когда за точку приложения составляющих аэродинамических сил и моментов принимается центр тяжести автомобиля. На рис. 5.5, *а* представлено сильно закругленное тело в идеальном, прилегающем к поверхности тела потоке. Отмеченные знаком "минус" области разрежения приводят к возникновению большого поворачивающего момента в направлении увеличения угла β. На эскизе "*б*" показано прямоугольное тело с закругленными кромками, для которого в задней части имеет место отрыв потока. Возникающий при обтекании такого тела поворачивающий момент по абсолютной величине существенно меньше, чем в случае "а", но также стремится повернуть тело в сторону увеличения угла β. Только для крылообразного базового тела (эскиз "*в*"), имеющего сильно вытянутую форму задней части, возникающий при обтекании воздухом аэродинамический поворачивающий момент носит стабилизирующий характер, т.е. имеет место устойчивое равновесие системы. Но на серийных автомобилях такие удлиненные формы задней части неприемлемы (о спортивных автомобилях речь идет в п. 7, см. также п. 4.7.3).

На рис. 5.5 рассмотрены случаи обтекания передка безотрывным потоком. И это оправдано, поскольку именно достижение безотрывного обтекания является целью оптимизации в отношении снижения аэродинамического сопротивления (см. пп. 4.6.1 и 8.5.4).

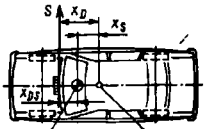


Рис. 5.5. Аэродинамическая устойчивость при боковом ветре [5.7]:
а – обтекание безотрывным потоком, $\partial c_N/\partial\beta > 0$, устойчивость очень плохая; *б* – обтекание с отрывом потока в задней части тела, $\partial c_N/\partial\beta > 0$, устойчивость плохая; *в* – обтекание "базового тела" с сильно вытянутой задней частью, $\partial c_N/\partial\beta < 0$, устойчивость нормальная

---

* Автомобиль находится в состоянии неустойчивого равновесия. – *Прим. ред. пер.*

Рис. 5.6. Определение расстояния до центра давления x_{DS}



Аэродинамический поворачивающий момент относительно условной точки отсчета: $N = x_D S$

Аэродинамический поворачивающий момент относительно центра тяжести автомобиля: $N_{SP} = x_{DS} S$

Из аэродинамики крыла известно, что на несущую плоскость крыла при отрыве потока на передней кромке действуют незначительная подъемная сила и, соответственно малый продольный момент. Применительно к автомобилю это означает, что за счет выполнения острыми боковых кромок передка автомобиля, пойдя на увеличение аэродинамического сопротивления, можно ожидать уменьшения боковой силы, а значит, и поворачивающего момента.

Различие требований к форме элементов поверхности автомобиля с точки зрения снижения аэродинамического сопротивления и уменьшения боковой силы и, следовательно, поворачивающего момента требует принятия компромиссного решения. Подобное решение можно получить за счет оформления передка автомобиля таким образом, чтобы в области углов скоса воздушного потока, обтекающего автомобиль $-10° \leqslant \beta \leqslant 10°$, т.е. в той области, в которой отрицательное действие бокового ветра на курсовую устойчивость автомобиля едва ли ощущается, имело место безотрывное обтекание. А в области углов β, лежащих вне указанного предела, т.е. при значительных скоростях бокового ветра, имел место отрыв. Как указал Гухо в [5.8], в частности, при оптимизации формы автомобилей-фургонов реализация такого подхода возможна.

В аэродинамике автомобиля моменты берутся относительно условной точки отсчета, совпадающей с центром базы и центром колеи на высоте полотна дороги. При рассмотрении вопроса о чувствительности к боковому ветру важнее знать поворачивающий момент N_{SP} относительно центра тяжести автомобиля (рис. 5.6). Только при равномерном распределении нагрузки по осям (на переднюю и заднюю оси приходится по 50% веса автомобиля) положение центра тяжести по длине автомобиля совпадает с положением условной точки отсчета поворачивающего момента. При увеличении в процентном отношении нагрузки от веса автомобиля, приходящейся на заднюю ось, поворачивающий аэродинамический момент относительно центра тяжести возрастает. И наоборот, в случае распределения веса по осям таким образом, что нагрузка, приходящаяся на переднюю ось, больше, чем нагрузка на заднюю, значение этого момента относительного центра тяжести уменьшается. Такое перераспределение нагрузок на оси автомобиля в конечном счете при дальнейшем увеличении нагрузки, приходящейся на переднюю ось, может привести к изменению направления поворачивающего аэродинамического момента, т.е. будет иметь место обратное суждение об устойчивости.

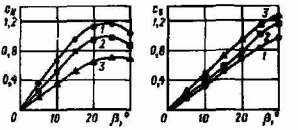


Рис. 5.7. Коэффициенты поворачивающего момента и боковой силы для семейства автомобилей с различными формами задка:
1 – плавно спускающаяся форма задка; *2* – ступенчатая форма задка; *3* – круто спускающаяся форма задка (типа "универсал")

Рис. 5.7 и 5.8 показывают реально существующие возможности воздействия на аэродинамические силы и моменты формообразованием автомобиля. Из рис. 5.7 видно, что коэффициент поворачивающего момента и коэффициент боковой силы сильно зависят от формы задка автомобиля. Самый низкий коэффициент поворачивающего момента и при этом самый высокий коэффициент боковой силы имеет автомобиль типа "универсал", в то время как автомобиль с плавно спускающейся формой задка имеет наименьший коэффициент боковой силы и наибольший коэффициент поворачивающего момента. Автомобиль со ступенчатой формой задка занимает промежуточное положение. Каким образом оценивается влияние этой пары параметров на курсовое отклонение автомобиля, показано в п. 5.5.3.

Коэффициенты подъемной силы (см. рис. 5.8) имеют значения того же порядка, что и коэффициенты сопротивления воздуха. На курсовую устойчивость подъемная сила оказывает влияние лишь при скоростях движения выше 150 км/ч ($V_F > 150$ км/ч). При более низких скоростях она мала по сравнению с весом автомобиля и вызывает лишь небольшую разгрузку колес.

На лимузинах или спортивных автомобилях, имеющих высокую максимальную скорость, следует попытаться уменьшить коэффициент подъемной силы за счет специального формообразования или установки спойлеров передка или задка. Чтобы увеличить предельную скорость движения гоночных автомобилей на виражах, используются спойлеры, которые, хотя и заметно увеличивают коэффициент сопротивления воздуха, т.е. уменьшают максимальную скорость, но зато создают силу, прижимающую автомобиль к поверхности дороги (отрицательную подъемную силу) (см. п. 7.1.3).

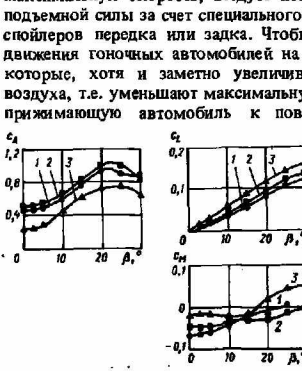


Рис. 5.8. Коэффициенты подъемной силы, поперечного и продольного моментов для семейства автомобилей с различными формами задка:
1 – плавно спускающаяся форма задка; *2* – ступенчатая форма задка; *3* – круто спускающаяся форма задка (типа "универсал")

expert22 для http://rutracker.org

5.2.4. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ БОКОВОМ ВЕТРЕ

Как сообщалось в п. 5.2.1, скорость естественного атмосферного ветра не постоянна по времени и направлению. К аэродинамическим силам и моментам, измеренным при стационарном боковом ветре, добавляются дополнительные составляющие, как схематично показано на рис. 5.9.Дополнительные компоненты можно разделить на стационарную, квазистационарную (вращательное движение) и нестационарную составляющие. Последняя имеет место лишь при большом градиенте скорости ветра, когда приведенная частота

$$\Omega = \omega l / V > 1.$$

Эпюры скоростей бокового ветра в соответствии с естественными границами свободного потока изменяются (см. работу Райхарда [5.9]) косинусообразно. Гухо и Эммельманн [5.10] с помощью теории пограничного слоя (*Slender – Body – Theorie*, см. также работы Гуммеля [5.11] и Вуларда [5.12]) рассчитали коэффициенты поворачивающего момента и *боковой силы при таких эпюрах скоростей бокового ветра*. Результат этого расчета приведен на рис. 5.10.

В верхней части рисунка приведены эпюры скоростей бокового ветра на виде в плане. Параметром семейства кривых является отнесенная к длине автомобиля l длина области S_M эпюры скорости бокового ветра, в которой скорость ветра изменяется от $V_S = 0$ до достижения полной скорости бокового ветра $V_{S\infty}$. Из приведенных ниже графиков видно, что нестационарная составляющая при крутой эпюре ветра ведет к выраженному "выбросу" значений коэффициентов боковой силы и поворачивающего момента, в то время как при более пологих эпюрах скорости бокового ветра характер изменения коэффициентов боковой силы и поворачивающего момента по своей форме приближается к эпюрам скорости бокового ветра.

Измерения, выполненные Бове [5.13] и Муто [5.14] , принципиально подтвердили возникновение нестационарного "выброса". Измерения Эммельманна [5.25] с помощью имитирующей боковой ветер установ-

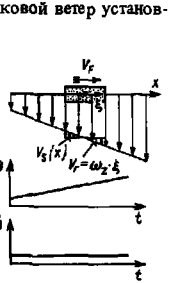


Рис. 5.9. Линеаризованное представление коэффициентов аэродинамических сил и моментов при различных эпюрах бокового ветра. Ход рассуждений:
$c_S = c_S(\beta, \dot{\beta}, \omega_Z)$
$c_N = \ldots\ldots$
$c_T = \ldots\ldots$
Линеаризованная зависимость: $c_S = (\partial c_S/\partial \beta)\beta + (\partial c_S/\partial \dot{\beta})\dot{\beta} + (\partial c_S/\partial \omega_Z)\omega_Z + \ldots\ldots$, где $(\partial c_S/\partial \beta)\beta$ – стационарная составляющая; $(\partial c_S/\partial \dot{\beta})\dot{\beta}$ – нестационарная составляющая; $(\partial c_S/\partial \omega_Z)\omega_Z$ – квазистационарная составляющая;
$c_N = \ldots\ldots$
$c_T = \ldots\ldots$

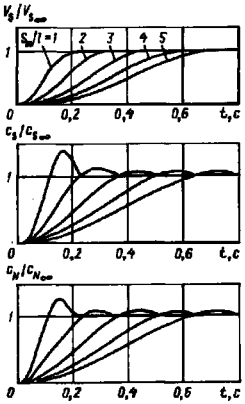
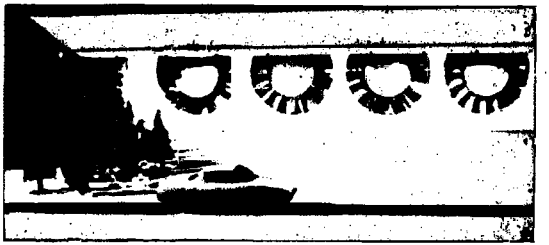


Рис. 5.10. Рассчитанные коэффициенты нестационарных боковой силы и поворачивающего момента при различных эпюрах скоростей бокового ветра [5.10]

Рис. 5.11. Имитирующая боковой ветер установка, предназначенная для измерения коэффициента нестационарных боковых сил и поворачивающих моментов [5.25]



ки (рис. 5.11) показали, что примененная в [5.10] теория, как и следовало ожидать, только тогда хорошо согласуется с экспериментальными данными, когда рассматриваемые тела, по меньшей мере, в области передка отличаются хорошей обтекаемостью.

5.3. ВСТРЕЧАЮЩИЕСЯ НА ПРАКТИКЕ ПРОБЛЕМЫ БОКОВОГО ВЕТРА

5.3.1. ПРОКЛАДКА ДОРОГ И ЗАЩИТА ОТ БОКОВОГО ВЕТРА

Прокладка дорог, как правило, осуществляется без учета опасности со стороны бокового ветра. Особенно уязвимы в этом отношении туннели, насыпи и мосты. В противоположность сказанному в п. 5.2.1 о

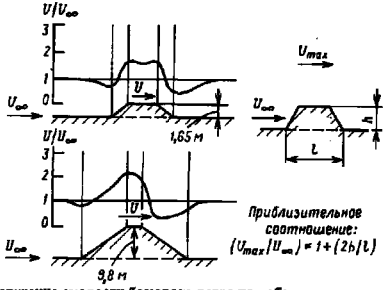


Рис. 5.12. Увеличение скорости бокового ветра при обтекании насыпи дороги [5.2]

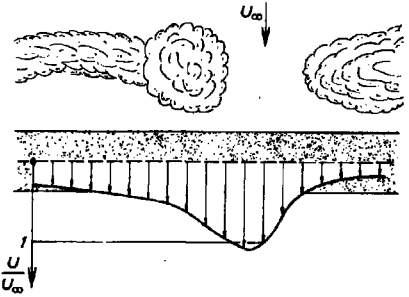


Рис. 5.13. Эффект "сопла", возникающий при боковом ветре из-за пробела среди кустарника [5.2]

том, что обычно на высоте автомобиля скорость ветра меньше, чем на высоте точки измерения над дорогой 10 – 15 м, рис. 5.12 показывает, что из-за строительных сооружений, например из-за насыпи, скорость ветра может вновь увеличиться. Пробелы среди кустарника и деревьев могут действовать как сопла, и скорость ветра в этом месте по сравнению со скоростью ветра в окружающем пространстве может быть больше, рис. 5.13. Рис. 5.12 и 5.13 взяты из работы Битцля [5.2].

Непроходимая живая изгородь из кустарника или деревьев уменьшает скорость бокового ветра (рис. 5.14, по Бленку и Тринесу [5.15]). Лесопосадки, например из тополей, в области стволов в связи с переменным действием кроны деревьев могут иногда вызвать повышенную скорость ветра.

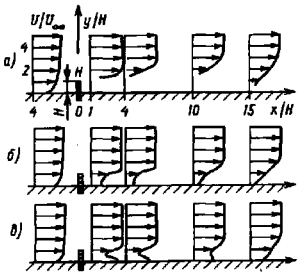


Рис. 5.14. Эпюры скоростей ветра за различными преградами (исследование с помощью моделирования) [5.15]: *а* – непроходимая живая изгородь ($\lambda = 0$); *б* – живая изгородь средней плотности ($\lambda = 0{,}48$); *в* – "топливный ряд"

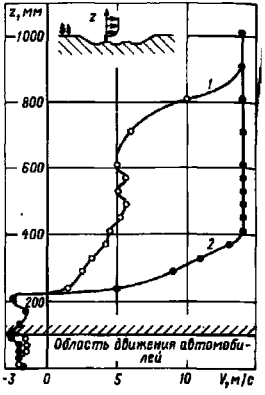


Рис. 5.15. Распределение скорости ветра в поперечном сечении ландшафта, масштаб 1:16:
1 – без деревьев; *2* – с деревьями

Хорошей защитой от ветра является углубление полотна дороги относительно ландшафта (рис. 5.15). Измерения были проведены автором с помощью масштабной модели местности (1:16) в большой аэродинамической трубе концерна "Фольксваген".

5.3.2. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ПОРЫВЫ БОКОВОГО ВЕТРА

Следует отметить, что степень турбулентности естественного ветра порядка 1. Это значит, что если дует боковой ветер с силой V, то скорость может внезапно увеличиться до $2V$ или уменьшиться до нуля. Применительно к автомобилю естественная порывистость ветра совершенно равнозначна *кажущейся* порывистости, вызванной пробелами среди построек или деревьев. В то время как действие равномерного бокового ветра (см. рис. 5.12) можно компенсировать постоянным углом поворота рулевого колеса, случай, показанный на рис. 5.13, опаснее, поскольку от водителя требуется мгновенная корректировка курса автомобиля поворотом рулевого колеса.

Сказанное справедливо и в случае переезда через мост при боковом ветре. Сначала автомобиль движется в поле постоянного бокового ветра (рис. 5.16) с соответствующим углом установки рулевого колеса, компенсирующим его действие, а затем попадает на участок с подветренной стороны предмостового укрепления. Чтобы не пересечь правый край полотна дороги, водитель должен повернуть влево. При таком положении рулевого колеса, в последующей ситуации уже неправильном, авто-

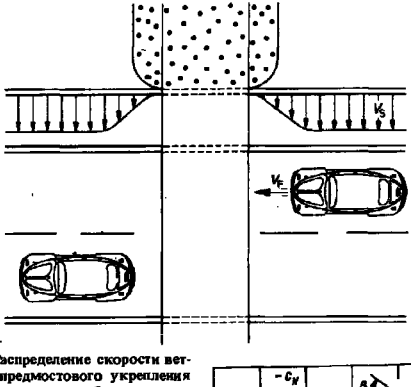


Рис. 5.16. Распределение скорости ветра вблизи предмостового укрепления при боковом ветре, изображение схематичное

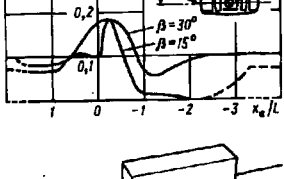


Рис. 5.17. Изменение коэффициента поворачивающего момента во время обгона легковым автомобилем автомобиля-контейнеровоза [5.15]

мобиль попадает в зону, где боковой ветер дует справа, что вновь требует мгновенной реакции водителя.



Каждому водителю хорошо знаком обгон грузового автомобиля при боковом ветре. В связи с тем что скорость обгона по сравнению со скоростью движения невелика, приведенная частота (Ω , см. п. 5.2.4) имеет небольшое значение, поэтому нестационарных эффектов можно не ожидать. Это позволяет исследование случая обгона проводить в аэродинамической трубе при стационарном боковом ветре. На рис. 5.17 (см. работу Эммельманна [5.16]) показано изменение коэффициента поворачивающего момента для легкового автомобиля, который обгоняет автопоезд. Большие градиенты коэффициента поворачивающего момента, а значит, опасность для системы "водитель – автомобиль", возникают тогда, когда легковой автомобиль с подветренной стороны контейнера попадает в поле потока, образованное кабиной грузового автомобиля; здесь по сравнению со скоростью бокового ветра имеют место повышен-

ные скорости, связанные с обтеканием кромок кабины грузовика. Легковые автомобили различной формы ведут себя аналогично. Градиент коэффициента поворачивающего момента может быть уменьшен за счет скругления переходных кромок от фронтальной к боковой поверхности кабины грузового автомобиля.

5.4. ДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Общепризнанного определения устойчивости автомобилей к боковому ветру в настоящее время не существует. В многочисленных работах по этой теме, как правило, воздействие бокового ветра на автомобиль описывается либо с привлечением результатов экспериментальных исследований, либо с помощью математических моделей (см. работы Фиала [5.17], [5.18], Гнаплера [5.19], Мичке [5.21], [5.22], Зоргатца [5.23]).

Для того чтобы полностью охватить понятие "*чувствительности к боковому ветру*", в рассмотрение нужно ввести водителя. Необходимо исследовать поведение регулируемой системы "автомобиль – водитель" (рис. 5.18). Сложность такой системы заключается в том, что водитель является адаптивным регулятором, т.е. он приспосабливает свои регулирующие воздействия к характерным особенностям автомобиля. Именно из-за адаптивного поведения водителя до сих пор отсутствуют объективные закономерности изменения многих параметров этой системы. Поэтому полного теоретического описания названной регулируемой системы в настоящее время пока нет.

Существующие различные методы экспериментальных исследований и математические модели базируются на различных допущениях в отношении регулирующего воздействия водителя (см. работу Ниманна [5.24]), т.е. описывается поведение водителя в различных условиях и

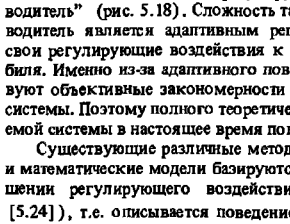


Рис. 5.18. Регулируемая система "водитель – автомобиль"

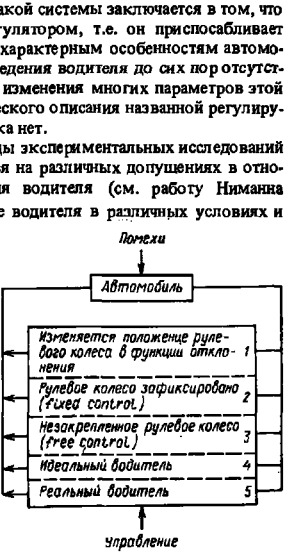


Рис. 5.19. Возможные варианты системы "водитель – автомобиль"



Рис. 5.20. Угол увода и боковое отклонение автомобиля при различных вариантах реакции водителя [5.17]:
1 – водитель противодействует отклонению автомобиля под действием бокового ветра; *2* – рулевое колесо удерживается в том же положении (*fixed control*); *3* – водитель бросает рулевое колесо (*free control*); *4* – водитель противодействует отклонению автомобиля под действием бокового ветра и тормозит

исследуется при этом перемещение автомобиля при возмущающем действии бокового ветра.

На рис. 5.19 показаны различные возможные варианты регулирующего воздействия водителя, причем под *fixed control* понимается движение с постоянным углом установки рулевого колеса, а под *free control* – движение со свободно вращающимся (не управляемым водителем) рулевым колесом. Для случаев 2, 3, 5 Фиалой [5.17] были проведены измерения. В своей работе он привел два графика (рис. 5.20), показывающих изменение угла увода γ и бокового отклонения y_G центра тяжести автомобиля после начала возмущающего действия бокового ветра, имитированного с помощью реактивного снаряда на горячей воде, в зависимости от времени. Время реакции *реального водителя* (случай 5) составляет 0,2 с, поэтому только по истечении этого времени он пытается противодействовать боковому ветру. Однако люфт рулевого управления, эластичность и нестационарное нарастание сил бокового увода ведут к тому, что автомобиль "замечает" вмешательство водителя лишь через 0,8 с.

До этого момента времени скорости изменения курсового угла, а значит, и боковые отклонения, для трех исследуемых случаев почти одинаковы. Поэтому в первые 0,8 с регулируемую систему "автомобиль – водитель" можно рассматривать как автомобиль с зафиксированным положением рулевого колеса (*fixed control*), при этом боковое отклонение центра тяжести автомобиля y_G в момент времени $t = 0{,}8$ с будет являться критерием оценки реакции автомобиля на порыв бокового ветра. Ниже приведены расчетные методы оценки влияния аэродинамического воздействия на боковое отклонение при зафиксированном положении рулевого колеса (*fixed control*). Соответствующие методы измерений описываются в п. 12.2.2.

5.5. ВЛИЯНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БОКОВОЕ ОТКЛОНЕНИЕ

5.5.1. УМЕНЬШЕНИЕ ЧИСЛА ПАРАМЕТРОВ

Боковое отклонение автомобиля при зафиксированном положении рулевого колеса (*fixed control*) зависит не только от самих возмущаю-

щих усилии, заданных эпюрной скоростей ветра, но и от массы автомоби ля, момента инерции относительно вертикальной оси, распределения наг рузки по осям, а также от параметров шасси – характеристики шин жесткости рулевого управления и характеристики подвески.

Отрицательными факторами, влияющими на боковое отклонение ав томобиля, являются аэродинамическая боковая сила и связанный с ней поворачивающий момент, а также подъемная сила, поперечный и про дольный моменты.

Так как исследование воздействия перечисленных выше параметров на курсовую устойчивость автомобиля при боковом ветре с помощью имитирующих боковой ветер устройств требует довольно весомых зат рат, то целесообразно провести соответствующие расчеты с помощью достаточно точной математической модели. Приведенные ниже резуль таты получены расчетом по вычислительной программе для математичес кой модели Зоргатца [5.23]. В соответствии с числом существующих 23-х степеней свободы, предусмотренных математической моделью потребовалось огромное число вводимых данных, полностью описыва ющих исследуемый автомобиль.

Для того чтобы дать оценку оптимизированным автомобилям се рийного производства, которые по конструктивному решению шасси имеют несущественные отличия, для параметров шасси можно исполь зовать стандартные данные, поэтому общее число рассматриваемых фак торов, влияющих на боковое отклонение, можно уменьшить, оставив: вес автомобиля G, распределение веса по осям автомобиля G_V/G_H (по ложение центра тяжести), момент инерции I_{ZZ}, поворачивающий момент N, боковая сила S.

На рис. 5.21 показан график, характеризующий соотношение между весом автомобиля и моментом инерции, который в диапазоне значений веса 700 кг $\leqslant G \leqslant$ 1500 кг адекватно описывается уравнением прямой

$$I_{ZZ} = 0{,}28G - 145\ [\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2]\,. \tag{5.}$$

Непосредственное влияние на механику движения оказывает значение аэродинамического поворачивающего момента относительно центра тяжести автомобиля, которое определяется с помощью известного его значения относительно условной точки отсчета (см. рис. 5.6) по выраже нию

$$N_{SP} = N - x_S S. \tag{5.2}$$

Разделив обе части равенства (5.2) на боковую силу, получим условное плечо поворачивающего аэродинамического момента (расстояние между центром давления и центром тяжести)

$$N_{SP}/S = x_{DS} = N/S - x_S = x_D - x_S, \tag{5.3}$$

которое имело бы место в том случае, если бы поворачивающий момент создавался только за счет действия боковой силы. Поворачивающий мо мент относительно условной точки отсчета, характеризуемый плечом x_D, включает в себя дополнительную составляющую поворачивающего мо мента от асимметрично действующей тангенциальной силы. Положение

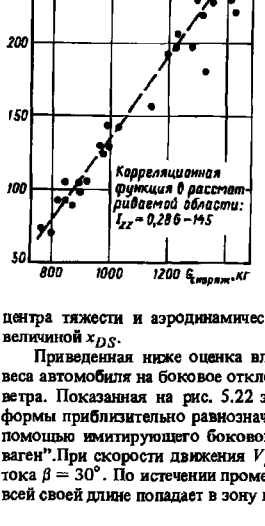
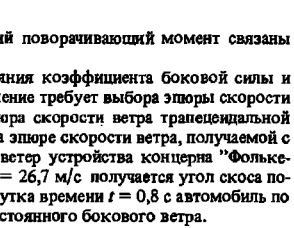


Рис. 5.21. Соотношение между весом автомобиля и моментом инерции относительно вертикальной оси

Рис. 5.22. Схематичное изображение эпюры скорости бокового ветра



центра тяжести и аэродинамический поворачивающий момент связаны величиной x_{DS}.

Приведенная ниже оценка влияния коэффициента боковой силы и веса автомобиля на боковое отклонение требует выбора эпюры скорости ветра. Показанная на рис. 5.22 эпюра скорости ветра трапецеидальной формы приблизительно равнозначна эпюре скорости ветра, получаемой с помощью имитирующего боковой ветер устройства концерна "Фольксваген".При скорости движения $V_F = 26{,}7$ м/с получается угол скоса потока $\beta = 30°$. По истечении промежутка времени $t = 0{,}8$ с автомобиль по всей своей длине попадает в зону постоянного бокового ветра.

5.5.2. УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ БОКОВОЙ СИЛЫ, ВЕСА И ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ДАВЛЕНИЯ НА БОКОВОЕ ОТКЛОНЕНИЕ АВТОМОБИЛЯ

С помощью названной выше математической модели Зоргатца для двух совершенно разных автомобилей, один из котрых имел привод на передние колеса, его вес составлял 996 кг, а другой автомобиль имел расположенный сзади двигатель и привод на задние колеса, его вес 1506 кг, были рассчитаны боковые отклонения. Варьируемыми факторами в процессе расчета были: боковая сила, поворачивающий аэродинамический момент и положение центра тяжести автомобиля. Остальные параметры (как указано в предыдущем разделе) имели стандартные значения. Далее был проведен регрессионный анализ полученных значений боковых отклонений с целью определения коэффициентов уравнения регрессии при варьируемых факторах (весе, расстоянии до центра давления x_{DS}, боковой силе, замененной произведением $c_S F$) и их взаимодействий. В соответствии с углом скоса результирующей скорости натекания потока на автомобиль в качестве коэффициента боковой силы была выб-

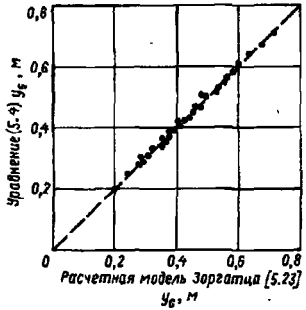


Рис. 5.23. Сравнение результатов расчета по уравнению (5.4) с результатами базового расчета по Зоргатцу [5.23]

рана величина $c_S = c_S(\beta = 30^\circ)$ и обозначена как c_{S30}. Окончательно была получена следующая зависимость:

$$y_G = [(1/G)(k_1 + k_2 x_{DS}) + k_3 x_{DS} + k_4]\, c_{S30} F + (1/G)(k_5 + k_6 x_{DS}) + k_7 x_{DS} + k_8, \qquad (5.4)$$

где G в кг; x_{DS} в м; F в м^2. Для исследуемого случая бокового ветра при времени оценки $t = 0{,}8$ с константы имеют следующие значения:

$k_1 = 58{,}820$; $k_5 = 182{,}350$;
$k_2 = 135{,}290$; $k_6 = -279{,}410$;
$k_3 = 0{,}028$; $k_7 = 0{,}215$;
$k_4 = 0{,}014$; $k_8 = -0{,}095$.

Как видно из рис. 5.23, имеет место хорошая сходимость результатов расчета боковых отклонений, полученных по уравнению (5.4), со значениями этих отклонений, полученными для полной модели по Зоргатцу. Таким образом, уравнение (5.4) может использоваться для вычисления бокового отклонения серийных автомобилей (см. п. 5.5.3) с достаточной точностью.

5.5.3. ВЫЧИСЛЕНИЕ БОКОВОГО ОТКЛОНЕНИЯ СЕРИЙНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Для выборки из 30 автомобилей по уравнению (5.4) были рассчитаны боковые отклонения. На рис. 5.24 для этих автомобилей приведены

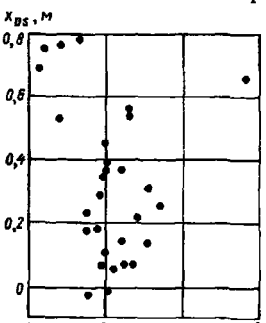
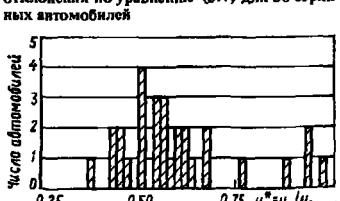


Рис. 5.24. Коэффициенты боковой силы и расстояние до центра давления для 30 серийных автомобилей

Рис. 5.25. Функция распределения бокового отклонения по уравнению (5.4) для 30 серийных автомобилей



значения x_{DS} в зависимости от боковой силы ($c_{S30}F$). По приведенным данным видно, что для автомобилей с малыми коэффициентами боковой силы центр давления расположен дальше от центра тяжести, чем для автомобилей, имеющих высокое значение коэффициента боковой силы.

Полученные по уравнению (5.4) значения боковых отклонений y_G, отнесенные к наибольшему боковому отклонению $y_{G\max}$ из числа исследуемых автомобилей, представлены на рис. 5.25 в форме функции распределения. Среднее арифметическое значение относительного отклонения $y^*_G = 0{,}63$. Только 30% исследуемых автомобилей превышают это значение. Примерно 50% автомобилей имеют величину $y^*_G < 0{,}57$.

Ранжирование исследуемых автомобилей по их боковым отклонениям y_G было подтверждено при проведении экспериментальных работ с использованием имитирующей боковой ветер установки.

5.6. ПРЕДЕЛЬНОЕ УСЛОВИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПАСНОСТИ

Предела, при котором чувствительность к боковому ветру из потери комфорта перерастает в непосредственную угрозу безопасности движения, по найденной функции распределения боковых отклонений определить нельзя. С помощью высказанных ниже предположений предпринята попытка определить предельное условие возникновения опасности.

Боковое отклонение опасной величины имеет место тогда, когда автомобиль достигнет края своей полосы движения. Следовательно, при полосе движения шириной 3,75 м (шоссе в ФРГ и США имеют ширину примерно 3,66 м) и ширине автомобиля около 1,7 м возможно отклонение от курса примерно 1 м (см. рис. 5.26).

При этом в первом приближении можно исходить из того, что отклонение автмобиля на дороге после возникновения реакции водителя составляет $2y_G$ от первоначального курса, т.е. вдвое больше, чем отклоне-

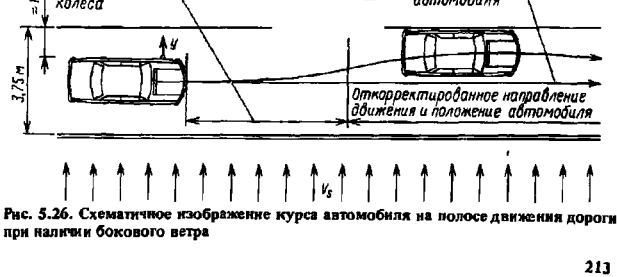


Рис. 5.26. Схематичное изображение курса автомобиля на полосе движения дороги при наличии бокового ветра

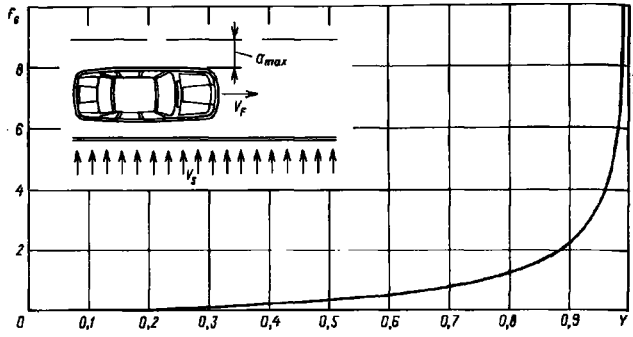


Рис. 5.27. Степень опасности по мере приближения к краю полосы движения

ние в первые 0,8 с после возникновения порыва бокового ветра, в течение которых автомобиль движется при почти зафиксированном положении рулевого колеса (*quasi fixed control*) (см. рис. 5.20).

Исходя из того, что первоначально автомобиль двигался посередине полосы движения, степень опасности по мере приближения к краю полосы движения сначала мала, а затем, вблизи от края, сильно увеличивается. Такой процесс можно выразить следующим соотношением (см. рис. 5.27)

$$f_G = \sqrt{1/(1-Y)} - 1, \tag{5.5}$$

где

$$Y = 2y_G/a_{max}. \tag{5.6}$$

При принятом распределении степени опасности (см. уравнение (5.5)) опасность сильно возрастает при $Y = 0{,}9$. Если это значение принять в качестве предельного условия возникновения опасности, то для приведенного на рис. 5.26 примера ($a_{max} = 1$м) это означает, что допустимым максимальным отклонением следует считать $y_G = 0{,}45$ м, при этом соотвественно минимальное безопасное расстояние до края полосы движения составит 0,1 м.

5.7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чувствительность автомобилей к боковому ветру представляет собой помеху системы "автомобиль – водитель", которая из ухудшения комфорта может перерасти в угрозу безопасности движения. В то время как автомобиль хорошо описывается с помощью теории, для водителя имеются лишь идеализированные модели, которые не воспроизводят его

адаптивных свойств. По этому вопросу в будущем следует форсировать исследовательскую работу. До настоящего времени в распоряжении разработчиков автомобилей имеются упрощенные методы оценки; один из них был представлен выше.

5.8. ОБОЗНАЧЕНИЯ

U – скорость ветра;
V – скорость ветра;
V_F – скорость движения автомобиля;
V_S – скорость бокового ветра;
F – базовая поверхность;
Y – относительное боковое отклонение, уравнение (5.6);
l – длина;
y_G – боковое отклонение;
x_S – расстояние до центра тяжести;
x_D – расстояние до центра давления;
x_{DS} – расстояние между центром давления и центром тяжести;
N – поворачивающий аэродинамический момент;
S – боковая аэродинамическая сила;
q_∞ – скоростной напор;
I_{ZZ} – момент инерции;
c_N – коэффициент поворачивающего аэродинамического момента;
c_S – коэффициент боковой силы;
c_{S30} – коэффициент боковой силы при $\beta = 30^\circ$;
c_A – коэффициент подъемной силы;
c_L – коэффициент поперечного аэродинамического момента;
c_M – коэффициент продольного аэродинамического момента;
c_T – коэффициент тангенциальной силы;
f_G – степень опасности, уравнение (5.5);
Tu – степень турбулентности;
γ – угол отклонения от курса движения (угол увода);
β – угол скоса потока.

6. ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ И КОМФОРТ

Раймунд Пиатек

6.1. РАЗГРАНИЧЕНИЕ ТЕМЫ

В пп. 4 и 5 была установлена связь между структурой поля потока вокруг легкового автомобиля и вызванными им силами и моментами. Имеющие место отрывы потока рассматривались лишь с позиций их влияния на коэффициенты аэродинамических сил и моментов. В рамках этой книги такого одностороннего рассмотрения взаимодействия автомобиля с обтекающим его воздухом будет явно недостаточно.

В приведенном ниже материале данной главы представлены другие аспекты обтекания, связанные с функциональностью, безопасностью и комфортабельностью автомобиля, которые также необходимо учиты-

вать, занимаясь формированием потока вокруг автомобиля. Такие явления, как загрязнение поверхности автомобиля, охлаждение тормозов, возникновение действующих на отдельные детали кузова сил, дребезжание деталей кузова и навесных элементов, наконец, возникновение аэродинамического шума ветра непосредственно связаны с обтеканием автомобиля. Для решения поставленных проблем очень важно воссоздать точную картину потока в рассматриваемом месте. Качественное представление отдельных полей потока дают рис. 4.3 и 4.4. Количественные характеристики потока получают путем замера локальных полей.

6.2. ПОЛЕ ПОТОКА ВОКРУГ АВТОМОБИЛЯ

6.2.1. ХАРАКТЕР ОБТЕКАНИЯ

Различают две принципиально различные формы потока, обтекающего автомобиль, это области прилегающего к поверхности потока и области срывного обтекания. Отрывы делятся на два вида: близкие к двухмерным (квазидвухмерные) и трехмерные (см. п. 4.2).

Выявление областей срывного обтекания, а также определение их протяженности по поверхности автомобиля, можно осуществить довольно просто с привлечением испытательного оборудования. На рис. 6.1 и 6.2 приведены примеры, позволяющие понять, каким образом сделать видимым поток вокруг автомобиля. На рис. 6.1 по наружной поверхности через определенные расстояния наклеены тонкие шерстяные нитки. Направление этих нитей при обтекании воздухом позволяет сделать вывод о местном направлении потока. На этом рисунке можно явно увидеть трехмерный отрыв за стойкой ветрового стекла. На рис. 6.2 показан спектр обтекания модели автомобиля, полученный с помощью красителей. Нанесенный на автомобиль или его модель красящий раствор растекается и высушивается при обтекании потоком воздуха в аэродинамической трубе. Полученная таким образом картина позволяет довольно приблизительно судить о локальном направлении скорости потока, так как влияние гравитации на каждую из частичек жидкости искажает их траектории. Получаемые линии на поверхности тела отклоняются



Рис. 6.1. Поток вокруг автомобиля становится видимым, если на поверхность автомобиля приклеить шерстяные нити [6.17]



Рис. 6.2. Спектр обтекания модели автомобиля-фургона, полученный с помощью красящего раствора. Радиус скругления кромок $r = 0$ мм, угол скоса потока $\beta = 0°$ [6.6]

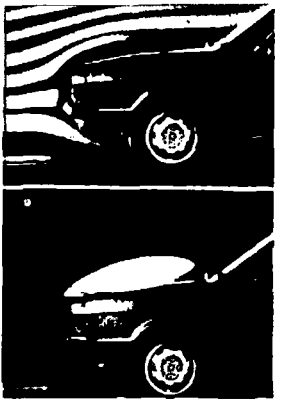


Рис. 6.3. "Раковина отрыва" становится видимой с помощью струек дыма; внизу — инъекция дыма в районе отрыва потока [6.6]

от действительных линий тока всегда вниз. Но рисунок очень хорошо позволяет увидеть две области отрыва потока: одну за стойкой ветрового стекла, другую за вертикальной кромкой передка. Приведенные спектры обтекания получены при симметричном натекании потока. Оба упомянутых способа дают представление о характере линий тока по поверхности автомобиля. Получить данные о потоке в пространстве вокруг автомобиля на основании таких исследований невозможно. Для этого можно воспользоваться визуализацией потока с помощью струек дыма. На рис. 6.3 (см. работу Гухо, Янссена [6.6]) представлено ставшее видимым с помощью струек дыма обтекание капота; в качестве примера показан отрыв потока от передней кромки капота. Области срывного обтекания особенно хорошо заметны потому, что дым вместе с оторвавшимся потоком отходит от поверхности (как можно увидеть на рис. 6.3 внизу).

Точные количественные данные могут быть получены благодаря измерению полей скоростей и давлений с помощью зондов.

В рамках рассматриваемых в п.6.1. задач среди всех отрывов, которые могут иметь место на автомобиле, интерес представляют следующие: отрыв в зоне капота; отрыв в зоне крыши; вихревое течение в зоне стойки ветрового стекла; трехмерные вихри в задней части автомобиля (продольные вихри); близкий к двухмерному вихревой след за автомобилем (зона "спокойной воды").



Рис. 6.4. Спектр обтекания, иллюстрирующий возникновение трехмерного отрыва в районе стойки ветрового стекла [6.5]:
1 – линия отрыва; 2 – линия повторного прилегания потока

Отрыв в передней части капота автомобиля (см. рис. 6.3) вызван тем, что передняя часть капота имеет обусловленную конструкцией острую кромку. Этот отрыв, не учитывая боковые области рассматриваемого автомобиля, может считаться близким к двухмерному. *Отрыв от переднего края крыши* по своей физической природе идентичен отрыву от кромки капота. За стойкой ветрового стекла (стойкой *А*) возникает третья интересующая нас область отрыва – вихрь стойки ветрового стекла. Наличие такого потока в указанной области хорошо видно на рис. 6.4 (Ватанабе и другие [6.5]).

Полученный с помощью красящего раствора спектр обтекания на натурном автомобиле подтверждает наличие в этой области формы потока, определенной в процессе экспериментов с моделями. Его схематичное изображение приведено на рис. 6.5 (см. Ватанабе и другие [6.5]). Образующийся "вихревой кулек" с распространяющимся по краю вторичным вихрем носит трехмерный характер.

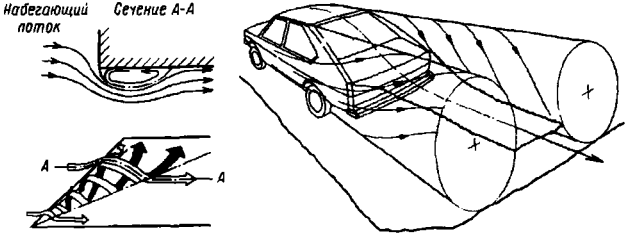


Рис. 6.5. Схематичное изображение вихря стойки ветрового стекла [6.5]

Рис. 6.6. Схематичное изображение продольных вихрей, образующихся в задней части автомобиля с плавно спускающейся формой задка [6.3]

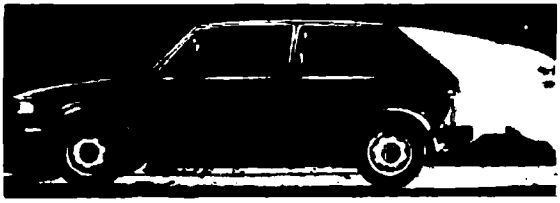


Рис. 6.7. Зона близкого к двухмерному вихревого следа позади автомобиля "Фольксваген Гольф" (продольные вихри не образуются)

В области задка автомобиля имеют место две формы отрыва потока. *Продольные вихри задка,* в сильно идеализированном виде представленные на рис. 6.6, образуются из-за разности статического давления в верхней и нижней частях автомобиля. Лучше отражает действительный характер обтекания рис. 4.4. Перепад давления между нижней частью боковины и крышей индуцирует по обеим сторонам направленный вверх по течению поток, который вместе с потоком с крыши образует продольные вихри задка. Вторая форма отрыва потока в области задней части автомобиля – *близкий к двухмерному вихревой след.* На рис. 6.7 он хорошо просматривается благодаря инъекции дыма. Поток над автомобилем в задней его части не может больше прилегать к контуру, он отрывается в районе задней кромки крыши от контура автомобиля. Такой оторвавшийся поток на первый взгляд кажется беспорядочным. Но, как подробнее будет рассмотрено в п. 6.4.3, в каждый момент времени в этом потоке можно выделить характерное доминирующее его направление. Далее речь идет о влиянии показанных здесь отдельных полей потока на круг проблем, касающихся функциональности, безопасности эксплуатации и комфортабельности автомобиля.

6.2.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

При движении вокруг автомобиля складывается определенное распределение скоростей и давлений потока. На рис. 6.8 приведено сравнение замеренных по среднему продольному сечению эпюр распределения давления для трех различных конструкций автомобиля: авто-

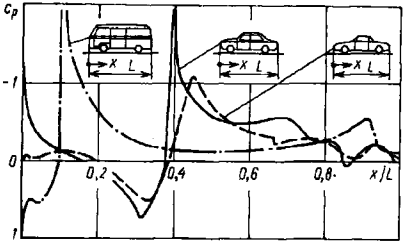


Рис. 6.8. Эпюра распределения давления для различных типов автомобилей, угол скоса потока $\beta = 0°$

мобиля-фургона, автомобиля со ступенчатой формой задка и спортивного автомобиля. На графике значение давления приведено в виде безразмерного коэффициента c_p, который определяется по уравнению (2.8). В рамках этой главы важно иметь представление о распределении локальных давлений с учетом трех аспектов (см. также п. 2.3.2): выявление областей для забора воздуха в систему вентиляции салона; выявление областей выпуска воздуха из системы вентиляции салона; определение сил, действующих на элементы кузова. По последнему пункту разъяснения можно найти в п. 6.3.

При решении вопросов забора и выхода воздуха для вентиляции салона автомобиля возможны две концепции (см. также п. 10.4.1): объемный расход воздуха не зависит от скорости движения автомобиля; объемный расход воздуха зависит от скорости движения. Независимость объемного расхода воздуха от скорости движения обеспечивается тем, что забор и выпуск воздуха происходят в областях равного давления. При этом перепад давления отсутствует и постоянный расход воздуха создается с помощью непрерывно работающего вентилятора. Возникновение дополнительного шума, а также более высокая стоимость изготовления вентилятора, привели к тому, что на практике обычно используется второй возможный вариант, при котором объемный расход воздуха хотя и зависит от скорости движения, но при этом вентилятор, подающий свежий воздух, не обязательно должен быть включенным постоянно.

При выборе места расположения отверстий для забора воздуха в общем случае свобода действий ограничена. Для обеспечения хорошей вентиляции при минимальных конструктивных параметрах вентилятора для забора воздуха выбирают области более высокого давления. В этом случае (как видно из рис. 6.8) для легковых автомобилей возможны два варианта. Один из них – расположить отверстия на фронтальной поверхности передка автомобиля, т.е. в области вблизи точки полного торможения набегающего потока, где $c_p = 1$. Но при этом, однако, существует опасность попадания в салон рассматриваемого автомобиля выхлопных газов обгоняющего автомобиля. Кроме того, в этом случае для подачи воздуха в салон автомобиля необходима установка длинного воздуховода, что потребует дополнительных конструктивных затрат и приводит к удорожанию. Второй вариант – воздухозаборные отверстия разместить в области сопряжения капота с ветровым стеклом. Отверстия для забора воздуха, как правило, располагаются в центре этой зоны. Статическое давление в этой зоне, которое необходимо знать для определения конструктивных параметров системы вентиляции, не для всех автомобилей одинаково. На него оказывает влияние не только наклон ветрового стекла, но и характер потока вдоль капота. Если поток отрывается от переднего края капота, то в зависимости от положения точки повторного прилегания избыточное давление в этой зоне будет различно. На рис. 6.9 (по Янссену и Гухо [6.2]) показано влияние оформления передней кромки капота на давление в области сопряжения ка-

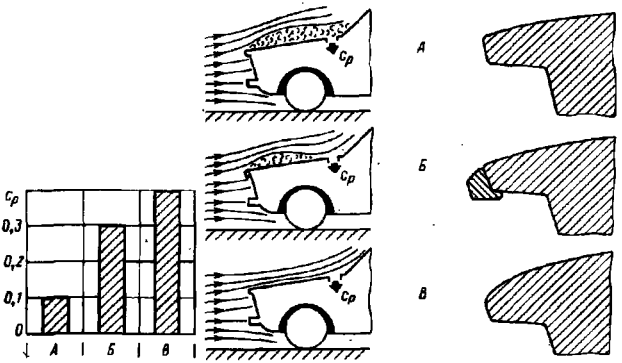


Рис. 6.9. Влияние характера потока, обтекающего капот, на давление в зоне сопряжения капота с ветровым стеклом [6.2]:
А – полный отрыв потока; *Б* – частичный отрыв потока; *В* – отрыв потока отсутствует, автомобили "Фольксваген Гольф" и "Фольксваген Сирокко"

пота с ветровым стеклом. При форме исполнения А, приводящей к полному отрыву потока от поверхности капота, имеет место небольшое избыточное давление ($c_p = +0,1$). При реализации такого контура передка необходимо было бы предусмотреть непрерывно работающий вентилятор.

Контур Б, при котором обтекание передка улучшилось, вызывает отрыв с повторным прилеганием потока перед зоной сопряжения капота с ветровым стеклом. При таком исполнении статическое давление в рассматриваемой области увеличивается до $c_p = +0,3$.

При скругленной кромке капота (контур В) имеет место безотрывное обтекание капота. Давление в этом случае возрастает до $c_p = +0,4$, и это обеспечивает достаточный объемный расход свежего воздуха даже без дополнительного вентилятора. Для автомобиля-фургона, как видно из рис. 6.8, забор воздуха можно осуществить только из зоны, расположенной на фронтальной поверхности передка автомобиля. Но отверстие по возможности следует сместить вверх, чтобы исключить попадание выхлопных газов от обгоняющих автомобилей.

При выборе зон расположения отверстий для вытяжки воздуха из салона, как правило, свободы больше. На первый взгляд кажется, что следует выбрать область по возможности наибольшего разрежения, т.е. область перехода от ветрового стекла к крыше. Такое решение обеспечивает максимальный перепад давления, а значит, и максимальный объемный расход воздуха. Однако распределение по салону свежего и теплого воздуха было бы неудовлетворительным (см. п. 10), так как пространство за передними сиденьями вентиляции бы не подвергалось.

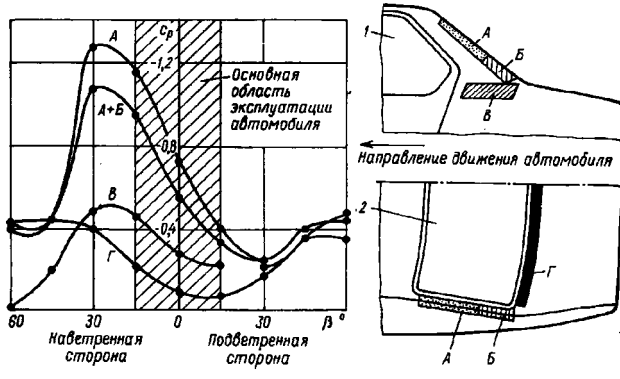


Рис. 6.10. Средние коэффициенты давления для возможных зон расположения вытяжных отверстий системы вентиляции при различных углах скоса потока [6.1]: *1* – стекло задней боковой двери; *2* – стекло заднего вида

Принимая во внимание требования технологии, хороший результат скорее всего можно получить, если отверстия для вытяжки воздуха сместить назад. В задней части автомобиля области разрежения (пониженного давления) имеются в различных местах. На рис. 6.10 (по Гухо [6.1]) представлены результаты измерений распределения давления, которые были предприняты для выявления мест расположения отверстий вытяжки воздуха для автомобиля со ступенчатой формой задней части. Измерения проводились для четырех зон пониженного давления, которые конструктивно наиболее приемлемы для размещения вытяжных отверстий. На графиках приведены средние значения коэффициентов давления для этих зон. Из приведенных зависимостей хорошо видно, что при кососимметричном обтекании с подветренной стороны наблюдается существенное уменьшение разрежения. Чтобы обеспечить в эксплуатационных условиях при наличии бокового ветра безупречное функционирование вытяжной вентиляции, проведение испытаний по выбору зон расположения вытяжных отверстий следует проводить для различных значений параметра угла скоса потока β.

Отдельные элементы кузова оказывают существенное влияние на давление в местах вытяжки воздуха. Если, например, вытяжные отверстия размещаются позади водосточного желобка на стойке задка (стойке *C*), то давление в этом месте зависит прежде всего от геометрических размеров водосточного желобка. Сравниваемые на рис. 6.10 результаты были получены Гухо и Янссеном [6.16] при разработке системы вентиляции автомобиля "Фольксваген 1300" ("Жук").

О том, что давление воздуха, распределенное по поверхности автомобиля, является источником аэродинамических сил и моментов, говорилось в пп. 4 и 5. В данном разделе рассматриваются аэродинамические силы, которые действуют на отдельные детали или поверхности кузова. Эти силы могут быть как стационарными, так и нестационарными. Из рис. 6.11 (на примере переднего бокового стекла) видно, что аэродинамические силы могут иметь существенные значения, и это требует поиска соответствующих конструктивных решений по предотвращению их отрицательного воздействия. Величина действующей силы, конечно, зависит от площади стекла, а также в значительной степени и от результирующего угла скоса потока β. Результирующая сила, действующая на стекло с подветренной стороны, увеличивается вследствие уменьшения статического давления с наружной стороны стекла. Такое действие силы при безрамной конструкции стекла может привести к неприлеганию стекла к уплотнителю. Возникающая таким образом щель приводит к появлению обусловленного перепадом давления высокочастотного соплообразного течения воздуха, которое вызывает крайне неприятные ощущения (см. п. 6.5.2). Избежать этого можно за счет увеличения сопротивления скручиванию стекла, или (с учетом механики потока) за счет увеличения давления на внешнюю поверхность стекла путем уменьшения местной скорости потока.

Особое внимание следует уделить силам и моментам, действующим на неподвижные детали кузова, такие, как капот и крышка багажника. Вследствие сильного разрежения в районе переднего края капота (см. рис. 6.8) возникают большие силы, действующие на поверхность капота. В случае, когда капот открывается подниманием переднего края,

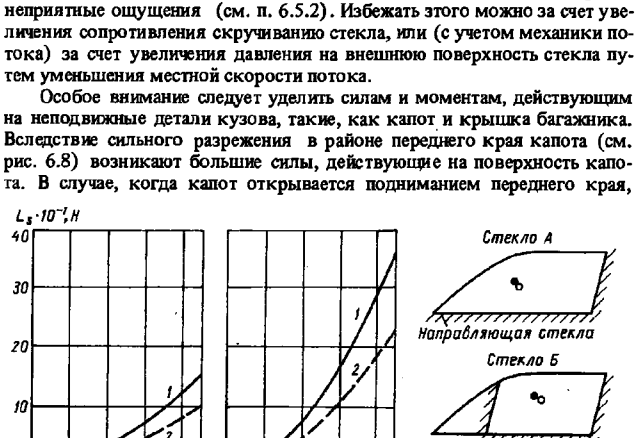


Рис. 6.11. Влияние скорости движения автомобиля и угла скоса потока на результирующую аэродинамическую силу, действующую на боковое стекло:
а – угол скоса потока $\beta = 0°$; *б* – угол скоса потока $\beta = 15°$, подветренная сторона; *1* – стекло А; *2* – стекло Б

особое внимание необходимо уделить замку капота, чтобы избежать ситуации самопроизвольного открывания при высокой скорости движения. Плавное опускание контура капота к переднему его краю или большой радиус скругления передней кромки уменьшают пиковое значение разрежения в передней части капота.

Периодичные изменения в структуре потока, обтекающего автомобиль, такие, как, например, периодический отрыв вихрей, приводят к тому, что действующие на элементы поверхности и детали автомобиля аэродинамические силы нестационарны. Это может привести (с учетом того, что жесткость деталей и элементов поверхностей имеет конечную величину) к так называемому дребезжанию. Подобные явления наблюдались для капотов легковых автомобилей, а также для крыши автомобилей-фургонов. Опасность возбуждения таких колебаний можно уменьшить, если при проектировании автомобиля стремиться к тому, чтобы зоны срыва потока по возможности удалить от деталей кузова, имеющих большие площади поверхности. Тенденция к плоским, вытянутым автомобилям и, как следствие, меньшим выпуклостям поверхностей, а также к более легким конструкциям ведет к тому, что проблеме дребезжания в будущем будет уделяться повышенное внимание.

Говоря о действии нестационарных сил на отдельные детали кузова, в качестве примера можно рассмотреть взаимодействие с потоком наружного зеркала заднего вида. Периодические изменения структуры потока в вихревом следе за зеркалом приводят к нестационарности нагрузки, действующей на зеркало. Так как в силу своего функционального назначения зеркало должно быть механически подвижным, то это может привести к периодическому смещению от первоначальной его установки. Этому можно противодействовать изменением геометрических параметров формы зеркала, оптимизируя их таким образом, чтобы исключить возбуждение колебаний. Однако на поиск удовлетворительной геометрии оказывают влияние многие аспекты (см. п. 6.4.2).

6.4. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

6.4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Оседание грязи на поверхности автомобиля следует рассматривать с учетом двух аспектов (см. также п. 8.6). Во-первых, загрязнение фар, сигнальных фонарей, а также стекол в значительной степени отражается на безопасности автомобиля. Вторым аспектом данной проблемы является эстетика. Загрязнение больших площадей боковых поверхностей автомобиля, особенно в зонах входа в автомобиль и дверных ручек, снижает его потребительские качества. Тема "загрязнение поверхности автомобиля" касается и нового аспекта рассмотрения потока вокруг автомобиля как потока, содержащего в себе инородные частицы (см. п. 2.3.4.). Переносимые воздухом частицы могут быть жидкими (вода) или твердыми (подхваченная с дороги грязь). Зачастую,

рассматривая загрязнение автомобиля в процессе движения, речь идет о забрызгивании грязной водой, которая представляет собой комбинацию указанных двух видов частиц. В данном разделе для лучшей наглядности поток воды и оседание грязи на автомобиль рассматриваются отдельно.

6.4.2. ПОТОК ВОДЫ

Попаданию воды на оконные проемы автомобиля, вызывающему ухудшение видимости, при проектировании новых автомобилей должно уделяться особое внимание. С учетом этого аспекта должны рассматриваться ветровое стекло, стойки ветрового стекла с расположенными за ними боковыми стеклами, наружные зеркала заднего вида, заднее стекло. Целью работ в этом направлении всегда является обеспечение отвода определенного количества воды с поверхности стекла.

В отношении ветрового стекла (см. работу Гетца [6.8]) существует множество предложений (см. также п. 8.6.1). Направляющие поток устройства и "воздушные завесы" с помощью специальных продувных устройств внизу перед ветровым стеклом до сегодняшнего дня неприемлемы на практике. Следует отметить, что для очистки ветрового стекла и в дальнейшем будут использоваться обычные системы очистки и омыва.

Попадание воды на боковые стекла автомобиля, а также на наружное зеркало заднего вида ухудшает видимость по сторонам. Этому можно противодействовать благодаря соответствующему оформлению стойки ветрового стекла. При разработке геометрии стойки ветрового стекла, однако, нельзя забывать и о ее влиянии на аэродинамическое сопротивление автомобиля (см. п. 4.5.5), и на возбуждение аэродинамического шума (см. п. 6.5.2).

На рис. 6.12 (по Янссену и Гухо [6.2]) показаны различные этапы при разработке стойки ветрового стекла для автомобиля "Фольксваген Сирокко". Исполнение *1* с точки зрения технологии является очень удачной формой, но обусловливает наличие высокого коэффициента аэродинамического сопротивления из-за интенсивного отрыва потока. Боко-

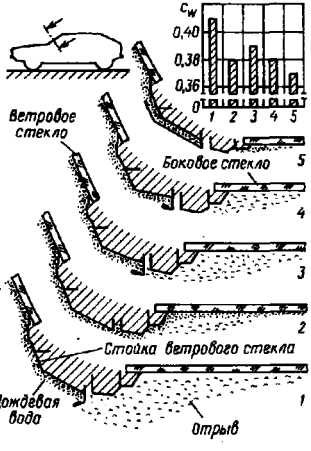


Рис. 6.12. Влияние оформления стойки ветрового стекла на коэффициент сопротивления воздуха c_W, сток воды и отрыв потока [6.2]

вые стекла защищены от попадания воды спереди. Варианты *2 – 5* являются дальнейшими разработками конструкции. Форма контура *2* вследствие существенного уменьшения области отрыва приводит к значительному уменьшению коэффициента аэродинамического сопротивления, однако она неприемлема, так как вода перетекает через стойку ветрового стекла и попадает на боковые стекла. Исполнение *3* хотя и обеспечивает отсутствие влаги на стеклах, однако значение коэффициента c_W снова увеличивается. Конструкция *5* была отвергнута из-за высоких конструктивных затрат, и в серийном производстве нашел применение контур *4* со встроенным водосточным желобком.

Другим источником попадания воды на боковые стекла является поток, обтекающий наружное зеркало заднего вида. Вихревой след, образующийся за зеркалом, может нести с собой частички воды, которые могут оседать как на боковых стеклах, так и на поверхности самого зеркала. Но общего вывода о влиянии формообразования зеркала сделать нельзя. В каждом конкретном случае, разрабатывая новый автомобиль, необходимо провести несколько циклов испытаний, чтобы определить оптимальную геометрию зеркала. Оптимальной в данном случае является форма зеркала, которая позволяет по возможности избежать соприкосновения вихревого следа за ним с поверхностью бокового стекла. Кроме того, этот вихревой след не должен вызывать загрязнения самого зеркала.

Попадание воды на стекло заднего вида автомобилей со ступенчатой и с плавно спускающейся формами задка вызвано ее стеканием с крыши. Дождевая вода, попадающая на автомобиль сверху, может отводиться от поверхности стекла. Стекающая с крыши вода улавливается выше стекла заднего вида и отводится по обеим сторонам стекла вниз. На рис. 6.13 (см. работу Янссена [6.17]) показано конструктивное решение, разработанное для автомобиля с плавно спускающейся формой задка "Фольксваген Сирокко". Для отвода воды используется разъем между крышей и дверью задка. На левой половине фотографии показано решение, предлагавшееся на ранней стадии разработки автомобиля, а на правой – решение, которое нашло применение в серийном производстве автомобиля. Вода отводится вбок по разъему двери задка.

Решение по исключению попадания воды с крыши на стекло задне-



Рис. 6.13. Сток воды по стеклу задка автомобиля "Фольксваген Сирокко" и его устранение на автомобилях серийного производства [6.17]

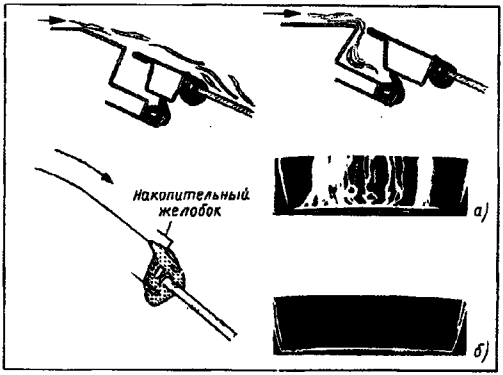


Рис. 6.14. Сток воды по поверхности стекла заднего вида автомобиля со ступенчатой формой задка (*а*) и его устранение с помощью водосборного желобка (*б*) [6.1]

го вида для автомобиля со ступенчатой формой задка показано на рис. 6.14 (по Гухо [6.1]). Функцию отвода воды выполняет видоизмененный декоративный молдинг. Вставляемый в уплотнитель стекла декоративный молдинг снабжен дополнительным водосборным желобком. Форма и размеры такого водосборного желобка должны определяться для каждого автомобиля индивидуально.

6.4.3. ОСЕДАНИЕ ГРЯЗИ

Выше рассматривалось попадание воды на оконные проемы автомобиля. Но вода на дороге и дождевая вода очень редко остаются чистыми. Поэтому попадание воды является одной из причин загрязнения стекол. Но не следует считать, что это единственный источник загрязнения и что устранением перетекания воды на стекла будет решена проблема их загрязнения.

Оседание грязи на фарах едва ли можно уменьшить за счет формообразования автомобиля. На сегодняшний день механической системе очистки фар еще нельзя противопоставить аэродинамическую альтернативу.

Загрязнение стекла заднего вида может быть вызвано двумя причинами. Одна из них — стекание воды с крыши автомобиля — была подробно рассмотрена в п. 6.4.2. Такой источник загрязнения характерен для автомобилей с плавно спускающейся и ступенчатой формами задка. Для автомобилей с круто спускающейся формой задка, особенно для автомобилей типа "универсал", стекло заднего вида увлажняется и загрязняется из-за того, что в вихревом следе за автомобилем находятся

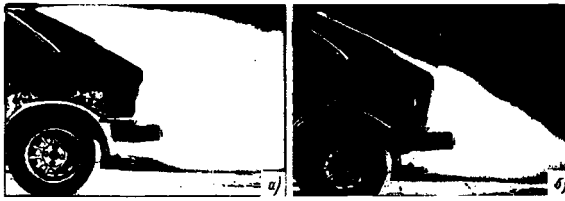


Рис. 6.15. Вихревой след за автомобилем с плавно спускающейся формой задка: *а* – поток отрывается от задней кромки крыши; *б* – поток прилегает к наклонной поверхности задка, отрыв по нижней кромке этой поверхности [6.3]

во взвешенном состоянии капли воды и частицы грязи, которые вихревым движением потока за автомобилем транспортируются к поверхности кузова. На рис. 6.15 приведены рассмотренные ранее в п. 4 две принципиальные формы отрыва потока. На рис. 6.15, *а* поток крыши отрывается от задней кромки крыши. В этом случае стекло задка располагается в зоне вихревого следа и подвергается систематическому соприкосновению с вихревыми потоками, содержащими во взвешенном состоянии частички грязной воды. На рис. 6.15, *б* показан поток, прилегающий в области стекла заднего вида. С точки зрения сохранения чистого стекла прилегающий поток имеет преимущества. Но желая добиться прилегания потока к стеклу задка можно получить, как показано в пп. 4.3.2. и 4.5.5, увеличение аэродинамического сопротивления.

Для автомобилей с круто спускающейся формой задка (например, типа "универсал"), не оборудованных какими-либо дополнительными устройствами, характерен отрыв потока всегда от задней кромки крыши. Поэтому стекло заднего вида соприкасается с вихревым потоком, образующимся за автомобилем, и очень сильно загрязняется. На рис. 6.16 (по Гухо [6.1]) показано, каким образом можно сохранить чистым стекло благодаря организации "воздушной завесы". Форму и расположение направляющего козырька следует согласовывать с формой кузова автомобиля в целом. Изменение направления движения воздуха приводит к тому, что верхняя часть стекла заднего вида почти полностью свободна от грязи, однако при этом существенно увеличивается количество оседающей грязи в нижней трети стекла. На рис. 6.17 (по Гухо и Янссену [6.6]) приведены фотографии, иллюстрирующие влияние выступания козырька относительно контура автомобиля на степень загрязнения стекла задка. При достаточном выступании козырька относительно контура автомобиля действие "воздушной завесы" распространяется до нижнего края стекла заднего вида. Из-за того, что навесные устройства, направляющие воздух, существенно увеличивают аэродинамическое сопротивление, они не представляют интереса для автомобилей серийного производства. Выполнение направляющего воздух устройства встроен-

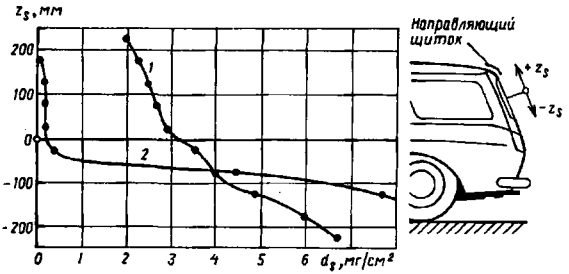


Рис. 6.16. Влияние направляющего козырька на загрязнение стекла заднего вида автомобиля с кузова "универсал":
1 – модель без направляющего козырька; *2* – модель с направляющим козырьком

ным в автомобиль с технологической точки зрения затруднительно и может привести к удорожанию конструкции. Но на автобусах иногда такое решение используется, например, как показано на рис. 8.49.

Особенно сильно загрязняются задние фонари автомобиля, что обусловлено их расположением в зоне вихревого следа, образующегося за автомобилем. Измерения толщины слоя грязи, проведенные Гетцом [6.8], дали следующий результат: наибольшее количество грязи оседает на задних фонарях автомобилей со ступенчатой формой задка. Несколько меньшее загрязнение было получено для автомобилей с бесступенчатой формой задка. Одно из возможных решений проблемы загрязнения фонарей – создание воздушной подушки между поверхностью фонаря и зоной вихревого следа за автомобилем аналогично "воздушной завесе",



Рис. 6.17. Влияние изменения выступания направляющего козырька на оседание грязи по поверхности задка автомобиля [6.6]:
а – без козырька; *б* – выступание козырька 20 мм; *в* – выступание козырька 40 мм

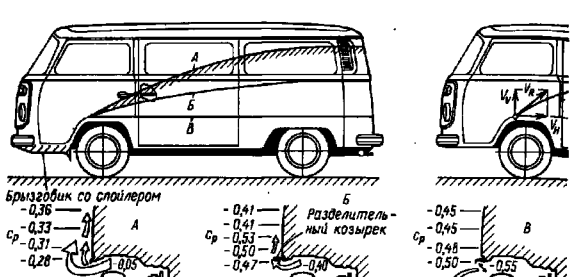


Рис. 6.18. Загрязнение боковины автомобиля-фургона (по Рольфу):
А – исходное состояние; *Б* – установлены брызговик со спойлером и разделительный козырек; *В* – установлены оптимизированные брызговик со спойлером и разделительный козырек

снижающей загрязнение стекла задка автомобилей типа "универсал". Отрицательные явления и трудности, возникающие при этом, уже были названы выше. При сегодняшнем уровне развития автомобилей предпринимаются попытки получить по возможности минимальное загрязнение в этой области за счет соответствующего формообразования внешней поверхности блока фонаря. Оказалось, что эффективным решением является выполнение внешней поверхности задних фонарей ребристыми, так как утопленные области поверхности подвергаются менее сильному воздействию вихревого следа, содержащего частички грязи.

Что касается автомобилей-фургонов, то здесь зачастую речь идет о сильном загрязнении боковых сторон автомобиля. Вылетающая из-под арок передних колес грязная вода оседает на большой площади поверхности кузова. На рис. 6.18 (по Рольфу) показано, с помощью каких деталей можно уменьшить этот эффект. Конструктивные изменения кузова заключаются в установке переднего брызговика со спойлером и разделительного козырька арки переднего колеса. Для исходной формы А характерен большой перепад между давлением на поверхности боковины в районе арки переднего колеса и давлением во внутренней полости арки. Следствием этого является возникновение направленной вверх составляющей скорости потока, вырывающегося из-под арки колеса и содержащего частички воды и грязи. Мероприятия, представленные на схеме Б, благодаря уменьшению перепада давлений, обеспечивают снижение вертикальной составляющей скорости потока и, как следствие, приводят к уменьшению площади загрязняемой поверхности, но загрязнение все еще распространяется на область, которая для данного типа автомобилей используется для рекламных надписей. Исполнение,

приведенное на схеме В, обеспечивает очень малый перепад давления и, как следствие, приводит к существенному уменьшению загрязняемой поверхности. Поэтому оно может рассматриваться в качестве приемлемого. Как видно из рис. 6.18, уменьшение перепада давления достигается за счет увеличения разрежения во внутренней полости арки колеса. Уменьшение перепада давления за счет повышения давления на боковой поверхности автомобиля, расположенной над аркой колеса, потребовало бы существенных изменений формы автомобиля, которые оказались бы неприемлемыми.

6.5. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ ШУМ

6.5.1. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ШУМОВ В АВТОМОБИЛЕ

Обтекание автомобиля сопровождается возникновением так называемого аэродинамического шума (шума ветра). Рассматривать аэродинамический шум следует только совместно с прочими шумами, существующими при движении автомобиля. Основы акустики изложены, например, Гюнтером и другими [6.9], Зборальским [6.10].

Шум автомобилей в основном создается двигателем, шинами и обтекающим воздушным потоком. Измерение уровня *внутреннего* шума на автомобиле "Фольксваген Гольф" дает представление о порядке величины и соотношении шумов, излучаемых тремя названными источниками шума. При скорости движения автомобиля 150 км/ч, что соответствует частоте вращения двигателя 5500 мин$^{-1}$ (микрофон для восприятия измеряемого шума был установлен на высоте левого уха водителя) получены следующие уровни шума: двигатель – 82,5 дБ(А); шины – 78,0 дБ(А) обтекающий автомобиль воздушной поток – 18,5 дБ (А). По этим данным был рассчитан уровень общего шума, который составил 85 дБ(А).

Тенденция к повышению комфортабельности автомобилей, а также принятие законодательных требований по охране окружающей среды, приводят к необходимости уменьшения уровня внутреннего и внешнего шумов.

Ожидаемые к введению законодательные требования в отношении уровня внешнего шума касаются, в первую очередь, уменьшения шума двигателя благодаря его лучшей шумоизоляции. Побочным эффектом, сопутствующим этому, будет уменьшение уровня внутреннего шума от двигателя и, как следствие, внутренний шум, создаваемый шинами и обтекающим потоком воздуха будет проявляться сильнее.

При оценке уровня аэродинамического шума автомобилей различают два показателя – спектр частот шума ветра и упомянутый ранее уровень звукового давления, т.е. громкость. Говоря о комфортабельности автомобиля, стремятся получить так называемый "равномерный" шум. Под "равномерным" в данном случае понимается такой шум ветра,

частотная полоса которого по возможности не зависит от скорости движения, а уровень общего шума с увеличением скорости движения нарастает монотонно и не имеет пиковых значений частот.

Замеряемый в салоне уровень шума зависит не только от мощности источника шума, но и от звукопроводности и резонансной характеристики автомобиля. Можно вспомнить, например, о шумоизоляционных прокладках или шумопоглощающих кожухах, которые нашли применение в современных автомобилях серийного производства и которые положительно влияют на звукопроводные свойства кузова. Шумоизоляция такого типа, однако, наталкивается на существенные трудности, когда речь идет о снижении аэродинамического шума. Это связано с тем, что между местами возникновения шума ветра и салоном конструктивно едва ли возможно установить шумоизоляционные прокладки или облицовки. Поэтому, говоря о снижении аэродинамического шума, необходимо основные усилия направить на то, чтобы уменьшить мощность источника шума за счет оптимизации поверхностей в местах его возникновения.

6.5.2. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИКИ ОБТЕКАНИЯ

Формы потока, представленные на рис. 4.3 и 4.4 и более подробно рассмотренные в п. 6.2.1, различаются в отношении их механизма возбуждения шума, как показали Стэплфорд и Кэрр [6.11] с помощью простой модели – прямоугольного параллелепипеда. Следует рассмотреть следующие формы потока: прилегающий поток; близкая к двухмерному "раковина отрыва"; повторно прилегающий поток; трехмерный вихревой отрыв. На рис. 6.19 (по Стэплфорду и Кэрру [6.11]) показаны названные четыре формы потока для параллелепипеда. Число Рейнольдса для потока по длине параллелепипеда в процессе измерений составляло $Re_l = 9{,}2 \cdot 10^5$. Прилегающий по всей длине поток может быть обеспечен за счет радиуса скругления в точке контура А. Из-за наличия острой кромки между точками А и Б возникает "раковина отрыва" с последующим повторным прилеганием потока. Четвертая из рассматриваемых здесь форм потока может иметь место при кососимметричном обтекании тела, кромки которого не закруглены. Спектры обтекания параллелепипеда потоком воздуха показаны на рис. 6.20 – 6.22 (тоже взято из [6.11]). Внутри "раковины отрыва"можно вы-



Рис. 6.19. Формы потока, полученные при обтекании параллелепипеда для измерения шума [6.11]

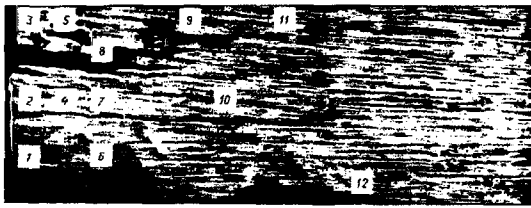


Рис. 6.20. Спектр обтекания потоком, прилегающим по всей длине (передняя кромка скруглена, см. рис. 6.19) [6.11]

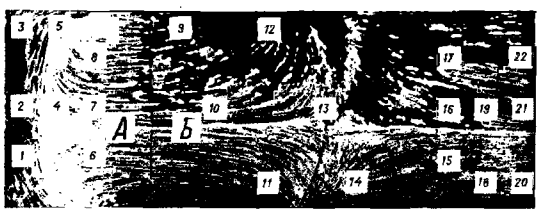


Рис. 6.21. Спектр обтекания при наличии двухмерной "раковины отрыва" и повторного прилегания потока (см. рис. 6.19) [6.11]

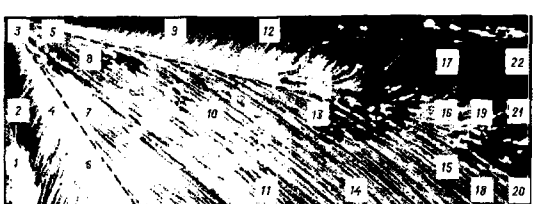


Рис. 6.22. Спектр обтекания параллелепипеда потоком, направленным под углом 30° к его продольной оси; образуются два продольных вихря (см. рис. 6.19) [6.11]

делить две области: область А с перетеканием потока вбок и область Б с выраженным обратным потоком. *Измерения уровня шума производились* с помощью микрофонов.

В табл. 6.1 для каждой формы потока приведено определенное максимальное значение звукового давления и диапазон частот, в котором

6.1. Максимальные уровни звукового давления и соответствующие им диапазоны частот для различных форм потока [6.11].

Форма потока	Максимальный уровень звукового давления L_{max}, дБ (А)	Диапазон частот при L_{max}, Гц
Прилегающий поток	111	800 – 1200
"Раковина отрыва", область А	108	400 – 500
"Раковина отрыва", область Б	115	200 – 500
Повторно прилегающий поток	113	300 – 600
Вихрь	130	500 – 800

этот уровень был измерен. Максимальные уровни, измеренные в диапазоне частот от 500 до 1500 Гц, показаны в форме линий постоянного звукового давления на рис. 6.23 (по [6.11]). По результатам проведенных замеров особенно "шумными" показали себя области оторвавшегося потока, а именно: область обратного потока в "раковине отрыва" и трехмерный вихревой отрыв. Эти две формы потока охватывают очень большой диапазон частот, в рассматриваемом случае примерно от 200 до 800 Гц.

Приведенные в табл. 6.1 данные измерений можно расценивать как ориентировочные значения, их нельзя считать абсолютными. Для автомобиля в натуральную величину, как показали измерения, уровень возбуждаемого звукового давления в области отрыва позади стойки ветрового стекла может быть более чем на 30дБ(А) выше, чем в центре крыши, т.е. в области прилегающего потока. Поэтому специалисты по акустике заинтересованы в том, чтобы по возможности предотвратить отрыв.

На рис. 6.24 представлены результаты измерений уровня шума, проведенных Ватанабе и другими [6.5], в месте расположения "раковины отрыва", образующейся при обтекании прямоугольной ступени. Частота, при которой проводились измерения

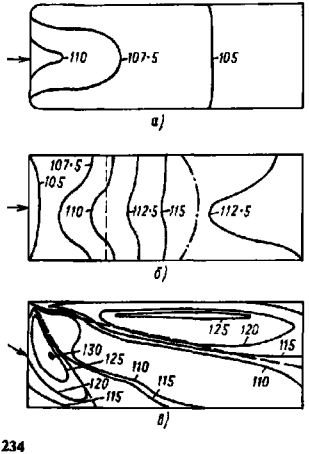


Рис. 6.23. Уровни равного звукового давления в полосе частот от 500 до 1500 Гц [6.11]:
а – прилегающий поток; *б* – двухмерный отрыв с повторным прилеганием потока; *в* – трехмерный отрыв

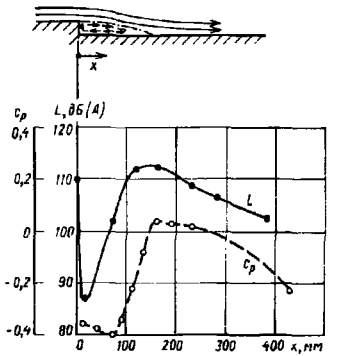


Рис. 6.24. Результаты измерения статического давления и уровня звукового давления позади ступени, обтекаемой потоком воздуха [6.5]; высота ступени h, число Рейнольдса $Re_h = 5 \cdot 10^4$

уровня звукового давления, составляла 2 кГц. Измерения подтвердили правильность показанного на рис. 6.23,*а* и 6.23,*б*. В почти что двухмерной (квазидвухмерной) "раковине отрыва" имеет место максимальное значение уровня звукового давления в области, соответствующей началу повторного прилегания потока. Далее, по мере удаления от этой точки уровень шума уменьшается.

Ниже следует остановиться на двух исключительно отрицательных явлениях, присущих только автомобилям. Это так называемое "громыхание" и неприлегание дверей к уплотнителям. "Громыхание" возникает при открытых боковых стеклах или открытом люке крыши. При этом столб воздуха внутри автомобиля возбуждается внешним потоком, салон становится резонатором. Согласно Аспиналлу [6.14] в случае открытого бокового стекла существуют две возможные формы "громыхания". Первая возникает преимущественно при малых скоростях движения (примерно до 80 км/ч) с наветренной стороны. Звуковое давление имеет периодический характер. Вторая форма возникает с подветренной стороны при более высоких скоростях движения. Звуковое давление имеет случайный характер. При симметрично набегающем потоке имеет место периодический характер изменения звукового давления. Для обеих низкочастотных форм "громыхания" (частоты расположены в диапазоне до 60 Гц) были разработаны мероприятия по их уменьшению.

В случае периодического "громыхания" хорошо показали себя отражатели на передней стороне проема окна. Такие козырьки предотвращают явления грохота на задней кромке оконного проема и однозначно определяют положение точки повторного прилегания потока. На автомобилях при реализации выполненных таким образом козырьков можно получить снижение уровня местного звукового давления со 120 дБ(А) до 90 дБ(А). Однако такой способ управления потоком в районе бокового стекла очень трудно осуществить с учетом автомобильного дизайна. И напротив, для крыш со сдвижным люком нашел применение механически выдвигаемый отражатель.

Вторая форма "громыхания" может быть ослаблена благодаря сильному наклону ветрового стекла. В этом случае изменяется распределение

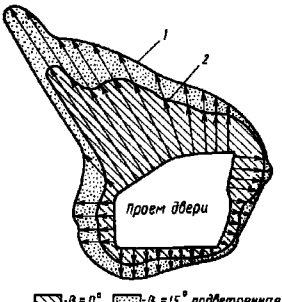


Рис. 6.25. Распределение статического давления в проеме двери легкового автомобиля:
1 – кососимметричное обтекание;
2 – симметричное обтекание

потока таким образом, что объемный поток воздуха, перетекающий на боковину через стойку ветрового стекла, уменьшается. В результате этого в районе проема окна имеют место меньшие скорости потока.

Ни для геометрии и расположения отражателей, ни для наклона ветрового стекла нельзя заранее задать функциональную связь с уровнем звукового давления и соответствующим спектром частот. Для различных автомобилей оптимальными будут различные формы, размеры и расположение отражателей. В процессе экспериментальных работ в аэродинамической трубе для каждого автомобиля следует проводить индивидуальную оптимизацию.

Давно известно, что шум из-за плохого уплотнения проемов дверей вызывает у сидящих в автомобиле людей крайне неприятные ощущения. В качестве причин плохого уплотнения стыков дверей можно назвать плохое качество изготовления деталей и сборки автомобиля, большую силу разрежения с наружной стороны двери (см. п. 6.3), которая может вызвать местное неприлегание двери к уплотнителю в районе стекла. На рис. 6.25 показано полученное путем измерения распределение статического давления по проему передней двери легкового автомобиля. На рисунке хорошо видна область существенного разрежения. Измеренные в этом месте значения c_p (прежде всего с подветренной стороны) относятся к самым низким, если рассматривать автомобиль в целом. Данные подобных измерений для автомобиля "Фольксваген 411" были опубликованы Гухо и Янссеном [6.16]; согласно этим данным были подобраны уплотнители дверей и разработан метод проверки на герметичность.

Плохое прилегание двери к уплотнителю является отрицательным по двум причинам: ухудшается изоляция салона от проникновения сильного шума, возникающего из-за вихря в районе стойки ветрового стекла, неплотный стык является шумовым мостом; из-за сильного перепада давлений возникает высокочастотный сопловидный поток из салона через щель, образуемую в результате неприлегания двери к уплотнителю, дверной стык становится дополнительным источником шума. Обеспечение хорошего уплотнения стыков дверей при любых режимах движения может стать потенциалом уменьшения аэродинамического шума.

6.6. ОБТЕКАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

6.6.1. ОЧИСТИТЕЛЬ ВЕТРОВОГО СТЕКЛА

При решении вопросов обтекания очистителя ветрового стекла следует обратить внимание на то, чтобы ни при каких обстоятельствах щетки стеклоочистителя не отрывались от поверхности стекла.

При движении автомобиля из-за наличия скорости потока вдоль поверхности стекла возникает подъемная сила, действующая на щетки стеклоочистителя и направленная перпендикулярно к поверхности стекла. Она зависит от многих факторов и постоянно изменяется в процессе работы стеклоочистителя. Единственным стационарно влияющим фактором является геометрия рычага стеклоочистителя. Все остальные факторы, влияющие на подъемную силу, имеют нестационарный характер, как, например, скорость движения и угол скоса набегающего на автомобиль потока. Вращательное движение рычагов стеклоочистителя, кроме того, постоянно изменяет величину и направление вектора скорости результирующего потока, набегающего на стеклоочиститель, а значит, и величину подъемной силы. Составляющая скорости потока, увеличивающая подъемную силу, по мере приближения щеток к горизонтальному крайнему положению становится больше, т.е. вблизи нижней мертвой точки рычаги стеклоочистителя подвергаются наибольшей опасности быть оторванными от поверхности стекла.

На рис. 6.26 приведены результаты исследования силового взаи-

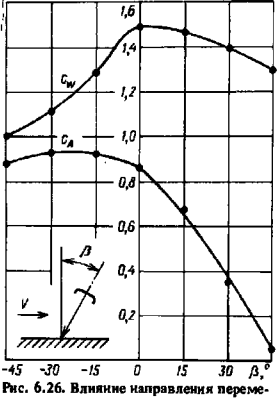


Рис. 6.26. Влияние направления перемещения щетки стеклоочистителя на силу сопротивления воздуха и подъемную силу, действующие на стеклоочиститель [6.15]

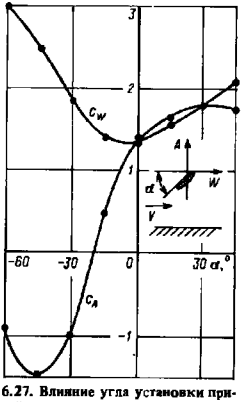


Рис. 6.27. Влияние угла установки прижимной пластины на силу сопротивления воздуха и подъемную силу, действующие на стеклоочиститель [6.15]

модействия щетки с набегающим потоком воздуха при различных углах наклона резиноленты (по Барту [6.15]). В зависимости от направления движения щетки угол β положительный или отрицательный. При движении вниз ($\beta < 0°$) явно видна большая подъемная сила по сравнению с подъемной силой при движении стеклоочистителя вверх ($\beta > 0°$). При $\beta < 0°$ значение угла наклона резиноленты почти не влияет на c_A.

Максимальная подъемная сила имеет место при движении щетки вниз незадолго до нижней мертвой точки. Для уменьшения подъемной силы используются маленькие прижимные пластины, которые создают дополнительное прижимающее усилие.

На рис. 6.27 (также по Барту [6.15]) показано влияние угла установки такой пластины на коэффициенты c_A и c_W. Здесь рассматривается критический случай, когда поток перпендикулярен к оси щетки стеклоочистителя. Угол установки $\alpha = -45°$ с точки зрения обеспечения минимального значения подъемной силы, действующей на стеклоочиститель, является оптимальным. Длина, ширина и профиль такой пластины определяются экспериментально в процессе доводочных работ.

6.6.2. ТОРМОЗА

Важным моментом оптимизации автомобиля с точки зрения механики его обтекания является обеспечение удовлетворительного охлаждения тормозов. На рис. 6.28 приведены некоторые данные испытаний, проведенных Гухо [6.1] с целью улучшения охлаждения дисковых тормозов. За счет правильного расположения отверстий для под-

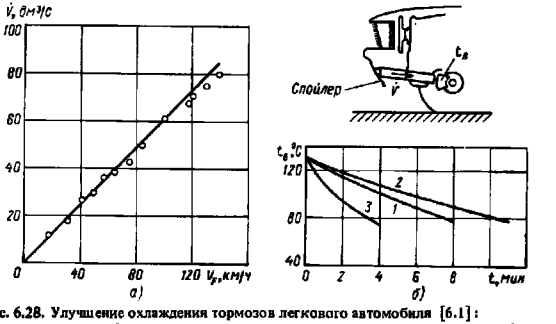


Рис. 6.28. Улучшение охлаждения тормозов легкового автомобиля [6.1]:
а – зависимость объемного расхода воздуха от скорости движения автомобиля; *б* – влияние на температуру тормоза конструктивных решений ($V_F = 80$ км/ч); *1* – исходное состояние; *2* – установлен оптимизированный в отношении коэффициента c_W спойлер; *3* – в спойлере выполнены отверстия и проложен воздуховод для подачи к тормозу охлаждающего воздуха

вода воздуха к тормозам необходимо обеспечить по возможности большее поступление воздуха к дисковым тормозам для их охлаждения. На левом графике показана зависимость объемного расхода воздуха от скорости движения. Справа на графике можно увидеть, как подача охлаждающего воздуха влияет на температуру дискового тормоза. Первоначально в исходном состоянии автомобиль был оснащен спойлером передка, на графике кривая зависимости температуры суппорта дискового тормоза от времени для этого случая обозначена цифрой "1". Для уменьшения аэродинамического сопротивления этого автомобиля была проведена оптимизация геометрии этого спойлера. Однако это привело к ухудшению охлаждения тормозов (кривая *2*). Введение в спойлере отверстий и прокладка воздуховодов для подачи охлаждающего воздуха к тормозам позволили существенно повысить эффективность охлаждения тормозов (кривая *3*). При этом аэродинамическое сопротивление автомобиля осталось неизменным.

6.7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показано в п.6, говоря о механике обтекания автомобиля, нельзя ограничиваться рассмотрением только ее влияния на динамику автомобиля. Имеется много проблем, связанных с безопасностью, функционированием и комфортабельностью автомобиля, которые должны решаться с привлечением механики обтекания. Решение по рассмотренным в п. 6 вопросам должно приниматься индивидуально для каждого автомобиля. При этом основной упор делается на *эксперимент*, так как на рассмотренные выше процессы обтекания накладывает отпечаток множество геометрических и аэродинамических параметров. Теоретические методы, применение которых в автомобильной аэродинамике уже началось (см. пп. 1.3.3 и 4.7.3), в будущем могут помочь целенаправленно проводить экспериментальные работы.

6.8. ОБОЗНАЧЕНИЯ

L – *длина автомобиля*, рис. 6.8;
L_S – сила, действующая на боковое стекло, рис. 6.11;
L, L_{max} – уровень звукового давления, табл. 6.1;
Re – число Рейнольдса;
V_F – скорость движения автомобиля;
V_∞ – скорость невозмущенного потока;
V – объемный расход, рис. 6.28;
c_A – коэффициент подъемной силы стеклоочистителя;
c_W – коэффициент аэродинамического сопротивления стеклоочистителя;
c_p – коэффициент давления, уравнение (2.8);
d_S – вес грязи, приходящейся на единицу площади, рис. 6.16;
h – высота ступени, рис. 6.24;
t – время с момента начала испытания, рис. 6.28;
t_B – температура тормоза, рис. 6.28;
V_V, V_R, V_H – компоненты скорости, рис. 6.18;
X, Y, Z – оси в прямоугольной системе координат;
α – угол установки прижимной пластины, рис. 6.27;
β – угол скоса потока;
β – угол наклона резинодержателя щетки стеклоочистителя, рис. 6.26.

7. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АЭРОДИНАМИКИ СПОРТИВНЫХ И ГОНОЧНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Гельмут Флегль, Райнхард Лехнер

7.1. ТРЕБОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ И ПУТИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

7.1.1. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Как известно, сила сопротивления воздуха пропорциональна произведению коэффициента сопротивления воздуха на площадь поперечного сечения (см. уравнение (1.2)). Ограничения на уменьшение указанных факторов для серийных и гоночных автомобилей носят совершенно различный характер.

Площадь поперечного сечения для серийного автомобиля в основном определяется необходимостью получения желаемых размеров салона, в то время как для гоночного прежде всего существенное значение имеют колея и размеры шин. В данном случае возникает ситуация, в которой конструктор сталкивается с противоречивыми требованиями. Обеспечение по возможности большей вместимости серийного автомобиля и соответственно максимально высокой предельной скорости движения на повороте для гоночного автомобиля так же важны, как и получение малого сопротивления воздуха. Для спортивных автомобилей и в особенности для гоночных, кроме того, возникает необходимость отыскания возможного компромисса между силой сопротивления воздуха и подъемной силой.

Коэффициент сопротивления воздуха в основном определяется формой автомобиля. Некоторые элементы формы, наиболее сильно влияющие на коэффициент c_W, были названы Флеглем [7.1].

Сужающийся в продольном сечении передок обеспечивает малое значение коэффициента сопротивления воздуха. Однако не достаточно чтобы верхняя и нижняя поверхности передка сходились равномерно т.е. чтобы контур передка в среднем продольном сечении был симметричным (рис. 7.1) поскольку такая форма способствует появлению аэродинамической подъемной силы. Плавное постепенное сужение просвета между нижней поверхностью передка и основанием приводит к возникновению зоны повышенного давления, что сопровождается возникновением подъемной силы. Для предотвращения появления подъемной силы, а зачастую, и для создания силы, прижимающей автомобиль к поверхности дороги, передок следует сужать с одновременным наклоном вниз (см. также рис. 4.34).

Приведенные на рис. 7.1 численные значения аэродинамических коэффициентов были получены при измерениях для модели в масштабе 1:5, имеющей ровное днище. Из приведенных значений хорошо видно уменьшение подъемной силы с увеличением вытягивания передка вниз. Минимальное аэродинамическое сопротивление имеет место в случае, когда подъемная сила приблизительно равна нулю (см. работу Морелли [7.2]). На реальных автомобилях очень сложно получить ровное дни-

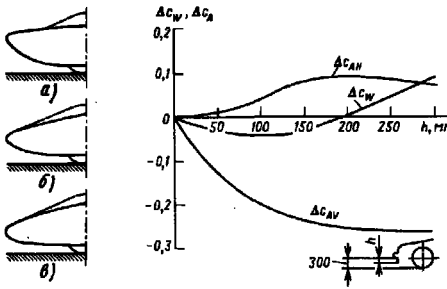


Рис. 7.1. Сравнение различных форм передка при неизменных формах других элементов кузова:
а – $c_W = 0{,}240$; $c_{aV} = +0{,}198$; *б* – $c_W = 0{,}223$; $c_{aV} = +0{,}022$; *в* – $c_W = 0{,}224$; $c_{aV} = -0{,}094$

Рис. 7.2. Влияние высоты переднего спойлера на коэффициенты сопротивления воздуха и подъемной силы [7.3]

ще, поскольку детали подвесок и привода едва ли возможно закрыть облицовками, а к некоторым другим узлам, например, к глушителю, для охлаждения требуется доступ воздуха. Днище с выступами и неровностями оказывает воздуху сильное сопротивление. Поэтому лучше хотя бы часть воздуха направить по бокам автомобиля. Относительно просто это сделать с помощью спойлера передка; числовые данные по этому вопросу приведены, например, Шенкелем в [7.3]. Как показано на рис. 7.2, коэффициент аэродинамического сопротивления можно уменьшить до определенного значения и, кроме того, за счет разрежения, образующегося за спойлером, получить силу, прижимающую автомобиль к дороге.

На рис. 7.3 приведены результаты оценки влияния контуров задней части автомобиля, имеющих разную площадь крайнего поперечного сечения. Уменьшение площади поперечного сечения на схеме *б* осуществлялось за счет увеличения наклона верхней поверхности задка. Дальнейшее уменьшение площади (схема *в*) производилось одновременно увеличением наклона верхней поверхности задка и увеличением заднего свеса, так как дальнейшее увеличение наклона в этом случае сопровождается отрывом потока и ростом коэффициента аэродинамического сопротивления, что было доказано Гухо [7.4]. После достижения предельного с точки зрения возникновения отрыва наклона уменьшение площади крайнего сечения задка автомобиля возможно только за счет его удлинения. При этом следует обратить внимание, что с увеличением наклона верхней поверхности задка возрастает подъемная сила, действующая на заднюю ось.

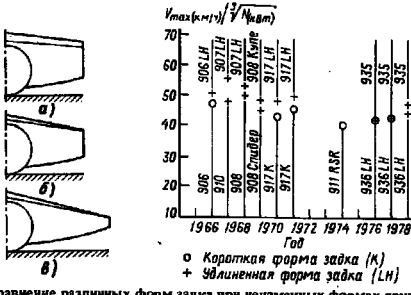


Рис. 7.3. Сравнение различных форм задка при неизменных формах других элементов кузова:
а – $c_W = 0{,}224$; $c_{AH} = -0{,}100$; *б* – $c_W = 0{,}205$; $c_{AH} = 0{,}037$; *в* – $c_W = 0{,}193$; $c_{AH} = 0{,}056$

Рис. 7.4. Изменение отношения максимальной скорости в гонках Ле Ман к максимальной мощности двигателя (по годам)

Следовательно, в отношении величины площади крайнего сечения задка автомобиля необходимо отыскать компромисс между силой сопротивления воздуха и подъемной силой, или же создавать прижимающую автомобиль к дороге силу (отрицательную подъемную силу) с помощью таких вспомогательных средств, как спойлер или антикрыло, которые, однако, в общем случае отрицательно влияют на аэродинамическое сопротивление.

На рис. 7.4 по результатам гонок "Ле Ман" за период с 1966 по 1978 г. показано, каким образом формообразование кузова гоночных автомобилей влияет на значение максимальной скорости. Приведенное значение $V_{max}/\sqrt[3]{N}_{max}$ однозначно определяется в зависимости от фактора обтекаемости автомобиля $c_W F$. Высокие значения величины $V_{max}/\sqrt[3]{N}_{max}$ означают хорошие значения произведения $c_W F$, и наоборот. Хорошо видно, что удлиненный задок или же исполнение "купе" предпочтительнее.

Относительно малое значение $V_{max}/\sqrt[3]{N}_{max}$ автомобиля "Порше тип 911 *RSR*" позволяет сделать вывод о том, что в данном случае речь идет об автомобиле, по своим качествам очень близком к автомобилям серийного производства.

Причина того, что значения относительной максимальной скорости с 1967 г. имеют тенденцию к уменьшению, заключается в обусловленных конструкцией больших площадях торцовой поверхности задка автомобиля. С другой стороны, выяснилось, что мероприятия, способствующие возрастанию прижимающей аэродинамической силы, увеличивают время прохождения круга, в результате чего уменьшаются значения средних максимальных скоростей.

7.1.2. АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ПРИЖИМАЮЩАЯ (ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ПОДЪЕМНАЯ) СИЛА

Увеличение мощностей двигателей, устанавливаемых на автомобили, и соотвествующее увеличение скоростей движения приводят к необходимости уделять особое внимание созданию прижимающей силы, так как это связано с устойчивостью движения.

Как было указано выше, отклонение передка вниз положительно отражается на перераспределении давлений, действующих на нижнюю и верхнюю поверхности передка в смысле возникновения и роста прижимающей аэродинамической силы. Однако если верхняя поверхность передка имеет сильную выпуклость, то получаемый эффект снижается.

Правильное решение с учетом указанного обстоятельства показано на рис. 7.5. Передок выполнен очень сильно отклоненным вниз, с вогнутым подъемом верхней поверхности от передней кромки. В зоне неизбежного выпуклого перехода к плоскому капоту можно расположить отверстие для подачи воздуха к вентилятору. Благодаря этому можно несколько уменьшить возникающее в этой зоне разрежение.

Спойлер передка, аналогичный тому, который сегодня можно увидеть на многих серийных автомобилях, показан на рис. 7.6 (по данным Брэсса и других [7.5]). Влияние спойлера на подъемную силу, приходящуюся на переднюю ось автомобиля, приведено на рис. 7.7.

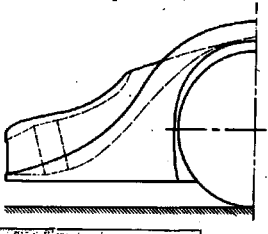
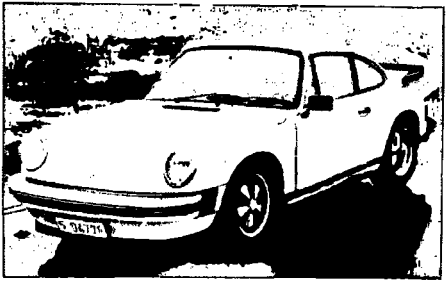


Рис. 7.5. Форма передка автомобиля "Порше 917/30", обеспечивающая образование прижимающей силы

Рис. 7.6. Автомобиль "Порше 911 Каррера" со спойлером передка [7.5]



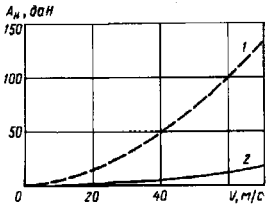
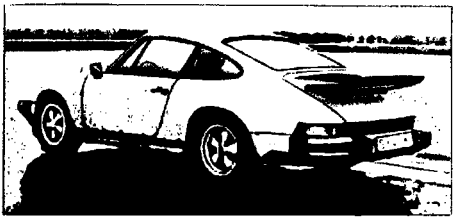


Рис. 7.7. Подъемная сила, приходящаяся на переднюю ось автомобиля "Порше 911 Каррера" при симметричном обтекании [7.5]:
1 – без спойлера; 2 – со спойлером

Рис. 7.8. Автомобиль "Порше 911 Каррера" со спойлером задка [7.5]



Подъемная сила, приходящаяся на заднюю ось, уменьшается тем больше (и даже может стать прижимающей), чем меньше наклон верхней линии контура задка или соответственно чем выше приподнимается верхняя кромка задка автомобиля (см. рис. 7.3). Благодаря спойлеру задка (см. рис. 7.8) можно так сформировать поток в задней части автомобиля, что над верхней поверхностью спойлера будет иметь место зона повышенного давления, т.е. подъемная сила уменьшается. Насколько существенно можно уменьшить подъемную силу, приходящуюся на заднюю ось, с помощью спойлера задка показано на рис. 7.9 (по [7.5]).

В качестве средства, обеспечивающего получение большой прижимающей силы, можно назвать отсасывание пограничного слоя или вдувание воздуха в пограничный слой. На рис. 7.10 (по Шлихтингу [7.6]) можно увидеть, что за счет вдувания воздуха в пограничный слой над закрылком можно весьма заметно изменить

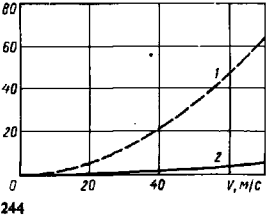
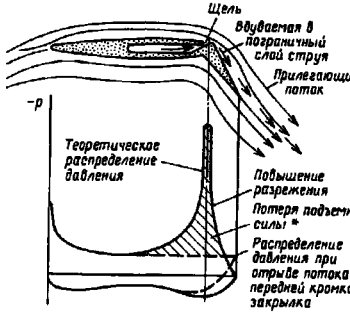


Рис. 7.9. Подъемная сила, приходящаяся на заднюю ось автомобиля "Порше 911 Каррера" при симметричном обтекании [7.5]:
1 – без спойлера; 2 – со спойлером



* В данном случае происходит возрастание подъемной силы. Говоря о потере подъемной силы, авторы, видимо, приводят рассуждения с учетом того, что на автомобиль такого типа крыло устанавливается в перевернутом виде (прим. редактора)

Рис. 7.10. Крыло с вдуванием воздуха в пограничный слой над закрылком [7.6]

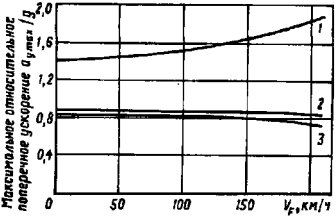


Рис. 7.11. Влияние аэродинамических вспомогательных устройств (спойлер, антикрыло) на максимальное поперечное ускорение [7.7]:
1 – гоночные спортивные автомобили; *2* – серийные спортивные автомобили со спойлером; *3* – серийные спортивные автомобили без спойлера

подъемную силу, действующую на крыло. Но из-за высоких конструктивных затрат вспомогательные средства такого вида еще не нашли применения в гоночных автомобилях.

Флегль [7.7] показал, что максимальные допустимые силы бокового увода зависят от действующей на автомобиль подъемной силы и ее знака. Эта взаимосвязь представлена в виде зависимости максимального поперечного ускорения от скорости движения для различных автомобилей (рис. 7.11).

7.1.3. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ СИЛОЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА И ПРИЖИМАЮЩЕЙ (ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПОДЪЕМНОЙ) СИЛОЙ

Для формы кузова автомобиля, оптимизированного с точки зрения снижения аэродинамического сопротивления, дополнительную прижи-

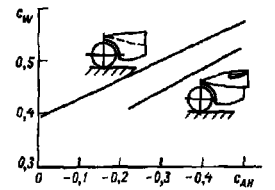


Рис. 7.12. Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления в зависимости от коэффициента подъемной силы, приходящейся на заднюю ось автомобиля при различных формах задка

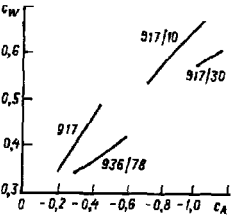


Рис. 7.13. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от коэффициента подъемной силы для различных автомобилей фирмы "Порше"

мающую силу можно получить, лишь пойдя на увеличение силы сопротивления воздуха. Однако, выбирая мероприятия для увеличения прижимающей силы, можно найти решение, приводящее к минимальному увеличению аэродинамического сопротивления. В качестве примера на рис. 7.12 для сравнения приведены поляры для форм задка с приподнимающейся верхней поверхностью и с плавно спускающейся, но имеющей антикрыло.

На рис. 7.13 приведены зависимости между подъемной силой и силой сопротивления воздуха (поляры) для различных типов автомобилей "Порше". В зависимости от мощности устанавливаемого на автомобиль двигателя и предусмотренной области применения удается найти приемлемый компромисс. Имея поляры автомобиля и зная его мощностные параметры, можно рассчитать оптимальные значения прижимаю-

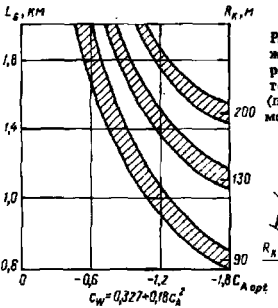
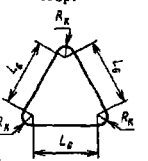


Рис. 7.14. Оптимальные значения прижимающей аэродинамической силы при различных значениях параметров, характеризующих трассу гонки [7.8] (по горизонтальной оси отложен параметр $C_{A\,opt}$)



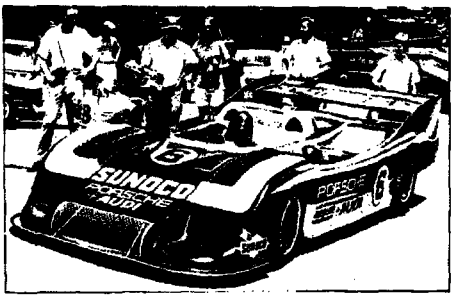


Рис. 7.15. Прототип для гонок Кан Ам ("Порше 917/30")

щей аэродинамической силы для любой определенной трассы гонок. Такого типа диаграммы приведены Поттхоффом [7.8].

На рис. 7.14 представлены результаты расчета Поттхоффа [7.8] для приведенной треугольной дистанции. Больший участок движения по прямой смещает оптимум к меньшим значениям прижимающей силы, и напротив, увеличение радиуса поворота, при тех же длинах прямолинейных участков, требует наличия прижимающей силы большей величины для уменьшения времени прохождения круга.

В общем случае автомобили, оснащенные более мощными двигателями, требуют соответственно более высоких коэффициентов прижимающей силы. Современные гоночные автомобили группы 6 с мощностью двигателя примерно 425 кВт (580 л.с.) для Нюрбургского кольца, имеющего множество поворотов, требуют увеличения на 80% прижимающего аэродинамического усилия по сравнению с гоночной трассой Ле Ман с относительно длинными прямолинейными участками. Прототипы для гонок Кан Ам, один из которых показан на рис. 7.15, с мощностью двигателя примерно 735 кВт (1000 л.с.) имеют коэффициент прижимающей (отрицательной подъемной) силы $c_A = -1{,}0 \div -1{,}1$. Прижимающая сила для такого автомобиля при скорости около 300 км/ч достигает значения, равного его собственному весу.

7.1.4. УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Поворачиваемость. Поворачиваемость автомобилей в первую очередь определяется предельными значениями сил бокового увода, приходящимися на переднюю и заднюю оси автомобиля, при которых поворот еще не сопровождается заносом. Как отмечалось в п. 7.1.2, максимальные силы бокового увода, а значит, и поворачиваемость, зависят от значения прижимающей аэродинамической силы.

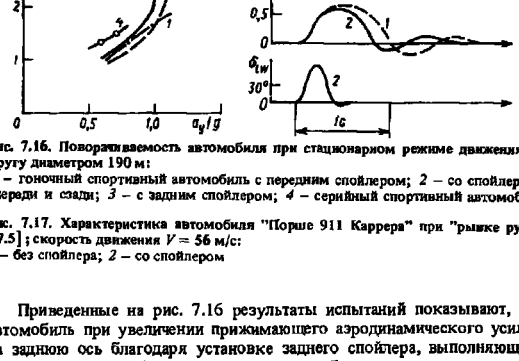


Рис. 7.16. Поворачиваемость автомобиля при стационарном режиме движения по кругу диаметром 190 м:
1 – гоночный спортивный автомобиль с передним спойлером; *2* – со спойлерами спереди и сзади; *3* – с задним спойлером; *4* – серийный спортивный автомобиль

Рис. 7.17. Характеристика автомобиля "Порше 911 Каррера" при "рывке руля" [7.5]; скорость движения $V = 56$ м/с:
1 – без спойлера; *2* – со спойлером

Приведенные на рис. 7.16 результаты испытаний показывают, что автомобиль при увеличении прижимающего аэродинамического усилия на заднюю ось благодаря установке заднего спойлера, выполняющего функции прижимной площадки, может приобрести недостаточную поворачиваемость (сильное увеличение угла поворота рулевого колеса при более высоких поперечных ускорениях не приводит к росту поперечных ускорений). При установке переднего спойлера, что приводит к увеличению прижимающего аэродинамического усилия на переднюю ось, у автомобиля возникает склонность к избыточной поворачиваемости. Следует отметить, что указанные испытания проводились при движении по кругу диаметром 190 м, т.е. при максимальной скорости всего лишь 120 км/ч, но и в этом случае можно было четко увидеть различия.

Поскольку обычно (как указывает Ромпе [7.9]) автомобили с приводом на задние колеса на скоростных поворотах склонны к избыточной поворачиваемости, то с помощью соответствующего аэродинамического формообразования можно изменить ездовые свойства автомобиля, создав относительно высокую прижимающую силу, приходящуюся на заднюю ось. За счет этого с ростом скорости движения на повороте (см. рис. 7.16) будет увеличиваться склонность к недостаточной поворачиваемости, водитель сможет легко управлять автомобилем. Как будет показано ниже, в рассмотренных случаях имеет значение также боковая аэродинамическая сила.

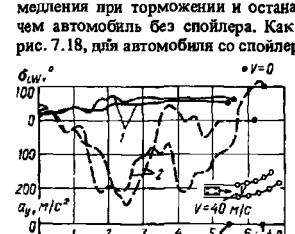
Неустановившийся режим движения (рис. 7.17). Создание прижимающей аэродинамической силы положительно отражается на уменьшении влияния боковой силы при неустановившихся режимах движения, таких, например, как при внезапных маневрах, движении по змейке и т.п. [7.5]. В качестве примера в [7.5] рассматривается маневр, весь-

ма характерный для неустановившегося режима движения автомобилей.

При высокой скорости движения автомобиля возбуждается синусообразное изменение угла поворота рулевого колеса, и фиксируется реакция автомобиля в форме поперечного ускорения. Как установили Бресс и другие [7.5] для автомобиля "Порше 911 Каррера" (см. рис. 7.6 – 7.9), автомобиль, имеющий большее значение коэффициента прижимающей силы, реагирует на отклонение рулевого колеса с меньшим смещением по фазе и отклоняется менее сильно.

Торможение на повороте. При торможении на повороте возникающая тормозная сила предъявляет повышенные требования к силовому замыканию между шинами и полотном дороги. Кроме того, процесс усложняется и рядом других явлений, связанных с динамикой движения, в особенности с перераспределением нагрузок на колеса. Такая ситуация, имеющая место при внезапном появлении на дороге препятствия, также заслуживает внимания.

На рис. 7.18 (по данным Бресса и других [7.5]) внизу представлены полученные значения замедлений при торможении в размеченном узком коридоре. Начальная скорость при въезде в коридор составляла примерно 145 км/ч. Испытания проводились на том же автомобиле, который представлен на рис. 7.6 – 7.9. Из приведенных результатов хорошо видно, что автомобиль со спойлером имеет гораздо большие значения замедления при торможении и останавливается примерно на 1 с раньше, чем автомобиль без спойлера. Как можно видеть на верхнем графике рис. 7.18, для автомобиля со спойлером требуются существенно меньшие



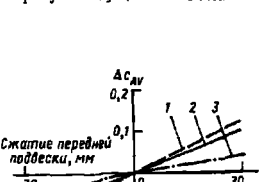


Рис. 7.18. Тормозные свойства автомобиля "Порше 911 Каррера" на повороте [7.5]:
1 – со спойлером; *2* – без спойлера

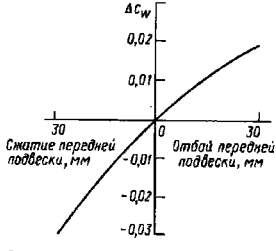
Рис. 7.19. Изменение коэффициента подъемной силы, приходящейся на переднюю ось, при изменении угла установки автомобиля относительно дороги (положение задней оси по высоте не изменяется):
1 – автомобиль "Мак Ларен" для гонок Кан Ам; *2* – автомобиль "Порше 917" с удлиненной формой задка выпуска 1971 г.; *3* – автомобиль "Порше 917/10" с крылообразным передком

углы поворота рулевого колеса, а значит, управлять таким автомобилем в процессе торможения на повороте легче.

Влияние угла установки автомобиля относительно дороги. При выполнении маневров движения, а также из-за существующих неровностей дороги (подъемы, холмы) изменяется угол установки кузова автомобиля относительно полотна дороги. А вместе с этим изменяются и аэродинамические свойства автомобиля (см. также пп. 4.4.2 и 4.5.2).

На рис. 7.19 представлено изменение коэффициента подъемной силы, приходящейся на переднюю ось, при ходах сжатия и отбоя подвески. При обычных формах передка наблюдается уменьшение прижимающей аэродинамической силы при отбое и увеличение ее при сжатии. Для стабилизации положения автомобиля по высоте следовало бы стремиться к обратной характеристике, которую можно получить, используя вспомогательные средства, создающие прижимающую силу, зависимую от хода колеса. Но внедрение таких мероприятий, естественно, связано с весомыми конструктивными затратами, а кроме того, предложенные недавно для гоночных автомобилей различных формул аэродинамические средства, регулируемые в процессе движения, не укладываются в требования по конструкции спортивных и гоночных автомобилей, допускаемых к соревнованиям.

Однозначно можно сказать, что для очень быстрых гоночных автомобилей ни в коем случае нельзя предусматривать в статическом положении подвески положительную подъемную силу, так как при некоторых обстоятельствах это может привести к фатальным последствиям: имели место случаи, когда гоночные автомобили отрывались от поверхности дороги и переворачивались назад. Отрицательно проявляют себя и увеличивающие прижимающую аэродинамическую силу



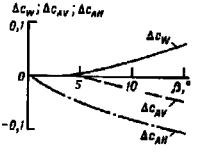


Рис. 7.20. Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления при изменении угла установки автомобиля относительно дороги (автомобиль "Порше 917" с удлиненной формой задка, положение задней оси по высоте не изменяется)

Рис. 7.21. Изменение коэффициентов аэродинамического сопротивления и подъемных сил, приходящихся на переднюю и заднюю оси автомобиля "Порше 936/78" при кососимметричном обтекании

вспомогательные средства, такие, как боковые спойлеры, так как они при соударении с "противником" легко повреждаются и становятся бесполезными.

Как видно из рис. 7.20, увеличение угла установки автомобиля при ходе отбоя передней подвески отрицательно влияет на коэффициент сопротивления воздуха.

Влияние скоса набегающего воздушного потока. Для создания боковых стабилизирующих сил необходимо наличие определенного угла бокового увода шин автомобиля. Серийные автомобили при движении на повороте имеют угол увода порядка 10 — 15°, а гоночные автомобили – 6 – 8°. Это же значение имеет и угол скоса потока, обтекающего автомобиль. Точно такое же влияние оказывает боковой ветер, приводящий к асимметрии обтекания.

Результаты замеров, приведенные на рис. 7.21, показывают, что при кососимметричном потоке следует считаться с довольно существенным уменьшением значения прижимающей силы. Следует стремиться к тому, чтобы такое уменьшение коэффициента прижимающей аэродинамической силы на передней оси происходило интенсивнее, чем падение коэффициента прижимающей аэродинамической силы на задней оси, так как за счет этого можно противодействовать усилению склонности автомобиля к заносу при движении на поворотах с большой скоростью.

Кососимметричный набегающий поток, конечно, вызывает появление боковых аэродинамических сил, действующих на переднюю и заднюю оси автомобиля. Результирующая этих сил по возможности должна быть приложена позади центра тяжести автомобиля, чтобы обеспечить устойчивый режим движения, в особенности при боковом ветре. Как правило, необходимость в смещении назад точки приложения результирующей аэродинамической боковой силы за центр тяжести возникает для автомобилей с малым значением коэффициента c_W и реализуется чаще всего с помощью дополнительных боковых килей в области задка. При этом увеличение абсолютного значения боковой силы за счет такого мероприятия может отрицательно сказываться при боковом ветре (см. пп. 4.7.3 и 5).

На рис. 7.22 показано изменение боковых сил, действующих на пе-



Рис. 7.22. Изменение боковых сил на передней и задней осях автомобиля "Порше 934/76" при кососимметричном обтекании: боковая аэродинамическая сила на передней (*1*) и задней (*2*) осях; результирующая боковая сила с учетом снижения предельного значения сил бокового увода колес вследствие уменьшения прижимающей аэродинамической силы на передней (*3*) и задней (*4*) осях; скорость движения $V = 200$ км/ч

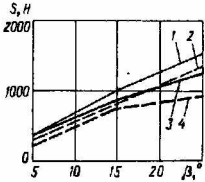


Рис. 7.23. Изменение боковых сил на передней и задней осях автомобиля "Порше 935/76" при кососимметричном обтекании: боковая аэродинамическая сила на передней (*1*) и задней (*2*) осях; результирующая боковая сила с учетом снижения предельного значения сил бокового увода колес вследствие уменьшения прижимающей аэродинамической силы на передней (*3*) и задней (*4*) осях; скорость движения V = = 200 км/ч

реднюю и заднюю оси автомобиля "Порше 934" (выпуска 1976 г.), при скорости движения 200 км/ч. Речь идет об автомобиле, который относительно мало отличается от серийного спортивного автомобиля типа "Порше 911".

При движении на повороте боковая аэродинамическая сила действует в направлении от центра поворота и способствует увеличению бокового увода колес; однако из-за уменьшения прижимающей аэродинамической силы (по сравнению со значением этой силы при симметричном обтекании) имеет место некоторое уменьшение предельного значения силы бокового увода колес. В соответствии с рис. 7.22 результирующая боковая сила с увеличением угла скоса потока для передней оси возрастает, а для задней остается примерно равной нулю. Такая характеристика противоречит ранее высказанному пожеланию об обеспечении возможности противодействия усилению склонности автомобиля к заносу при движении на повороте за счет аэродинамических сил.

На рис. 7.23 показано соотношение указанных выше сил для автомобиля "Порше 935" (год выпуска 1976). Автомобиль также выполнен на базе "Порше 911", но в соответствии с регламентом соревнований он претерпел более существенные изменения, в особенности аэродинамического характера. В результате полученная характеристика более близка к желаемой.

Движение в поле возмущенного потока за впереди идущим автомобилем. Во всех приведенных выше рассуждениях не принималось во внимание влияние возмущений из-за движущегося впереди автомобиля. Как известно, благодаря движению в поле потока за впереди идущим автомобилем можно получить довольно существенное увеличение скорости. Как выяснили при проведении исследований с моделями Ромберг и другие [7.10], уменьшение коэффициента сопротивления воздуха для впереди идущего автомобиля может составить максимум 30%, а для следующего за ним – до 37% (рис. 7.24).

Кроме того, было отмечено существенное изменение коэффициентов подъемных сил по осям обоих автомобилей. Полученные в результате замеров значения свидетельствуют о возрастании склонности автомобилей к заносу по сравнению с движением автомобилей поодиночке в невозмущенной среде.

expert22 для http://rutracker.org

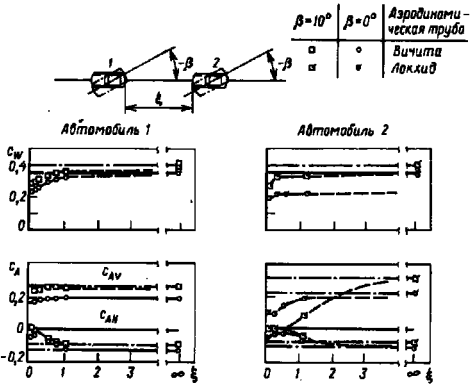


Рис. 7.24. Изменение коэффициентов аэродинамического сопротивления и подъемной силы для двух автомобилей, один из которых движется в возмущенном потоке другого [7.10]

В другом исследовании [7.11], посвященном изучению эффективности антикрыльев для автомобилей различных формул, было установлено, что в общем случае при движении в поле потока за впереди идущим автомобилем без бокового смещения относительно впереди идущего автомобиля изменения положительной подъемной силы, приходящейся на переднюю ось заднего автомобиля, не наблюдается, однако имеет место максимальное уменьшение этой силы при относительном смещении автомобилей вбок примерно на 0,42 от ширины автомобиля при одновременном уменьшении прижимающей аэродинамической силы на задних осях обоих автомобилей. Такой случай относительного смещения вбок часто встречается на практике, поэтому в указанной ситуации необходимо считаться со значительно возрастающей склонностью заднего автомобиля к заносу.

7.1.5. ВЕНТИЛЯЦИЯ, ОХЛАЖДЕНИЕ

Для охлаждения агрегатов и вентиляции салона необходимо организовать внутренний поток в автомобиле (см. пп. 6.2.2, 9.4.1, 10.4.1).

Поскольку сопротивление движению этого потока, как известно, отрицательно сказывается на общем аэродинамическом сопротивлении автомобиля (см. рис. 4.48), то наряду с обеспечением определенного расхода воздуха следует стремиться к получению минимального сопротивления движению внутреннего потока.

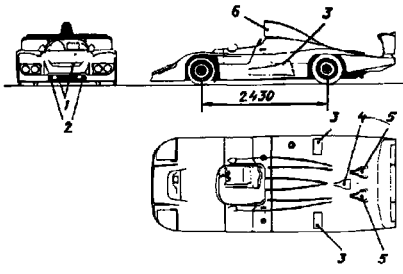


Рис. 7.25. Отверстия для забора и выпуска воздуха на автомобиле "Порше 936/78": *1* – охлаждение масляного радиатора; *2* – охлаждение тормозов; *3* – охлаждение водяного радиатора двигателя; *4* – охлаждение турбокомпрессора, работающего на выхлопных газах; *5* – забор воздуха, необходимого для работы двигателя; *6* – "коробка воздухопритока" для охлаждения двигателя, наддувочного воздуха и трансмиссионного масла

Расположение отверстий для забора и выпуска воздуха. На примере гоночного спортивного автомобиля "Порше 936/78" можно рассмотреть расположение и число отверстий, необходимых для забора и выпуска воздуха (рис. 7.25).

В передней части кузова располагаются отверстия для забора и выпуска воздуха, охлаждающего масляный радиатор двигателя *1* и тормоза *2*. Сбоку располагаются отверстия для забора и выпуска воздуха, поступающего для охлаждения водяного радиатора двигателя *3*. На поверхности задка размещены отверстия забора воздуха для охлаждения работающего на отработавших газах турбокомпрессора *4* и отверстия забора воздуха для подачи в камеры сгорания двигателя *5*. За местом водителя располагается так называемая коробка воздухопритока *6*, воздух из которой с помощью вентилятора двигателя подается для охлаждения цилиндров, наддувочного воздуха, подаваемого турбокомпрессором в камеры сгорания и в теплообменник охлаждения трансмиссионного масла. Благодаря удачному формообразованию коробки воздухопритока и облицовки дуги безопасности позади водителя удалось уменьшить значение коэффициента c_W на 18%, а фактора $c_W F$ на 11% по сравнению с предыдущей моделью, имеющей более ровную форму задка. Кроме того, на 100% было увеличено давление воздуха, подаваемого вентилятором и используемого для охлаждения наддувочного воздуха, подаваемого в камеры сгорания двигателя. Такие более благоприятные соотношения давления привели к уменьшению температуры цилиндров на 15°С, а температуры наддувочного воздуха на 17°С.

Формообразование воздуховодов для подачи охлаждающего воздуха. Большой расход воздуха можно обеспечить за счет использования большой разности давлений в местах забора и выпуска охлаждающего воздуха. Лучше всего (см. работу Ларрабе [7.12]) предусмотреть радиатор больших размеров и обеспечить возможность регулирования объемного расхода воздуха за счет изменения площади отверстий, через которые поступает воздух.

На практике такой подход едва ли возможен, так как чаще всего в распоряжении конструктора имеется очень мало места, и трудно получить оптимальные соотношения. Наиболее подходящим местом расположения радиатора с точки зрения эффективности его работы можно считать переднюю часть автомобиля, так как высокое избыточное давление в зоне точки полного торможения потока и пониженное давление в зоне над передней осью автомобиля обеспечивают большой перепад давления, а значит, обеспечивают большой расход воздуха (см. рис. 2.4).

Недостатком является малая конструктивная длина в направлении распространения потока, поскольку величина свеса ограничена. Из-за этого воздуховод подачи охлаждающего воздуха до и после радиатора может иметь относительно небольшое расширение, соответственно, сужение сечения с учетом выбора приемлемых углов вытяжки. На автомобилях серийного производства в связи с ограничением имеющегося в распоряжении конструктора пространства следует обратить особое внимание на оформление выхода воздуха, обдувающего радиатор. Охлаждающий воздух проще всего направить через моторный отсек вниз.

7.2. ПРОЧИЕ ТРЕБОВАНИЯ

7.2.1. ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ КАЧЕСТВА

Для серийного спортивного автóмобиля, как и для прочих автомобилей, в отношении аэродинамического формообразования границы установлены следующими ниже требованиями.

Минимальный угол переднего свеса (угол въезда) должен быть не менее 20°, поэтому спойлер передка нельзя слишком сильно опускать вниз. И кроме того, дорожный просвет перед передними колесами должен быть не менее 180 мм, так как бордюры (особенно в США) могут иметь именно такую высоту.

По соображениям пассивной безопасности детали, отстоящие от наружной поверхности автомобиля, должны иметь радиусы скругления не менее установленных значений, даже если они выполнены из эластичного материала. Все чаще и чаще навесные детали, устанавливаемые для аэродинамического воздействия на автомобиль, изготовляются из интегральной пены. Это дает несколько большую свободу при их оформлении.

С противоречивыми требованиями приходится сталкиваться конструктору при выборе положения и формы ветрового стекла. Из-за яв-

ления преломления света и нагрева салона автомобиля солнечными лучами его нельзя установить под любым углом и соответственно выполнить с любой выпуклостью. Изготовляемые в настоящее время серийно спортивные автомобили имеют минимальный угол наклона ветрового стекла примерно 30° относительно горизонтали.

Перечень таких противоречивых требований можно продолжить и дальше.

7.2.2. СПОРТИВНЫЙ РЕГЛАМЕНТ

Весьма существенные ограничения в использовании аэродинамических мероприятий в автомобильных гонках накладываются спортивным регламентом. При этом условия и ограничения носят различный характер. Установлена классификация автомобилей по группам. На близких к серийным автомобилях возможны относительно небольшие изменения; выпускаемый серийно гоночный автомобиль должен безироваться исключительно на обычном серийном автомобиле, но допускается больший объем изменений, как, например, можно видеть на рис. 7.26. Кроме того, допускаются двухместные гоночные спортивные автомобили с закрытыми колесами, которые в качестве опытных образцов (прототипов) изготовляются специально для использования на гоночных трассах (рис. 7.27) и автомобили, соответствующие определенным гоночным формулам с отстоящими от кузова колесами (рис. 7.28). На этих автомобилях аэродинамика имеет исключительно важное значение для уменьшения времени прохождения круга при хороших ездовых свойствах.

Принципиально согласно регламенту для всех групп автомобилей можно использовать аэродинамические вспомогательные средства, жестко связанные с кузовом, которые не могут изменять свое положение относительно автомобиля в процессе движения. Исключение составляют эластичные фартуки или щетки между кузовом автомобиля и полотном дороги, которые препятствуют выходу воздуха вбок, т.е. они должны уменьшать индуктивную составляющую аэродинамического сопротивления (принцип "автомобиля с крыльями", см. п. 7.3.2).

Подвижные закрылки и спойлеры, такие, как, например, использовались на автомобилях "Порше" в конце 60-х годов (описаны Мецгером в [7.13], см. рис. 7.29), к сожалению, запрещены, хотя они и являются логическим и правильным решением, поскольку на обусловленные *динамикой движения* требования отвечают *динамически* действующими мероприятиями.

Точно так же были запрещены опоры антикрыльев, которые устанавливались непосредственно на ступицы колес. За счет этого была ликвидирована проблема изменений положения колес, возникающих при сжатии подвески автомобиля вследствие действия прижимающей аэродинамической силы.

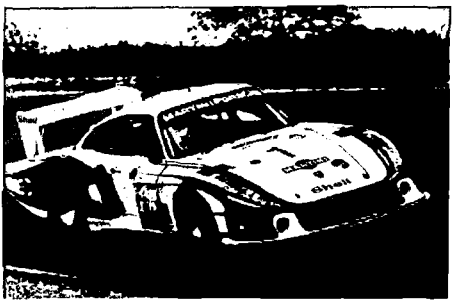


Рис. 7.26. Серийно выпускаемый спортивный автомобиль группы 5 "Порше 935/78"

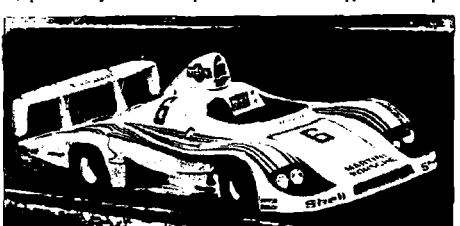


Рис. 7.27. Гоночный спортивный автомобиль группы 6 "Порше 936/78"

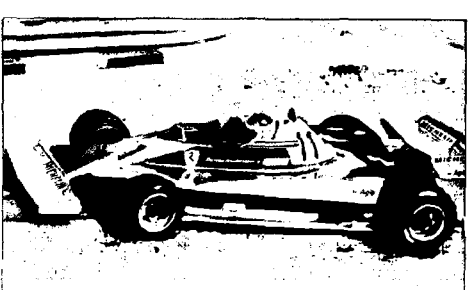


Рис. 7.28. Автомобиль формулы 1 "Феррари", 1978 г.

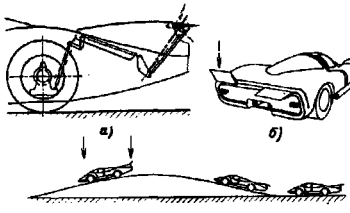


Рис. 7.29. Регулировани прижимающей аэродинами ческой силы с помощь подвижного закрылк [7.13]:
а – управление закрылком задка; *б* – положение за крылка при повороте вле во; *в* – принцип действи закрылков при переезд через холм

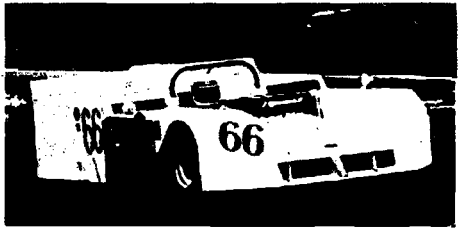


Рис. 7.30. Автомобиль, использующий эффект отсоса прилежащего к поверхности дороги воздуха "Чапарэл 2/", 1970 г.

7.3. ПРИМЕРЫ ОРИГИНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

7.3.1. ЭФФЕКТ ОТСОСА ПРИЛЕЖАЩЕГО К ПОВЕРХНОСТИ ДОРОГИ ВОЗДУХА – "ПЫЛЕСОС"

В 60-е годы на гонках Кан Ам впервые появился автомобиль, прижимающая сила которого создавалась за счет уменьшения давления под автомобилем путем отсоса из-под него воздуха (рис. 7.30). Зазор между кузовом и дорогой изолировался от окружающей среды с помощью эластичных фартуков, и воздух из-под автомобиля отсасывался двумя осевыми вентиляторами, приводимыми в действие от вспомогательного двигателя, и выбрасывался позади автомобиля (рис. 7.31). Потребляемая вентиляторами мощность составляла примерно 37 кВт.

Создаваемое таким образом дополнительное прижимающее к дороге усилие, которое можно считать независимым от скорости движения автомобиля, обеспечивает преимущества при движении на затяжных поворотах. По различным причинам этот автомобиль после кратковременного пребывания на гоночных трассах был изгнан соответствующим предписанием спортивного регламента. В 1978 г. описанная выше систе-

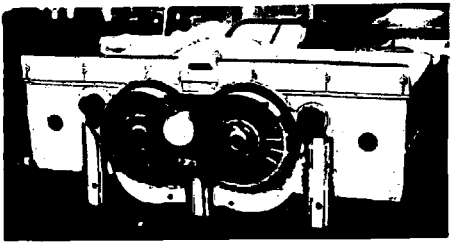


Рис. 7.31. Автомобиль, использующий эффект отсоса прилежащего к поверхности дороги воздуха "Чапарэл 2Л", 1970 г., вид сзади

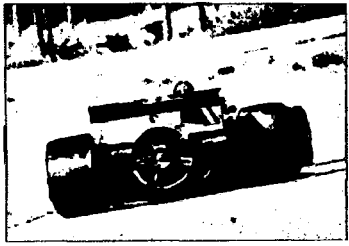


Рис. 7.32. Автомобиль, использующий эффект отсоса прилежащего к поверхности дороги воздуха "Брабгам Альфа" (формула 1), 1978 г.

ма возродилась к жизни в автомобиле формулы 1 "Брабгам-Альфа" (рис. 7.32), однако и здесь после проведения гонок на него наложили запрет.

На основании результатов испытаний моделей автомобилей в масштабе 1:1 Поттхоффом [7.8] был сделан вывод о том, что при одинаковой мощности привода на скорости 300 км/ч автомобиль-"пылесос" потреблял бы примерно на 40 % меньшую мощность (сопротивление воздуха плюс мощность вентиляторов), чем автомобиль, на котором используются обычные вспомогательные средства для увеличения прижимающей аэродинамической силы.

7.3.2. ЭФФЕКТ СОЗДАНИЯ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО РАЗРЕЖЕНИЯ У ПОВЕРХНОСТИ ДОРОГИ – "АВТОМОБИЛЬ С КРЫЛЬЯМИ"

Стремление к достижению большого значения коэффициента прижимающей силы привело к созданию автомобиля формулы 1 "Лотус 79", который появился в 1978 г. на гоночных трассах и основные решения которого были использованы для конструкций одноместных гоночных автомобилей.

Расположенные по бокам корпуса автомобиля детали кузова, закры-

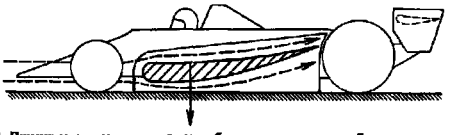


Рис. 7.33. Принципиальная схема автомобиля с крыльями по бокам

вающие радиаторы с воздуховодами, были выполнены в виде крыло-образного профиля (рис. 7.33). Возникающее благодаря этому между днищем автомобиля и дорогой разрежение вызывает появление существенной прижимающей аэродинамической силы ($c_A \approx -2$). Для предотвращения или уменьшения концевых потерь из-за бокового перетекания потока по бокам крылообразных профилей между телом автомобиля и полотном дороги были установлены упругие уплотнительные фартуки. Вследствие малого удлинения боковых крыльев при отсутствии бокового уплотнения прижимающая сила имела бы довольно малое значение.

7.3.3. АВТОМОБИЛИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ РЕКОРДОВ СКОРОСТИ

Из большого числа автомобилей, которые в течение многих лет создавались для достижения мировых рекордов скорости, следовало бы вспомнить об одном, хотя он из-за превратностей судьбы ни разу не установил такого рекорда. Речь идет о разработанном профессором Порше в 1937–1940 гг. по поручению фирмы "Даймлер Бенц" рекордном автомобиле "Мерседес-Бенц *T* 80" (рис. 7.34).

Автомобиль (по сообщению Германна [7.14]) должен был достигать максимальной скорости 650 км/ч. Первоначально предусматривалось регулируемое антикрыло, которое также должно было использоваться в качестве аэродинамического тормоза, но затем было решено расположить по бокам жесткие крыловые сегменты, за счет которых создавалась необходимая прижимающая аэродинамическая сила. Эти крыловые сегменты вместе с большими боковыми килями придают автомобилю самолетообразный вид.

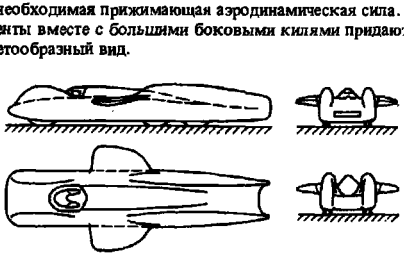


Рис. 7.34. Рекордный автомобиль "Мерседес-Бенц 780", 1939 г.

Эта конструкция представляет собой одно из множества решений, найденных конструкторами на пути к обузданию аэродинамических сил и достижению поставленной цели.

7.4. ОБОЗНАЧЕНИЯ

A – суммарная подъемная сила;
A_V, A_H – подъемная сила, действующая соответственно на переднюю и заднюю оси автомобиля;
F – площадь лобового сопротивления автомобиля;
L – база автомобиля, рис. 7.16;
L_G – длина прямолинейного участка гоночной трассы, рис. 7.14;
N – мощность двигателя;
R_K – радиус поворота гоночной трассы, рис. 7.14;
S – боковая сила, рис. 7.22, 7.23*;
V – скорость движения автомобиля;
a_y – максимальное поперечное ускорение;
g – ускорение свободного падения;
c_A – коэффициент суммарной подъемной силы;
c_{AV}, c_{AH} – коэффициенты подъемных сил, действующих на переднюю и заднюю оси автомобиля;
c_W – коэффициент аэродинамического сопротивления;
h – высота спойлера, рис. 7.2;
i – передаточное число рулевого управления;
δ_{LW} – угол поворота рулевого колеса;
β – угол скоса потока, рис. 7.22, 7.23*.

8. АЭРОДИНАМИКА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Ганс Гетц

8.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ожидаемое в будущем уменьшение запасов нефти и вытекающая отсюда задача экономичной и рентабельной эксплуатации грузовых автомобилей требует от разработчиков и изготовителей грузовых автомобилей мобилизации всех возможных усилий, направленных на уменьшение расхода топлива. Наряду с дальнейшим усовершенствованием экономичного принципа Дизеля, улучшением характеристик шин и оптимизацией привода мероприятия по снижению аэродинамического сопротивления грузовых автомобилей являются составной частью усилий, направленных на снижение расхода топлива.

Понятно, что аэродинамика для многих грузовых автомобилей с учетом узкой специализации сферы их применения может играть лишь второстепенную роль. К разряду таких автомобилей можно отнести, например, автомобили по обслуживанию строительных работ, сельскохо-

*Обозначения введены переводчиком.

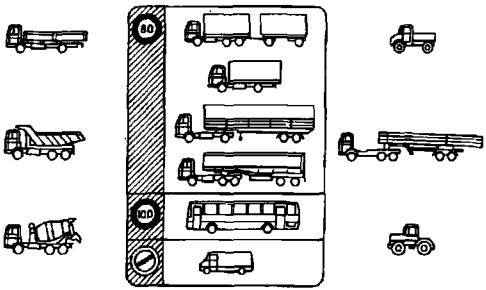


Рис. 8.1. Многообразие грузовых автомобилей

зяйственные машины и различные специальные автомобили, предназначенные для выполнения особых работ. Для автомобилей, эксплуатируемых в пригородном сообщении, особенно для магистральных автопоездов, эксплуатируемых с более высокими скоростями и на дальние расстояния, аэродинамика приобретает все большее значение. Поэтому используемые чаще всего в этих условиях грузовые автомобили и автопоезда с высокими кузовами, междугородные и туристские автобусы и автомобили-фургоны являются объектами исследования и внедрения на них аэродинамических мероприятий, направленных на снижение расхода топлива (рис. 8.1).

8.2. СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ И РАСХОД ТОПЛИВА

Прежде, чем говорить о том, как за счет уменьшения сопротивления воздуха можно уменьшить расход топлива, следует хорошо себе представить, сколь большим может быть это уменьшение. Для этого необходимо определить силу сопротивления движению и энергию, необходимую для ее преодоления (рис. 8.2) (см. также рис. 3.11). При рассмотрении движения по горизонтальному участку с постоянной скоростью

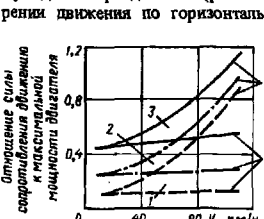


Рис. 8.2. Распределение сил сопротивления движению, действующих на автомобиль: *1* – автомобиль-фургон; *2* – автомобиль без прицепа средней грузоподъемности; *3* – контейнеровоз с контейнером весом 9,5 т

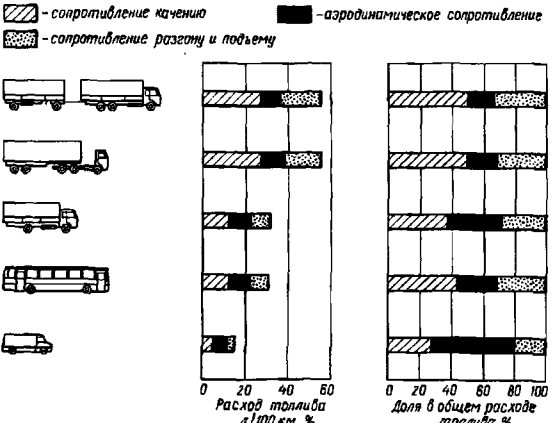


Рис. 8.3. Доля составляющих сопротивления движению в расходе топлива для различных автомобилей

оказалось, что во многих случаях сила сопротивления качению превышает силу сопротивления воздуха. Только для небольших грузовых автомобилей без прицепа и для автомобилей-фургонов уже при средней скорости движения преобладает аэродинамическое сопротивление. Для тяжелых автопоездов преобладание силы сопротивления воздуха над силой сопротивления качению наблюдается, как правило, при скорости больше 100 км/ч. Несмотря на это силой сопротивления воздуха даже для тяжелых автопоездов пренебрегать нельзя, если вспомнить о том, что затраты мощности, например, для автопоезда грузоподъемностью 38 т с высоким кузовом на преодоление аэродинамического сопротивления составляют 25 кВт при скорости движения 60 км/ч и 60 кВт при 80 км/ч.

В реальных условиях эксплуатации автомобиля, отличающихся от идеализированного движения с постоянной скоростью по ровной местности наличием движения на подъем и чередованием ускорения с замедлением, соотношения изменяются. На рис. 8.3 показаны относительные значения расхода топлива, затрачиваемого на преодоление составляющих сопротивления движению различными типами грузовых автомобилей при движении по холмистой местности. Доля общего расхода топлива, приходящаяся на аэродинамическое сопротивление, все еще остается высокой, поэтому разработка мероприятий, направленных на его снижение, является весьма актуальной.

8.3. ВЛИЯНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ, УМЕНЬШАЮЩИХ СИЛУ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, НА РАСХОД ТОПЛИВА

Влияние уменьшения силы сопротивления воздуха на эксплуатационный расход топлива лучше всего проанализировать, рассматривая один из характерных типов автомобилей при типичных для него условиях движения.

На рис. 8.4 (по Гетцу [8.1]) представлены соотношения между снижением аэродинамического сопротивления и соответствующим уменьшением расхода топлива для седельного тягача с полуприцепом грузоподъемностью 38 т, который является характерным представителем тяжелых автопоездов. В реальных эксплуатационных условиях, таких, например, как движение по "очень тяжелой трассе" или движение по дороге "государственного значения" по сравнению с идеализированным движением с постоянной скоростью по ровному горизонтальному участку дороги видно явное уменьшение снижения расхода топлива, полученного за счет снижения аэродинамического сопротивления.

Для грузовых автомобилей малой грузоподъемностью или автомобилей-фургонов эта зависимость от вида участка трассы, по которой он движется, проявляется в меньшей степени (рис. 8.5).

Отсюда становится понятно, что мероприятия, направленные на уменьшение силы сопротивления воздуха для тяжелых грузовых автомобилей (в особенности в условиях движения по автобану) и для грузо-

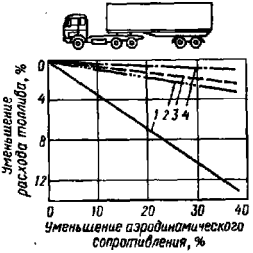


Рис. 8.4. Влияние аэродинамического сопротивления на эксплуатационный расход топлива седельного тягача (мощность двигателя 236 кВт) с полуприцепом грузоподъемностью 38 т:
1 – движение по ровному горизонтальному участку дороги; *2* – движение по холмистой местности; *3* – движение по дороге государственного значения; *4* – движение по очень тяжелой трассе

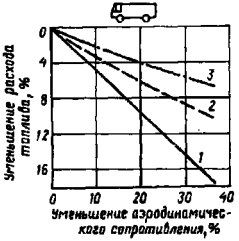


Рис. 8.5. Влияние аэродинамического сопротивления на эксплуатационный расход топлива автомобиля-фургона (мощность двигателя 48 кВт) грузоподъемностью 2,8 т:
1 – движение по ровному горизонтальному участку дороги; *2* – движение по дороге государственного значения; *3* – движение по очень тяжелой трассе

вых автомобилей малой грузоподъемностью при эксплуатации в условиях "очень тяжелой трассы" и дорог "государственного значения", имеют смысл и оправдывают себя.

8.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Причина существования очень высоких значений сил сопротивления воздуха, действующих на движущийся грузовой автомобиль, заключается не только в том, что по сравнению с легковым автомобилем он имеет существенно большую площадь лобового сопротивления — соотношение площадей грузового автомобиля с высоким кузовом, автобуса и легкового автомобиля составляет примерно 9:7:2 (*рис. 8.6*). Решающее значение имеет его обтекаемость, характеризуемая коэффициентом c_w.

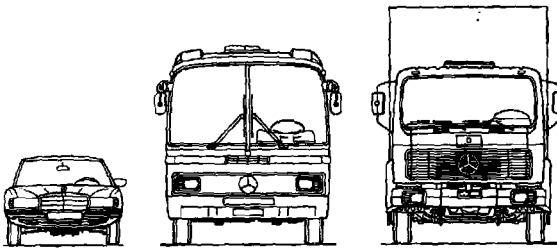


Рис. 8.6. Соотношение площадей лобового сопротивления легкового автомобиля, автобуса и грузового автомобиля

8.4.1. СИММЕТРИЧНОЕ ОБТЕКАНИЕ

Из-за многообразия конструктивных исполнений коэффициент аэродинамического сопротивления грузовых автомобилей колеблется в широких пределах (рис.8.7).



Рис. 8.7. *Диапазоны коэффициентов аэродинамического сопротивления легковых автомобилей, автобусов и грузовых автомобилей*

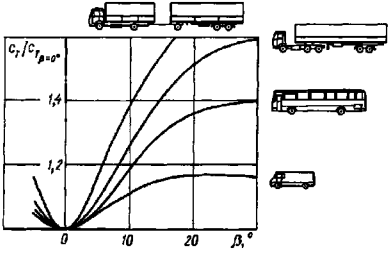


Рис. 8.8. Относительный коэффициент тангенциальной силы при кососимметричном обтекании грузовых автомобилей и автобусов

По сравнению с легковыми автомобилями автобусы имеют примерно в 1,5 раза большие значения коэффициента c_y, а автопоезда и седельные тягачи с полуприцепом – в 2 раза. И только для автомобилей-фургонов, при разработке которых проблемам аэродинамики уделяется достаточно внимания, значения коэффициента c_y тесно примыкают к значениям для легкового автомобиля.

8.4.2. КОСОСИММЕТРИЧНОЕ ОБТЕКАНИЕ

Коэффициент аэродинамического сопротивления при симметричном обтекании, которое соответствует движению автомобиля при отсутствии ветра (штиль), не может быть использован для однозначной оценки аэродинамических свойств грузовых автомобилей в реальных условиях эксплуатации. Необходимо дополнительно принимать во внимание изменение коэффициента тангенциальной силы c_T (аэродинамической составляющей в направлении движения) при кососимметричном обтекании (рис. 8.8). За исключением автомобиля-фургона все остальные виды грузовых автомобилей и автобусы имеют существенное увеличение значения коэффициента c_T с ростом угла скоса потока β.

Значения реально встречающихся в эксплуатации углов скоса потока, до которых необходимо учитывать приведенные на рис. 8.8 зависимости, определяются соотношением реально существующих в природе скоростей и направлений ветра и скорости движения автомобиля, при которой имеет смысл учитывать аэродинамическое сопротивление.

8.4.3. ОГРАНИЧЕНИЕ УГЛА СКОСА ПОТОКА С УЧЕТОМ СКОРОСТИ ВЕТРА

В связи с многообразием топографических и метеорологических условий очень трудно сделать общий вывод о типичных соотношениях сил ветра и скоростей движения автомобилей на дорогах. Поэтому можно ограничиваться грубой оценкой силы и направления ветра на основании анализа так называемой "розы ветров" во всех международных аэропортах ФРГ.

На рис. 8.9 в качестве примера приведена роза ветров аэропорта

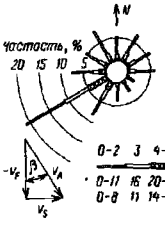


Рис. 8.9. Влияние распределения силы ветра в течение года на угол скоса набегающего потока. Годовая роза ветров аэропорта Штуттгарт

г. Штуттгарта. Из нее видно, что силы ветра 4—5 баллов по шкале Бофорта (20—39 км/ч) и выше составляют лишь около 20% ветров[8.2].

В силу того, что гораздо чаще имеют место более слабые ветра, можно сделать вывод о том, что при рассмотрении вопроса аэродинамического сопротивления грузовых автомобилей, имеющего место в реальных условиях при максимально допустимой для них скорости движения, достаточно ограничиться областью углов скоса потока $\beta < 14^\circ$ (см. также п. 4.5.2).

8.4.4. ПАРАМЕТР, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЙ СИЛУ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для оценки аэродинамического сопротивления в реальных условиях эксплуатации можно отдать предпочтение предлагаемому в [8.3] и [8.4] коэффициенту аэродинамического сопротивления $c_W{}^*$, учитывающему действие бокового ветра (рис. 8.10). Его можно записать в виде интеграла для определенной скорости движения автомобиля и характерной скорости бокового ветра (см. также п. 3.2.2):

$$c_W{}^* = (1/\pi) \int_0^{\pi} c_T(\beta) \left[1 + (V_S/V_F)^2 + 2(V_S/V_F)\cos\delta\right] \mathrm{d}\,\delta .$$

В США для оценки силы аэродинамического сопротивления принята скорость движения $V_F = 55$ миль/ч (90 км/ч) и характерная скорость бокового ветра $V_S = 9{,}5$ миль/ч (15 км/ч) по рекомендациям *DOT/SAE*. Для Европы такие рекомендации отсутствуют.

8.5. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

8.5.1. ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЯХ



Рис. 8.10. Схема для определения усредненного коэффициента аэродинамического сопротивления c_W, учитывающего действие бокового ветра [8.3]

В отличие от легковых автомобилей главным критерием, определяющим форму грузового автомобиля, является максимальный по-

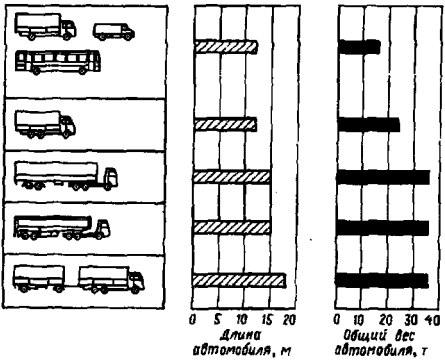


Рис. 8.11. Допустимые значения длины автомобиля и общего веса

лезный объем. При этом в законодательном порядке установлены ограничения максимальных габаритных размеров. В ФРГ, например, максимальная ширина составляет 2,5 м, максимальная высота 4 м и в зависимости от типа автомобиля ограничивается габаритная длина автомобиля. Поэтому доминирующее место занимают прямоугольные кузова с выраженными кромками, и специалистам по аэродинамике остается очень мало возможностей для изменения формы (рис. 8.11). Их усилия могут быть направлены практически только на оформление передка автомобиля или кабины водителя и на разработку и доводку снижающих аэродинамическое сопротивление навесных элементов.

8.5.2. ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ И ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЭТОМ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Аэродинамическая труба благодаря высокой степени воспроизведения режимов испытаний независимо от погодных условий является идеальной базой для целенаправленного систематического проведения исследований по решению аэродинамических задач. Аэродинамические трубы и методология проведения в них экспериментальных исследований подробно рассматриваются в п. 11. В данном разделе книги уделяется внимание особенностям, возникающим при испытаниях грузовых автомобилей. При работе с грузовыми автомобилями проблематичны необходимые размеры аэродинамической трубы. В имеющихся в настоящее время больших аэродинамических трубах можно производить точные аэродинамические измерения только для небольших грузовых автомобилей и автобусов в натуральную величину. Большие автомобили

создают слишком сильное загромождение рабочей части аэродинамической трубы как в поперечном, так и в продольном направлениях. Поэтому для аэродинамических исследований таких автомобилей приходится использовать их модели в уменьшенном масштабе. Но при этом возникает вопрос: с какой степенью достоверности полученные для модели результаты можно перенести на автомобиль в натуральную величину?

Предпосылкой получения идентичных результатов для модели и автомобиля в натуральную величину является сохранение геометрического подобия, т.е. точное и детальное воспроизведение оригинала, и одинаковые числа Рейнольдса.

Для уменьшенных моделей (в масштабе 1:10) почти всегда приходится мириться с некоторыми неточностями при воспроизведении поверхности автомобиля, что обусловлено технологией изготовления модели. Кроме того, несмотря на высокие скорости набегающего потока (250 км/ч), получаются меньшие значения числа Рейнольдса, чем для соответствующих натурных автомобилей, движущихся со средней скоростью от 60 до 70 км/ч. Поэтому при работе с масштабными моделями следует учитывать, что возможны различия между обтеканием модели и натурного автомобиля. Это проявляется, например, в различном положении точки перехода потока от ламинарного режима течения в пограничном слое к турбулентному или в несовпадении точек отрыва потока.

Приведенные на рис. 8.12 результаты измерений для модели седельного тягача с полуприцепом в масштабе 1:10 позволяют хорошо проследить зависимость коэффициента c_W от числа Re. Из приведенных результатов видно, что лишь при скоростях набегающего потока свыше 300 км/ч (штриховая линия), когда влияние сжимаемости становится ощутимым, коэффициент c_W асимптотически приблизился бы к его точному значению, полученному при правильном выборе числа Рейнольдса.

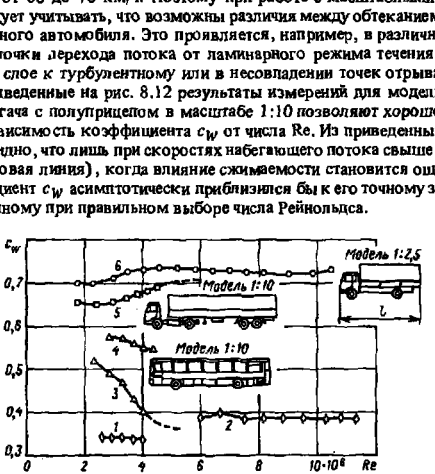


Рис. 8.12. Влияние числа Рейнольдса на значение c_W:
1 – модель легкового автомобиля в масштабе 1:5; *2* – легковой автомобиль в натуральную величину; *3* – модель автобуса в масштабе 1:10, R = 20 мм; *4* – модель автобуса в масштабе 1 : 10; R = 15 мм; *5* – модель контейнеровоза с контейнером в масштабе 1 : 10,; *6* – модель седельного тягача с полуприцепом в масштабе 1:2,5

Соотношение между коэффициентом аэродинамического сопротивления и числом Рейнольдса в противоположность моделям легковых автомобилей для моделей грузовых автомобилей сильно зависит от оформления передка автомобиля. Так, например, для модели автобуса при изменении значения радиуса скругления R передней поперечной кромки передка получаются совершенно различные зависимости коэффициента c_W от числа Рейнольдса. К аналогичным результатам привели исследования Павловского [8.5], Гухо, Янссена и Эммельманна [8.6].

Эти примеры показывают, что измерения на моделях в уменьшенном масштабе, даже при введении сложных и трудновыполнимых корректировок пограничного слоя, например, с помощью турбулентных шнуров или введением определенным образом распределенных местных шероховатостей, лишь приблизительно могут воспроизвести реальные соотношения. Поэтому во многих случаях они служат лишь для качественных предварительных исследований, которые не требуют существенных затрат.

Из-за указанных выше проблем аэродинамические исследования проводят с моделями в масштабе 1:2,5. На моделях такого масштаба можно получить более близкие к реальным условиям режимы обтекания, а также осуществить моделирование внутренних потоков через радиатор системы охлаждения, моторный отсек и систему вентиляции кабины. Получаемые коэффициенты аэродинамического сопротивления хорошо совпадают с данными измерений для автомобиля в натуральную величину. Модели такого масштаба позволяют также проводить исследования по загрязнению автомобиля.

8.5.3. ПУТИ СНИЖЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Характерные условия обтекания и распределение давления. Если рассматривать картину обтекания наиболее характерной группы грузовых автомобилей – автопоездов и седельных тягачей с полуприцепом, имеющих высокие кузова, – то, как видно из рис. 8.13 благодаря струйкам дыма, кабина водителя и кузов оказывают существенное влияние друг на друга.

Длина свободного пространства s между задней стенкой кабины и передней торцовой поверхностью кузова, а также перепад по высоте кузова относительно крыши кабины водителя h, несомненно, являются важными параметрами, влияющими на аэродинамическое сопротивление.

Распределение давления по поверхности автомобиля (рис. 8.14) с зонами высокого положительного давления в передней части кабины и кузова и разрежения в задней части автомобиля вследствие отрыва потока, характерного для тупых тел с выраженными кромками, служит причиной высокого аэродинамического сопротивления.

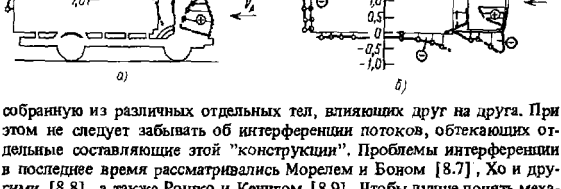
Составляющие аэродинамического сопротивления – проблема интерференции. Рассматривая обтекание седельных тягачей и автопоездов, с точки зрения аэродинамики их можно представить как "конструкцию",



Рис. 8.13. Характерная картина обтекания грузового автомобиля



Рис. 8.14. Распределение давления (c_p) по поверхности грузового автомобиля при симметричном обтекании: *а* – сечение в продольной плоскости симметрии; *б* – сечение в плоскости поясной линии



собранную из различных отдельных тел, влияющих друг на друга. При этом не следует забывать об интерференции потоков, обтекающих отдельные составляющие этой "конструкции". Проблемы интерференции в последнее время рассматривались Морелем и Боном [8.7], Хо и другими [8.8], а также Рошко и Кенигом [8.9]. Чтобы лучше понять механизм действия мероприятий, направленных на улучшение аэродинами-

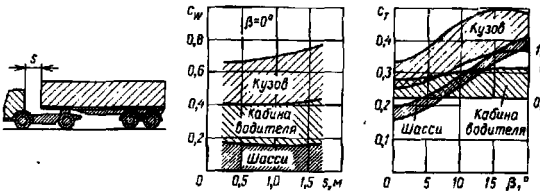


Рис. 8.15. Составляющие аэродинамического сопротивления контейнеровоза грузоподъемностью 8 т

ческих свойств автомобиля, помимо качественной оценки обтекания необходимо определить аэродинамические силы, действующие на отдельные составляющие "конструкции".

На рис. 8.15 приведен пример исследования по названному методу. Общее аэродинамическое сопротивление седельного тягача с прицепом разделено на составляющие аэродинамического сопротивления кабины, шасси и кузова.

При симметричном обтекании составляющие аэродинамического сопротивления кузова, кабины и шасси относятся, как 4:3:2. С увеличением расстояния между кабиной и кузовом s наблюдается небольшое увеличение составляющих аэродинамического сопротивления. При кососимметричном обтекании коэффициенты тангенциальной силы кузова и шасси заметно увеличиваются; это является результатом отрыва потока с подветренной стороны для "кузова" вследствие явно плохообтекаемой формы с "острыми" кромками, а для шасси из-за большого числа "неровностей"

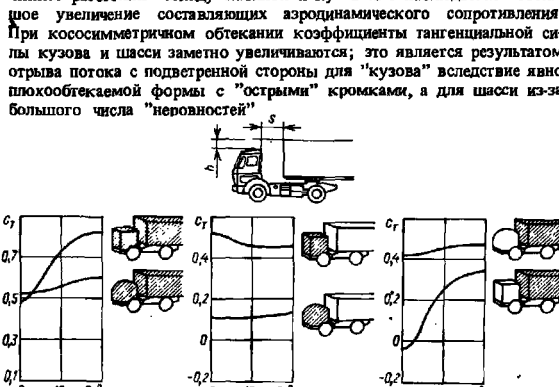
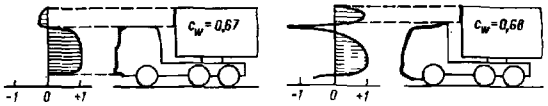


Рис. 8.16. Влияние формообразования кабины водителя на аэродинамическое сопротивление грузового автомобиля в целом и на аэродинамическое сопротивление кабины и кузова отдельно (на примере седельного тягача с контейнером весом 30 т, h = 1,1 м; s = 0,7 м)



Распределение давления c_p в сечении продольной плоскостью симметрии

Рис. 8.17. Интерференция потоков; кабина водителя – передняя стенка кузова [8.8]

Напротив, коэффициент тангенциальной силы кабины водителя почти не зависит от бокового ветра.

Формообразование кабины водителя. Анализ результатов исследований для седельного тягача с прицепом (рис. 8.16) с двумя вариантами кабины водителя – обтекаемой формы и прямоугольной с "острыми" кромками, имеющих одинаковые габаритные размеры – показывает, что при одинаковом кузове и шасси коэффициенты сопротивлений воздуха автомобиля в целом имеют примерно одинаковые значения. На первый взгляд, казалось бы, напрашивается вывод о том, что формообразование кабины вообще не влияет на силу сопротивления воздуха. Но если рассмотреть отдельно, как указывалось выше, аэродинамическое сопротивление кабины водителя и кузова при симметричном обтекании, то станет понятно, что аэродинамическое сопротивление автомобиля с прямоугольной формой кабины, имеющей острые кромки, полностью состоит из аэродинамического сопротивления кабины водителя. Вследствие интенсивного отрыва потока по всему периметру поперечного сечения кабины расположенная за ней передняя стенка кузова находится в зоне разрежения, в результате распределение давления по поверхности кузова может быть таково, что аэродинамическое сопротивление непосредственно кузова будет равно нулю или даже иметь отрицательное значение. Эпюры распределения давления по поверхности кабины водителя и выступающей над ней передней стенки кузова в сечении продольной плоскостью симметрии для двух вариантов исполнения кабины приведены на рис. 8.17 (см. работу Хо и других [8.8]). Такой характер взаимодействия кабины и кузова приводит к необходимости рассматривать формообразование кабины водителя с учетом ее расположения в пространстве относительно кузова.

Варьируя расстояние между кузовом и кабиной s, а также высоту выступания кузова над крышей кабины h для трех кабин, имеющих различную форму, но одинаковые габаритные размеры, можно установить приведенные ниже зависимости (рис. 8.18, по Гетцу [8.1]).

Для *прямоугольной кабины водителя, имеющей острые кромки* (модель В):

а) очень малая зависимость значения c_W от s;

б) минимальное значение коэффициента аэродинамического сопротивления имеет место при выступании кузова относительно крыши кабины $h = 1{,}0$ м;

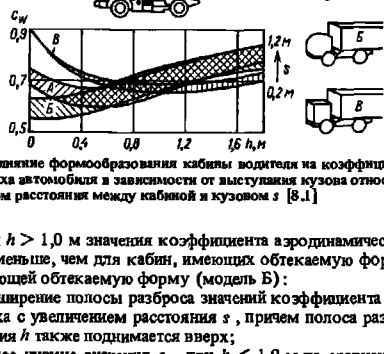


Рис. 8.18. Влияние формообразования кабины водителя на коэффициент сопротивления воздуха автомобиля в зависимости от выступания кузова относительно кабины h с учетом расстояния между кабиной и кузовом s [8.1]

в) при $h > 1{,}0$ м значения коэффициента аэродинамического сопротивления меньше, чем для кабин, имеющих обтекаемую форму. Для кабины, имеющей обтекаемую форму (модель Б):

а) расширение полосы разброса значений коэффициента сопротивления воздуха с увеличением расстояния s, причем полоса разброса с ростом значения h также поднимается вверх;

б) более низкие значения c_W при $h < 1{,}0$ м по сравнению с конструкциями кабин, имеющими кромки.

При общепринятой форме кабины (модель А):

а) сильно выраженное сближение значений c_W со значениями, полученными для кабины водителя, имеющей обтекаемую форму;

б) при малой величине выступания кузова над кабиной $h < 0{,}6$ м наблюдается увеличение c_W; это обстоятельство часто приводит к необходимости принимать компромиссное решение между снижением силы аэродинамического сопротивления и получением по возможности максимального внутреннего объема кабины водителя, причем очень часто приходится мириться с меньшими наружными радиусами скругления или обусловленными технологией изготовления острыми кромками и перепадами поверхностей.

Приведенные результаты позволяют констатировать, что при определенных значениях выступания кузова относительно крыши кабины h, по меньшей мере, при симметричном обтекании даже для кабин с острыми кромками можно получить приемлемые значения коэффициента сопротивления воздуха. Как утверждают Рошко и Кеник [8.9], в принципе хорошие результаты получаются, если исходящая от кабины водителя "разделительная линия тока", являющаяся границей между зоной вихревого течения оторвавшегося потока и невозмущенным внешним потоком, плавно прилегает к расположенному за кабиной кузову.

Если рассматривать влияние скоса потока, то для автомобилей, имеющих кабину с острыми кромками, можно наблюдать удивительно резкое увеличение коэффициента сопротивления воздуха (рис. 8.19). Если

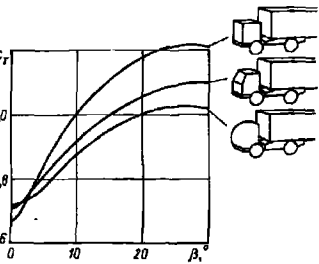


Рис. 8.19. Влияние формы кабины водителя на коэффициент тангенциальной силы при кососимметричном обтекании для седельного тягача с контейнером весом 30 т (h = 1,1 м; s = 0,7 м)

при симметричном обтекании кузов находится в "аэродинамической тени" кабины, то с увеличением угла скоса потока он все более сильно подвергается непосредственному воздействию потока. Грузовые автомобили с обтекаемой формой кабины имеют существенно меньшие коэффициенты тангенциальной силы.

Накладные элементы, уменьшающие аэродинамическое сопротивление грузовых автомобилей. Так как до сегодняшнего дня фирмы-разработчики и изготовители грузовых автомобилей используют одни и те же кабины водителя для большого числа видов специализированного подвижного состава – будь то седельные тягачи, предназначенные для перевозок на ближние и дальние расстояния или для эксплуатации с полуприцепами, используемыми для обслуживания строительства, – то в силу многообразия применяемых кузовов не всегда можно получить удовлетворительное значение коэффициента аэродинамического сопротивления только за счет конструкции кабины.

Поэтому известен целый ряд дополнительных накладных элементов, предназначенных для уменьшения силы сопротивления воздуха при эксплуатации с высокими кузовами (рис. 8.20).

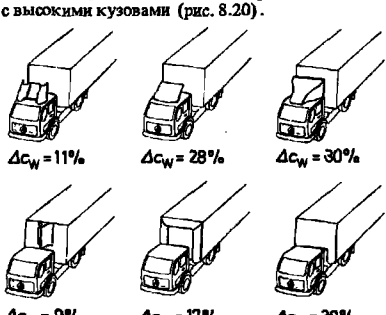


Рис. 8.20. Уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления за счет установки дополнительных накладных элементов при симметричном обтекании

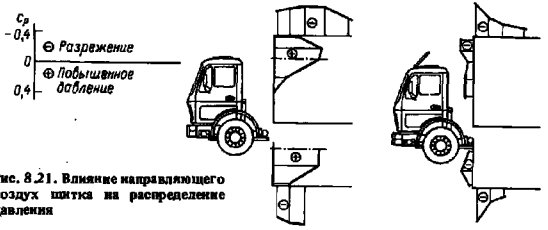


Рис. 8.21. Влияние направляющего воздух щитка на распределение давления

Хорошо показали себя устанавливаемые на крыше кабины водителя обтекатели различной формы или регулируемые щитки. Последними можно легко управлять, они эффективны и имеют малую стоимость. Распределение давления, приведенное на рис. 8.21, показывает высокую эффективность направляющих воздух щитков. Для этой цели используются также расположенные на торцевой панели кузова килеобразные вихревые стабилизаторы, препятствующие при боковом ветре протеканию воздуха между кабиной водителя и кузовом благодаря образованию вихрей, или накладные элементы, образованные из полуцилиндрических тел, уменьшающие общее аэродинамическое сопротивление.

С помощью перечисленных направляющих воздух устройств при симметричном обтекании для грузовых автомобилей, имеющих кабины с острыми кромками, силу сопротивления воздуха можно уменьшить примерно на 10 %, а если кабины имеют обтекаемую форму, то на 30 % (рис. 8.22, по Гетцу [8.1]).

При увеличении угла скоса потока в случае использования полуцилиндрических накладных элементов, устанавливаемых на переденей стенке кузова, коэффициент тангенциальной силы оказывается существенно меньше, чем при использовании направляющего воздух щитка. На рис. 8.23 приведена фотография реально существующего автопоезда с таким накладным элементом. Подобные конструкции были описаны Шуле [8.10], а также в [8.11].

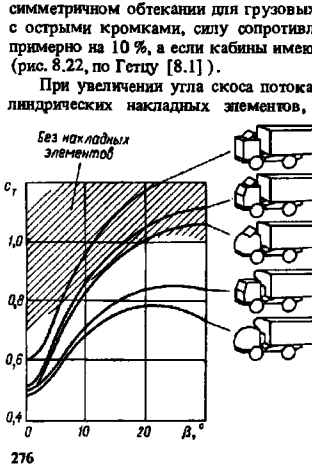


Рис. 8.22. Уменьшение аэродинамического сопротивления благодаря использованию накладных элементов для седельного тягача с контейнером весом 30 т, h = = 1,1 м; s = 0,7 м [8.1]



Рис. 8.23. Направляющий воздух щиток и накладной элемент на передней торцевой стороне контейнера

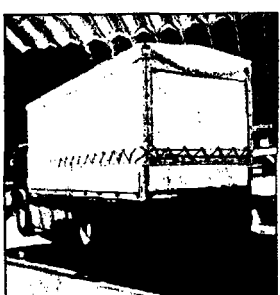


Рис. 8.24. Облицовка шасси

Облицовки шасси, которые одновременно включают в себя защитный брус, предотвращающий подъезд под кузов сзади и сбоку легкового автомобиля, эффективны лишь при боковом ветре (рис. 8.24). При такой конструкции поток, обтекающий шасси, имеющее множество выступов и впадин, движется по периметру вдоль поверхности облицовок. При наличии облицовки шасси с увеличением угла скоса потока β характер изменения коэффициента тангенциальной силы улучшается, и при $\beta \approx 15°$ выигрыш от установки облицовки достигает примерно 13 % (рис. 8.25).

Еще на 5 % силу сопротивления воздуха можно уменьшить с помощью фартука, установленного под передним бампером, который аналогично спойлеру передка легковых автомобилей улучшает обтекание *под днищем автомобиля*.

Результаты различных исследований в этом направлении в последнее время воплощаются в дизайнерских проектах и прототипах автопоездов и седельных тягачей с полуприцепами, имеющих вместительную кабину водителя и предназначенных для междугородних перевозок на дальние расстояния (рис. 8.26).

Наряду с рассмотренным взаимодействием потоков, обтекающих кабину водителя и кузов автомобиля без прицепа или кузов полуприцепа, могут быть рассмотрены условия обтекания между полуприцепом,

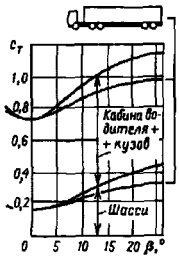


Рис. 8.25. Влияние облицовки шасси на коэффициент тангенциальной силы c_T при кососимметричном обтекании

Рис. 8.26. Дизайнерский проект вместительной кабины водителя (слева) и прототип (справа)





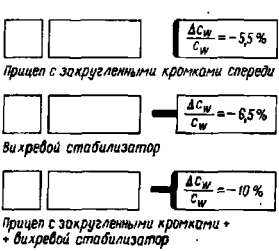


Рис. 8.27. Уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления автопоезда за счет использования накладных элементов на прицепе [8.8]

связанным с тягачом, и прицепом. Аналогично тому, как с помощью направляющего воздух щитка на крыше кабины водителя осуществляется приемлемый с точки зрения хорошей обтекаемости переход от кабины к кузову, в данном случае также можно отыскать практически приемлемые решения по оформлению ровного, закрытого перехода от полуприцепа к прицепу [8.12].

На рис. 8.27 (по Хо и др. [8.8]) показано, в какой последовательности аэродинамическое сопротивление автопоезда было сведено к аэродинамическому сопротивлению автомобиля, в конфигурации которого существуют свободные промежутки.

Следует отметить, что за счет вихревого стабилизатора, в первую очередь, уменьшается аэродинамическое сопротивление тягача с полуприцепом, в то время, как закругленные кромки в передней части прицепа преимущественно уменьшают аэродинамическое сопротивление самого прицепа. Рекомендуется использовать одновременно оба мероприятия, причем можно считать, что эффекты отдельных мероприятий суммируются.

8.5.4. ПУТИ СНИЖЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ АВТОБУСОВ И АВТОМОБИЛЕЙ-ФУРГОНОВ

Характерные условия обтекания и распределение давления. По сравнению с грузовыми автомобилями тела прямоугольной формы, к которым можно отнести автобусы и автомобили-фургоны, имеют более простую картину обтекания (рис. 8.28, 8.29). Подъемы потока, видимые с помощью струек дыма, и измерения распределения давления для модели автобуса свидетельствуют о том, что мероприятия, направленные на улучшение аэродинамики, должны касаться преимущественно передка автомобиля.

Приведенные ниже сведения, относящиеся к автобусу, если не делается специальных оговорок, можно распространить и на автомобиль-фургон.

Оптимизация радиусов скругления передка. Существенное влияние на силу аэродинамического сопротивления автобуса оказывает значение радиусов скругления кромок передней фронтальной поверхности. На рис. 8.30 приведены результаты исследования влияния на силу сопротивления воздуха увеличения радиуса скругления, начиная с формы передка с острыми кромками ($R = 0$). Оказалось, что предельной величиной радиуса скругления можно считать $R = 150$ мм, так как при дальнейшем его увеличении вплоть до образования так называемой обтекаемой формы передка, существенного снижения коэффициента аэродинамического сопротивления получить не удается.

Для реально существующих автобусов очень часто только за счет несущественных изменений передка по отношению к предыдущей конструкции можно хорошо использовать имеющийся потенциал уменьшения силы аэродинамического сопротивления. На рис. 8.31 показано изменение формы передней кромки: значение коэффициента c_w снизилось на 12 %. Влияние положения водосточного желобка на передней кромке

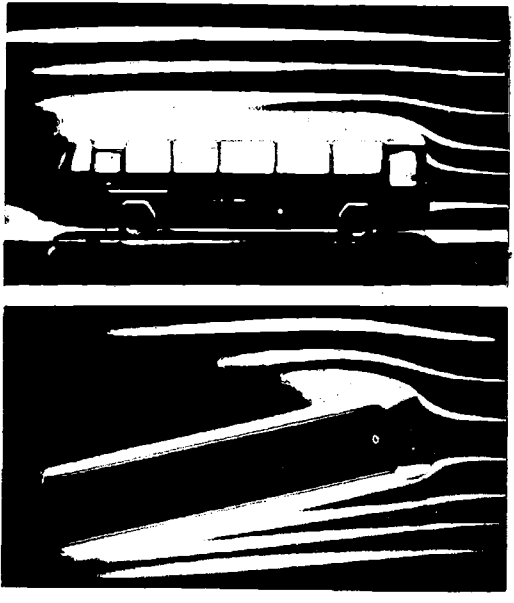
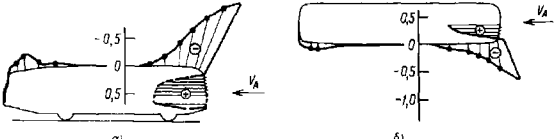


Рис. 8.28. Характерная картина обтекания автобуса



а) *б)*

Рис. 8.29. Распределение давления (c_p) по поверхности автобуса при симметричном обтекании:
а – сечение в продольной плоскости симметрии; *б* – сечение в плоскости поясной линии

Рис. 8.30. Влияние радиуса скругления кромок передней части автобуса на коэффициент аэродинамического сопротивления

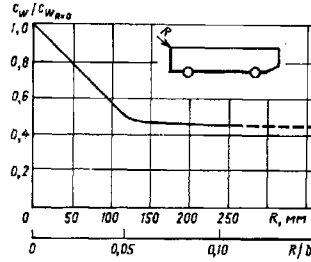
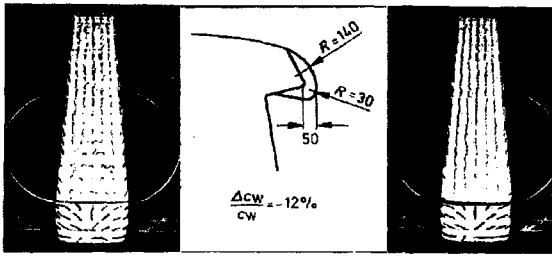


Рис. 8.31. Оформление кромок автобуса с целью улучшения условий обтекания



крыши на значение коэффициента аэродинамического сопротивления приведено на рис. 8.32.

Разделение общей силы сопротивления воздуха на составляющие, действующие на переднюю, среднюю и заднюю части автобуса отдельно (рис. 8.33, по [8.13]), позволяет установить, что на передок с оптимизированными значениями радиусов скругления приходится лишь минимальная часть сопротивления. Ввиду существенно более высоких сил сопротивления воздуха, приходящихся на среднюю и заднюю части автобуса, дальнейшая оптимизация передка себя не оправдывает.

Прочие мероприятия. Аэро-

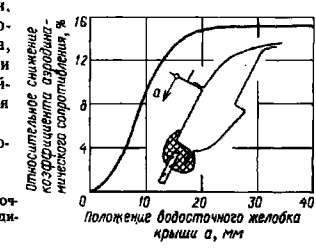


Рис. 8.32. Влияние положения водосточного желобка на коэффициент аэродинамического сопротивления

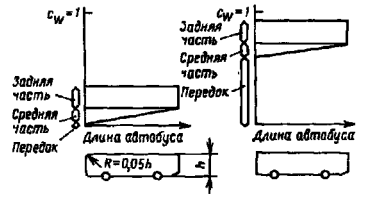


Рис. 8.33. Коэффициент сопротивления воздуха автобуса со скруглением кромок в передней части и без скругления — разделение на составляющие, приходящиеся на переднюю, среднюю и заднюю части автобуса

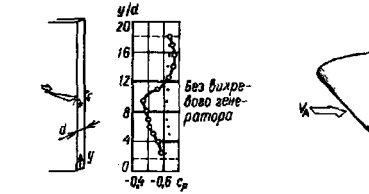


Рис. 8.34. Мероприятие, направленное на уменьшение силы сопротивления воздуха — "вихревой генератор", расположенный сзади. Приведено распределение давления (c_p) по торцевой поверхности [8.14]

Рис. 8.35. Мероприятие, направленное на уменьшение силы сопротивления воздуха — устанавливаемый сзади направляющий профиль [8.15]. Без направляющего профиля $c_W = 0{,}60$; с направляющим профилем $c_W = 0{,}30$; $Re_d = 0{,}6 \cdot 10^6$; $l/d = 3{,}3$; $b/d = 303$

динамическое сопротивление формы можно уменьшить не только за счет оптимизации передка, но и за счет изменений задней части. Но так как эти мероприятия сводятся к сужению салона, например, автобуса, то у них едва ли есть шанс на применение. Реально лишь небольшое опускание крыши в районе задней части автобуса и несущественное сужение по бокам.

При условии сохранения полезного объема возможны некоторые мероприятия в районе задка автомобиля, которые способствуют уменьшению разрежения со стороны задней торцевой поверхности. Здесь можно рекомендовать (по Юнгу [8.14]) применение так называемых вихревых генераторов (рис. 8.34) или установленного сзади, как описано Фреем [8.15], направляющего профиля (рис. 8.35), см. также работу Кирша [8.16].

8.5.5. ОСОБЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Движение в колонне. Увеличение плотности движения почти всегда приводит к образованию колонн автомобилей, чаще состоящих из грузовых автомобилей. Вследствие отсутствия условий для обгона и существования ограничения максимальных скоростей движения такие колонны

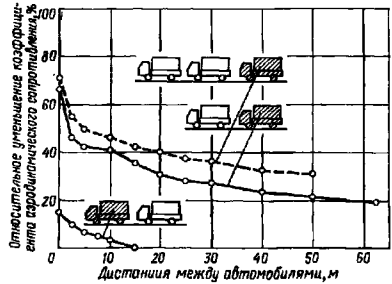


Рис. 8.36. Изменение коэффициента сопротивления воздуха автомобилей, движущихся в колонне [8.1]

распадаются очень медленно. В то же время очень часто имеет место довольно высокая средняя скорость движения в колоннах, по крайней мере, на автобанах. В этом случае наблюдается интерференция между полями потоков, обтекающих автомобили. Каждый автомобиль оставляет позади себя характерный вихревой след. Он уменьшает давление скоростного напора, действующее на следующий за ним автомобиль. Этот эффект, известный в автотранспорте под названием "движение в спутной струе"* (см. п. 7.1.4), для грузовых автомобилей выражен особенно сильно, поэтому, как указал Гетц [8.1], по мере удаления от начала колонны наблюдается явное снижение значений коэффициента аэродинамического сопротивления автомобилей (рис. 8.36).

Если колонна состоит из нескольких автомобилей и водители при скорости движения 80 км/ч соблюдают безопасную дистанцию, равную "половине показания спидометра" 40 м, то сила сопротивления воздуха, действующая на второй автомобиль, будет на 20 % ниже, чем на первый, а для третьего и каждого последующего она будет меньше примерно на 30 %. При этом вовсе не обязательно следовать точно по колее предыдущего автомобиля, можно смещаться вбок на величину до половины ширины автомобиля. Поскольку с уменьшением дистанций между автомобилями снижение значений коэффициентов аэродинамического сопротивления становится еще больше, то следует категорически предостеречь от возможной эйфории по поводу экономии топлива, так как существенное уменьшение расхода топлива может быть приобретено ценой опасного для участников движения уменьшения дистанций между автомобилями.

Движение по туннелю. Для улучшения общественного пригородного

*Другое название – "гонка за лидером" в автотранспорте и велоспорте. – *Прим. ред. пер.*

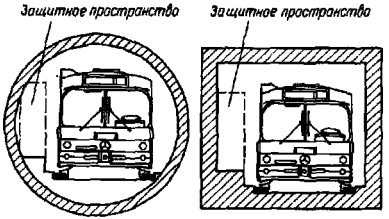


Рис. 8.37. Возможные варианты туннелей, предназначенных для автобусного движения [8.17]



Рис. 8.38. Испытательная установка для измерений силы сопротивления воздуха автобуса при движении по туннелю

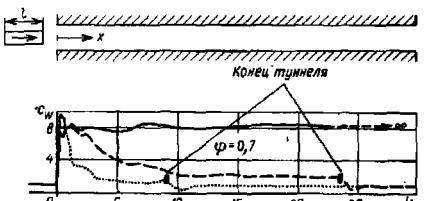


Рис. 8.39. Изменение коэффициента c_W тела при движении по туннелю (коэффициент блокировки туннеля $\varphi = F_{авт}/F_{тун}$)

пассажирского сообщения в будущем предполагается иметь транспортную систему, которая предусматривает наличие особых трасс, частично проложенных в туннелях, имеющих трубчатое сечение, в тех местах, где особенно высока напряженность транспортных потоков (см. [8.17]).

В общем случае при проектировании и использовании туннельных транспортных систем проблема аэродинамического сопротивления является одним из самых существенных вопросов. Для рельсовых транспортных средств известно несколько теоретических работ и экспериментальных исследований (см. труды Гаккенхольца [8.18], Непперта, Зандерсона [8.19] и Макродта [8.20]), результаты которых, к сожалению, непосредственно для рассматриваемой автобусной системы использовать нельзя в силу других соотношений как размеров туннеля, так и размеров автобуса (рис. 8.37). Поэтому такие вопросы, как определение влияния коэффициента блокировки φ (отношение площади лобового сопротивления автобуса к площади поперечного сечения туннеля), длины туннеля и формы передка автобуса на значение коэффициента c_W автобуса, движущегося в туннеле, и как он изменяется в процессе движения по туннелю, требует своего разрешения.

Для выяснения этих вопросов были проведены "пробеговые испытания" на катапульте, которая обычно служит для испытания на удар (рис. 8.38). Объектами испытаний являлись цилиндрические тела, размеры которых соответствовали габаритным размерам автобуса в масштабе 1:20, и трубы, имитирующие туннель. Скорость движения моделей достигала 70 км/ч. Сила сопротивления воздуха определялась с помощью встроенного в модель динамометрического датчика. В качестве примера на рис. 8.39 показана характеристика изменения коэффициента c_W цилиндрического тела, имеющего острые кромки, на фазе входа в туннель, движения в туннеле и выхода из туннеля; коэффициент блокировки $\varphi = 0{,}7$.

Следует обратить внимание на большой градиент $dc_W/d(x/l)$ на фазе входа с максимальным значением c_W, которое в 10 раз больше значения c_W на свободном участке. Причем на фазе входа эта величина не зависит от длины туннеля и вызвана импульсным ускорением столба воздуха в туннеле.

После фазы входа сразу становится заметным влияние длины туннеля. Чем короче туннель, тем быстрее уменьшается значение c_W; это связано с инерцией массы воздуха в туннеле. На фазе выхода из туннеля кривая значений c_W имеет короткий "всплеск" в сторону уменьшения значения c_W. Падение значения c_W ниже того, которое существует на свободном участке, является следствием повышения давления в зоне вихревого следа позади цилиндра вследствие внезапного разрушения кольцевого потока, который в туннеле окружает зону вихревого следа и, действуя по типу инжектора, понижает в ней давление.

На рис. 8.40 на примере короткого туннеля показано влияние формы цилиндра (передняя часть с острыми кромками или же скругленная) на коэффициент c_W при различных коэффициентах блокировки

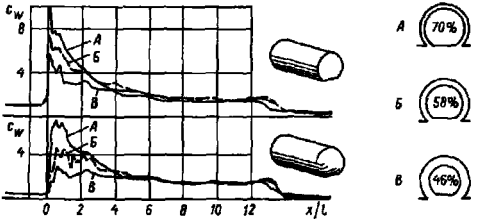


Рис. 8.40. Влияние коэффициента блокировки на значение c_W при различных формах передка

$\varphi = 0{,}46;\ 0{,}58;\ 0{,}70$. Цилиндр со скругленной формой передней части отличается меньшим "пиковым" значением c_W и менее крутым нарастанием $dc_W/d(x/l)$ на фазе входа в туннель (рис. 8.40, нижний график).

На рис. 8.41 показан вариант специального оформления въезда в туннель. С помощью сегментов туннеля, которые постепенно уплотняются по направлению к непосредственно въезду в туннель, удается уменьшить коэффициент аэродинамического сопротивления цилиндра с острыми кромками до уровня этого коэффициента цилиндра со скругленной формой передней части.

Эти примеры показывают, что разработка обтекаемой передней части автобуса при высоких коэффициентах блокировки эффективна только на въезде в туннель. Таким образом, расчет экономической эффективности туннелей трубчатого сечения, устраиваемых на рассматриваемых специальных автобусных трассах, заключается в оптимизации площадей поперечного сечения туннелей в отношении конструктивных и строительно-монтажных затрат и доли эксплуатационных затрат системы, вызванной аэродинамическим сопротивлением.



Рис. 8.41. Влияние оформления въезда в туннель на коэффициент c_W при различных формах передка:
а – туннель без специального оформления въезда; *б* – туннель со специальным оформлением въезда

8.6. ЗАГРЯЗНЕНИЕ АВТОМОБИЛЯ

Как указывалось в п. 6.4, загрязнение, возникающее при движении по мокрым дорогам, особенно при повышенной плотности движения, отрицательно влияет на безопасность движения вследствие ухудшения видимости. Колеса автомобиля подхватывают частички грязи, которые оседают на самом автомобиле (самозагрязнение) или смешиваются с турбулентным потоком вихревого следа и осаждаются на движущихся позади или навстречу автомобилях (загрязнение посторонних участников движения).

Это сопровождается ухудшением видимости из-за загрязненных фар, стекол (ветрового, боковых, заднего). Кроме того, ухудшение видимости происходит из-за побочных эффектов вследствие наличия водяной пыли в вихревом следе за автомобилями, ухудшения различимости сигналов задних фонарей и номерного знака, загрязнения дорожных знаков и дорожной разметки.

Не трудно понять, что предотвращение загрязнения уже давно не является вопросом только комфорта, это также существенный вклад в активную безопасность – в безопасность восприятия окружающей среды. Мероприятия по борьбе с загрязнением либо направлены на удаление осевшей грязи, т.е. должны обеспечивать очистку загрязненных поверхностей, либо должны способствовать направлению или отводу потока грязи таким образом, чтобы он не соприкасался с чистыми поверхностями, или, наконец, должны препятствовать захвату грязной воды с поверхности дороги.

8.6.1. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОТ ПОСТОРОННИХ УЧАСТНИКОВ ДВИЖЕНИЯ

Для предотвращения осаждения грязи на поверхностях автомобиля, воспринимающих давление скоростного напора (фары, ветровое стекло) в 1950–1955 гг. предлагались прозрачные направляющие воздух устройства для легковых и грузовых автомобилей (рис. 8.42). Однако практическое их использование показало, что частички грязи, имеющие высокий удельный вес, и насекомые едва ли могут перемещаться вместе с потоком, изменившим направление. Вследствие инерции их масс они

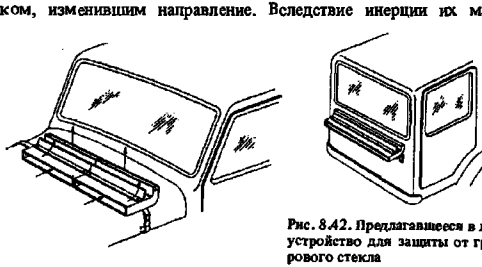


Рис. 8.42. Предлагавшееся в прошлом устройство для защиты от грязи ветрового стекла

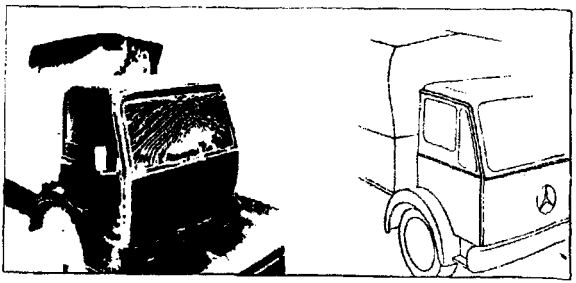


Рис. 8.43. Защита от грязи боковой поверхности кабины благодаря использованию водосточных желобков



Рис. 8.44. Загрязнение бокового стекла из-за наружного зеркала заднего вида



Рис. 8.45. Уменьшение загрязнения бокового стекла благодаря соответствующему формообразованию наружного зеркала заднего вида и использованию грязеотводящего профиля

отклоняются от линий тока направляющего потока и загрязняют само направляющее воздух устройство (см. также п. 2.3.4).

Результаты исследования создаваемых с помощью вентилятора "воздушных завес" для предотвращения загрязнения ветрового стекла показали, что аналогичные решения по причине отсутствия места, и – что гораздо существеннее – из-за большого расхода мощности и повышенного уровня шума пока неприемлемы (см. работы Гетца [8.21], [8.22]). Следовательно, в будущем будут сохранены известные устройства для *омыва и очистки стекол, и их необходимо совершенствовать.*

Предотвращение загрязнения боковых стекол при всех скоростях движения достигается благодаря использованию аэродинамически профилированных упругих козырьков, сточных желобков или молдингов вдоль стойки ветрового стекла и продолжающихся вниз вдоль проема

двери (см. также п. 6.4.2). Выбор конструкции этих устройств должен согласовываться с обтеканием соответствующей конкретной формы грузового автомобиля, как показано на примере кабины водителя (рис. 8.43).

Загрязнение боковых стекол грузовых автомобилей часто вызывается отстоящими от них наружными зеркалами и их креплением (рис. 8.44). За счет соответствующего формообразования наружного зеркала и отводящего грязную воду профиля удается обеспечить чистую поверхность зеркала, при этом существенно уменьшается забрызгивание бокового стекла (рис. 8.45).

8.6.2. САМОЗАГРЯЗНЕНИЕ

Самозагрязнение возникает в результате движения автомобиля по мокрому и грязному полотну дороги. С одной стороны, при качении шины вода вытесняется из пятна контакта шины с опорной поверхностью вперед и в стороны (разбрызгиваемая вода), с другой стороны, увлекаемые шиной частички воды вследствие действия центробежных сил отбрасываются преимущественно под углом от 0 до 30° назад (отбрасываемая вода) (рис. 8.46, по Кесслеру [8.23]). Против разбрызгиваемой воды, которая существует в форме относительно больших капель и разбрызгивается на относительно небольшое расстояние, до сих пор еще не найдены эффективные мероприятия. И напротив, в целях уменьшения отбрасывания воды известны различные решения для грузовых автомобилей и автобусов.

Уменьшение загрязнения автобуса. Условия обтекания и распределение давления в передней части кузова оказывают сильное влияние на выбрасывание воды из-под арок передних колес. Чем ближе форма передней части автобуса к прямоугольной и чем острее вертикальные кромки, тем сильнее выражены боковые зоны разрежения с высокими отрицательными значениями коэффициента c_p на высоте передней оси (см. рис. 6.18). Вследствие этого поток из-под арки колеса и находящиеся в нем во взвешенном состоянии частицы воды легко перетекают на боковину кузова, что ведет к сильному загрязнению боковой поверхности.

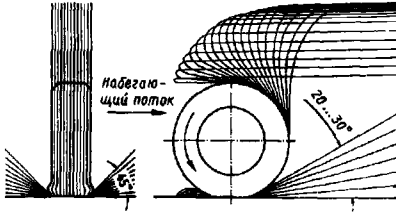


Рис. 8.46. Разбрызгивание грязной воды катящимся свободно колесом [8.23]



Рис. 8.47. Влияние формы передка автобуса на загрязнение боковых поверхностей: *а* – прямоугольная форма с острыми кромками; *б* – скругленная форма

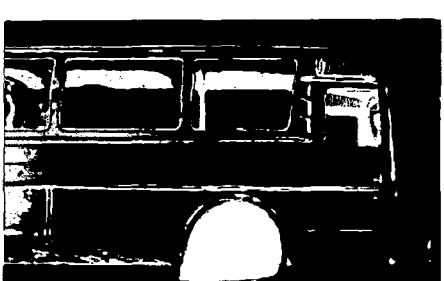


Рис. 8.48. Уменьшение загрязнения боковой поверхности автобуса благодаря использованию облицовки колеса

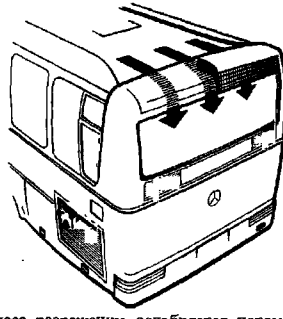


Рис. 8.49. Направляющее воздух устройство, защищающее от загрязнения стекло задка

Скруглением кромок передка автобуса можно полностью уберечь от загрязнения зону боковых стекол (рис. 8.47).

Выброс воды из-под арок колес можно уменьшить с помощью эластичного фартука, располагающегося перед передней осью поперечно по всей ширине автобуса и отстоящего от поверхности дороги на 10 см. Благодаря возникающему позади фартука и распространяющемуся в арку колеса разрежению ослабляется поток, вырывающийся из-под арки наружу.

В качестве другого мероприятия, направленного на уменьшение загрязнения, можно назвать облицовку колеса, представляющую собой кожух, крепящийся к ступице колеса и закрывающий колесо сверху вплоть до нижней бортовой закраины обода. При этом выброс грязной воды происходит только в самой нижней зоне боковой поверхности (рис. 8.48).

На автобусах очень сильно и гораздо быстрее по сравнению с другими поверхностями загрязняется стекло задка и соответственно задняя торцовая поверхность. Благодаря расположению на краю крыши направляющего воздух устройства удается направить поток с крыши таким образом, чтобы он оттеснял содержащий частички грязи поток вихревого следа от поверхности стекла (рис. 8.49).

Уменьшение загрязнения грузового автомобиля. Общепринятые в настоящее время брызговики колес на грузовом автомобиле вследствие относительно большого расстояния от поверхности дороги до нижней кромки в задней части брызговика не в полной мере выполняют свои функции по ограничению разбрызгивания и задержанию отбрасываемой назад воды.

На рис. 8.50 показана предлагаемая Брауном [8.24] конструкция брызговика колеса, оптимизированная в отношении уменьшения разбрызгивания отбрасываемой колесом воды. Внутренняя, хорошо смачиваемая поверхность брызговика имеет такие размеры, чтобы по возможности охватить весь диапазон углов отбрасывания воды. Вдоль всего брызговика выполнен желобок с необходимой площадью поперечного сечения. В него собирается отбрасываемая шиной вода и направляется по кратчайшему пути в сторону центра автомобиля, где в местах меньшей скорости потока по возможности закрытой струйкой стекает на дорогу. Улучшенная облицовка колеса представлена на рис. 8.51. Брызги воды непосредственно позади опорной поверхности колеса, которые не могут

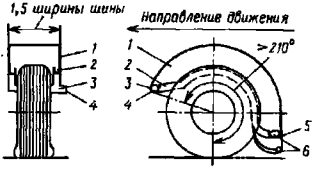


Рис. 8,50. Брызговик колеса [8.24]:
1 – жесткое крыло; *2* – накопительный желобок; *3* – водосточный желобок; *4* – переднее сточное отверстие; *5* – фартук брызговика; *6* – заднее сточное отверстие

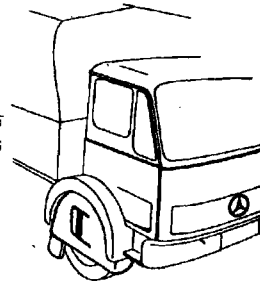


Рис. 8.51. Облицовка колеса с воздухопроницаемым грязеуловителем

улавливаться облицовкой колеса, задерживаются эластичным, воздухопроницаемым и крупнопористым грязеуловителем, расположенным в задней части арки колеса. За счет этого уменьшается влияние формы автомобиля, скорости движения, шин и поверхности дороги на степень загрязненности автомобиля. Мероприятия, направленные на уменьшение самозагрязнения грузовых автомобилей, одновременно служат и уменьшению забрызгивания следующих сзади автомобилей. Если вслед за грузовым автомобилем следует легковой и плотность движения велика, то отбрасываемая грузовым автомобилем вода попадает в область ветрового стекла легкового автомобиля, и этим аспектом безопасности пренебрегать нельзя. Эффективность различных конструкций брызговиков колес и облицовок шасси грузовых автомобилей в отношении забрызгивания следующего сзади легкового автомобиля была исследована Яманакой и Нагайке [8.25].

Количественная оценка степени забрызгивания грязной водой сзади идущего легкового автомобиля осуществлялась замером количества грязной воды, улавливаемой пластиной площадью 0,2 м^2, расположенной перед легковым автомобилем примерно на высоте глаз водителя. Качественная оценка осуществлялась частотой работы стеклоочистителя, необходимой для обеспечения безопасности движения. На рис. 8.52 показано влияние различных мероприятий, реализуемых на грузовом автомобиле, на загрязнение следующего сзади легкового автомобиля в зависимости от скорости движения. На рис. 8.53 можно увидеть, какое влияние на загрязнение следующего сзади легкового автомобиля оказывает расстояние между автомобилями.

Однако внедрение описанных выше мероприятий влечет за собой целый ряд отрицательных моментов. Это прежде всего повышение конструктивных затрат (вес, стоимость), снижение проходимости, необходимость дополнительного охлаждения шин и тормозов, скопление грязи, снега, включая обледенение. Поэтому, несмотря на прилагаемые усилия, очень трудно найти приемлемый компромисс.

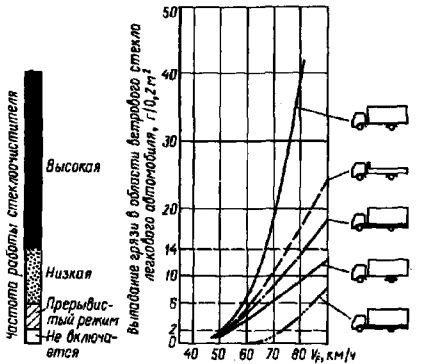


Рис. 8.52. Влияние мероприятий, реализуемых на грузовом автомобиле, на загрязнение следующего за ним легкового автомобиля (дистанция между автомобилями 10 м) [8.25]

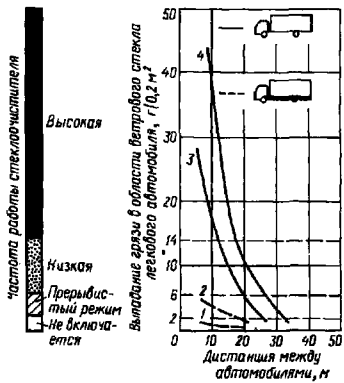


Рис. 8.53. Влияние облицовки шасси, установленной на грузовом автомобиле, на загрязнение следующего за ним легкового автомобиля [8.25]:
1 – грузовой автомобиль с облицовкой, скорость движения 70 км/ч; *2* – грузовой автомобиль с облицовкой, скорость движения 80 км/ч; *3* – грузовой автомобиль без облицовки, скорость движения 70 км/ч; *4* – грузовой автомобиль без облицовки, скорость движения 80 км/ч. Толщина слоя воды на поверхности дороги 2,36 мм

8.7. ОБОЗНАЧЕНИЯ

F – площадь лобового сопротивления автомобиля;
$F_{авт}$ – площадь лобового сопротивления автобуса, рис. 8.39;
$F_{тун}$ – площадь поперечного сечения туннеля, рис. 8.39;
R – радиус, рис. 8.30, 8.31;
Re – число Рейнольдса, рис. 8.12;
T – тангенциальная сила, рис. 8.10;
W – сила сопротивления воздуха;
a – линейный размер, характеризующий положение желобка крыши, рис. 8.32;
b – ширина автомобиля;
c_p – коэффициент давления, уравнение (2.8);
c_T – коэффициент тангенциальной силы, рис. 8.10;
c_W – коэффициент аэродинамического сопротивления
c_{W}^{*} – усредненный коэффициент аэродинамического сопротивления, рис. 8.10;
h – выступание кузова относительно крыши кабины, рис. 8.16, 8.18;
l – длина автомобиля;
s – расстояние между кабиной водителя и кузовом, рис. 8.15, 8.16, 8.18;
V_A – скорость набегающего потока;
V_F – скорость движения автомобиля;
V_S – скорость бокового ветра;
x – текущее значение расстояния, проходимого телом в туннеле, рис. 8.39;
β – угол скоса потока;
δ – угол натекания бокового ветра;
ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха;
φ – коэффициент блокировки, рис. 8.39.

9. ОХЛАЖДЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯ

Клаус-Дитер Эмменталь

9.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существенная часть содержащейся в топливе энергии в процессе работы двигателя преобразуется в теплоту. Этот тепловой поток частично может использоваться для отопления салона автомобиля, но наибольшая его часть для обеспечения надежной работы двигателя должна отводиться в окружающую среду. Отвод теплоты может осуществляться непосредственно воздухом при воздушной системе охлаждения. В этом случае поток охлаждающего воздуха, возникающий при движении автомобиля или создаваемый вентилятором, непосредственно омывает ребра головки и блока цилиндров. Однако по ряду причин почти на всех легковых автомобилях в настоящее время применяется водяная система охлаждения, которая также предусматривает отвод теплоты воздухом, но не непосредственно от двигателя, а от промежуточного теплоносителя – охлаждающей двигатель жидкости. Поэтому ниже речь идет лишь о проблеме водяной системы охлаждения легковых автомобилей.

В последнее время требования, предъявляемые к таким системам, существенно изменились. В условиях возросшей плотности движения на автомобильных дорогах возникла необходимость создания компактных автомобилей с высокой мощностью двигателя, которые, кроме того,

должны удовлетворять всем существующим требованиям безопасности в отношении внешнего формообразования и силовой схемы кузова. Перед конструктором, занимающимся проектированием системы охлаждения, возникает проблема отвода от двигателя относительно большого теплового потока охлаждающей жидкости в окружающий воздух с помощью радиатора, для увеличения размеров которого в передке автомобиля в связи с указанной выше тенденцией к компактности автомобиля едва ли можно найти место. Используемый в настоящее время для размещения двигателя и радиатора объем подкапотного пространства в передней части автомобиля в дальнейшем может стать еще меньше из-за необходимости установки дополнительных узлов и агрегатов, используемых при доводке автомобиля с целью удовлетворения требований различных рынков сбыта. Кроме того, требования обзорности и дизайна кузова привели к появлению сильно спускающихся капотов двигателя, поэтому уменьшились отверстия для забора воздуха в систему охлаждения в районе передка автомобиля и возросли требования к параметрам вентилятора радиатора (см., например, рис. 1.5). Компоновочные соображения часто обусловливают применение вентилятора с приводом от электродвигателя, мощность которого ограничивается мощностью электрической системы.

Перед выбором параметров и конструированием системы охлаждения необходимо обратить внимание на следующее: дизайнерское решение и схема расположения двигателя определяют площади сечений, используемых для потока охлаждающего воздуха, и максимальный конструкторский объем для размещения радиатора и вентилятора в передке автомобиля. По мощности двигателя можно сделать вывод о величине теплового потока, который необходимо отвести охлаждающей жидкостью, по графику мощностного баланса – об обтекающем воздушном потоке. Следует стремиться к возможно меньшей мощности вентилятора, принимая во внимание необходимость снижения расхода топлива, уровня шума и допустимую предельную нагрузку электрооборудования при использовании для привода вентилятора электромотора. При этом необходимо провести тщательное технико-экономическое сравнение затрат, связанных с увеличением радиатора, с одной стороны, и повышением технических характеристик вентилятора и его привода, с другой.

Решение вопроса передачи теплоты от охлаждающей жидкости в окружающий воздух связано с выбором конструкции и размеров радиатора, водяного насоса и вентилятора, причем особое значение имеют два параметра: размеры радиатора и производительность вентилятора. Эти параметры, а также данные о потоке охлаждающей жидкости могут быть получены тремя путями: экспериментально, расчетом и экспериментально-расчетным путем.

Определение необходимых параметров системы охлаждения чисто экспериментальным путем требует много времени и больших затрат. Существующие теоретические методы определения этих параметров недостаточно точны. Поэтому при поиске технических решений чаще всего

используют расчетные методы, базирующиеся на экспериментальных исходных данных, и они настолько точны, что уже на стадии проектирования позволяют оценить влияние любых параметров на размеры радиатора, вентилятора и водяного насоса.

Ниже рассматриваются важнейшие проблемы теплопередачи, гидро- и аэродинамики водяной системы охлаждения легковых автомобилей. Все приведенные ниже соотношения относятся к установившемуся режиму работы системы охлаждения. Проблема передачи теплоты на холостом ходу, а также такие конструктивные детали, как термостат, шланги и т.д. не рассматриваются.

9.2. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

Основное назначение системы охлаждения, состоящей из радиатора, вентилятора и водяного насоса, – обеспечить отвод выделяющейся при работе двигателя теплоты в окружающую среду. При этом отдельные узлы по своим размерам, ориентировочно принятые с учетом предполагаемого для их размещения пространства, должны быть согласованы между собой таким образом, чтобы температура охлаждающей жидкости при всех встречающихся в эксплуатации режимах работы была ниже температуры ее вскипания. На рис. 9.1 для автомобиля среднего класса представлена полученная эмпирическим путем зависимость температуры охлаждающей жидкости на входе в радиатор от скорости движения автомобиля. На приведенных графиках видно, что с увеличением скорости движения температура падает; наиболее высокое значение имеет место на первой передаче, где она приближается к температуре вскипания.

Обеспечение заданных пределов возможного изменения температуры в процессе эксплуатации для автомобилей одинакового класса может выполняться с помощью совершенно различных конструктивных решений. На рис. 9.2 в качестве примера сравниваются радиаторы и вентиляторы автомобилей А и Б. Приблизительно при одинаковом занимаемом пространстве в одном случае применяется радиатор с крупными ячейками и вентилятор с приводом от коленчатого вала двигателя, во втором случае ячейки радиатора очень мелкие и применяется электровентилятор.

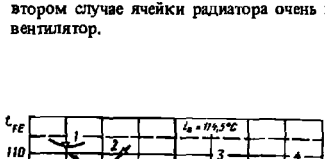


Рис. 9.1. Изменение температуры охлаждающей жидкости на входе в радиатор для легкового автомобиля с рабочим объемом двигателя 1,6 л в зависимости от скорости его движения, данные измерений в аэродинамической трубе [9.18]; T_{LE} = 40°C, педаль акселератора прожата полностью: *1* – 1-я передача; *2* – 2-я передача; *3* – 3-я передача; *4* – 4-я передача

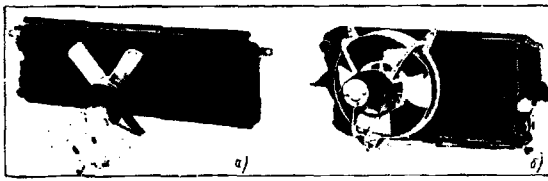


Рис. 9.2. Конструкция радиатора и вентилятора для автомобилей А (*а*) и Б (*б*), имеющих одинаковый рабочий объем двигателя 1,6 л и одинаковую мощность 85 – 90 л. с. (1 л. с. = 0,735 кВт) [9.18]. Автомобиль А: коэффициент местного сопротивления $\xi_k = 3$; коэффициент теплопередачи на единицу лобовой поверхности радиатора 6,5 кВт/м²/°С; материал радиатора – медь; латунь; мощность, потребляемая вентилятором 1,1, кВт; площадь лобовой поверхности радиатора 0,15 м². Автомобиль Б: коэффициент местного сопротивления $\xi_k = 6$; коэффициент теплопередачи на единицу лобовой поверхности радиатора 10 кВт/м²/°С; материал радиатора – сталь; мощность, потребляемая вентилятором 0,08 кВт; площадь лобовой поверхности радиатора 0,11 м²

Система охлаждения двигателя наряду с основной функцией охлаждения при всех практически встречающихся режимах эксплуатации должна удовлетворять следующим условиям:

иметь возможно меньшую стоимость изготовления системы;

иметь по возможности минимальную массу;

должна быть минимальной доля эксплуатационных затрат, приходящаяся на систему охлаждения (малая мощность, потребляемая вентилятором; низкое значение коэффициента сопротивления воздуха системы; удобство обслуживания);

не должна быть источником сильного шума, например, вследствие высоких угловых скоростей вентилятора.

На рис. 9.3, например, показано качественное изменение стоимости изготовления, эксплуатационных затрат и уровня шума в зависимости от площади лобовой поверхности радиатора. С увеличением площади лобовой поверхности радиатора уровень шума уменьшается, так как для отвода необходимого количества теплоты уменьшается требуемая мощность вентилятора, и увеличивается доля теплоты, отводимой обтекающим автомобиль воздушным потоком. Минимальные затраты на из-

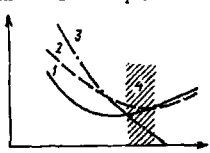


Рис. 9.3. Качественные зависимости показателей водяной системы охлаждения от площади лобового сопротивления радиатора [9.18]: *1* – стоимость изготовления; *2* – эксплуатационные затраты; *3* – шум от работы вентилятора; *4* – оптимум

готовление определяются балансом стоимости вентилятора, зависящей от его мощности, с одной стороны, и стоимости радиатора, зависящей от его размеров, с другой стороны. Минимум эксплуатационных затрат определяется балансом между мощностью, потребляемой вентилятором, с одной стороны, и мощностью, затрачиваемой на преодоление аэродинамического сопротивления радиатора, зависящей от его размеров, а также конструкции, с другой стороны. Оптимум заключается внутри заштрихованной зоны (см. рис. 9.3).

Для рассматриваемого в каждом конкретном случае автомобиля предельные значения отдельных параметров для системы охлаждения приведены в *каталоге*.

Далее система охлаждения дорабатывается в отношении обеспечения необходимых температуры,, мощности, потребляемой вентилятором, стоимости изготовления и веса.

9.2.1. РАСЧЕТНЫЕ ТОЧКИ НА ГРАФИКЕ МОЩНОСТНОГО БАЛАНСА

Требование обеспечения движения с установившимся тепловым режимом работы двигателя во всех точках графика мощностного баланса на практике привело бы к очень большим, а значит, и дорогостоящим радиаторам и к большим мощностям, потребляемым вентилятором. Экстремальные подъемы в области свыше 20 %, которые автомобиль в соответствии с его мощностным балансом может преодолеть, встречаются не так уж часто, и они настолько коротки, что при определении параметров системы охлаждения значения не имеют. Были проведены исследования (см. работу Гааса [9.1]), целью которых было определение репрезентативных расчетных точек, таких, чтобы охватить все практически встречающиеся в отношении охлаждения режимы движения. На основании наблюдения условий движения транспорта, проводившегося в течение длительного времени, были выделены две рабочие точки, для которых и определяются параметры системы охлаждения.

1. Автомобиль должен преодолевать 10 %-ный подъем со скоростью 25 км/ч при полной нагрузке и максимальном весе прицепа при непрерывном режиме работы.

2. Автомобиль должен иметь возможность двигаться с указанной в его технической характеристике максимальной скоростью без ограничения по времени.

Дополнительно к указанным условиям вводятся следующие ограничения: разность температур воздуха и воды на входе в радиатор при движении на подъем и движении с максимальной скоростью не должна превышать соответственно 80 и 65 °С. Указанные условия в полной мере отражают *европейские* условия эксплуатации при использовании общепринятых в настоящее время систем охлаждения, теплоносителем в которых является циркулирующий под давлением антифриз. Такие жидкости описаны в [9.2].

На рис. 9.4, например, показан график мощностного баланса автомобиля А с двигателем мощностью 66 кВт, предназначенного для эксплуа-

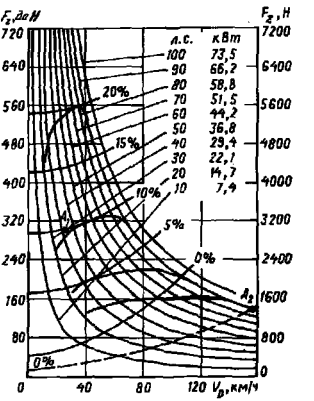


Рис. 9.4. Расчетные точки для системы охлаждения на графике мощностного баланса автомобиля [9.18]. Данные автомобиля: вес с прицепом G = 2510 кг; площадь лобового сопротивления A = 1,94 м^2; c_W = 1,5; $c_W A$ = 2,91 м^2; NE_{max} = 66 кВт при 5200 мин$^{-1}$; шины 165SR13; R_{dyn} = 300 мм; передаточное число главной передачи i_A = 35:8=4,375; —— – с прицепом; – – – – без прицепа

тации с прицепом; при определении размеров радиатора дополнительно была учтена кривая сопротивления для движения без прицепа по ровной местности; расчетные точки обозначены A_1 и A_2. Значение коэффициента c_W было принято по Бове [9.3], причем в качестве характерной площади поперечного сечения использовалось поперечное сечение автопоезда (автомобиля с прицепом). Из рис. 9.4 видно, что в случае *движения на подъем* (A_1) необходима мощность примерно 23 кВт, которая на первой передаче достигается при частичной нагрузке двигателя. В расчетной точке A_2 мощность составляет 66 кВт.

9.2.2. ТЕПЛОВОЙ ПОТОК ОТ ДВИГАТЕЛЯ К ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

После того как в соответствии с изложенным в п. 9.2.1 установлена требуемая мощность двигателя, необходимая для движения в условиях, определяемых расчетными точками графика мощностного баланса, можно перейти к рассмотрению теплового потока, отводимого от двигателя охлаждающей жидкостью. Неоднократно предпринимались попытки рассчитать этот тепловой поток, исходя из грубого предположения, что он составляет 30 % энергии, выделяемой при сжигании топлива. Так, например, Друкер в [9.4] приводит уравнение для расчета теплового потока, отводимого в охлаждающую жидкость. Можно вспомнить, также работу Крамера [9.5] о влиянии термического коэффициента полезного действия двигателя на тепловой поток, отводимый охлаждающей жидкостью. Но на величину теплового потока оказывают влияние различные конструктивные особенности двигателя, например конструктивные особенности головки цилиндров, поэтому практически без точных измерений на образце двигателя на испытательном стенде при определении оптимальных параметров системы охлаждения не обойтись. На рис. 9.5 для различных двигателей представлено измерение теплового потока, отводимого охлаждающей жидкостью, отнесенного к мощности

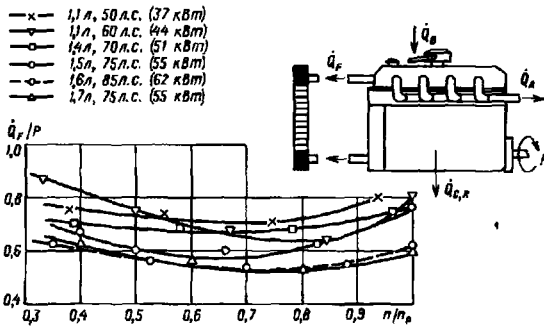


Рис. 9.5. Тепловой поток, отводимый охлаждающей жидкостью, для различных двигателей при полной нагрузке [9.24]

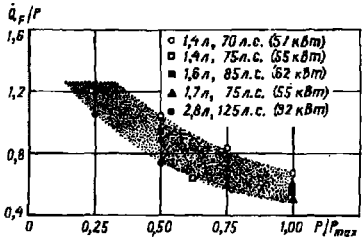


Рис. 9.6. Тепловой поток, отводимый охлаждающей жидкостью, для различных двигателей при частичной нагрузке [9.24]; частота вращения двигателя $n = 3\,000$ мин$^{-1}$

двигателя при полной нагрузке в зависимости от частоты вращения двигателя, отнесенной к номинальной частоте вращения (по Эмменталю и Гухо [9.24]).

Особый интерес представляют следующие выводы.

1. Зависимость теплового потока от частоты вращения выражена очень слабо.

2. Отношение величины теплового потока к мощности двигателя при полной нагрузке всегда меньше единицы и составляет 0,5—0,7.

3. Отношение величины теплового потока к мощности уменьшается с увеличением рабочего объема двигателя при одном и том же числе цилиндров, что обусловлено различным приростом объема камер сгорания и их поверхности.

Для определения параметров радиатора при *движении на подъем* необходимо знать величину теплового потока двигателя при частичной нагрузке. На рис. 9.6 представлены зависимости теплового потока от нагрузки двигателя, полученные Гаасом [9.1] для ряда четырехцилинд-

ровых и одного шестицилиндрового двигателя рабочим объемом 2,8 л. Из приведенных результатов хорошо видно, что отношение величины теплового потока к мощности с уменьшением отношения мощностей P/P_{max} возрастает до значения, большего единицы.

9.3. ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

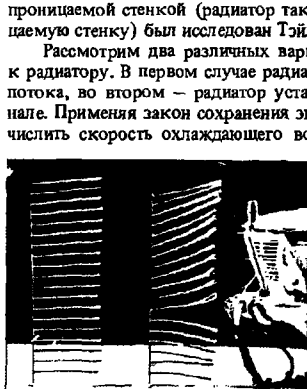
9.3.1. ПОСТУПЛЕНИЕ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА

Конструктивные возможности для установки радиатора в автомобиле весьма неблагоприятны (см. работу Линке [9.6]): пространство определяется и ограничивается поперечиной, двигателем и вспомогательными агрегатами; поток воздуха сужается из-за элементов оформления кузова и дополнительных фар. На рис. 9.7 (по Гухо [9.25]) показано, что набегающий поток (хотя об этом зачастую умалчивают) натекает на решетку радиатора под углом относительно полотна дороги, а не параллельно ему. При проектировании решетки радиатора необходимо это принимать во внимание. На рис. 9.8 показано, что коэффициент потерь давления (называемый также коэффициентом местного сопротивления) ζ_G решетки радиатора очень сильно зависит от угла установки α_G [9.25]. Имеет силу следующее соотношение:

$$\zeta_G = \Delta p_G / [(\rho/2) v_G^2]. \qquad (9.1)$$

Свободный, т.е. не направляемый каким-либо устройством, поток перед проницаемой стенкой (радиатор также можно рассматривать как проницаемую стенку) был исследован Тэйлором [9.7].

Рассмотрим два различных варианта подачи охлаждающего воздуха к радиатору. В первом случае радиатор располагается в поле свободного потока, во втором — радиатор установлен в направляющем воздух канале. Применяя закон сохранения энергии для обоих случаев можно вычислить скорость охлаждающего воздуха как функцию коэффициента



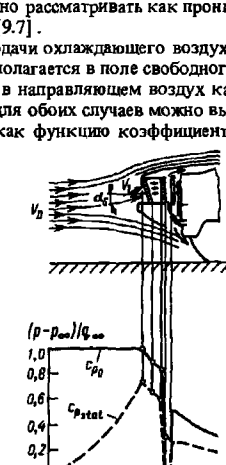


Рис. 9.7. Поток охлаждающего воздуха и распределение его давления по трассе системы охлаждения двигателя легкового автомобиля [9.25]

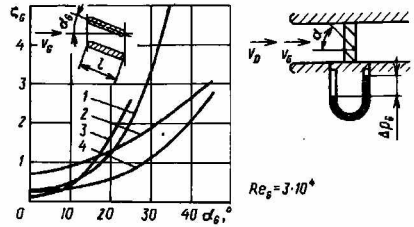


Рис. 9.8. Зависимость коэффициента местного сопротивления ζ_G различных решеток радиатора от угла установки направляющих пластин решетки α_G [9.25]. Автомобили: *1* – "Фольксваген *К*-70"; *2* – "Рено 16"; *3* – "*NSU Ro* 80"; *4* – "*BMW* 2500"

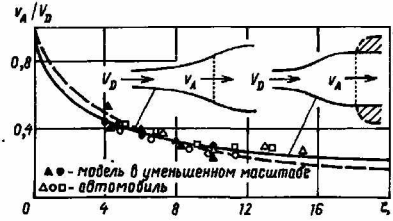


Рис. 9.9. Изменение соотношения между скоростями охлаждающего воздуха на входе в радиатор и набегающего при движении потока при различных коэффициентах сопротивления системы охлаждения [9.24]

сопротивления направляющего воздух канала ζ_t и скорости движения. При этом принимается, что упомянутый выше коэффициент учитывает все источники потери давления, имеющие место при прохождении воздуха в канале и через радиатор. На рис. 9.9 представлены графики функций:

$$v_A/v_D = 1/[1 + (\zeta_t/4)]; \qquad (9.2)$$

$$v_A/v_D = 1/\sqrt{1 + \zeta_t}. \qquad (9.3)$$

Случай свободного обтекания соответствует свободной установке масляного радиатора на гоночном автомобиле ($\zeta_t = \zeta_k$), направленное обтекание хорошо отражает расположение радиатора на легковом автомобиле. Отдельные элементы, такие, как радиатор, решетка радиатора, воздухоотвод и моторный отсек, вносят различный вклад в потерю давления в направляющей воздух системе. Предельные значения составляют: $\zeta_t = 4$ для хорошо проницаемых систем и $\zeta_t = 8$ для плохо проницаемых систем. Из рис. 9.9 видно, что лишь при очень малых значениях коэффициента ζ_t, имеющих место при установке радиатора, обеспечивающей его свободное обтекание, можно получить высокие скорости охлаждающего воздуха.

Система охлаждения должна по возможности оказывать минимальное влияние на аэродинамическое сопротивление автомобиля (см. п. 4.3.2). Гернером [9.8] были проведены исследования, устанавливающие зависимость между дополнительным приращением аэродинамического сопротивления автомобиля и потерей давления в системе ох-

expert22 для http://rutracker.org

лаждения двигателя, вызывающей это приращение. Предполагая, что охлаждающий воздух поступает в систему охлаждения и выходит из нее с одной и той же скоростью и что статическое давление в месте выхода воздуха равно давлению окружающей среды, было получено следующее соотношение для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления системы охлаждения в зависимости от характеризующего ее коэффициента сопротивления:

$$c_{WK} = 2\left\{[1/\sqrt{1+\zeta_t}] - [1/(1+\zeta_t)]\right\}. \qquad (9.4)$$

Это уравнение относится ко всему автомобилю. По коэффициенту сопротивления воздуха c_{WK} системы охлаждения и отношению площади лобовой поверхности радиатора к площади лобового сопротивления автомобиля A/A_F можно вычислить долю системы охлаждения в общем коэффициенте сопротивления автомобиля:

$$\Delta c_{WK} = c_{WK}\,(A/A_F). \qquad (9.5)$$

Например, при очень хорошо проницаемой системе охлаждения ($\zeta_t = 3$) и отношении площади лобовой поверхности радиатора к площади поперечного сечения автомобиля $A/A_F = 0{,}1$ согласно уравнениям (9.4) и (9.5) доля системы охлаждения в коэффициенте аэродинамического сопротивления автомобиля составляет $\Delta c_{WK} = 0{,}05$. Для большинства современных автомобилей значение коэффициента аэродинамического сопротивления $0{,}4 \leqslant c_W \leqslant 0{,}5$. Таким образом, в значении c_W на долю потока, протекающего через систему охлаждения, приходится примерно 10 % для очень хорошо проницаемых систем.

Определение доли аэродинамического сопротивления, возникающего вследствие протекания воздуха через систему охлаждения, по уравнениям (9.4) и (9.5) следует считать довольно приблизительным, поскольку не учитывается интерференционное сопротивление, которое имеет место, например, из-за изменения потока, обтекающего передок автомобиля, вследствие протекания воздуха через систему охлаждения. Исследование влияния спойлеров передка на условия протекания воздуха в моторном отсеке проведены Шенкелем [9.9]. Некоторую информацию по этому вопросу можно получить из п.п. 4.3.2. и 4.5.3.

9.3.2. РАДИАТОРЫ ДЛЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

На автомобилях в настоящее время применяются исключительно радиаторы с перекрестным направлением потоков воздуха и воды. В отношении применяемого материала различают радиаторы из тяжелых металлов (сталь, латунь, медь) и радиаторы из легкого металла (алюминий). На рис. 9.10 представлены различные конструкции алюминиевых радиаторов [9.26]. Речь идет о следующих конструкциях: паяный радиатор фирмы "Фольксваген", сборный радиатор "*VW* Софика", радиатор с клеевой сердцевиной "*AED* Коврад", многослойный радиатор "Унион Карбид", сваренный лазером, радиатор с ребристо-чешуйчатой сердцевиной фирмы "Шмеле".

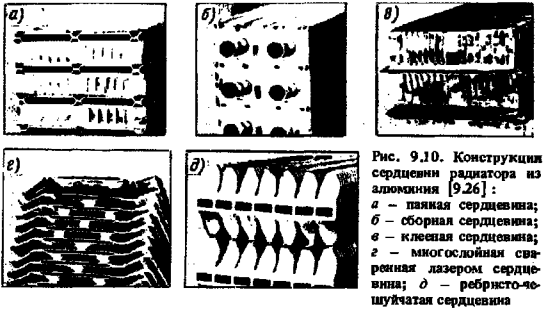


Рис. 9.10. Конструкция сердцевин радиатора из алюминия [9.26]:
а – паяная сердцевина;
б – сборная сердцевина;
в – клеевая сердцевина;
г – многослойная сваренная лазером сердцевина; *д* – ребристо-чешуйчатая сердцевина

При разработке форм сердцевин автомобильных радиаторов прежде всего ориентируются на малую стоимость и небольшую мощность устанавливаемого вентилятора. Из множества работ, посвященных исследованию радиаторов, необходимо упомянуть о работах Дэна [9.10], Лоренца [9.11], а также Кэйса и Лондона [9.12].

9.3.3. ВЕНТИЛЯТОР РАДИАТОРА

Практически на всех автомобилях в системе охлаждения двигателя для увеличения объемного расхода охлаждающего воздуха используются осевые вентиляторы. При выборе вентилятора и его привода первоочередное значение придается малой стоимости и малой потребляемой мощности, а также низкому уровню шума. Удачным решением с точки

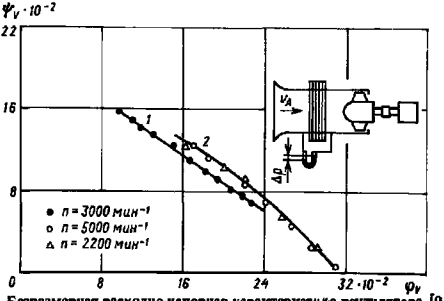


Рис. 9.11. Безразмерная расходно-напорная характеристика вентилятора [9.18]:
1 – автомобиль А, диаметр крыльчатки вентилятора 250 мм; *2* – автомобиль Б, диаметр крыльчатки вентилятора 355 мм

зрения уменьшения стоимости является привод вентилятора от коленчатого вала двигателя. Но наилучшим образом приспособить вентилятор к условиям эксплуатации при сильно изменяющихся нагрузках можно при наличии электропривода.

Для выбора параметров и конструирования системы охлаждения должны быть известны характеристики предполагаемого для использования вентилятора. Целесообразнее всего характеристику задавать в форме зависимости коэффициента давления, создаваемого вентилятором, ψ от коэффициента расхода φ^*, так как в этом случае характеристика вентилятора сводится к нескольким кривым (см. рис. 9.11).

Из множества работ, посвященных вентиляторам системы охлаждения, необходимо выделить труды Эккерта [9.13, 9.14, 9.15] и Марчиновского [9.16].

9.3.4. ВОДЯНОЙ НАСОС

Для создания циркуляции потока жидкости в системах охлаждения автомобилей применяются исключительно радиальные насосы. И здесь прежде всего необходимо ориентироваться на малую стоимость. Привод насосов осуществляется от коленчатого вала двигателя. По водяным насосам можно назвать книгу Пфляйдерера [9.17]. Безразмерная расходно-напорная характеристика водяного насоса приведена на рис. 9.12.

9.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Для определения параметров системы охлаждения необходимо иметь данные о тепловом потоке двигателя, скорости движения автомобиля (график мощностного баланса) и данные о расходе охлаждающей жидкости и добавках, содержащихся в ней (например, добавка этиленгликоля). Методы определения параметров и расчета системы охлаждения описаны Эмменталем [9.18].

9.4.1. РАДИАТОР КАК ТЕПЛООБМЕННИК С ПЕРЕКРЕСТНЫМ ТОКОМ

Закономерности передачи теплоты при перекрестном токе изложены Нуссельтом [9.19]. Приведение этих зависимостей к удобному для прак-

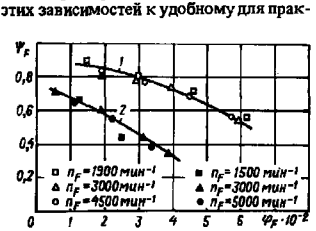


Рис. 9.12. Безразмерная расходно-напорная характеристика водяного насоса [9.18]:
1 – автомобиль А; *2* – автомобиль Б

* Безразмерная расходно-напорная характеристика. – *Прим. ред. пер.*

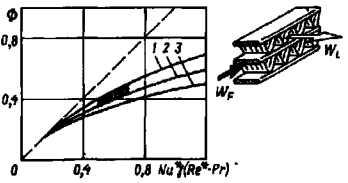


Рис. 9.13. Коэффициент эффективности теплообменника с перекрестным током: *1* – $W_L/W_F = 0$; *2* – $W_L/W_F = 0{,}5$; *3* – $W_L/W_F = 1$

тического использования виду было выполнено Босньяковиком и его учениками [9.20] в форме зависимости *безразмерной удельной тепловой нагрузки* радиатора* Φ от *эквивалента охлаждающей жидкости* W_F, *эквивалента воздуха* W_L и произведения коэффициента теплопередачи на площадь поверхности, через которую передается теплота. Так как при таком воспроизведении имеет значение не только сама величина коэффициента теплопередачи, но и уже упомянутое выше его произведение на площадь поверхности, через которую происходит теплообмен, то коэффициент теплопередачи можно отнести к любой другой поверхности радиатора. Поскольку решающее значение в автомобиле имеет площадь лобовой поверхности радиатора, которая, кроме того, в отличие от площади поверхности внутренней сердцевины радиатора может быть точно измерена, то именно ее принимают в качестве базовой поверхности. Благодаря этому погрешности, связанные с неточностью измерения площади, очень малы, и ими можно пренебречь. Недостатком является то, что коэффициент теплопередачи k_A в общем случае относится к числу определяемых параметров теплообменника, но в случае, когда речь идет об использовании существующих конструкций сердцевины радиатора, его можно принимать как заданный показатель. На рис. 9.13 приведена функция

$$\Phi\,(k_A A/W_L, W_L/W_F) = (t_{LE} - t_{LA})/(t_{LE} - t_{FE}) \qquad (9.6)$$

для случая, когда поток охлаждающей жидкости находится в равновесном состоянии в отношении эпюры температур по каждому элементу теплообменника (одностороннее перемешивание, охлаждающая жидкость хорошо перемешивается в направлении, перпендикулярном к направлению ее течения). Безразмерная удельная тепловая нагрузка Φ, достигающая своего верхнего предельного значения, равного единице, в том случае, когда воздух покидает радиатор с температурой, равной температуре охлаждающей жидкости на входе в радиатор, может принимать значение $\Phi = 0{,}8$ только при очень плохо проницаемых радиаторах и малых скоростях воздуха (например, движение на подъем). Отношение эквивалента воздуха к эквиваленту охлаждающей жидкости изменяется в пределах $0{,}05 \leqslant W_L/W_F \leqslant 0{,}5$. В публикациях Босньяковика [9.20]

*Часто эту характеристику называют также коэффициентом эффективности. – *Прим. ред. пер.*

для функции $\Phi(k_A A/W_L,\ W_L/W_F)$ приводится уже выведенное уравнение, которое далее используется для расчета передачи теплоты

$$\Phi = (W_F/W_L)\left\{1 - \exp\left[(-W_L/W_F)(1 - \exp(-k_A A/W_L))\right]\right\}. \quad (9.7)$$

При пользовании уравнением (9.7) должен быть известен коэффициент теплопередачи k_A радиатора. Пока рассматриваются металлические конструкции радиаторов термическое сопротивление разделительной стенки между потоками воздуха и охлаждающей жидкости имеет второстепенное значение; коэффициент теплопередачи в основном является функцией коэффициентов теплоотдачи от жидкости к стенке α_F и от стенки к воздуху α_L.

Уже неоднократно предпринимались попытки определить расчетным путем коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху. Для этого необходимо было прежде всего провести исследования потока внутри сердцевины радиатора; по этому вопросу можно назвать работы Бове [9.21] и Пэйша [9.22]. Более поздние результаты измерений, проведенных на моделях сердцевин радиаторов в увеличенном масштабе, приведены в работе Вонга и Смита [9.23].

Все существующие методы теплотехнического и гидравлического расчета радиаторов с целью определения их размеров и вычисления эксплуатационных показателей не достаточно точны. К тому же, для применяемых в настоящее время компактных радиаторов, в водяных трубках которых для улучшения отдачи теплоты единицей площади лобовой поверхности иногда предусматриваются турбулизаторы, необходимо знать коэффициент теплоотдачи со стороны воды к стенке α_F, от которого, как будет показано ниже, существенно зависит значение коэффициента теплопередачи в процессе эксплуатации автомобиля. Для расчета коэффициента теплоотдачи необходимо иметь точные результаты измерений характеристик радиатора.

9.4.2. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАТОРА

Определить характеристики радиатора можно с помощью испытательного стенда, показанного на рис. 9.14. Речь идет о малой аэродинамической трубе. На указанном стенде измеряется нагрев воздушного потока,

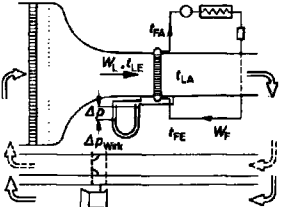


Рис. 9.14. Схематичное изображение испытательного стенда для измерения характеристик радиатора [9.25]. Воздушный контур: мощность привода P = 40 кВт; рабочая часть v_{max} = = 30 м/с, A = 0,115 м^2; сужение 11:1; степень турбулентности 0,5%. Водяной контур: мощность нагрева Q = 75 кВт; объемный расход воды V_F = 250 л/мин

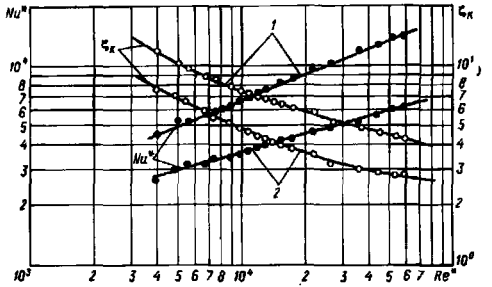


Рис. 9.15. Характеристики теплопередачи и потери давления воздушным потоком для двух различных конструкций сердцевин радиатора [9.18], $t_F = 90°$ С:
1 – сердцевина А, $L = 0{,}032$; *2* – сердцевина Б, $L = 0{,}035$

проходящего через радиатор, измеряется охлаждение циркулирующей в радиаторе жидкости при различных ее расходах, определяются потери давления воздушного потока и охлаждающей жидкости.

Результаты измерений приводятся в безразмерной форме. На рис. 9.15 представлены теплопередача и потеря давления воздушным потоком для двух различных конструкций сердцевин в зависимости от числа Рейнольдса, определяемого скоростью набегающего потока и толщиной *сердцевины радиатора*. Зависимость теплопередачи от скорости охлаждающей жидкости в трубках радиатора показана на рис. 9.16. Характер кривых позволяет сделать вывод о том, что зависимость теплопередачи от скорости охлаждающей жидкости наиболее сильно проявляется при высоких скоростях воздуха, проходящего через радиатор.



Рис. 9.16. Теплопередача сердцевины радиатора [9.18], $L = 0{,}032$

9.4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ РАДИАТОРА

При расчете радиатора следует принимать во внимание, что идеальный случай, когда по всей площади радиатора воздух проходит с одинаковой скоростью, на практике едва ли возможен. Так как зачастую отдельные участки поверхности радиатора закрыты бампером или элементами кузова, то необходимо считаться с неравномерной формой эпюры скоростей набегающего потока. Действие вентилятора распространяется на весь радиатор или только на его часть, т.е. составляющая эпюры скоростей, приходящаяся на вентилятор, изменяется тоже неравномерно.

В качестве исходной точки можно считать, что тепловой поток, отдаваемый двигателем в охлаждающую жидкость, известен в результате измерений (см. рис. 9.5 и 9.6); его можно записать в следующем виде

$$\dot{Q}_F = W_F (t_{FE} - t_{FA}). \tag{9.8}$$

Для выбранного диапазона уменьшения температуры охлаждающей жидкости в радиаторе $(t_{FE} - t_{FA})$ можно определить эквивалент охлаждающей жидкости W_F, а при известной удельной теплоемкости c_F охлаждающей жидкости можно определить ее объемный расход, обеспечиваемый насосом.

Для получения высокого значения безразмерной удельной тепловой нагрузки Ф радиатора (см. рис. 9.13), хороших коэффициентов теплоотдачи от головки и блока цилиндров к охлаждающей жидкости и от нее к стенкам радиатора, а также для обеспечения меньших тепловых напряжений в двигателе, на практике стремятся по возможности к меньшим перепадам температуры на входе и выходе из радиатора. Это достигается за счет большого расхода охлаждающей жидкости. С увеличением расхода охлаждающей жидкости, однако, сильно увеличивается мощность, потребляемая водяным насосом.

Тепловой поток, отводимый от двигателя, безразмерная удельная тепловая нагрузка радиатора, температуры воздуха и жидкости на входе в радиатор связаны между собой следующим соотношением:

$$\dot{Q}_F = W_L (t_{LE} - t_{FE}) \Phi. \tag{9.9}$$

Используя уравнения (9.6) и (9.7), можно записать:

$$\Phi = (t_{LE} - t_{LA})/(t_{LE} - t_{FE}) = (W_F/W_L) \left\{ 1 - \right.$$
$$\left. - \exp\left[(-W_L/W_F)(1 - \exp(-k_A A/W_L))\right] \right\}. \tag{9.10}$$

Для того чтобы воспользоваться уравнением (9.10) для дальнейших расчетов, из него необходимо исключить параметр t_{LA} (температура воздуха, выходящего из радиатора). Математическими преобразованиями уравнений (9.6), (9.7), (9.8) и (9.9) этот параметр можно исключить из рассматриваемого уравнения, в результате чего получим:

$$(t_{LE} - t_{FA})/(t_{LE} - t_{FE}) = \exp\left[(-W_L/W_F)(1 -\right.$$
$$\left. - \exp(-k_A A/W_L))\right]. \tag{9.11}$$

Решив уравнение (9.11) относительно величины t_{FA} (температура охлаждающей жидкости на выходе из радиатора), можно получить:

$$t_{FA} = t_{LE} - (t_{LE} - t_{FE}) \exp [(-W_L/W_F)(1 - \exp(-k_A A/W_L))]. \quad (9.12)$$

В уравнениях (9.8) и (9.12) известны следующие параметры и зависимости.

Уравнение (9.8):

$\dot{Q}_F$ – известна на основании измерений, проведенных на двигателе;

W_F – можно предварительно задаться этим параметром, уже задавшись расходом охлаждающей жидкости, и принимая во внимание зависимость ее теплоемкости от температуры; можно вычислить по заданному перепаду температур охлаждающей жидкости на входе и выходе из радиатора $(t_{FE} - t_{FA})$;

$(t_{FE} - t_{FA})$ – предварительно задается или может быть рассчитана по заданному эквиваленту охлаждающей жидкости.

Уравнение (9.12):

t_{LE} – задается максимальной температурой окружающей среды или температурой воздуха, выходящего из конденсатора климатической установки;

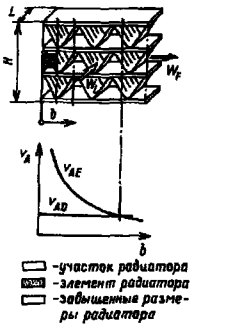
t_{FE} – задается расчетными критериями;

W_F – известна по уравнению (9.8);

k_A – известен по результатам измерения зависимости коэффициента теплопередачи от расхода охлаждающей жидкости и воздуха.

Определение численного значения уравнения (9.12) производится методом последовательных приближений. Для заданной площади лобовой поверхности радиатора A (при известной конструкции сердцевины) увеличивают значение эквивалента воздуха W_L до тех пор, пока не будет получено значение температуры охлаждающей жидкости на выходе из радиатора, соответствующее значению, принятому в уравнении (9.8) или определенному по этому уравнению. При расположении радиатора спереди, по крайней мере, часть эквивалента расхода воздуха покрывается скоростным напором обтекающего потока, остаток обеспечивается вентилятором радиатора.

Определение размеров радиатора осуществляется по общей схеме как представлено на рис. 9.17. Радиатор рассчитывается по участкам. Если набегающий поток неравномерный, то участки дополнительно разбиваются на более мелкие элементы, например на квадраты. Глубина блока L устанавливается выбором конструкции сердцевины. В рассматриваемом примере высота радиатора H пусть будет определяться конструктивными ограничивающими условиями. Расчет начинается с первого участка; при этом исходят из того, как будто бы он один обеспечивает отдачу теплоты. Скорость охлаждающего воздуха v_A шаг за шагом увеличивается до тех пор, пока не будет получена требуемая по уравнению (9.8) температура жидкости на выходе из радиатора t_{FA}. Требуемая для этого скорость охлаждающего воздуха обозначается v_{AE}. К первому



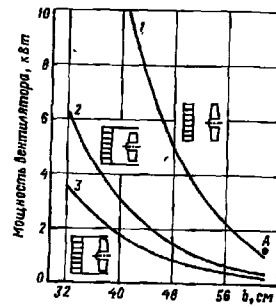


Рис. 9.17. Расчленение поверхности радиатора для определения его размеров [9.18]

Рис. 9.18. Необходимая мощность вентилятора в зависимости от ширины радиатора при различных коэффициентах полезного действия вентилятора [9.18]. Условия замера: 2-я передача, полный газ, частота вращения 5000 мин$^{-1}$. Точка A – измерение для автомобиля "Фольксваген" K 70". $1 - \eta_V = 0{,}1$; $2 - \eta_V = 0{,}35$; $3 - \eta_V = 0{,}6$

участку добавляется второй и рассматривается радиатор, состоящий из двух участков. Для обеспечения теплоотдачи в этом случае требуется уже меньшая скорость v_{AE}. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута предварительно заданная для конструкции ширина b_{max}. Поперечная передача теплоты в сердцевине не учитывается.

Полученное таким образом при ширине радиатора b_{max} значение скорости охлаждающего воздуха v_A благодаря последующему итеративному расчету функции

$$v_A/V_D = 1/\sqrt{1 + \zeta_t\,(v_A)} \qquad (9.13)$$

при предварительно заданной скорости движения V_D и измеренной характеристике сопротивления $\zeta_t\,(v_A)$ направляющих воздух элементов – решетки радиатора, моторного отсека – позволяет определить результирующую скорость охлаждающего воздуха v_{AD} при движении. На рис. 9.17 приведен график, характеризующий постоянное уменьшение необходимой скорости охлаждающего воздуха v_{AE} с увеличением *ширины* радиатора b. При определенной ширине радиатора значение необходимой скорости охлаждающего воздуха достигнет значения скорости на входе в радиатор набегающего при движении автомобиля потока v_{AD}. Справа от соответствующего значения абсциссы ширину радиатора можно считать завышенной; слева же от этого значения для обеспечения необходимого отвода теплоты нужно предусматривать вентилятор, который увеличит скорость воздуха от v_{AD} до $v_{AE}\,(b)$.

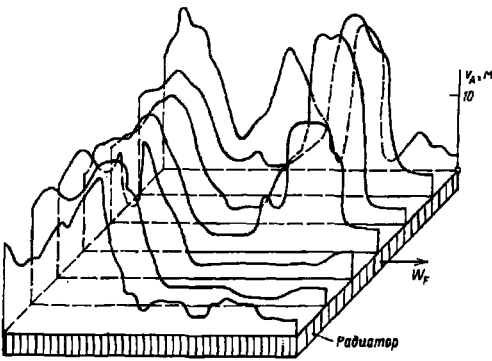


Рис. 9.19. Эпюра скоростей охлаждающего воздуха для легкового автомобиля с двигателем 1,5 л [9.18]. Скорость движения $V_D = 170$ км/ч; мощность двигателя $P = 62$ кВт

Так как шириной b и высотой H определяется площадь лобовой поверхности радиатора, то можно рассчитать объемный расход воздуха, который должен обеспечить вентилятор. Зная скорость и коэффициенты местных сопротивлений отдельных элементов направляющей воздух системы можно определить потерю давления, которую должен преодолеть вентилятор. На рис. 9.18, например, показана необходимая мощность вентилятора с изменением ширины радиатора при различных коэффициентах полезного действия вентилятора. Аналогично расчеты, проведенные для системы охлаждения автомобиля "Фольксваген К-70" показывают, что при вентиляторе без кожуха уменьшение ширины радиатора приводит к очень большому увеличению необходимой мощности вентилятора.

Благодаря членению лобовой поверхности радиатора на отдельные элементы можно провести расчет при очень неравномерной эпюре скоростей набегающего потока, что имеет место вследствие наличия перед радиатором элементов кузова. На рис. 9.19 приведена эпюра распределения скоростей охлаждающего воздуха по лобовой поверхности радиатора для заданного автомобиля при скорости движения 170 км/ч. Расчеты уменьшения температуры охлаждающей жидкости для среднего значения скорости и для приведенной выше эпюры скоростей показывают, что усреднение ведет к неправильным результатам (рис. 9.20). Так как теплоотдача пропорциональна v_A^{ϵ}, причем ϵ имеет значения $\epsilon < 1$, то в местах "впадин" эпюры скоростей наблюдается ухудшенная теплоотдача, которая не компенсируется улучшением теплоотдачи на участках с уве-

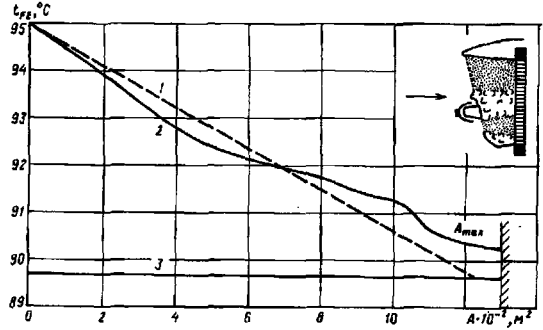


Рис. 9.20. Характер изменения температуры охлаждающей жидкости легкового автомобиля с двигателем 1,5 л (P = 62 кВт) при расчете с учетом средней скорости потока воздуха и с учетом реальной эпюры скоростей [9.18], скорость движения V_D = 170 км/ч:
1 – расчет с $\bar{v}_A$; *2* – расчет с v_A; *3* – необходимая температура жидкости на выходе из радиатора

личенной по сравнению со средним значением $\bar{v}_A$ скоростью. При неравномерной эпюре скоростей охлаждающего воздуха отводится меньше теплоты, чем при равномерной эпюре, характеризуемой средней скоростью $\bar{v}_A$, вычисляемой исходя из объемного расхода охлаждающего воздуха и площади лобовой поверхности радиатора.

9.4.4. ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ

Так как определение размеров радиатора и параметров системы охлаждения проводится только для одной точки графика мощностного

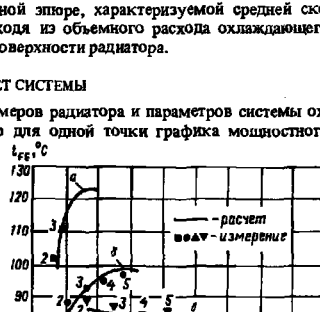


Рис. 9.21. Изменение температуры охлаждающей жидкости t_{FE} в зависимости от скорости движения V_D, сравнение результатов измерения и расчета [9.18], температура воздуха t_{LE} = 20°С, полный газ:
а – 1-я передача (с вентилятором); *б* – 2-я передача (с вентилятором); *в* – 3-я передача (без вентилятора); *г* – 4-я передача (без вентилятора). Цифры на поле графика означают частоту вращения двигателя n·1000 мин$^{-1}$

баланса, а температуры охлаждающей жидкости представляют интерес и в других, не включенных в расчет, точках, то можно предложить, например, расчет температурной характеристики в зависимости от скорости движения. С помощью методов расчета, описанных, например, Эмменталем [9.18], базируясь на заключительных, требующих дополнительных затрат, измерениях на готовом автомобиле, можно получить наглядную картину эксплуатационных свойств всей системы. На рис. 9.21 сравниваются результаты расчетаа и измерения. С помощью метода Эмменталя [9.18] эксплуатационные свойства системы охлаждения можно предварительно рассчитать, если известны теплотехнические свойства ее элементов, а также показатели сопротивления прохождению охлаждающего воздуха, о чем говорилось в п. 9.3. Примеры можно найти в [9.18].

9.5. ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Наряду с проверкой механической прочности элементов системы охлаждения на испытательном стенде (например, под действием знакопеременного давления) и на автомобиле (например, крепление радиатора) большое значение имеет измерение теплотехнических свойств в аэродинамической трубе. Для таких измерений автомобиль при различных нагрузках обкатывается на роликовом испытательном стенде в аэродинамической трубе. Система отопления отключается, термостат блокируется в открытом состоянии. В зависимости от нагрузки примерно через 20 мин наступает стабилизация температур. На рис. 9.22 представлены результаты измерений для двух различных систем охлаждения, устанавливаемых на один и тот же автомобиль (по Гухо [9.25]). Характер изменения температуры воды показывает, что при использовании системы охлаждения с открытым воздуховодом и большой площадью лобовой поверхности радиатора по сравнению с системой охлаждения с закрытым воздуховодом и малой площадью лобовой поверхности радиатора имеет место выраженная зависимость уровня температуры от скорости движения.

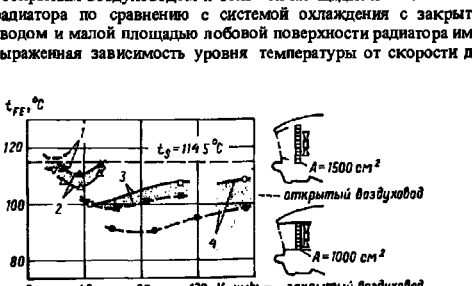


Рис. 9.22. Сравнение изменения температур охлаждающей жидкости в зависимости от скорости движения для двух систем охлаждения [9.25]:
1 – 1-я передача; *2* – 2-я передача; *3* – 3-я передача; *4* – 4-я передача. Температура воздуха на входе в радиатор $t_{LE} = 40°C$

9.6. ОЦЕНКА СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Разработка радиатора для каждого конкретного случая его применения обходится относительно дорого; прежде всего, следует отметить большие затраты на создание опытных образцов и проведение испытаний на автомобиле. Поэтому желательно иметь метод предварительной оценки, позволяющий сделать выбор из множества возможных видов радиаторов и тем самым уменьшить затраты на изготовление образцов и проведение испытаний. Работа радиатора при движении автомобиля описывается с помощью приведенных на рис. 9.23 уравнений. Тепловой поток отводится от двигателя охлаждающей жидкостью в радиатор, откуда он должен отводиться в окружающую среду. В рамках конкретной задачи следует исходить из того, что этот тепловой поток $\dot{Q}$ известен как функция мощности двигателя и частоты вращения. Точно так же температуру окружающего воздуха t_{LE} и поступающей в радиатор воды t_{FE} можно считать заданными условиями эксплуатации. Эквивалент воздуха W_L, протекающего через радиатор, т.е. объемный расход охлаждающего воздуха и коэффициент полезного действия η радиатора — оба этих параметра также определены на рис. 9.23 — должны быть таким образом согласованы друг с другом, чтобы выполнялось уравнение, определяющее тепловой поток, отводимый охлаждающей жидкостью от двигателя.

Скорость воздушного потока, набегающего на радиатор, v_A зависит от скорости движения автомобиля V_D и от эксплуатационных данных вентилятора радиатора. Метод оценки становится особенно наглядным, если рассматривается только случай без включения в работу вентилятора. Аэродинамический коэффициент полезного действия η, т.е. отношение скорости набегающего на радиатор потока v_A к скорости движения V_D (см. рис. 9.23), в свою очередь, является функцией коэффициента сопротивления ζ_t всего канала, подводящего охлаждающий воздух к радиатору.

Из уравнений, приведенных слева на рис. 9.23, получают уравнение для определения необходимой площади лобовой поверхности A радиатора заданного типа, свойства которого описываются выражением $1/(\eta\Phi)$ (уравнение справа внизу). В конкретном случае при определенной ско-

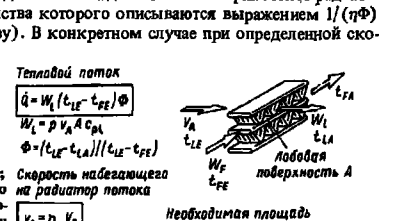


Рис. 9.23. Тепловой поток; скорость охлаждающего воздуха; необходимая площадь лобовой поверхности радиатора – расчетные зависимости для оценки системы охлаждения

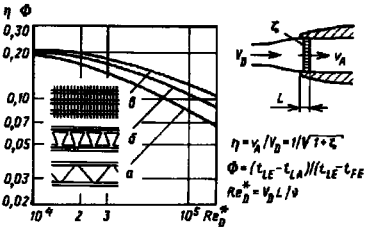


Рис. 9.24. Оценка различных конструкций сердцевин радиатора [9.25]

рости движения V_D задается тепловой поток $\dot{Q}$, который нужно отвести. Площадь лобовой поверхности радиатора A в этом случае:

$$A \sim 1/(\eta\Phi)\,. \tag{9.14}$$

Эта зависимость использовалась Гухо [9.25] для оценки различных конструкций сердцевин: чем больше произведение $\eta\Phi$, тем эффективнее конструкция радиатора.

На рис. 9.24 приводится оценка различных конструкций радиаторов. Показано изменение величины произведения $\eta\Phi$ в зависимости от значения Re_D^*, которое соответствует числу Рейнольдса, зависящему от скорости движения. Из рис. 9.24 следует, что в области высоких скоростей ($Re_D^* \approx 10^5$) между рассматриваемыми видами радиаторов наблюдаются явные отличия в эффективности передачи теплоты.

Этот метод оценки показывает, в каком направлении следует развивать интересующие автомобилестроителей конструкции радиаторов. Наряду с улучшением теплоотдачи встает вопрос об уменьшении потери давления воздуха, проходящего через систему. В противном случае улучшения в отношении теплоотдачи перекрываются ухудшением, вызванным увеличением сопротивления прохождению воздуха через радиатор.

Так как при проектировании радиатора в конечном счете интересует лишь цена единицы отводимой теплоты, то решающее значение имеют выбор материала и технология изготовления. Радиатор будущего должен обеспечивать увеличенный отвод теплоты и изготавливаться из более дешевого материала по технологии, обеспечивающей меньшие затраты.

9.7. ОБОЗНАЧЕНИЯ

Геометрические параметры

A – площадь лобовой поверхности радиатора;
A – площадь поперечного сечения рабочего участка, рис. 9.14.;
A_F – площадь лобового сопротивления автомобиля;
B – ширина сердцевины радиатора;

b – текущая ширина сердцевины радиатора;
D_F – диаметр колеса водяного насоса;
D_V – диаметр крыльчатки вентилятора;
d_{hyd} – гидравлический диаметр;
H – высота сердцевины радиатора;
L – толщина сердцевины радиатора;
α – угол установки профилей решетки.

Параметры двигателя и автомобиля

F_Z – сила тяги;
n – частота вращения двигателя;
n_P – частота вращения двигателя при номинальной мощности;
$P, P_{\max}$ – мощность двигателя.

Параметры, касающиеся теплотехники и техники обтекания

c_F – удельная теплоемкость жидкости;
c_{pL} – удельная теплоемкость воздуха;
k_A – коэффициент теплопередачи, отнесенный к лобовой поверхности радиатора;
Q_F – тепловой поток;
$Q_{C,\ R,\ A,\ B}$ – тепловой поток, отводимый конвекцией, излучением, с выхлопными газами, и подводимый в результате сгорания топлива;
p_0 – давление воздуха окружающей среды;
Δp – потеря статического давления;
t_{FE} – температура охлаждающей жидкости на входе в радиатор;
t_{FA} – температура охлаждающей жидкости на выходе из радиатора;
t_S – температура вскипания охлаждающей жидкости;
t_{LE} – температура воздуха на входе в радиатор;
t_{LA} – температура воздуха на выходе из радиатора;
U_f – окружная скорость колеса водяного насоса;
U_V – окружная скорость вентилятора;
$\overline{v}_A = \overline{v}_A = \dot{V}_L / A$ средняя скорость охлаждающего воздуха;
v_A – скорость охлаждающего воздуха;
v_{AE} – необходимая скорость охлаждающего воздуха;
v_{AD} – скорость набегающего потока охлаждающего воздуха при движении;
v_G – скорость воздуха перед решеткой радиатора;
v_F – скорость охлаждающей жидкости в трубках радиатора;
v_D – скорость движения;
$\dot{V}_F$ – объемный расход охлаждающей жидкости;
$\dot{V}_L$ – объемный расход охлаждающего воздуха;
W_L – эквивалент расхода воздуха;
W_F – эквивалент расхода охлаждающей жидкости;
λ_L – коэффициент теплопроводности охлаждающего воздуха;
ρ – плотность воздуха;
ρ_F – плотность охлаждающей жидкости;
ν – коэффициент кинематической вязкости охлаждающего воздуха;
ν_F – коэффициент кинематической вязкости охлаждающей жидкости.

Характеристики

$\zeta_k = 2\Delta p / \rho v_A^2$ – коэффициент местного сопротивления радиатора протеканию воздуха;
$\zeta_G = 2\Delta p / \rho v_G^2$ – коэффициент местного сопротивления решетки радиатора;
ζ_L – коэффициент сопротивления всего воздуховода, отнесенный к v_A;
$\mathrm{Re}^* = v_A L / \nu$ – число Рейнольдса для воздуха на входе в радиатор;
$\mathrm{Re}_G = v_G L_G / \nu$ – число Рейнольдса для воздуха, проходящего через решетку радиатора;

$\mathrm{Re}_F = v_F d_{hyd}/\nu_F$ – число Рейнольдса для потока охлаждающей жидкости в трубках радиатора;

$\mathrm{Re}^*_D = v_D L/\nu = \mathrm{Re}\sqrt{1+\xi_I}$ – число Рейнольдса, характеризующее режим движения;

$Nu^* = k_A L/\lambda_L$ – число Нуссельта;

$\psi_F = 2\Delta p/(\rho_F U_F^2)$ – коэффициент давления (водяной насос);

$\psi_V = 2\Delta p/(\rho U_V^2)$ – коэффициент давления (вентилятор);

$\varphi_F = 4\dot{V}_F/(U_F \pi D_F^2)$ – коэффициент расхода (водяной насос);

$\varphi_V = 4\dot{V}_L/(U_V \pi D_V^2)$ – коэффициент расхода (вентилятор);

$\Phi = (t_{LE} - t_{LA})/(t_{LE} - t_{FE})$ – безразмерная удельная тепловая нагрузка радиатора (коэффициент эффективности);

η_V – коэффициент полезного действия вентилятора;

c_W – коэффициент аэродинамического сопротивления.

10. ОТОПЛЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ И МИКРОКЛИМАТ В САЛОНЕ АВТОМОБИЛЯ

Вернер Генгенбах

10.1. КЛИМАТ

В общем случае под климатом понимается среднее состояние атмосферы в определенной области пространства за определенный промежуток времени и характерное для данной области изменение погоды. Понятие "климат" тесно связано с качеством процессов, протекающих в живых организмах, с самочувствием человека и вообще с возможностью существования жизни. В экстремальных климатических условиях могут существовать только специфические формы жизни.

Климат определяется многими факторами, которые по отдельности или в комплексе оказывают большее или меньшее воздействие на существование жизни в целом или только на самочувствие человека. Этими факторами являются: температура воздуха, влажность воздуха, его подвижность, излучение, давление воздуха, ионизация воздуха, парциальное давление кислорода, электростатические поля, радиоактивность. В дополнение к столь общему определению климата можно говорить о микроклимате в малой локализованной области пространства, в данном случае о микроклимате в салоне автомобиля. Существует большое число работ, посвященных кондиционированию воздуха в зданиях и микроклимату в жилых и рабочих помещениях. В дальнейшем отчасти придется ссылаться на такие работы, так как по рассматриваемой в данной главе проблеме – созданию микроклимата в салоне автомобиля – имеется очень мало литературных источников.

Понятие "создание микроклимата" означает не только его воспроизведение в соответствии с описанными ниже параметрами, но и управле-

ние им. Совершенно однозначно можно сказать, что микроклимат должен изменяться, и целью такого изменения является создание комфортных условий в окружающем человека пространстве. Само собой разумеется, что далеко не на все факторы, определяющие микроклимат в салоне автомобиля, можно воздействовать. В основном могут изменяться температура и влажность воздуха, его подвижность.

Системы, обеспечивающие микроклимат в салоне автомобиля, выполняют важную функцию повышения активной безопасности автомобиля: во-первых, в комфортных условиях повышается способность водителя к концентрации внимания на быстро изменяющиеся условия движения, во-вторых, целенаправленное распределение воздушных потоков из системы отопления и вентиляции позволяет избежать конденсации влаги на стеклах автомобиля, и тем самым обеспечивается хорошая видимость.

10.2. КЛИМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИОЛОГИЯ

Существует целый ряд принципиальных исследований о взаимосвязи между ощущением комфорта и значениями параметров микроклимата, определяющими это ощущение. Эти исследования в основном связаны с созданием микроклимата в жилых и рабочих помещениях. Перенести полученные результаты без всяких изменений на соотношения параметров воздуха в салоне автомобиля нельзя, поскольку граничные условия, как по плотности размещения людей в располагаемом объеме салона, так и по времени пребывания пассажиров в автомобиле, сильно отличаются от граничных условий помещений.

Далее рассматривается воздействие отдельных климатических факторов на ощущение комфорта.

10.2.1. ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА В САЛОНЕ

На рис. 10.1 приведены предлагаемые разными авторами в качестве наиболее комфортной температуры в салоне автомобиля в зависимости от температуры наружного воздуха. Так, например, Штольц [10.21] независимо от температуры наружного воздуха предлагает об-

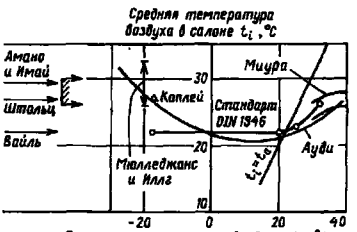


Рис. 10.1. Данные литературных источников по средней температуре в салоне автомобиля, которую можно считать наиболее приемлемой, в зависимости от температуры наружного воздуха; данные собраны Теммингом

ласть температуры внутри салона от 26 до 30°С. Мюлледжанс и Иллг [10.16] при температуре наружного воздуха −20°С наиболее комфортной считают температуру в диапазоне от 25 до 33°С. Вайль [10.23] независимо от температуры наружного воздуха предлагает в качестве комфортной температуру в салоне 22°С; такое же значение рекомендуется по *DIN* 1946 [10.4] для автомобилей при температуре наружного воздуха от −18 до +20°С.

По мнению автора, нельзя задавать наиболее приемлемый диапазон температур в салоне независимо от температуры наружного воздуха. Человек воспринимает в качестве комфортной различную температуру в салоне автомобиля в зависимости от температуры наружного воздуха, т.е., например, зимой он чувствует себя лучше при несколько более высокой температуре, чем летом. Если человек привык к очень высоким температурам окружающей среды, то для того, чтобы он хорошо чувствовал себя в автомобиле, необходимо повысить температуру в салоне. В этом случае даже с точки зрения медицины необходимо увеличить эту температуру, так как, например, при температуре наружного воздуха +40°С и температуре в салоне +22°С довольно велика вероятность переохлаждения организма из-за большого перепада температур.

Рекомендация автора также приведена на рис. 10.1, причем можно быть уверенным, что такая кривая лишь приблизительно отражает тот диапазон температур, который ощущается наиболее комфортно. Одежда, время суток, настроение и т.д. сидящих в автомобиле людей могут привести к явному изменению этого значения. Поэтому особенно важно, чтобы существовала возможность тонкой регулировки внутренней температуры в широких пределах.

Значения температур, приведенные на рис. 10.1, которые рекомендуются в качестве комфортных специально для микроклимата в салонах автомобилей, получены на основании многолетних наблюдений. Некоторые из них были опубликованы несколько лет тому назад. Если сравнить эти значения со значениями, рекомендуемыми в качестве комфортных для помещений, то можно заметить, что рекомендуемые температуры воздуха в салоне автомобиля несколько выше, чем в помещении. Причина заключается в том, что при расчете микроклимата зданий температура излучения стен принимается равной температуре в помещении, и это можно считать правильным в силу относительно большой их инерционности. В автомобиле, однако, относительно большие поверхности остекления могут иметь температуру, существенно отличающуюся от средней температуры воздуха внутри пассажирского салона. Поэтому часть теплообмена между человеком, находящимся в автомобиле, и остеклением путем излучения должна компенсироваться более высокой температурой воздуха в салоне зимой, и тем сильнее, чем ниже температура наружного воздуха, а значит, и температура на внешней поверхности стекла. Летом, наоборот, действие солнечных лучей на современные большие и наклонно установленные стекла, а значит, и на пассажиров, должно компенсироваться хладопроизводительностью кондиционера.

Когда речь идет о температурном режиме микроклимата в помеще-

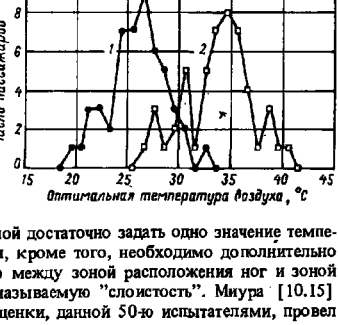


Рис. 10.2. Средневзвешенное распределение комфортных температур в зоне расположения головы (1) и ног (2) [10.15]:
1 – зона расположения головы; *2* – зона расположения ног

нии, то в качестве обязательной достаточно задать одно значение температуры. В салоне автомобиля, кроме того, необходимо дополнительно задавать разность температур между зоной расположения ног и зоной расположения головы, так называемую "слоистость". Миура [10.15] посредством субъективной оценки, данной 50-ю испытателями, провел исследования в климатической камере, направленные на выявление наиболее приемлемого перепада температур (между зоной ног и головы). На рис. 10.2 представлены результаты. Из них видно, что разность температур между зонами расположения ног и головы примерно 7°С воспринималась испытателями как наиболее удовлетворительная.

Данные примерно того же порядка можно найти и в других литературных источниках, в которых специально рассматривается вопрос о распределении температур в салоне автомобиля. Во всех этих работах не указаны источники получения данных, очевидно, можно считать, что они опираются на обширнейший опыт, накопленный инженерами автомобильной промышленности, занимающимися проблемами отопления и микроклимата.

Из рис. 10.2 особенно хорошо видно, что диапазон температур, в котором разные люди при одинаковых условиях чувствуют себя прекрасно, довольно велик. Разброс полученных температур в зоне расположения ног, а также в зоне расположения головы составляет 14°С.

Названные выше результаты относятся к приемлемым температурам при установившемся микроклимате в салоне. В процессе исследования, проведенного Ролсом и Уэллисом [10.19] (США) в результате субъективной оценки, данной примерно 3 тыс. чел., было определено время, которое проходит с момента включения кондиционера в прогретом на солнце автомобиле до получения в салоне комфортной температуры. При этом время, в течение которого достигается комфортная температура в салоне, зависит только от количества и температуры воздуха, поступающего из дефлектора, и положения сидящего в автомобиле человека (спереди и сзади). Комфортная температура, которая в районе передних сидений достигается скорее, чем в районе задних сидений, устанавливается тем быстрее, чем больше объемный расход воздуха, подаваемого кондиционером, и чем больше разность температур выхо-

дящего из дефлектора воздуха и комфортной в салоне. При одинаковом объемном расходе воздуха размер выходных дефлекторов, а значит, и скорость выходящего воздуха не играют никакой роли.

10.2.2. ПОДВИЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Известно, что человек воспринимает температуру неподвижного воздуха иначе, чем температуру воздуха, обдувающего его с определенной скоростью. При этом в области температур окружающей среды меньше температуры поверхности тела человека с увеличением скорости обдува температура воздуха должна увеличиваться, чтобы обеспечивать такое же восприятие температуры, как и в неподвижном воздухе. О том, какой должна быть эта зависимость, в литературе нет единого мнения. На рис. 10.3 приведено предпринятое Темминго м сравнение данных различных литературных источников [10.4], [10.7], [10.13], [10.14], [10.22]. Кривая по Фангеру [10.7] показывает, что существует предельное значение температуры, при которой дальнейшее увеличение скорости воздуха свыше 1,5 м/с не вызывает изменения восприятия температуры, что, по крайней мере, качественно хорошо согласуется с собственными наблюдениями, сделанными Темминго м.

При температуре воздуха выше температуры поверхности тела (например, в знойной пустыне) подвижность воздуха оказывает обратное влияние. В этом случае температура перемещающегося воздуха из-за лучшей теплоотдачи кожи воспринимается как более высокая, чем в случае неподвижного воздуха. Поэтому при езде в автомобиле, не оснащенном кондиционером, может быть рекомендовано при температурах наружного воздуха свыше 40°С закрыть окна и боковые форточки. Аналогичные неприятные ощущения возникают и тогда, когда теплый воздух (в случае работы отопителя) непосредственно обдувает сидящих в автомобиле людей.

При решении вопросов отопления и вентиляции автомобиля нужно ориентироваться на то, чтобы при работающей системе отопления исключить непосредственный обдув пассажиров. Для выполнения этого требования необходимо тщательно продумать размещение дефлекторов выхода нагретого воздуха и оптимальное распределение воздуха, даже при больших его расходах. Большие расходы воздуха необходимы тогда,

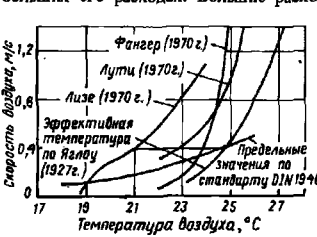


Рис. 10.3. Влияние подвижности воздуха на восприятие температуры. Сравнение данных, опубликованных разными авторами, проведено Темминго м

когда при низких наружных температурах необходимо обеспечить хороший прогрев салона.

Летом же, при более высоких температурах наружного воздуха, целенаправленный обдув тела воспринимается удовлетворительно. Лучше всего обдувать область груди воздухом с максимальной скоростью 3 м/с, причем из-за опасности переохлаждения не следует допускать обдува области шеи и свободных суставов рук, а также следует избегать воздействия высоких скоростей потока на лицо, в особенности на глаза. В связи с этим высокие скорости воздуха, хотя они и вызывают ощущение приятного местного "холодка", по медицинским соображениям следует исключить. Гораздо лучше, имея большой объемный расход воздуха, обеспечить большую площадь обдува пассажиров с малой скоростью. При низких температурах наружного воздуха или при пользовании кондиционером направляемый для обдува воздух следует немного подогреть.

Приведенные сведения в настоящее время учитываются в любом современном легковом автомобиле, который располагает достаточным количеством дефлекторов, обеспечивающих подачу воздуха в салон при его отоплении и вентиляции. Вентиляционные дефлекторы должны иметь возможность индивидуальной регулировки объема поступающего через них воздуха и направления его распространения.

10.2.3. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Механизм теплового регулирования человека, поддерживающий постоянную температуру его тела на уровне примерно 37°С, предусматривает выделение теплоты, затрачиваемого на испарение пота с поверхности тела. При термически нейтральных условиях человеком выделяется примерно 25 г влаги в час. Выделение влаги увеличивается с повышением температуры окружающей среды. *Испарение влаги с поверхности тела* и вызываемое в связи с этим ощущение прохлады зависит от парциального давления водяных паров в окружающем воздухе, а значит, и от относительной влажности окружающего воздуха. Точные границы между условиями, воспринимаемыми человеком как приятные и неприятные, установить нелегко, так как решающее значение имеет целый ряд факторов, таких, как солнечное излучение, состояние тела (напряженное или расслабленное), погодные условия и т.д. В литературе очень часто можно найти указание на то, что давление паров воды 14 торр является *пределом, превышение которого вызывает ощущение духоты, подавленности.* Это давление пара соответствует относительной влажности 80 % при температуре воздуха 20°С; 60 % при температуре воздуха 25°С; 45 % при температуре воздуха 30°С. Если эти предельные значения смещаются в сторону увеличения влажности, то, чтобы устранить неприятные ощущения в автомобиле, можно осушить воздух с помощью кондиционера.

С другой стороны, хотя пересушенный воздух и не всегда вызывает неприятные ощущения, однако он может иметь следствием явления, ухудшающие самочувствие человека, такие, как повышенная опасность

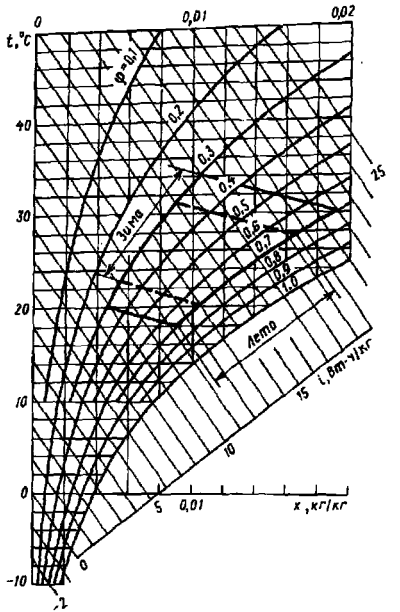


Рис. 10.4. Зоны комфорта на "$i - x$"-диаграмме, различные при движении автомобиля зимой и летом

инфекции, сухость кожи, сухость губ и т.д. Если в зданиях предусмотрено создание микроклимата, в полной мере отвечающего комфортным условиям, то в таких случаях воздух искусственно увлажняется. Для автомобиля в этом отношении технических решений не известно, к тому же отсутствуют какие-либо сведения о том, из каких значений следует исходить, когда (как в случае езды в автомобиле) имеет место лишь кратковременное пребывание человека в атмосфере предельно сухого воздуха.

В качестве приемлемых с точки зрения самочувствия человека в условиях изменяющейся температуры и влажности воздуха можно считать области, выделенные на "i–x"-диаграмме влажного воздуха, приведенной на рис. 10.4. На диаграмме выделены области, касающиеся эксплуатации в летних и зимних условиях.

10.2.4. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МИКРОКЛИМАТУ В САЛОНЕ АВТОМОБИЛЯ

Описанные взаимосвязи можно сформулировать в виде требований, предъявляемых к удовлетворительному микроклимату в салоне автомобиля.

Температура должна регулироваться в широком диапазоне. Регулировка должна быть плавной.

Температура воздуха в салоне в процессе езды по возможности не должна самопроизвольно изменяться.

Подача теплого воздуха должна осуществляться таким образом, чтобы водитель и пассажиры не попадали под его струю.

Температура в зоне расположения головы должна быть примерно на 7°С ниже, чем температура в зоне расположения ног (требование "слоистости" температуры).

Относительная влажность воздуха должна составлять 30–70 %.

Для воздухообмена может использоваться непосредственный обдув немного подогретым воздухом. Направление распространения воздуха и его расход должны регулироваться. Обдув должен осуществляться на большой площади с небольшой скоростью воздуха. В районе лица, шеи и суставов рук скорость воздуха должна быть по возможности малой.

10.3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОКЛИМАТА В САЛОНЕ

На рис. 10.5 представлены два примера возможного изменения параметров микроклимата в салоне автомобиля при работающей системе отопления.

В первом примере исходят из того, что в туманный день при температуре наружного воздуха примерно 10°С и относительной влажности 100 % воздух подогревается в системе отопления примерно до 45°С, в результате чего средняя температура в салоне устанавливается примерно 25°С. Принимая, что воздух дополнительно получает еще 2 г воды (на 1 кг воздуха) из выдыхаемого пассажирами воздуха и возможно из несколько влажной одежды, относительная влажность достигает величины примерно 45 % – это еще вписывается в условия удовлетворительного микроклимата.

Во втором примере температура наружного воздуха –10°С, относительная влажность 100 %, температура воздуха в салоне обеспечивается на уровне примерно 28°С. И в этом случае допускается, что в воздух дополнительно поступает при дыхании людей 2 г воды на 1 кг подаваемого воздуха. В этом случае относительная влажность воздуха в салоне будет составлять 16 %, т.е. воздух будет слишком сухой. О неприятных воздействиях воздуха пониженной влажности, приводящих к сухости кожи и увеличению опасности инфекции, уже говорилось.

При высокой температуре наружного воздуха и высокой влажности только за счет воздухообмена невозможно обеспечить удовлетворительный микроклимат в салоне автомобиля. Явное улучшение параметров микроклимата можно получить только за счет установки кондиционера.

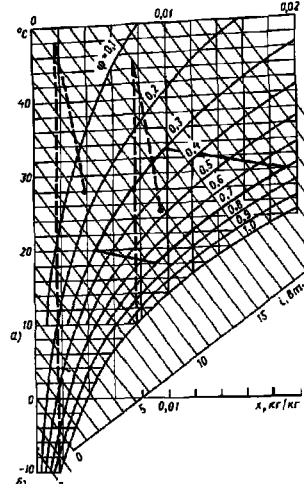


Рис. 10.5. Изменение параметров состояния воздуха при работе системы отопления автомобиля:
а – температура наружного воздуха 10°С, воздух насыщенный влагой; *б* – температура наружного воздуха –10°С, воздух насыщенный влагой

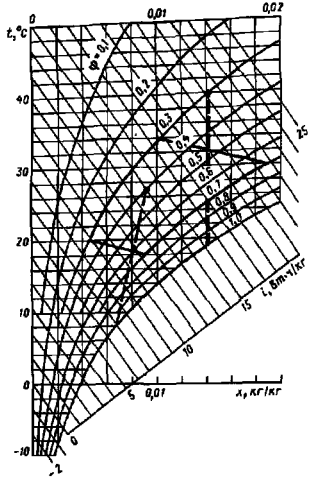


Рис. 10.6. Изменение параметров состояния воздуха при работе кондиционера. Начальные условия: температура наружного воздуха 40°С, относительная влажность 30%

На рис. 10.6 показано изменение параметров состояния воздуха в салоне при работе кондиционера. Исходят из того, что кондиционер работает в режиме подачи наружного воздуха. Температура наружного воздуха составляет 40°С при относительной влажности примерно 30 %. Такие параметры воздуха характерны, например, для климатических условий штата Колорадо (США), они довольно неприятны, и воспринимаются человеком как духота и зной.

Поступающий в кондиционер воздух охлаждается в испарителе до температуры примерно 8°С. При этом конденсируется и отводится в дренаж примерно 7 г воды на 1 кг подаваемого воздуха. При температуре воздуха в салоне примерно 27°С, снова принимая дополнительное поступление воды из воздуха, выдыхаемого человеком, в количестве 2 г на 1 кг воздуха, получим, что относительная влажность составит 40 %. Таким образом, параметры микроклимата попадают в выделенную зону комфортных условий. Тепловая энергия, затрачиваемая на конденсацию воды, безвозвратно забирается у кондиционера.

Эти примеры показывают, что при работе систем отопления и вентиляции создание микроклимата в салоне автомобиля, т.е. целенаправленное изменение основных параметров воздуха, возможно не в полном объеме. Может изменяться температура воздуха, но только в направлении ее увеличения. При этом неизбежно возникает относительное осушение воздуха, и с этим приходится мириться.

При температурах наружного воздуха, лежащих на границе зоны комфортных условий и несколько выше, уменьшение ощущения дискомфорта может обеспечиваться организацией обдува по возможности наибольшей поверхности тела. При этом оказать влияние на высокую влажность воздуха не представляется возможным.

Лишь благодаря установленному на автомобиле кондиционеру – который иногда ошибочно называют климатической установкой – возможно широкомасштабное воздействие на параметры микроклимата в автомобиле. В этом случае высокая относительная влажность воздуха, особенно тяжело воспринимаемая при повышенных температурах, может уменьшаться. Кроме того, температура воздуха в салоне по сравнению с температурой наружного воздуха может как увеличиваться благодаря работе системы отопления, так и уменьшаться.

10.4. КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ

Создание приемлемого микроклимата в салоне автомобиля, как правило, обеспечивается работой систем отопления и вентиляции, которыми располагает сегодня каждый автомобиль. Для удовлетворения повышенных требований к микроклимату необходима установка кондиционера, рассмотреть работу и устройство которого в рамках данной книги не представляется возможным. Соображения, приведенные для случая отопителя, в принципе верны и для кондиционера, если изменить параметры вытекающего из отопителя воздуха, т.е. снизить температуру

и, что верно в большинстве случаев, считать воздух насыщенным парами воды.

Важнейшими компонентами систем отопления и вентиляции являются: кузов, теплообменник, вентилятор и органы управления.

10.4.1. КУЗОВ

Для создания объемного потока наряду со свободно продуваемой потоком площадью необходимо иметь разность давлений. На перемещение воздуха в салоне оказывает влияние, с одной стороны, напор, создаваемый вентилятором, с другой стороны, существенное значение имеет кузов (см. также пп. 2.3.2. и 6.2.2).

Салон автомобиля по конструктивным причинам никогда не может быть герметичным. Всегда в местах уплотнений, направляющих стекол, сварных швов и т.д. имеются неплотности, через которые может происходить утечка воздуха из салона в окружающую среду. Площадь неплотностей, через которые происходит утечка, можно относительно просто определить для имеющегося автомобиля. Для этого воздух с помощью автономного вентилятора, оборудованного устройством для замера расхода воздуха, нагнетается в салон автомобиля через хорошо уплотненный воздуховод и регистрируется расход воздуха в зависимости от давления в салоне (см. п. 12.1.5). Имея график такой зависимости, можно предположить, что он принадлежит работающему без потерь соплу с площадью сечения L_0. Эта площадь может считаться эффективным сечением кузова, через которое происходит утечка воздуха. Преимущество этого метода по сравнению с другими состоит в том, что появляется возможность оперировать наглядной физической величиной – площадью, которую можно непосредственно увеличивать или уменьшать.

При обтекании движущегося автомобиля в местах замедления потока имеет место зона повышенного статического давления, а в местах ускорения потока – зона пониженного статического давления, как уже объяснялось в п. 2.3.2. Так как отмеченные выше места возможной утечки воздуха из салона распределены по автомобилю, то давление в каждом таком месте характеризуется своим коэффициентом давления, имеющим разное значение. Это приводит к необходимости построения кривой распределения эквивалентных площадей неплотностей в зависимости от коэффициента давления в местах утечки. Как правило, такая кривая распределения, хотя и характерна для каждого автомобиля, однако при переходе от автомобиля к автомобилю она незначительно отличается. Такая кривая распределения представлена на рис. 10.7, где в зависимости от эффективного давления, отнесенного к давлению скоростного напора, приведено распределение эквивалентных площадей. Получающийся расход истекаемого воздуха может определяться по сумме площадей отдельных сечений, через которые истекает воздух, и характерных для них разрежений.

Как правило, центр тяжести кривой распределения соответствует области небольшого разрежения. Поэтому и на автомобилях, не имею-

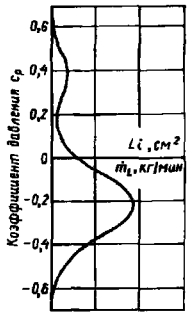


Рис. 10.7. Распределение эквивалентных площадей сечений, через которые происходит утечка воздуха, в зависимости от коэффициента давления

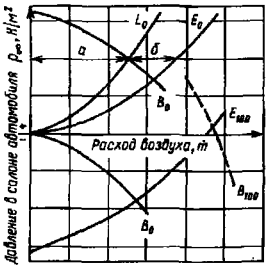


Рис. 10.8. Характеристики вентилятора и сопротивления вытяжки салона автомобиля и определение расхода воздуха; индекс "0" относится к скорости движения автомобиля $V = 0$; индекс "100" относится к скорости движения автомобиля $V = 100$ км/ч; *а* – истечение воздуха регулируется плохо; *б* – на вытяжку воздуха можно влиять

щих специально устраиваемых отверстий для выхода воздуха, возможен воздухообмен в салоне благодаря перепаду давлений на входе в отопитель и выходе в местах неплотностей.

Существующая непредусмотренная негерметичность кузова в очень сильной степени зависит от качества изготовления автомобиля. Поэтому уже давно пришли к выводу, что выход воздуха из салона автомобиля не должен подчиняться случайностям, и необходимо предусматривать специальные вытяжные отверстия, через которые происходит выпуск воздуха. В зависимости от величины разрежения в предусмотренных для размещения вытяжных отверстий местах можно получить более или менее крутую характеристику расхода воздуха, независимую от скорости движения автомобиля. Если в месте расположения вытяжного отверстия существует небольшое разрежение и площадь выходного отверстия относительно велика, то расход воздуха мало изменяется с увеличением или уменьшением скорости движения; если же в этом месте существует сильное разрежение, то расход воздуха с увеличением скорости движения сильно возрастает. Оптимальной следует считать незначительную зависимость расхода воздуха от скорости движения при достаточно высоком значении расхода воздуха при малых скоростях движения и на неподвижном автомобиле.

Определение эквивалентных площадей сечений отдельных неплотностей, через которые выходит воздух, и соответствующих значений коэффициента давления на практике осуществить довольно затруднительно, и это требует много времени. Поэтому обычно поступают следующим образом: строят характеристику сопротивления вытяжки воздуха через

неплотности, определяя при герметично закрытых выпускных отверстиях (при помощи автономного вентилятора) расхода воздуха в зависимости от внутреннего давления в автомобиле (см. п. 12.1.5). Путем расчета или с помощью измерения определяют характеристику сопротивления при одновременном выходе воздуха через неплотности и вытяжные отверстия как для неподвижного, так и движущегося с постоянной скоростью автомобиля. Такой график схематично показан на рис. 10.8. Кроме того, на рис. 10.8 приведена характеристика вентилятора, применяемого в системе отопления, приведена кривая, характеризующая подачу воздуха без вентилятора. Соответствующие точки пересечения кривых сопротивления вытяжных отверстий совместно с естественной негерметичностью салона и расходно-напорной характеристики вентилятора отопителя позволяют судить о расходе воздуха и его зависимости от скорости движения.

Этот метод дает возможность уже на ранних этапах проектирования автомобиля делать выводы о расходе воздуха и оптимизировать предусматриваемые вытяжные отверстия в отношении места их расположения и площади выходного сечения. Для этого необходимо знать эквивалентную площадь неплотностей, через которые происходит утечка воздуха. Эта площадь в большинстве случаев известна по предыдущей модели автомобиля, или же в случае изменения концепции каркаса кузова может быть определена. Кроме того, необходимо располагать данными о распределении давления по поверхности кузова, которые можно получить при испытаниях модели в аэродинамической трубе.

10.4.2. РАДИАТОР СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

Радиатор системы отопления (теплообменник) имеет особое значение, поскольку он должен не только передавать необходимое количество теплоты для обогрева салона, но и в значительной степени способствовать функционированию системы отопления в отношении поддержания постоянной температуры в салоне и равномерного ее распределения.

До недавнего времени считалось общепринятым использовать для системы отопления радиаторы, имеющие конструкцию, аналогичную радиаторам системы охлаждения двигателя (см. п. 9.4.2). Они состояли из плоских (например, латунных) трубок и расположенных между ними тонких медных или стальных пластин. Плоские трубки слева и справа оканчивались в трубной решетке, которая закрывалась бачком радиатора. Весь радиатор запаивался при прохождении через печь. Чаще всего впускной и выпускной патрубки располагались в одном и том же бачке радиатора; направление потока воды осуществлялось таким образом, что в двухрядных теплообменниках по отдельным рядам она перемещалась навстречу друг друга. Смыканию потоков препятствовала разделительная перегородка в бачке радиатора.

В настоящее время чаще находят применение радиаторы системы отопления из круглых алюминиевых трубок (рис. 10.9). Изготовление такого радиатора обходится существенно дешевле; можно полностью отказаться от термической обработки. Алюминиевые трубки толщиной

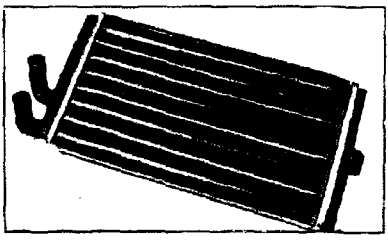


Рис. 10.9. Современный алюминиевый радиатор системы отопления с круглыми трубками, площадь лобовой поверхности 4,26 дм^3, толщина блока 42 мм

примерно 0,4 или 0,5 мм пакетируются штампованными тонкими пластинами и охватываются оправкой. Плотный контакт, который в обычном радиаторе обеспечивается за счет плохо проводящего теплоту припоя, достигается благодаря прямому металлическому контакту водоносной трубки с тонкими пластинами. Недостаток радиатора с круглыми трубками по сравнению с радиатором, имеющим плоские трубки, – меньшая *турбулентность потока воды – может компенсироваться специально выполненными турбулизаторами или благодаря разветвлению потока воды,* приводящему к увеличению скорости ее течения. Уплотнение трубок в трубных решетках осуществляется либо с помощью резинового уплотнителя, или же благодаря запрессовке алюминиевой трубки в трубной решетке. Отлитые под давлением пластмассовые бачки радиатора уплотняются в сопряжении с трубной решеткой резиновым уплотнителем. Соединение осуществляется с помощью отбортовок трубной *решетки.* В выборе направления перемещения воды существует относительная *свобода, так как в пластмассовых* бачках радиатора можно предусмотреть любым образом расположенные перегородки.

На рис. 10.10 показана характеристика такого радиатора. На левом графике представлены тепловой поток $\dot{Q}_{100}$ (отнесенный к разности температур 100°С между водой, поступающей в радиатор, и входящим воздухом) и его воздушное сопротивление в зависимости от расхода воздуха $\dot{m}_L$. С правой стороны приведены тепловой поток и гидравлическое сопротивление радиатора в зависимости от расхода жидкости. Приведенные графики охватывают все важнейшие параметры, необходимые для разработки радиатора и системы отопления. Аналогичная характеристика в безразмерной форме приведена на рис. 9.16 для радиатора системы охлаждения. Так как каждый режим движения автомобиля характеризуется соответствующим расходом воздуха и жидкости, то для каждого режима движения можно определить получаемый тепловой поток. На этой характеристике в несколько измененной форме еще предстоит остановиться при описании возможных систем регулирования и управления.

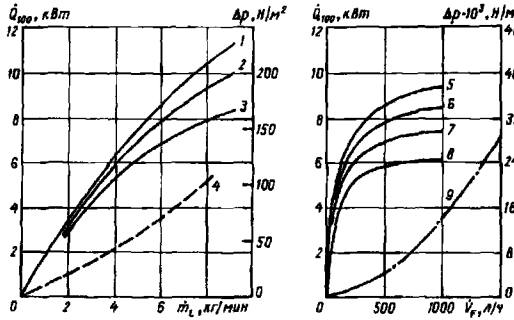


Рис. 10.10. Характеристика радиатора системы отопления:
1 – $\dot{V}_F$ = 1000 л/ч; *2* – $\dot{V}_F$ = 500 л/; *3* – $\dot{V}_F$ = 250 л/ч; *4* – $\Delta p = f(\dot{m}_L)$, ρ = 1,15 (холодный воздух); *5* – $\dot{m}_L$ = 7 кг/мин; *6* – $\dot{m}_L$ = 6 кг/мин; *7* – $\dot{m}_L$ = 5 кг/мин; *8* – $\dot{m}_L$ = 4 кг/мин; *9* – $\Delta p = f[\dot{V}_F]$ 20° С

О таких системах следует помнить с самого начала, поскольку взаимодействие воды и воздуха, проходящих через радиатор, приводит к явлениям, которые при конструировании и выборе параметров системы отопления имеют существенное значение. Если управление тепловым потоком осуществляется путем изменения расхода жидкости с помощью крана отопителя, то при отоплении, включенном на полную мощность, т.е. при максимальном расходе жидкости, вода, протекая по радиатору, во всех местах имеет примерно одинаковую температуру, поэтому при равномерном обдуве радиатора воздухом, т.е. при одинаковой скорости воздуха в любом месте радиатора, можно ожидать равномерного распределения температур в сечении за радиатором.

Иначе обстоит дело при небольшой потребности в теплоте, т.е. при малом расходе жидкости. Вода, проходящая по радиатору, не имеет одинаковую температуру, она заметно охлаждается при перетекании по трубкам. В этом случае при однородном воздушном потоке не достигается равномерное распределение температур в сечении за радиатором. Температура воздуха на выходе из радиатора выше в той области, где жидкость входит в радиатор.

На рис. 10.11 показано распределение температур по фронтальной поверхности радиатора отопителя для четырех режимов работы при малых расходах воды. Расход воздуха во всех четырех случаях составлял 4 кг/мин. Температура воздуха на входе в радиатор подбиралась таким образом, чтобы во всех четырех случаях средняя температура воздуха в салоне составляла примерно 25°С. Расход воды изменялся ступенчато от 15 до 100 л/ч при неизменной температуре на входе в радиатор,

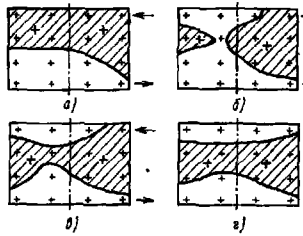


Рис. 10.11. Распределение по поверхности радиатора температур *выходящего воздуха и различие этих температур на выходе* из правой и левой половин радиатора при схеме протекания воды по рядам трубок навстречу друг другу и малом ее расходе:

а – расход воздуха 4 кг/мин; расход воды 15 л/ч; температура воды на входе в радиатор 82°С; температура воздуха на входе в радиатор 18°С; разность температур воздуха на выходе из правой и левой половин радиатора 5,1°С; *б* – расход воздуха 4 кг/мин; расход воды 30 л/ч; температура воды на входе в радиатор 82°С; температура воздуха на входе в радиатор 15°С; разность температур воздуха на выходе из правой и левой половин радиатора 4,8°С; *в* – расход воздуха 4 кг/мин; расход воды 50 л/ч; температура воды на входе в радиатор 82°С, температура воздуха на входе в радиатор 12°С; разность температур воздуха на выходе из правой и левой половин радиатора 3,8°С; *г* – расход воздуха 4 кг/мин; расход воды 100 л/ч; температура воды на входе в радиатор 82°С; температура воздуха на входе в радиатор 4°С; разность температур воздуха на выходе из правой и левой половин радиатора 3,3°С

равной 82°С. Рассматривается двухрядный алюминиевый радиатор с круглыми трубками, имеющими турбулизаторы, направление течения воды по рядам навстречу друг другу, т.е. по расположенному сзади ряду трубок течет справа налево, а по расположенному перед ним ряду трубок наоборот.

С помощью сетки из 16 термоизмерительных элементов, расположенных за радиатором, измерялась температура воздуха на выходе из радиатора. В каждом из рассматриваемых четырех случаев проведена линия средней температуры воздуха, выходящего из радиатора. Области с температурами выше среднего значения затемнены и обозначены знаком "+". Для каждого из четырех случаев приведена максимальная разность температур воздуха, выходящего из левой и правой половины радиатора.

При очень малом расходе воды, равном 15 л/ч или 0,25 л/мин, разность температур воздуха, выходящего из левой и правой половин радиатора, составляет примерно 5°С. Со стороны входа воды температура выше. С увеличением расхода воды разности температур воздуха на выходе из правой и левой половин радиатора становятся все меньше.

При равномерно распределенном по обдуваемой поверхности потоке воздуха на разность температур между различными участками поверхности радиатора можно оказывать существенное воздействие, применяя различные схемы движения воды по трубкам радиатора. Наряду с применяемой схемой подачи воды в трубки радиатора сильное влияние на равномерность температуры воздуха на выходе из радиатора оказывает также эпюра распределения скоростей воздуха на входе в радиатор.

Высокая скорость воздуха на входе сопровождается уменьшением получаемого перепада температур воздуха на входе и выходе из радиатора, и наоборот. При разработке системы отопления автомобиля можно за счет выбора схемы протекания воды по трубкам радиатора и распределения скорости воздуха по поверхности радиатора на входе в него при малых и очень малых расходах воды обеспечить равномерное распределение температуры воздуха на выходе из радиатора.

10.4.3. ВЕНТИЛЯТОР

Для создания потока воздуха системы отопления и вентиляции автомобиля устанавливаются осевые или центробежные вентиляторы. Осевые вентиляторы проще и надежнее в эксплуатации, чем центробежные, но более шумные в работе. В связи с повышающимися требованиями к комфорту в настоящее время отмечается явная тенденция к использованию более дорогих, но работающих с меньшим шумом, центробежных вентиляторов.

На рис. 10.12 приведены характеристики осевого и центробежного вентиляторов. Оба вентилятора подобраны таким образом, что в рабочей точке при неподвижном автомобиле имеет место одинаковый расход воздуха (точка пересечения с кривой сопротивления). Приведенные характеристики дают хорошее представление о различиях между двумя типами вентиляторов. Осевой вентилятор имеет более пологую расходно-напорную характеристику, чем центробежный. Это означает, что осевой вентилятор может обеспечивать большой расход воздуха при малом воздушном сопротивлении системы отопления и вентиляции и что расход

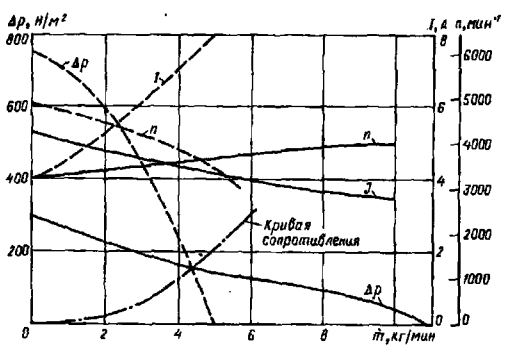


Рис. 10.12. Характеристики осевого и центробежного вентиляторов, построенные при одинаковых значениях расхода воздуха для неподвижного автомобиля: —— — осевой вентилятор; – – – – центробежный вентилятор; $U = 13$ В

воздуха, обеспечиваемый вентилятором, сильно уменьшается при небольшом увеличении воздушного сопротивления системы отопления и вентиляции. Расход воздуха, обеспечиваемый центробежным вентилятором, изменяется при увеличении воздушного сопротивления системы отопления и вентиляции существенно меньше. Кроме того, приведенные расходно-напорные характеристики вентиляторов показывают, что при наложении давления скоростного напора, имеющего место при движении автомобиля, расход воздуха, создаваемый центробежным вентилятором, увеличивается меньше, чем расход, создаваемый осевым вентилятором.

В отношении потребляемого тока оба типа вентиляторов также отличаются друг от друга. Частота вращения осевого вентилятора увеличивается по мере снижения создаваемого им давления, в то время как потребляемый ток уменьшается. Для центробежного вентилятора, наоборот, по мере падения давления и увеличения расхода частота вращения уменьшается, а потребляемый ток возрастает. Это приводит к необходимости особое внимание уделять тепловой нагрузке электродвигателя центробежного вентилятора при снижении давления. Электродвигатель должен быть спроектирован таким образом, чтобы он мог обеспечить длительную работу вентилятора на высшей ступени регулирования при максимальной скорости движения автомобиля и при открытом люке крыши, если он имеется. В этом случае необходимо предусмотреть специальное охлаждение электродвигателя воздухом. Известны также и другие, более дорогие технические решения тепловой защиты, обеспечивающие работу электродвигателя при снижении давления, создаваемого вентилятором.

10.4.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Особое внимание при разработке системы отопления автомобиля следует уделять устройствам, обеспечивающим возможность регулирования производительности системы отопления, т.е. средней температуры воздуха в салоне. При этом следует стремиться к обеспечению возможно более чувствительного регулирования, и устанавливаемая при регулировании температура по возможности не должна изменяться в зависимости от режима движения автомобиля. При рассмотрении тепловой характеристики радиатора (см. рис. 10.10) отмечалось, что она не является линейной и изменение расхода воды, связанное с изменением скорости движения и переменной передачи, а также изменение расхода воздуха, зависящего от скорости движения и выбора ступени работы вентилятора, сильно отражаются на температуре воздуха, выходящего из радиатора.

В настоящее время применяются в основном две различные системы регулирования температуры.

1. Производительность системы отопления регулируется изменением расхода воды. В этом случае, как уже отмечалось ранее, с помощью крана в зависимости от желаемой температуры в салоне через радиатор пропускается большее или меньшее количество воды. Управление этим краном, как правило, осуществляется из салона автомобиля с помощью гибкой тяги. Требования, предъявляемые к регулировочной характеристи-

ке этого крана, исключительно высоки; и если рассмотреть приведенный на рис. 10.13 расход воды в зависимости от регулировочного хода крана, то можно себе представить, каким он должен быть, чтобы обеспечить чувствительную регулировку, т.е. линейное увеличение температуры.

Примерно до 70 % регулировочного хода кран должен пропускать такой поток воды, который составляет примерно 10 % максимального расхода воды через радиатор. В конечной части регулировочного хода расход пропускаемой краном воды должен резко увеличиться до максимального значения. Трудности обеспечения такой характеристики заключаются не только в геометрии крана, а прежде всего в том, что для получения очень малых расходов воды необходимо очень маленькое проходное сечение, которое может легко и быстро забиваться примесями, содержащимися в охлаждающей жидкости. Возможным конструктивным решением крана является так называемый эксцентриковый кран. Он имеет регулировочную пластину, выполненную в виде осевой задвижки. По предложению Генгенбаха в ней для регулирования свободного сечения для протекания воды в области малых расходов выполнены клинообразные прорези.

На рис. 10.14 схематично представлен такой эксцентрик. Для пяти различных положений регулировки показано относительное расположение клинообразных прорезей и сечения канала, подающего воду в радиатор.

В положении *1(а)* сечение канала полностью перекрыто, кран закрыт. В положении *2(б)* небольшое количество воды может протекать через сечение, открываемое клинообразными прорезями. В положении *3(в)* за счет открытия серпообразного сечения начинается крутой рост характеристики расхода. В положении *5(д)* кран полностью открыт.

2. Производительность системы отопления регулируется изменением расхода воздуха, проходящего через радиатор. При таком способе регулирования температуры через радиатор постоянно протекает вода с расходом, соответствующим полностью открытому крану отопителя и зависящим только от частоты вращения двигателя. Получение желаемой температуры на выходе из отопителя достигается за счет смешивания потоков холодного и теплого воздуха. Регулировка потоков воздуха, один из которых проходит через радиатор, а другой минуя его, осуществляется с помощью двух смесительных заслонок, одна из которых расположена перед радиатором, а другая позади него. Теоретически достаточно было бы иметь одну смесительную заслонку перед радиатором, но тогда в области за радиатором всегда имело бы место нежелательное подмешивание теплого воздуха из-за завихрений и конвективного потока от радиатора даже при полностью закрытой заслонке теплого воздуха. А это приведет к тому, что даже при положении регулировки "Холод" будет иметь место ощутимый подогрев воздуха в отопителе. При наличии двух смесительных заслонок на автомобиле "Ауди 100" остаточный подогрев воздуха внутри отопителя при положении регулировки "Холод" и небольшом расходе воздуха составляет менее 2°С. Управление смеси-

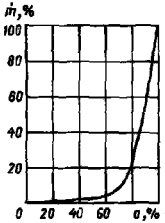


Рис. 10.13. Расход воды через радиатор системы отопления, необходимый для получения линейной зависимости увеличения температуры на выходе из радиатора от регулировочного хода крана при работе системы отопления

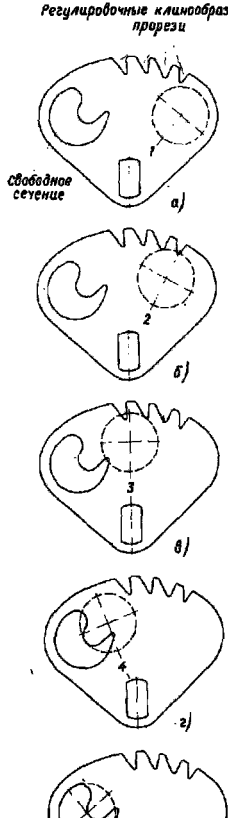


Рис. 10.14. Принципиальная схема эксцентрикового крана, устанавливаемого в системе отопления легковых автомобилей: *а* – исходное положение *1*; *б* – положение *2*, пологая часть характеристики; *в* – положение *3*, начало крутого подъема характеристики; *г* – положение *4*, область круто поднимающейся характеристики; *д* – положение *5*, конечное

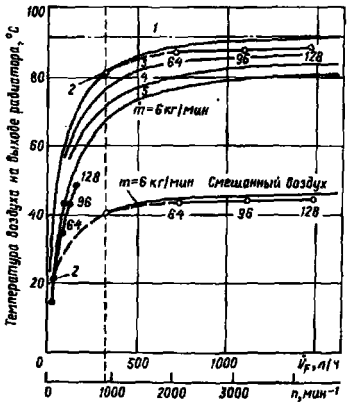


Рис. 10.15. Температура воздуха на выходе из радиатора системы отопления в зависимости от расхода воздуха и воды, температура наружного воздуха 0°С:
1 – принятое значение температуры воды на входе в радиатор; *2* – холостой ход

тельными заслонками осуществляется из салона автомобиля с помощью гибкой тяги.

Наряду с описанными двумя системами регулирования температуры известны системы и смешанного регулирования. Например, такая система, включающая кран, регулирующий расход воды, и *бейспасный канал для* подачи холодного воздуха, существовала на модели, предшествующей современному автомобилю "Ауди 100".

Типы систем регулирования температуры в салоне автомобиля были подробно рассмотрены Франком [10.8]. Об их преимуществах и недостатках можно судить по графику, приведенному на рис. 10.15.

На нем показано изменение температуры воздуха на выходе из радиатора при различных расходах воздуха в зависимости от расхода воды, который пропорционален частоте вращения двигателя. Температура воды на входе в радиатор принята 92°С, температура наружного воздуха – 0°С. Расход воздуха при неподвижном автомобиле должен составлять примерно 5 м³/мин = 6 кг/мин, что для пятиместного автомобиля соответствует удвоенному значению минимально допустимой подачи свежего воздуха на одного человека, которая принята равной 0,5 м³/мин. Чтобы при принятых условиях получить удовлетворительную температуру воздуха в салоне, примерно половина потока воздуха направляется через радиатор. Это значит, что при неподвижном автомобиле через радиатор необходимо подать 3 кг/мин воздуха. На графике для одного из значений расхода воздуха кружочками обозначены расходы воды, соответствующие скоростям движения автомобиля 64, 96 и 128 км/ч на прямой передаче. Из графика видно, что при данном значении расхода воздуха его температура на выходе из радиатора при скорости 64 км/ч почти на 1°С ниже температуры при 128 км/ч. Считая, как указывалось выше, что через радиатор направляется только половина расхода воздуха, а другая половина попадает в область за радиатором, минуя его, значение температуры на выходе из отопителя уменьшается в 2 раза, потому что теп-

лый, прогретый примерно до 87°С, воздух смешивается с таким же количеством воздуха при 0°С; примерно на 0,5°С уменьшается и указанное выше отклонение температур. Если рассмотреть максимальное отклонение температуры воздуха на выходе из отопителя между названными режимами движения и холостым ходом, то она составит примерно 4,5°С. Это означает, что средняя температура воздуха в салоне будет отклоняться примерно на 2°С, это значение в пределах чувствительности.

Если бы регулирование той же самой системы отопления осуществлялось за счет изменения количества воды, подаваемой в радиатор, и если принять, например, что при скорости движения 96 км/ч достигается температура воздуха на выходе из отопителя 43°С, т.е. такая же, как и в случае системы отопления, регулируемой за счет изменения расхода воздуха через радиатор, то при скорости 128 км/ч она возрастет до 48°С, при скорости 64 км/ч уменьшится до 35°С, а на холостом ходу даже до 22°С. Такое различие температур между холостым ходом и рабочими точками влияет на температуру в салоне, и это ведет к необходимости изменения регулировки температуры на выходе из радиатора при изменении режима движения. Кратковременные изменения скорости, например, при движении в гору, вследствие теплоемкости радиатора и инерционности системы не вызывают ощутимого изменения средней температуры в салоне, поэтому в таких случаях дополнительное повторное регулирование не нужно.

Рассматриваемый пример относился к случаю большого расхода воздуха, при меньших расходах воздуха изменения его температуры на выходе из радиатора при уменьшении расхода воды также меньше, что исключает необходимость дополнительного регулирования при изменении режимов движения. Это справедливо и в случае использования на автомобиле отопителя с увеличенной теплопроизводительностью, когда рабочие точки не находятся в зоне крутого подъема характеристики радиатора. При работе отопителя в режиме максимальной теплопроизводительности обе системы регулирования уже не различаются.

Преимуществом системы отопления является быстрая реакция на регулирующее воздействие. Сидящий в автомобиле человек быстрее ощущает измененную температуру, чем в случае инерционной системы отопления, регулируемой за счет изменения расхода воды, и быстрее находит приемлемое для него положение органов регулирования. По этой же причине регулирование температуры при такой системе реализуется проще, чем в случае системы отопления, регулируемой за счет изменения расхода воды, обладающей большой инерционностью и приводящей к более высоким отклонениям в температуре воздуха на выходе из отопителя в зависимости от режима движения.

10.5. ПРИМЕР СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

В качестве примера можно рассмотреть систему отопления автомобиля "Ауди 100". Бауэром в [10.3] была описана система отопления ав-

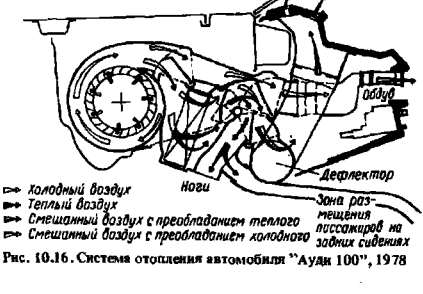


Рис. 10.16. Система отопления автомобиля "Ауди 100", 1978

томобиля "Ауди 100" выпуска 1969 г. Здесь приводится описание усовершенствованной системы современного "Ауди 100".

На рис. 10.16 показано сечение системы отопления автомобиля "Ауди 100". В сечении показаны схема подачи воздуха для обдува и обогрева ветрового стекла, схема подачи воздуха к дефлекторам обдува водителя и переднего пассажира, схема подачи воздуха в зону расположения задних пассажиров. Система отопления устанавливается симметрично относительно продольной плоскости симметрии автомобиля, за исключением расположенного с одной стороны воздухозаборника отверстия вентилятора. Корпус отопителя выполнен из двух половин с делением в продольной плоскости симметрии автомобиля. Заслонки, радиатор, вентилятор входят в обе половины. Отопитель устанавливается снаружи в пространство, изолированное от моторного отсека.

Однопоточный центробежный вентилятор имеет закругленные лопасти. Электродвигатель вентилятора снаружи полностью капсулирован и устанавливается в левой половине корпуса. Он охлаждается воздухом, отводимым из спирали вентилятора. Вентилятор имеет три ступени работы и управляется с помощью сопротивлений. В положении "вентиляция" благодаря уменьшению сопротивления магистрали увеличивается число оборотов вентилятора, изменение числа оборотов примерно соответствует одной ступени. Спираль расширяется как в радиальном, так и в осевом направлении.

Воздух с помощью двух связанных друг с другом смесительных заслонок может направляться либо через радиатор, либо через байпас, минуя его. Таким образом, можно установить любую желаемую температуру. В месте, где предусмотрено смешивание воздуха, холодный и теплый воздух не перемешиваются полностью. В верхней части поперечного сечения канала при смешивании воздух холоднее, чем в нижней. Это было использовано для того, чтобы воздух, направляемый в дефлекторы обдува на панели приборов и в канал для обдува и обогрева ветро-

вого стекла, имел более низкую температуру, чем воздух, направляемый в зону расположения ног. Таким образом выполняется одно из сформулированных ранее для системы отопления требований "слоистости" температур, т.е. по обеспечению в зоне расположения головы более низкой температуры, чем в зоне расположения ног. Стабильность температур при изменении режимов движения достигается благодаря использованию метода регулирования изменением соотношения расходов воздуха через радиатор и минуя его.

Регулирование распределения воздуха в отопителе на "Ауди 100" осуществляется с помощью рычажка, расположенного в месте размещения органов управления системой отопления. Обе направляющие воздушные заслонки движутся в противоположном друг другу направлении и связаны между собой через поводок. В крайнем правом положении рычага регулировки, соответствующем работе отопителя в режиме "размораживание" ветрового стекла весь поток воздуха направляется через дефлекторы обогрева ветрового стекла в панели приборов. В этом положении имеют место оптимальное осушение и размораживание ветрового стекла. В другом крайнем положении рычага регулирования ("обдув") увеличенный поток воздуха благодаря уменьшению дополнительного сопротивления за счет перекрытия канала подачи воздуха на лобовое стекло поступает через многочисленные дефлекторы для обдува. При промежуточных положениях рычага регулирования воздух распределяется в различных пропорциях по различным дефлекторам. При нормальных условиях оптимальное распределение воздуха отмечено пазом на шкале. Некоторые данные рассматриваемой системы отопления приведены в табл. 10.1.

10.1. Данные системы отопления автомобиля "Ауди 100" выпуска 1978 г.

Теплопроизводительность при температуре наружного воздуха −20° С, нормальный радиатор отопителя	8,9 кВт (примерно 7650 ккал/ч)
Теплопроизводитель при температуре наружного воздуха −30° С, радиатор отопителя в "северном" исполнении	10,4 кВт (примерно 8950 ккал/ч)
Площадь лобовой поверхности радиатора, имеющего габаритные размеры 280×152 мм²	4,26 дм²
Толщина радиатора	42 мм
Максимальный расход воздуха в положении "Обдув" при неподвижном автомобиле, окна закрыты	11,6 кг/ч

10.6 ОБОЗНАЧЕНИЯ

L_j, L_a – эквивалентная площадь сечений кузова, через которые происходит утечка воздуха;

$\dot{Q}_{1ee}$ – тепловой поток, рис. 10.10;

$\dot{V}_F$ – объемный расход жидкости, рис. 10.10;
I – электрический ток, рис. 10.12;
U – напряжение, рис. 10.12;
a – относительный регулировочный ход крана, рис. 10.13;
i – энтальпия, рис. 10.4, 10.5 и 10.6;
$\dot{m}$, $\dot{m}_l$ – расход воздуха;
n – частота вращения вентилятора, рис. 10.12;
p_∞ – атмосферное давление воздуха;
t_i – средняя температура воздуха в салоне;
t_a – температура наружного воздуха;
x – влагосодержание воздуха, рис. 10.4, 10.5, 10.6;
ρ – плотность воздуха.

11. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЕЙ

Вольф-Генрих Гухо

11.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

11.1.1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К АВТОМОБИЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Для того чтобы добиться улучшения аэродинамических и теплотехнических свойств автомобилей, рассмотренных в предыдущих разделах книги, проектировщикам необходимо приложить немалые усилия и выполнить значительный объем исследовательских и доводочных работ (см. п. 1.3.3). При разработке автомобиля дорожные испытания все еще являются важной составной частью и, помимо того, последней инстанцией, на которой должны проверяться результаты проектных работ.

Для облегчения проведения работ, связанных с улучшением аэродинамических свойств, оказывается целесообразным заменить движение по дороге имитацией этого движения в аэродинамической трубе. Для этого необходимо проанализировать реальный процесс движения.

На рис. 11.1 (по Гухо [11.1]) приведены факторы, оказывающие существенное влияние на обтекание и тепловую нагрузку автомобиля. Сначала следует рассмотреть обтекание. Как показано на рис. 4.2, 5.3 и 5.12, поле потока, обтекающего автомобиль, складывается из двух полей: одно возникает в результате движения автомобиля вперед, другое образуется в результате наличия естественного ветра. Поле потока естествен-

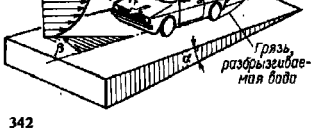


Рис. 11.1. Факторы, воздействующие на автомобиль в реальных условиях движения [11.1]

ного ветра, как показано на рис. 11.1, имеет характер пограничного слоя и удивительным образом видоизменяет эпюру скоростей набегающего на автомобиль потока (см. рис. 5.3 и 12.15). Из-за порывистости ветра его скорость и угол натекания на автомобиль β постоянно изменяются. Прилежащий к поверхности земли пограничный слой ветра турбулентный; высота этого слоя того же порядка, что и высота автомобиля. В реальных условиях движения автомобиля порывистость ветра заметно увеличивается из-за стоящих вдоль дороги различных объектов, а также из-за периодического попадания движущегося автомобиля в поле потока, образующееся за другими участниками движения, которые перемещаются навстречу или в попутном направлении (см. также пп. 5.2.1 и 5.3.1).

Следовательно, поле набегающего на автомобиль потока в сильной степени неоднородно и нестационарно; оно гораздо сложнее, чем поле потока самолета, летящего на крейсерской высоте полета. Поэтому требования к качеству потока в автомобильных аэродинамических трубах не идентичны требованиям, предъявляемым к потоку в авиационных аэродинамических трубах.

И температурное поле над дорогой не всегда однородное. При интенсивном солнечном излучении полотно дороги по сравнению с окружающим воздухом сильно нагревается и над дорогой образуется температурный пограничный слой.

Поле потока и температурное поле, которые существуют при движении в реальных дорожных условиях, можно воспроизвести в аэродинамической трубе только в сильно идеализированной форме однородными полями. Поэтому при оценке результатов испытаний следует помнить об этом.

Необходимая мощность кондиционера, устанавливаемого на автомобиль, очень сильно зависит от солнечного излучения, а также и от диффузионного излучения. Солнечное излучение в отношении спектра и направления в упрощенной форме воспроизводится в аэродинамической трубе, диффузионное излучение остается неучтенным.

Как отмечалось в п. 6.4, требуются существенные конструктивные затраты, чтобы обеспечить отсутствие загрязнения, забрызгивания грязной водой и залепливания снегом поверхности кузова, его отдельных деталей, влияющих на безопасность движения. Воспроизведение дождя в аэродинамической трубе не вызывает затруднений. Имитация процессов, связанных с загрязнением, возможна лишь частично, прежде всего потому, что воспроизведение вращения колес автомобиля в аэродинамической трубе требует существенных затрат.

Исходя из исследований, проведенных на моделях, все названные работы могут быть проведены на дороге. Основным недостатком метода испытаний в дорожных условиях является низкая степень воспроизводимости результатов. При этом дополнительно возникают большие трудности, связанные с поиском дорог, которые при заданном подъеме имеют достаточную протяженность, обеспечивающую достижение установившихся режимов при различных температурных испытаниях. Следует

отметить, что получение и регистрация данных измерений, их обработка при дорожных испытаниях в настоящее время не вызывают столь больших затруднений, как раньше.

11.1.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Автомобильную аэродинамику по существу решаемых задач, а также равным образом и в отношении требований к технике моделирования, можно подразделить на четыре группы. Они представлены на рис. 11.2 для легковых автомобилей (по Гухо [11.2]), и на рис. 11.3 для грузовых автомобилей.

При рассмотрении сил и моментов, определяющих необходимую мощность двигателя и курсовую устойчивость, речь идет о том, чтобы воспроизвести процесс обтекания по возможности ближе к реальным условиям движения. Так как давление p в каждой точке поверхности автомобиля пропорционально квадрату местной скорости v: $p \sim v^2$, то расхождения в распределении скоростей сильно повлияют на результаты испытания. Процесс обтекания можно очень хорошо воспроизвести в *аэродинамической трубе*, учитывая при этом упомянутое ранее ограничение по однородности поля потока в трубе. Как показано в п. 11.3, в различных аэродинамических трубах удается достичь очень хорошего согласования между данными измерений в аэродинамической трубе и на дороге. В аэродинамической трубе в соответствии с общим принципом относительности классической механики относительное движение между автомобилем и окружающим его воздухом происходит в условиях так называемого обращенного движения, т.е. автомобиль стоит неподвижно и обдувается набегающим со скоростью движения автомобиля потоком воздуха. При исследовании нестационарных процессов при боковом ветре (см. п. 5.2.3) проводятся испытания методом буксировки модели автомобиля (наиболее распространенный метод испытаний в судостроении). *Буксирные устройства* также используются в настоящее время для воспроизведения процессов движения по туннелю (см. также п. 8.5.5). В данном случае уместно проведение параллелей с аэродинамикой рельсовых транспортных средств (см. п. 1.13). При проведении испытаний в аэродинамической трубе рекомендуется придерживаться принципа обращенного движения (рис. 11.4).

При исследовании обтекания отдельных деталей (см. п. 6) к качеству потока предъявляются те же требования, что и в первом случае (при изучении сил и моментов); однако для выполнения этого вида работ только аэродинамической трубы недостаточно. Так, например, исследования, направленные на снижение аэродинамического шума, из-за обычно высокого шума в аэродинамической трубе возможны лишь в ограниченном объеме. При изучении вопросов загрязнения автомобиля необходимо учитывать относительное движение между автомобилем и полотном дороги, вращение колес, а реализация этого сопряжена с весьма значительными техническими трудностями.

При исследованиях, связанных с разработкой систем охлаждения, к качеству потока предъявляются лишь ограниченные требования. При

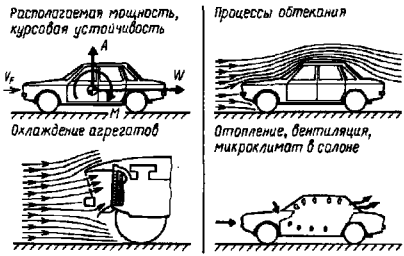


Рис. 11.2. Основные группы задач аэродинамики легковых автомобилей [11.2]

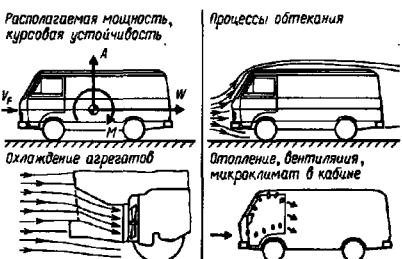


Рис. 11.3. Основные группы задач аэродинамики грузовых автомобилей



Рис. 11.4. Прямое и обращенное движение соответственно в реальных дорожных условиях и в аэродинамической трубе

этом необходимо точное воспроизведение тяговой силы, частоты вращения ведущих колес и также температуры наружного воздуха. Имитация обтекания передка автомобиля сама по себе связана с небольшими затратами. Для измерения теплотехнических параметров систем охлаждения используются специальные испытательные установки, для которых больше соответствует название *"климатическая камера"* или *"динамометрический стенд с беговыми барабанами и имитацией обдува холодным воздухом"*, чем "аэродинамическая труба". Такие устройства описаны в п. 11.5.

При проведении испытаний, связанных с отоплением, вентиляцией, созданием микроклимата в салоне, для имитации движения в реальных условиях эксплуатации одинаково важны как требования, предъявляемые к испытаниям, связанным с внешним обтеканием автомобиля, так и требования к испытаниям по охлаждению агрегатов. Наряду с необходимостью точно смоделировать такие существенные климатические параметры, как температура воздуха, влажность и солнечное излучение, требуется точно воспроизвести нагрузку двигателя. Тепловой режим в салоне автомобиля очень сильно зависит от состояния потоков, обтекающего автомобиль и протекающего через него. Конвективный тепловой поток прямо пропорционален количеству воздуха, протекающего через салон; его необходимо точно воспроизвести. Тепловой поток $\dot{Q}_L$, определяемый теплопроводностью материала кузова и теплоотдачей деталей, образующих его внутреннюю структуру и наружную поверхность $\dot{Q}_L \sim v^{0,5} \div v^{0,8}$. То есть в данном случае погрешность в воспроизведении скорости набегающего потока относительно мала и носит нелинейный характер. Поэтому в так называемых *климатических каналах*, используемых для такого рода испытаний, довольствуются относительно малым поперечным сечением потока в рабочей части, что при распределении скоростей потока вокруг автомобиля ведет к бо́льшим отклонениям, чем допустимы при аэродинамических испытаниях (см. п. 11.5.5).

Большому количеству различных испытательных устройств, позволяющих в зависимости от целей испытаний воспроизводить один главный параметр точно, а остальные только приблизительно, существует альтернатива: все основные параметры имитировать одновременно и по возможности в широких пределах изменения с помощью одного испытательного стенда, так называемой аэроклиматической трубы. Все названные в данном разделе книги возможные задачи моделирования реальных условий движения иллюстрируются в п. 11.5 практическими примерами.

Использование названных выше испытательных стендов в процессе создания автомобиля может быть успешным только тогда, когда имеется точная информация о том, как результаты испытаний на отдельных испытательных установках количественно перенести на движение в дорожных условиях или сравнивать их друг с другом. В самолетостроении и судостроении были приложены существенные усилия, чтобы благодаря сравнению различных испытательных установок (аэродинамических труб, гидроканалов) с помощью контрольных моделей выявить сущест-

вующие при имитации недостатки и дать им количественную оценку. Об исследованиях по этому вопросу в автомобильной аэродинамике рассказывается в пп. 11.3.2 и 11.5.7.

11.2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ

11.2.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Информация об аэродинамических трубах подробно изложена в соответствующей специальной литературе. В качестве характерных работ можно назвать книги Пэнкэста и Холдера [11.3], а также Попа [11.4]. Общий обзор особенностей аэродинамических труб сделал Вузст [11.5]. Более новые сведения, например по формообразованию сопел или конструкции направляющих устройств аэродинамических труб, пока не нашли отражения в существующих устаревших справочниках, поэтому их можно найти лишь в отдельных публикациях.

В рассматриваемом разделе книги обсуждаются проблемы, специфичные для автомобильных аэродинамических труб (см. работу Гухо [11.6]).

11.2.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Устройство и принцип действия аэродинамической трубы понятны из рис. 11.5. В зависимости от способа подачи воздуха различают два типа конструкций. Внизу на рис. 11.5 представлена замкнутая аэродинамическая труба с перемещением одной и той же массы воздуха по замкнутому каналу (Геттингенская конструкция). Циркуляция воздуха по каналу обеспечивается вентилятором. Вверху приведена схема аэродинамической трубы незамкнутого типа (конструкция Эйфеля). В такой трубе через рабочую часть проходит в каждый момент времени новая порция воздуха, входящего из окружающей среды и выходящего наружу с об-

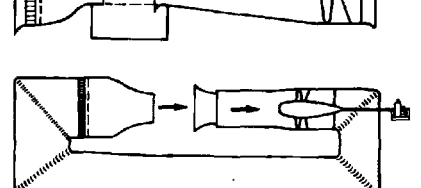


Рис. 11.5. Аэродинамические трубы незамкнутого и замкнутого типов (конструкция Эйфеля и Геттингенская конструкция) [11.5]

ратной стороны. Наряду с этими двумя типами была разработана конструкция, являющаяся как бы переходной между ними: конструкция с открытым возвратом воздуха, которая, как правило, тоже связывается с именем Эйфеля. При такой конструкции воздух внутри здания, окружающего аэродинамическую трубу, возвращается от выпускного диффузора к входной воронке. В новых аэродинамических трубах такого типа окружающее трубу помещение следует проектировать таким образом, чтобы возврат воздуха происходил по возможности без потерь. Примеры аэродинамических труб трех типов рассматриваются в п. 11.5.

Все три типа аэродинамических труб имеют свои преимущества и недостатки, оценить которые в количественном отношении можно только в каждом конкретном случае применения.

Достоинством аэродинамической трубы Геттингенской конструкции является меньшая требуемая мощность привода. Это приводит к меньшим эксплуатационным затратам, с одной стороны, благодаря меньшему расходу потребляемой электродвигателем энергии, а с другой стороны, благодаря меньшим потерям энергии в подводящих кабелях, которые для больших аэродинамических труб составляют весьма существенное значение. Меньшими будут и капитальные вложения на приобретение и монтаж привода, но капитальные затраты на строительство самого аэродинамического канала будут существенно более высокими, чем для незамкнутого аэродинамического канала. Модели автомобилей для аэродинамических испытаний изготовляются преимущественно из пластилина, а он при повышении температуры теряет свою твердость. Поэтому в аэродинамических трубах замкнутого типа необходимо предусматривать теплообменник для охлаждения воздуха, даже тогда, когда аэродинамическая труба не является климатической в том смысле, о котором говорилось выше. Потеря давления в теплообменнике, в свою очередь, требует дополнительного увеличения мощности привода, что несколько уменьшает выигрыш, получаемый в эксплуатации для труб замкнутого типа. Аэроклиматические трубы могут быть только замкнутого типа. Климатические каналы до сих пор тоже выполнялись только по Геттингенской схеме.

Существенным недостатком незамкнутой аэродинамической трубы по схеме Эйфеля, устанавливаемой, как правило, вне здания на открытом пространстве, является зависимость параметров потока от внешних погодных условий. При этом особые трудности связаны с предотвращением влияния атмосферного ветра на качество потока в рабочей части трубы. Поэтому ее можно использовать только в местах с умеренным климатом. Из опыта эксплуатации большой аэродинамической трубы Эйфеля в автомобильной промышленности известно, что в среднем один день измерений в неделю теряется из-за неблагоприятных погодных условий. Сетки, устанавливаемые перед входным сечением аэродинамической трубы и используемые для предотвращения засоса вместе с воздухом посторонних предметов (камней, листьев деревьев, птиц и т.п.) могут исключать влияние погоды только при соответствующей их конструкции. Другим недостатком аэродинамической трубы Эйфеля,

расположенной на свободном пространстве, является излучение ею шума в окружающую среду.

Достоинствами аэродинамической трубы Эйфеля являются малые затраты на ее сооружение и эксплуатацию. Если она располагается на открытом воздухе, то при проведении испытаний автомобиля с работающим двигателем можно отказаться от отсоса выхлопных газов. В простейшем случае аэродинамическую трубу Эйфеля можно выполнить с закрытой со всех четырех сторон рабочей частью, возможен также вариант с открытой рабочей частью, но он обходится дороже в строительстве.

11.2.3. ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ

Размеры, мощность и качество потока аэродинамической трубы определяются конструкцией рабочей части, размерами сопла и форкамеры, конструкцией вентилятора и его привода. В климатических каналах оказывает влияние теплообменник. В данном разделе книги рассмотрены только перечисленные четыре элемента конструкции; сведения о других элементах, таких, как диффузоры, поворотные направляющие лопатки, сетки и спрямляющие решетки, можно найти в литературе [11.3], [11.4].

Габаритные размеры аэродинамической трубы определяются в первую очередь размерами *рабочей части*, особенно площадью ее поперечного сечения. Для достижения идентичности процесса обтекания в аэродинамической трубе реальным условиям взаимодействия движущегося автомобиля с окружающим его воздухом отношение площади лобового сопротивления автомобиля A к площади поперечного сечения потока в рабочей части аэродинамической трубы A_D, называемое коэффициентом блокировки φ, должно быть как можно меньше. Если исходить из площади лобового сопротивления легкового автомобиля $A = 2{,}0$ м^2 (например, "Ауди 100" выпуска 1978 г.), то, следуя принятому в авиационной аэродинамике требованию, согласно которому не рекомендуется превышать значения коэффициента блокировки $\varphi = 0{,}05$, приходят к тому, что необходимо иметь площадь поперечного сечения сопла $A_D = 40$ м^2. Из всех автомобильных аэродинамических труб этому требованию удовлетворяет только новая аэродинамическая труба "Дженерал Моторс" ($A_D =$ 65,9 м^2). Все остальные аэродинамические трубы, используемые автомобильными фирмами (см. рис. 1.46) этому требованию не удовлетворяют. Сравнительные измерения в аэродинамических трубах с различными размерами сечения потока в рабочей части (см. п. 11.5.7) позволяют сделать вывод о том, что в автомобильной аэродинамике можно допустить и гораздо большие значения коэффициента блокировки.

За счет различного конструктивного исполнения аэродинамической трубы и вводимых эмпирических поправок к результатам измерений предпринимаются попытки создавать аэродинамические трубы по возможности меньших размеров. С одной стороны, стремятся воспроизвести характер невозмущенного потока, имеющего место в неограниченном

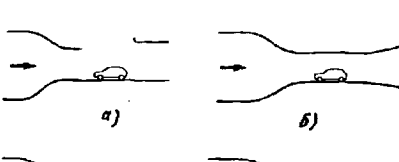


Рис. 11.6. Типы конструкций рабочей части аэродинамических труб:
а – открытая; *б* – закрытая; *в* – в форме линий тока; *г* – с воздухопроницаемыми стенками (с продольными щелями)

стенками пространстве за *счет соответствующего оформления границ* потока меньших размеров. С другой стороны, ограниченность размеров сечения потока в рабочей части учитывается введением расчетных поправок к результатам измерений. Об этих поправках будет рассказано в п. 11.3.3.

На рис. 11.6 показаны четыре типа конструкции рабочей части; для автомобильных аэродинамических труб общим элементом приведенных типов рабочей части является наличие ровного основания, имитирующего полотно дороги. Подробнее вопросы, связанные с моделированием полотна дороги, рассмотрены в п. 11.3.2. В аэродинамических трубах с открытой рабочей частью (рис. 11.6, *а*) велики потери кинетической энергии потока, вызванные взаимодействием струи с *окружающим* воздухом. Это приводит к необходимости увеличения мощности привода и ограничивает длину рабочей части.

Существенное преимущество открытой рабочей части заключается в том, что при правильном выборе формы и размеров входного отверстия диффузора градиент статического давления по оси аэродинамической трубы пренебрежимо мал. Это имеет особенно важное значение при измерении аэродинамического сопротивления тел, имеющих сравнительно большую длину и большие вертикальные ограничивающие поверхности, так как даже небольшие градиенты давления в осевом направлении в этом случае могут привести к заметным ошибкам (эффект выталкивающей силы). Другое преимущество открытой рабочей части заключается в том, что по сравнению с закрытой рабочей частью суммарная поправка на коэффициент блокировки существенно меньше. И наконец, открытая рабочая часть благодаря хорошему доступу облегчает проведение экспериментов и измерение характеристик потока. Недостатками открытой рабочей части являются относительно большой коэффициент потери скоростного напора потока в силу названной выше причины и высокий уровень *шума при работе трубы, с которым* невозможно бороться. В климатических каналах с открытой рабочей частью окружающее рабочую часть

помещение должно входить в область с контролируемыми климатическими параметрами.

Преимущество закрытой рабочей части (рис. 11.6, *б*) заключается в ее большей полезной длине; потери скоростного напора по ходу потока в аэродинамической трубе существенно меньше, чем в открытой рабочей части и определяются потерями на трение о стенки. Благодаря небольшому расширению поперечного сечения аэродинамической трубы в направлении потока это уменьшение давления можно компенсировать. Однако точную компенсацию таким способом можно осуществить только для одного конкретного случая течения потока, например для случая, когда в рабочей части отсутствует автомобиль; для всех других случаев ее можно считать приблизительной, и необходимо вводить поправку.

Существенным недостатко закрытой рабочей части является ее чувствительность к блокировке; поправка на коэффициент блокировки в сумме примерно вдвое больше, чем для открытой рабочей части. При большом угле скоса потока β из-за деформации струи могут иметь место отрыва от стенок аэродинамической трубы; корректикровка угла скоса в этом случае уже невозможна.

Для устранения такого недостатка закрытой рабочей части, как большая поправка на коэффициент блокировки, стенки рабочей части выполняют в форме линий тока (streamlined walls). Суть заключается в том, что характер линий тока на определенном удалении от поверхности автомобиля, так называемое поле дальней зоны, уже не так сильно зависит от формы отдельных деталей автомобиля. Поле дальней зоны в большей степени определяется габаритными размерами – длиной, высотой, шириной – а также рассчитанным с их помощью коэффициентом полноты (см. п. 4). Габаритные размеры легковых автомобилей изменяются в определенных пределах. Так, для европейских легковых автомобилей площадь лобового сопротивления автомобиля среднего класса составляет примерно $A \approx 1{,}85$ м^2, отклонение для больших и меньших легковых автомобилей составляет примерно ± 15 %, если не рассматривать самые маленькие автомобили. Если стенки закрытой рабочей части аэродинамической трубы выполнены с учетом характера обтекания автомобиля среднего класса в неограниченном стенками пространстве, то процесс обтекания меньших и больших автомобилей искажается несущественно.

Сравнение процессов обтекания на основании анализа видимых благодаря струйкам дыма линий подтверждает сказанное выше. Как видно из рис. 11.7, уже при высоте примерно 2 м над полотном дороги линии тока различных автомобилей очень близки друг другу. Стэффорду [11.7] удалось доказать, что если стенки закрытой рабочей части аэродинамической трубы выполнить в форме линий тока с учетом сказан-

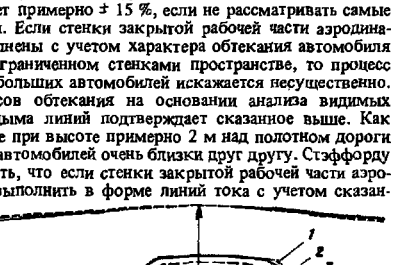


Рис. 11.7. Сравнение поля потока дальнейшей зоны различных легковых автомобилей (*1* – "Гольф", *2* – "Ауди100", *3* – "Сирокко") по виду линии тока, выбранной в продольном сечении автомобиля

ного выше, то при коэффициенте блокировки, равном 20 %, получается такой же результат, что и при закрытой рабочей части с параллельными стенками и коэффициентом блокировки всего лишь 5 %. Закрытая рабочая часть со стенками в форме линий тока особенно рекомендуется для больших климатических каналов ($A_D \approx 10\ м^2$). В этом случае речь идет не о том, чтобы производить таким образом корректировку распределения давления, а о том, чтобы в процессе измерения иметь состояние потока, которое соответствует тепловой нагрузке автомобиля при движении по дороге.

Использованием закрытой рабочей части, имеющей в стенках продольные щели, была предпринята попытка объединить преимущества открытой и закрытой рабочих частей и избавиться от недостатков, свойственных каждой из этих схем. По сведениям Гухо эта идея принадлежит Вигхарду [11.8] и Вэндрею [11.9]. При несжимаемом потоке стенки, имеющие продольные щели, нашли применение в водных каналах и аэродинамических трубах (например, аэродинамическая труба института судостроения университета г. Гамбурга), используемых для изучения гидродинамики судов, т.е. в тех случаях, когда необходимо обеспечить возможность проведения исследований особо длинных тел при достаточно больших числах Рейнольдса. Автомобильные аэродинамические трубы аэротехнического института в г. Сент-Сире (см. работу Петерсона [11.10]) и Баварского моторного завода (*BMW*) в г. Мюнхене также имеют закрытые рабочие части с продольными щелями в стенках. Относительная проницаемость стенок рабочей части (отношение площади продольных щелей к площади закрытой поверхности) подбирается с помощью градуировочных измерений таким образом, чтобы распределение давления по возможности приближалось к распределению давления в потоке, не ограниченном стенками. В аэродинамической трубе в г. Сент-Сире относительная проницаемость стенок составляет 28 % (см. [11.10]). В какой мере это значение приемлемо для всех легковых автомобилей, до сих пор еще неизвестно.

Степень поджатия *сопла аэродинамической трубы* и его форма в значительной степени определяют качество потока в рабочей части и необходимую мощность привода. Коэффициент поджатия K (см. рис. 11.8) равен отношению площадей на входе в сопло и на выходе из него $K = A_w/A_D$. Высокая степень поджатия способствует выравниванию профиля скоростей потока на выходе из сопла и уменьшению турбулентности. Из этих соображений аэродинамические трубы, предназначенные для испытания самолетов выполняют с большим коэффициентом поджатия; Брэдшоу и Пэнкэст [11.11] рекомендуют для них значения $k = 10 \div 12$. В незамкнутых аэродинамических трубах значения коэффициента поджатия гораздо меньше, обычно выбирают $k = 2 \div 3$.

В связи с тем, что к воспроизводимому полю потока в патомобильной аэродинамической трубе предъявляются другие требования (см. п. 11.1.1), повышенные затраты, связанные с получением высокого значения коэффициента поджатия, рекомендуемого в [11.11], не имеют

expert22 для http://rutracker.org

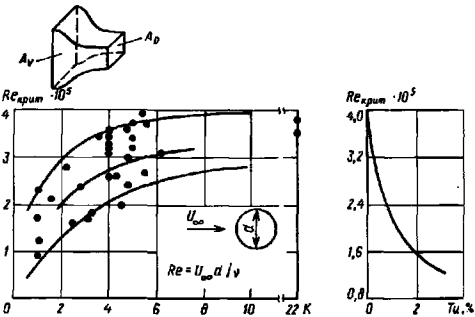


Рис. 11.8. Критическое число Рейнольдса ($Re_{крит}$) и степень турбулентности сопел аэродинамических труб ($Tu = (\overline{Vu'^2}/U_\infty)100$) [11.6], коэффициент поджатия $K = A_V/A_D$

смысла. Если в данном случае и имеет место тенденция к большим коэффициентам поджатия, то лишь с единственной целью — иметь более низкое значение мощности привода. Если принять мощность привода P_0, соответствующую коэффициенту поджатия сопла K_0, то, по оценке Пиатека [11.12], имеет место приведенное на рис. 11.9 уменьшение необходимой мощности привода с увеличением коэффициента поджатия сопла. При этом предполагается, что мощность потока остается постоянной. В первом приближении можно считать, что потери в сопле, в рабочей части и на входе в диффузор остаются неизменными, в то время как потери в остальных участках аэродинамической трубы при сохранении геометрического подобия уменьшаются в $(l/K_{нов} : K_0)^2$ раза. Естественным следствием сохранения геометрического подобия является увеличение объема, занимаемого аэродинамической трубой, с увеличением коэффициента поджатия. Если использовать рекомендуемый в [11.11] короткий диффузор перед форкамерой, то можно избежать значительного увеличения объема, занимаемого аэродинамической трубой, при увеличении степени поджатия сопла, но при этом уменьшение необходимой мощности привода с увеличением степени поджатия уже не будет выражено так сильно.

Определяющим для качества потока в аэродинамической трубе наряду с коэффициентом поджатия является форма сопла. На выходе из сопла поле скоростей должно быть равномерным. По соображениям стоимости сопло должно быть как можно короче. Очень важно, чтобы локальный вектор скорости в каждой точке потока был параллелен оси аэродинамической трубы. Из многочисленных математических зависимостей, предлагаемых для расчета геометрии сопла, до сих пор пред-

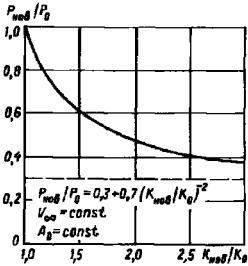


Рис. 11.9. Уменьшение необходимой мощности привода аэродинамической трубы с ростом коэффициента поджатия K; если аэродинамическая труба оснащена теплообменниками, то имеют место потери давления в сопле, в рабочей части и на входе в диффузор, они составляют примерно 30 % мощности привода и остаются постоянными [11.12]

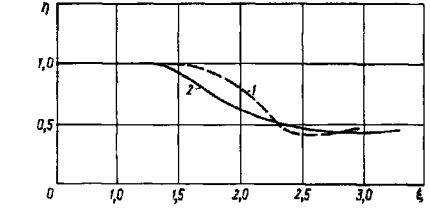


Рис. 11.10. Сравнение контуров осесимметричных сопел аэродинамических труб по Бергеру (*1*) и Витошинскому (*2*) [11.14]

почтение отдавалось расчетной формуле Витошинского [11.13], которая хорошо подходит для расчета осесимметричного сопла. Эта формула не дает рекомендаций по выбору длины сопла. Экспериментально установлено, что хорошие результаты можно получить для таких сопел при их длине, равной примерно 1/3 диаметра входного сечения. При этом, следуя рекомендации Прандтля, сопло на выходе немного расширяли. В более позднее время появились методы расчета, базирующиеся на принципе проверочного расчета: предварительно задается форма сопла, и ее изменяют до тех пор, пока на выходе из сопла не будет получено желаемое поле скоростей. Такой метод был предложен Бергером [11.14] для равномерного и осесимметричного потока; при расчете контура учитывается образование пограничного слоя. На рис. 11.10 показан рассчитанный по методу Бергера контур в сравнении с контуром, рассчитанным по формуле Витошинского; небольшое расширение контура на выходе является результатом расчета по Бергеру. При лучшем (расчетном) распределении скоростей на выходе сопло по Бергеру короче сопла по Витошинскому. Сведения об экспериментальном подтверждении этих результатов до сих пор не были опубликованы.

Метод, предложенный Морелем [11.49] для расчета осесимметричных сопел, приводит к контурам, которые очень близки к контурам, полученным по методу Бергера. Выбор параметров сопла по методу More-

ля осуществляется на основе специальных проектных диаграмм; экспериментальное подтверждение этого метода также пока отсутствует.

Скорость потока в аэродинамической трубе должна регулироваться плавно. В автомобильных аэродинамических трубах, кроме того, должна существовать возможность точного воспроизведения малых скоростей потока. Это необходимо при проведении работ, связанных с определением размеров радиатора, поскольку как уже описывалось в п. 9, одним из экстремальных режимов является медленное движение в гору. В этом случае охлаждению способствуют как вентилятор радиатора, так и обтекающий воздушный поток, поэтому точное воспроизведение обтекающего потока необходимо.

Для регулирования скорости потока в аэродинамической трубе принципиально возможны два способа: изменение угла атаки *лопастей вентилятора* при его постоянной частоте вращения и изменение частоты вращения вентилятора при постоянном угле атаки лопастей.

Преимуществом изменения угла атаки лопастей является возможность быстро изменять скорость потока и простота привода. Недостатком является высокий уровень шума при всех скоростях потока. Благодаря применению асинхронного двигателя с переключением полярности можно реализовать возможность работы вентилятора при втором, более низком числе оборотов, например, когда нужно провести исследования по аэродинамическому шуму ветра. Другими недостатками регулирования скорости за счет изменения угла атаки лопастей являются чувствительность механизма поворота лопастей и высокий момент инерции ротора. Благодаря внедрению облегченных конструкций, заимствованных из самолетостроения, эти недостатки можно преодолеть.

В новых аэродинамических трубах осуществляют регулирование скорости за счет изменения числа оборотов вентилятора. Роторы вентиляторов выполняются облегченными; для лопастей используются дерево или стеклопластик. На смену агрегату генератор–двигатель (агрегат Леонардо) пришло тиристорное управление. Существует возможность непосредственного привода вентилятора от теплового двигателя (например, использование турбовинтового агрегата), но, по сведениям Гухо, до сих пор практического применения это не нашло.

Определение параметров *теплообменника* аэродинамической трубы должно осуществляться с учетом не только стационарного режима. Важно, чтобы теплообменник был эффективным и обладал способностью быстро обеспечивать желаемый уровень температур. Для уменьшения потерь давления теплообменник рекомендуется устанавливать в части трубы, имеющей большую площадь поперечного сечения. Для этого лучше всего подходит участок, где оканчивается диффузор или форкамера (см. также п. 11.3.1).

11.2.4. ОСНАЩЕНИЕ

Для проведения измерений сил применяют шестикомпонентные весы (см. также п. 12.1.1). В аэродинамических трубах, используемых в автомобилестроении, применяются исключительно стационарные весы,

устанавливаемые под измерительным участком. Наряду с простотой установки на них модели существенным преимуществом этих весов является отсутствие необходимости введения поправок на подвеску весов. Необходима лишь поправка на подъемную силу, действующую на опорные платформы, которая учитывает то, что вследствие потока вокруг колеса на платформах создается поле пониженного давления, влияющее на подъемную силу, действующую на не закрытую колесом поверхность. "Классические" весы со съемными грузами все чаще и чаще вытесняются весами с динамометрами, хотя по точности и надежности они несколько хуже.

К другим измерительным системам автомобильной аэродинамической трубы относятся различные устройства, предназначенные для измерения давления и температуры. Все измеряемые в ходе процесса параметры выводятся на печатающее устройство, работающее в комплексном режиме с вычислительной машиной, управляющей процессом.

Как правило, автомобильные аэродинамические трубы оснащаются оборудованием для моделирования циркуляции охлаждающей жидкости, что позволяет осуществить разработку радиатора уже на фазе моделирования, а также оборудованием для получения расходно-напорной характеристики кузова (см. п. 12.1.5).

Для проведения различных тепловых испытаний необходима имитация климата. Должна существовать возможность воспроизведения температуры воздуха, солнечного излучения, влажности воздуха (включая тропический дождь). Нагрузочный режим движения автомобиля воспроизводится с помощью роликового испытательного стенда, передающего нагрузку на колеса автомобиля.

При визуализации процессов обтекания необходимо правильное освещение. Дым или пары масла могут стать хорошо заметными в затемненном пространстве, если исследуемое поле потока правильно освещается. Потоки вихревого следа за автомобилем в общем случае освещаются на большой поверхности (см. рис.1.2); при фотографировании потоков, выделяемых с помощью отдельных "струек" дыма, лучше подходит двухмерная световая вуаль (см. рис. 1.1 работы Гухо, Янссена [11.15]).

11.3. ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ИМИТАЦИИ

11.3.1. КАЧЕСТВО ПОТОКА

Требование по обеспечению равномерного распределения скоростей по поперечному сечению потока в рабочей части в большей степени определяется желанием иметь в различных аэродинамических трубах одинаковые условия проведения испытаний и, следовательно, иметь возможность для сравнения результатов, чем непосредственно требованиями воспроизведения движения в дорожных условиях. При коэффициенте поджатия $K = 4$ и при правильно подобранном сопле можно получить поле скоростей, в котором скорость потока в любой точке, за исключением

пограничной области, отличается от средней скорости потока не более чем на ±1 %. Этого вполне достаточно в автомобильной аэродинамике.

Большое значение в автомобильных аэродинамических трубах придается углам скоса потока в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Из-за наличия пограничного слоя на поверхности основания и весовых платформ в автомобильных аэродинамических трубах отдается предпочтение небольшому положительному углу скоса потока в вертикальной плоскости. Скос потока в вертикальной плоскости вызывает изменение угла атаки автомобиля, который, как показано на рис. 4.43, оказывает существенное влияние на силу сопротивления воздуха. Это влияние особо отчетливо может проявиться при оптимизации радиусов кромок по методу, изложенному в п. 4.6.1. Асимметрии в помещении, окружающем рабочую часть трубы, могут привести к появлению угла скоса потока в горизонтальной плоскости. До тех пор, пока он мал, его влияние на силу сопротивления воздуха очень незначительно (см. рис. 4.46). Но для точного определения боковых сил и вызываемых ими боковых отклонений в дорожных условиях необходимо иметь точно направленный поток.

В связи со сказанным выше, несмотря на возникающие дополнительные затраты, рекомендуется конструировать сопла аэродинамических труб таким образом, чтобы можно было регулировать направление потока.

В климатических каналах следует обратить внимание на равномерное распределение температур по поперечному сечению потока. Из-за неравномерной эпюры распределения температур на выходе из теплообменника, что является характерной особенностью теплообменника с перекрестным током, рекомендуется устанавливать его как можно дальше от сопла аэродинамической трубы вверх по течению, чтобы обеспечить выравнивание температур на более длинном участке течения.

11.3.2. СПОСОБЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДОРОГИ

Относительное движение между полотном дороги и автомобилем при испытаниях в аэродинамической трубе имитируется лишь в исключительных случаях. Как правило, в качестве полотна дороги используется ровное основание рабочей части трубы. Принципиально из-за возникающего пограничного слоя над основанием рабочей части имеет место поле потока, отличающееся от поля потока в случае движения по дороге. Существует целый ряд предложений, направленных на улучшение имитации полотна дороги в аэродинамической трубе. Они представлены на рис. 11.11 (см. работу Гухо и Янссена [11.16]).

Наиболее близким к реальным условиям решением является применение движущейся ленты. Как показано на рис. 11.12 (по данным Бове и других [11.17]), таким способом моделирования полотна дороги можно почти полностью устранить прилежащий к основанию пограничный слой. Это подтверждается измерениями Розе и Кэрра [11.18]. Трудности вызывает установка модели над движущейся лентой, прежде всего тогда, когда испытания проводятся с моделями в натуральную величину.

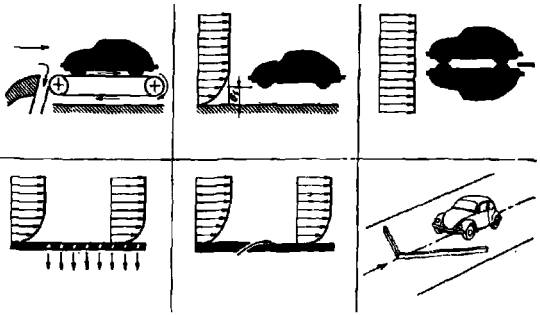


Рис. 11.11. Способы имитации полотна дороги в аэродинамической трубе [11.16]

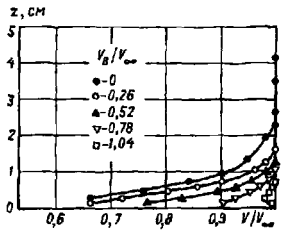


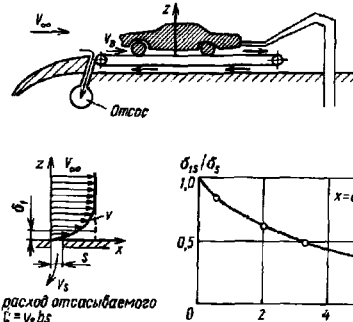
Рис. 11.12. Имитация полотна дороги с помощью движущейся ленты [11.17]

Бове и другие [11.17] доказали, что погрешность в величине силы сопротивления воздуха, и особенно в значении подъемной силы, возникающая из-за того, что в зазоре между колесами и лентой имеет место протекание воздуха, больше, чем влияние прилежащего к основанию пограничного слоя. В противоположность сказанному Отани и другие [11.19], проводя испытания над неподвижным основанием, установили, что приподнимание автомобиля на расстояние, равное толщине прилежащего к основанию пограничного слоя, не оказывает влияния на поток, обтекающий автомобиль, и на действующие на него аэродинамические силы.

Поттхоффом было предложено ограничить ширину движущейся ленты пространством между колесами. Автомобиль в этом случае может устанавливаться своими колесами на платформы стационарных весов. Экспериментальных данных, полученных при таком способе моделирования полотна дороги, пока неизвестно.

Способ зеркального отражения очень неудобен для практического использования. Наряду с трудностями, подробно рассмотренными в [11.16], следует обратить внимание на то, что вторая модель, при условии неизменности коэффициента блокировки, требует увеличения поперечного сечения потока аэродинамической трубы вдвое.

Отсос пограничного слоя является хорошим способом уменьшения толщины пограничного слоя. Как объясняется в [11.16], для автомо-



Объемный расход отсасываемого воздуха: $\dot{Q} = V_s bs$
Уменьшение объема воздуха в пограничном слое: $\dot{V} = V_\infty \cdot b \cdot \delta_{1x=0}$
s-ширина прорези; b-длина прорези

Рис. 11.13. Уменьшение вытесняемой толщины δ_1 турбулентного пограничного слоя благодаря отсосу через прорези [11.16]

бильной аэродинамической трубы речь идет только об отсосе через прорезь или через узкую полосу пористого материала в основании переднего участка рабочей части. На рис. 11.13 (по [11.16]) показана зависимость между объемным расходом отсасываемого воздуха $\dot{Q}$ и уменьшением вытесняемой толщины δ_1 прилежащего к основанию пограничного слоя в случае отсоса через прорезь; этот график построен на основании измерений Арнольда [11.20]. Параметр отсоса $c_Q^* = \dot{Q}/\dot{V} = v_s s/(V_\infty \delta_{1x=0})$. Для наибольшего из рассматриваемых здесь параметров отсоса $c_Q^* = 7$ был проведен расчет процесса отсасывания через прорезь климатической аэродинамической трубы концерна "Фольксваген". Если прорезь для отсоса располагают перед автомобилем, то для свободной от объекта испытаний рабочей части в центре поворотного диска весов получается уменьшение вытесняемой толщины на 60 % (рис. 11.14, *а*). Примерно такие же результаты получены при осуществлении отсоса пограничного слоя в аэродинамической трубе ФИАТ (г. Турин), см. работу Антонуччи, Черонетти, Костелли [11.21].

Дополнительное вдувание воздуха в пограничный слой также является хорошим средством уменьшения его толщины. На рис. 11.14, *б* (см. работу Вильямса [11.22]) показано применяемое в аэродинамической трубе "Локхид – Джорджия" устройство для вдувания воздуха в пограничный слой. В исследуемом сечении, расположенном примерно в двух метрах вниз по течению потока от ряда сопел, потеря импульса пограничного слоя почти что полностью выравнивается.

С помощью установленных в виде стрелы реек (см. рис. 11.11) можно вдвое уменьшить толщину пограничного слоя (по Гоулду [11.23]).

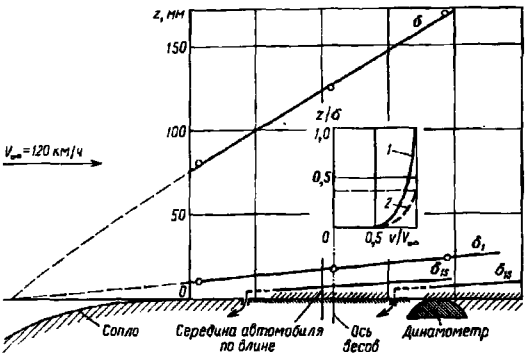


Рис. 11.14.

а – возможное уменьшение вытесняемой толщины δ_1 прилежащего к основанию пограничного слоя в климатической аэродинамической трубе концерна "Фольксваген" за счет отсоса воздуха через прорези при c_Q = 7, см. рис. 11.13 [11.16]: *1* – *без отсоса*; *2* – *с отсосом*; *б* – *уменьшение толщины пограничного слоя прилежащего к основанию рабочей части трубы, за счет вдувания в него воздуха* [11.22], диаметр сопел 13 мм, расстояние между соплами 127 мм: *1* – без вдувания воздуха; *2* – с вдуванием воздуха

Но, как установили Кэрр и Гассель [11.24], это мероприятие при характерных для автомобилей значениях дорожного просвета оказывает несущественное влияние на силы и моменты, действующие на автомобили.

Сравнительные измерения в аэродинамической трубе и на дороге, проведенные Гухо, Яниссеном и Шварцом [11.16], показывают (рис. 11.15), что скорость относительного движения воздуха под автомобилем зависит от прилежащего к основанию пограничного слоя аэродинамической трубы только в непосредственной близости от основания рабочей части

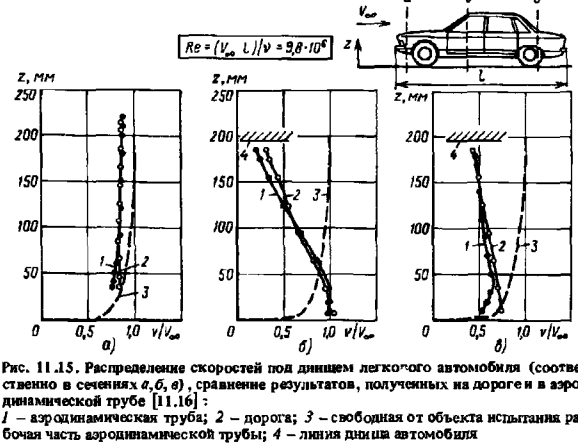


Рис. 11.15. Распределение скоростей под днищем легкового автомобиля (соответственно в сечениях *а, б, в*), сравнение результатов, полученных на дороге и в аэродинамической трубе [11.16]:
1 – аэродинамическая труба; *2* – дорога; *3* – свободная от объекта испытания рабочая часть аэродинамической трубы; *4* – линия днища автомобиля

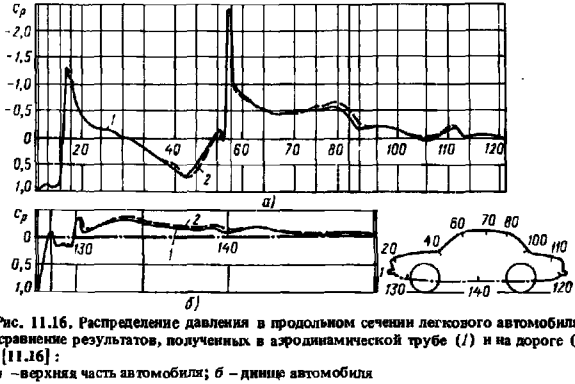


Рис. 11.16. Распределение давления в продольном сечении легкового автомобиля, сравнение результатов, полученных в аэродинамической трубе (*1*) и на дороге (*2*) [11.16]:
а – верхняя часть автомобиля; *б* – днище автомобиля

трубы. Поток, обтекающий автомобиль, изменяет полностью распределение скоростей над основанием рабочей части трубы по сравнению с распределением скоростей при свободной от объекта испытаний рабочей части. Как показано на рис. 11.16, в распределении давления имеет место

очень хорошее согласование результатов измерения в аэродинамической трубе и на дороге. Отсюда можно сделать вывод, что силы и моменты, возникающие в аэродинамической трубе и на дороге, одинаковы, если выполняется приведенное в [11.16] условие, при котором отношение вытесняемой толщины пограничного слоя δ_1 к дорожному просвету автомобиля e меньше или равно 0,1 ($\delta_1/e \leqslant 0{,}1$). Измерения на спортивных автомобилях, которые имеют меньший дорожный просвет, позволили установить, что при значении $\delta_1/e \approx 0{,}5$ еще не наблюдается заметного влияния пограничного слоя (см. [11.16], а также п. 11.5.7).

Таким образом, при измерениях в аэродинамической трубе, проводимых на легковых автомобилях и автомобилях-фургонах, отпадает необходимость улучшения имитации дорожного движения за счет воздействия на пограничный слой аэродинамической трубы. Для автомобилей с очень малым дорожным просветом, например гоночных, до сих пор отсутствует соответствующая проверка влияния пограничного слоя; здесь можно ожидать более сильного влияния. Предложенный Вильямсом [11.22] метод "заполнения" пограничного слоя путем вдувания воздуха кажется наиболее подходящим для этого случая.

11.3.3. БЛОКИРОВКА ПОТОКА, ДЕФОРМАЦИЯ, ГРАДИЕНТ ДАВЛЕНИЯ

На поток, обтекающий автомобиль в аэродинамической трубе, оказывают влияние граничные условия, существующие по краям потока. Это влияние тем сильнее, чем ближе расположена граница потока к модели. В закрытой рабочей части линии тока вокруг автомобиля уплотняются (располагаются ближе друг к другу); в открытой рабочей части они расходятся. Схематично это представлено на рис. 11.17 (по Вузсту [11.5]). В первом случае действительная скорость потока, обтекающего автомобиль, несколько больше, а во втором случае несколько меньше установленной. Это ведет к тому, что без введения поправки при испытании в аэродинамической трубе с закрытой рабочей частью получается несколько повышенное значение коэффициента аэродинамического сопротивления, а в трубе с открытой рабочей частью, наоборот, несколько пониженное; это же можно сказать и о всех остальных коэффициентах сил и моментов.

С помощью поправки пытаются учесть конечность размеров потока

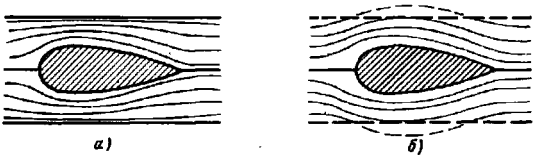


Рис. 11.17. Влияние граничных условий в рабочей части на поле потока [11.5]: *а* – сужение потока в закрытой рабочей части; *б* – расширение потока в открытой рабочей части

и произвести пересчет измеренных значений применительно к движению по дороге. Вуэстом в [11.5] рассматривается введение таких поправок в аэродинамике летающих тел. В формулу, корректирующую значение аэродинамического сопротивления таких тел, в качестве основных параметров входят коэффициент блокировки φ (поэтому такие поправки также называют поправками на блокировку) и коэффициент аэродинамического сопротивления обтекаемого тела. Поправки приемлемы только тогда, когда сами параметры, входящие в формулу, в сумме малы, т.е. при малой степени блокировки и малом аэродинамическом сопротивлении. При использовании выведенных для аэродинамики летающих тел поправочных формул в автомобильной аэродинамике требуется осторожность. Автомобили по сравнению с летающими телами являются тупыми телами с высоким значением аэродинамического сопротивления и большими зонами отрывных течений, прежде всего за автомобилем. При одинаковом геометрическом коэффициенте блокировки автомобили "возмущают" поток аэродинамической трубы гораздо сильнее, чем летающие тела. Кэрр [11.25] попытался учесть это с помощью специальных эмпирических поправочных формул для автомобилей. Но признанного всеми решения по поправке на блокировку при измерениях для автомобилей до сих пор нет.

Вуэст [11.5] доказал, что в аэродинамической трубе, в которой поток ограничен жесткой стенкой только с одной стороны, а с трех других не ограничен, суммарная поправка на вытеснение потока (блокировку) особенно мала. Для полномасштабной аэродинамической трубы (см. п. 11.5) поправки при измерениях для легковых автомобилей составляют максимум 2 %. Поэтому в таких полномасштабных аэродинамических трубах с открытой рабочей частью от введения поправки, как правило, вообще отказываются. И напротив, при закрытой рабочей части поправки на блокировку имеют относительно большую величину, и пренебречь ими уже нельзя. Кроме того, указанные поправки для двух типов рабочей части имеют противоположный знак, поэтому при сравнении результатов измерений в аэродинамических трубах с открытой и закрытой частью это следует принимать во внимание.

При проведении различных тепловых испытаний, при которых действительная скорость ветра должна быть равной окружной скорости на колесах, вращающихся на роликах установки, воспроизводящей нагрузку, подход к использованию поправок совсем иной, чем при проведении аэродинамических испытаний. В этом случае измеренные значения не могут корректироваться в конце испытания согласно поправочным формулам: откорректированная скорость должна устанавливаться в процессе испытания. Как правило, довольствуются тем, что подбирают в качестве исходной такую скорость, чтобы в точке полного торможения потока иметь значение $c_p = 1$ (см. п. 2.3.2).

Если автомобиль обдувается под углом (угол скоса потока $\beta \neq 0$), то поток деформируется. При открытой рабочей части поток может отклониться вбок. Более сильная по сравнению с потоком в свободной

рабочей части кривизна линий тока оказывает влияние на поле скоростей вверх по течению потока. Действительный угол скоса потока поэтому меньше, чем геометрический.

При закрытой рабочей части имеют место обратные соотношения. В этом случае при больших углах скоса потока дополнительно возникает опасность отрыва потока от стенок рабочей части трубы.

Так как поперечная сила, создаваемая ветром, набегающим на автомобиль под углом (сила, перпендикулярная к набегающему потоку, соответствует подъемной силе в случае рассмотрения летающего тела), имеет тот же порядок величин, что и подъемная сила, действующая на летающие тела малой протяженности (см. работу Гухо и Эммельмана [11.26]), то поправку на угол установки летающего тела можно было бы взять в качестве поправки на угол скоса потока при измерениях для автомобилей. На практике, однако, от введения поправки на угол скоса потока отказываются. Это пренебрежение правомерно до тех пор, пока связанная с механикой движения дальнейшая обработка аэродинамических производных обременена другими, гораздо большими неточностями. Источником этих неточностей являются, с одной стороны, качество используемых для испытаний моделей, с другой стороны, точность описания других компонентов системы "автомобиль – дорога", например шин.

О влиянии градиента давления вдоль оси потока на силу аэродинамического сопротивления автомобилей говорилось при рассмотрении различных типов рабочей части трубы (см. п. 11.2.3). Для аэродинамических труб с открытой рабочей частью необходимость во введении поправки на "выталкивающую силу", возникающую из-за градиента давления вдоль оси потока, отсутствует.

11.4. ИСПЫТАНИЕ МОДЕЛЕЙ В УМЕНЬШЕННОМ МАСШТАБЕ

11.4.1. ТЕХНИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе проведения исследований, направленных на улучшение аэродинамических свойств автомобиля, многие работы в настоящее время проводятся с использованием моделей в уменьшенном масштабе. Такие испытания требуют существенно меньших затрат (стоимость аэродинамической трубы, ее эксплуатации, изготовления моделей); другое преимущество заключается в большем удобстве работы с моделями (транспортирование, внесение изменений формы). Для аэродинамических испытаний в Европе наиболее часто используют модели в масштабе 1:4, а в очень малых аэродинамических трубах используется даже масштаб 1:5. В США применяется масштаб 3:8. Для грузовых автомобилей очень часто прибегают к масштабу 1:10; если в распоряжении имеется большая аэродинамическая труба, то выбирается масштаб 1:2,5 (см. п. 8.5.2).

Несмотря на отмеченные выше достоинства при разработке легковых автомобилей все чаще и чаще отказываются от использования умень-

шенных моделей при испытаниях в аэродинамической трубе. Причина этого, с одной стороны, заключается в том, что перенос результатов измерений, полученных при испытаниях масштабных моделей, на автомобиль в натуральную величину сопряжен с риском принятия ошибочных решений (подробнее этот вопрос рассматривается в п. 11.4.2). С другой стороны, разработчикам формы кузова предпочтительнее работать с моделью в натуральную величину. Оценить форму по уменьшенной модели очень тяжело. Такие элементы формы, как всевозможные выступы, закругления, проемы окон, подштамповки, как правило, на моделях в уменьшенном масштабе несколько преувеличены. На модели в натуральную величину, которая является основой выбора концепции кузова и его конструкции, такие преувеличения отсутствуют. Если исходить из того, что модель, предназначенная для испытаний в аэродинамической трубе, изготовляется путем уменьшения уже имеющейся модели в натуральную величину, то проблема точного воспроизведения отдельных элементов формы решается относительно просто. Масштаб 1:4 еще достаточен для того, чтобы верно воспроизвести в масштабе все основные детали.

Так как форма днища автомобиля оказывает существенное влияние на обтекающий поток (см. п. 4.3.2), то его следует воспроизводить во всех основных деталях.

Модели в натуральную величину, как правило, выполняются на имеющемся (усиленном) шасси; при этом можно предусмотреть изготовление каналов для прохождения охлаждающего воздуха, что является необходимой предпосылкой осуществления оптимизации передка автомобиля в том виде, о котором говорилось в п. 4.6.1.

Так как положение автомобиля относительно основания рабочей части трубы влияет на поток, обтекающий автомобиль, оно должно точно фиксироваться и быть регулируемым. При аэродинамических испытаниях в трубе ходового автомобиля возможны два варианта: подвеска фиксируется в заданном положении; подвеска остается свободной. В последнем случае автомобиль нагружается половиной допустимой нагрузки таким образом, чтобы он занял так называемое конструктивное положение. В зависимости от действующих на него аэродинамических сил и моментов в этом случае имеет место изменение положения автомобиля в зависимости от скорости примерно такое же, какое можно ожидать при движении по дороге. При измерениях на моделях в натуральную величину подвеска, как правило, блокируется. Модели существенно тяжелее, чем готовый автомобиль, поэтому зависимость аэродинамических сил и моментов от положения автомобиля совершенно иная, чем это имеет место для настоящего автомобиля.

Вращение колес при измерениях в аэродинамической трубе не принимается во внимание; измерения производятся при неподвижных колесах. При утопленных в кузов колесах их вращение оказывает несущественное влияние на силы и моменты, действующие на автомобиль. При исследовании загрязняемости, как правило, "картину разбрызгивания" вращающегося колеса пытаются воспроизвести с помощью целенаправленного вдувания капель воды или талька (для имитации пыли). При вы-

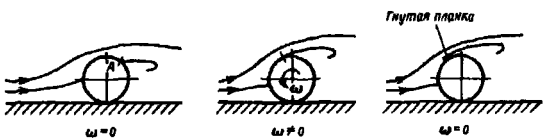


Рис. 11.18. Имитация вращения свободно катящегося колеса с помощью установки гнутой планки

ходящих за габариты кузова колесах, как, например, это имеет место на гоночных автомобилях, смещение вперед отрыва потока вследствие вращения колеса учитывается путем установки гнутой планки (рис. 11.18). В этом случае картина обтекания аналогична той, которая существует при вращающемся колесе.

При измерениях аэродинамических сил и моментов для грузовых автомобилей даже при незакрытых колесах их вращением пренебрегают. Это допущение вполне приемлемо, так как в области шасси, как правило, в любом случае имеет место отрыв потока.

11.4.2. ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

Кроме того, что модель и автомобиль в натуральную величину должны быть геометрически подобными, необходимо, чтобы поток вокруг модели и поток вокруг автомобиля были *динамически* подобными. В несжимаемом потоке это требование выполняется, если числа Рейнольдса для модели и автомобиля в натуральную величину одинаковы (см., например, работу Шлихтинга и Труккенбродта [11.28]). Число Рейнольдса определяется формулой (см. п. 2.2.1):

$$\mathrm{Re} = V_\infty l/\nu,$$

где V_∞ – скорость невозмущенного набегающего потока; l – длина автомобиля; ν – коэффициент кинематической вязкости рабочей среды. Следовательно, динамическое подобие имеет место, если

$$V_{\infty 1} l_1/\nu_1 = V_{\infty 2} l_2/\nu_2.$$

Как правило, при испытаниях моделей автомобилей рабочей средой является воздух. Испытания в водяных каналах для моделей автомобилей проводятся крайне редко. Поэтому требование соблюдения динамического подобия сводится к равенству произведения скорости на длину. Это условие при измерениях для моделей в масштабе 1:4 обычно не соблюдается; числа Рейнольдса для моделей составляют 1/4—1/2 часть от значения, соответствующего автомобилю в натуральную величину.

Так как для автомобилей сопротивление трения в общем аэродинамическом сопротивлении мало по сравнению с сопротивлением давления (см. п. 4.3.1), то можно предполагать, что влияние числа Рейнольдса в ха-

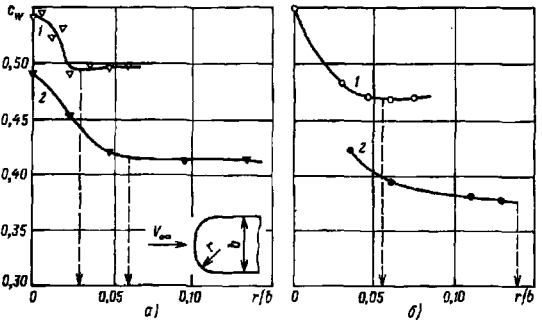


Рис. 11.19. Влияние числа Рейнольдса на "оптимальный" радиус перехода от передней поверхности к боковине [11.29]:
1 – $Re = 1{,}2 \cdot 10^7$; *2* – $Re = 3{,}5 \cdot 10^6$; *а* – автомобиль-фургон *А*; *б* – автомобиль-фургон *Б*

рактерной для автомобиля области чисел Рейнольдса мало*. И действительно, известны результаты измерений силы сопротивления воздуха для автомобилей, которые едва ли могут свидетельствовать о влиянии числа Рейнольдса. Тем не менее из-за нарушения закона подобия Рейнольдса могут возникать существенные погрешности, это можно показать на следующих двух примерах.

На рис. 11.19 (по Гухо, Янссену, Эммельманну [11.29]) приведены результаты измерений, выполненных в процессе оптимизации передка двух автомобилей-фургонов. В обоих случаях речь шла о том, чтобы найти такой радиус скругления между передней торцовой панелью и боковиной, при котором будет иметь место безотрывное обтекание потоком этого сопряжения, т.е. который в смысле определения, данного в п. 4.6.1, является "оптимальным". Автомобиль-фургон А имел относительно сильно выпуклую переднюю часть; для модели в масштабе 1:4 было получено отношение оптимального радиуса к ширине автомобиля $r/b = 0{,}06$. Автомобиль-фургон Б отличался плоской передней панелью, для модели в масштабе 1:4 этого автомобиля было получено отношение оптимального радиуса к ширине автомобиля $r/b \approx 0{,}14$. Этот радиус был настолько велик, что стилисты отказались от него, как от неприемлемого. Найденные на моделях в масштабе 1:4 "оптимальные" радиусы были перепроверены на моделях в натуральную величину. И в обоих случаях на

*Указанная причинно-следственная связь не совсем верна, так как от числа Рейнольдса зависит не только составляющая трения, но и составляющая давления, поскольку на положение линии отрыва потока его значение оказывает весьма существенное влияние. На это указывалось и в предыдущих разделах книги и несколько выше в данном разделе. – *Прим. ред. пер.*

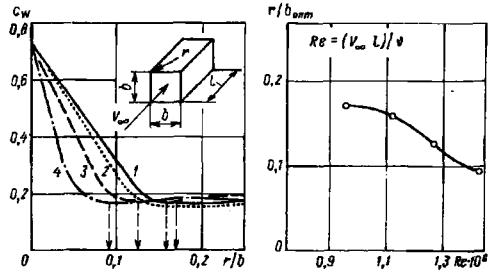


Рис. 11.20. Влияние числа Рейнольдса на "оптимальный" радиус скругления перед ней кромки параллелепипеда [11.30], b = 0,305 м, l = 0,534 м:
1 – Re = 0,96·10^6; *2* – Re = 1,12·10^6; *3* – Re = 1,27·10^6; *4* – Re = 1,43·10^6

моделях в масштабе 1:1 были получены оптимальные радиусы, существенно меньшие тех, которые были определены на моделях в уменьшенном масштабе. Для автомобиля-фургона Б при испытаниях модели в масштабе 1:1 был получен оптимальный радиус, являющийся стилистически приемлемым.

То, что для выполненных в масштабе 1:1 моделей удалось получить безотрывное обтекание сопряжений, скругленных меньшими радиусами, очевидно, можно объяснить различием чисел Рейнольдса. Как известно, на отрыв турбулентного пограничного слоя оказывает влияние число Рейнольдса; с увеличением числа Рейнольдса место отрыва перемещается по поверхности рассматриваемого тела вниз по течению. При более высоком числе Рейнольдса турбулентный пограничный слой выдерживает без отрыва более сильное повышение давления, чем при меньшем числе Re. Это означает, что при более высоком значении числа Re поток может обтекать без отрыва более острые кромки.

Представленные на рис. 11.20 результаты исследований, проведенных Павловским [11.30], подтверждают сказанное. Аналогичное влияние числа Рейнольдса наблюдалось и для других деталей автомобиля. Количественные результаты, и только они, учитываются при разработке автомобиля, достоверность их значений в сильной степени определяется правильностью выбора числа Рейнольдса.

Чтобы получить одинаковые значения чисел Рейнольдса для моделей в масштабе 1:1 и для уменьшенных моделей, существуют два пути: увеличение масштаба моделей и увеличение скорости потока при испытании моделей в уменьшенном масштабе. Первый способ потребовал бы увеличения размеров аэродинамической трубы, и такие преимущества уменьшенной модели, как удобство работы с моделью и возможность быстро вносить изменения в форму, с увеличением размеров модели быстро теряются. Следовательно, этот путь предполагает определенные

границы увеличения размеров модели; на практике наибольший используемый масштаб для уменьшения моделей составляет 3:8. Второй способ, заключающийся в увеличении скорости потока в аэродинамических трубах, предназначенных для работы с моделями, также имеет свои ограничения (см. рис. 11.21 [11.29]). Вследствие большой относительной высоты ("полноты") тела автомобиля в отдельных местах контура автомобиля достигается очень высокая скорость, соизмеримая со скоростью звука. Как показывают расчеты и измерения для эллиптических тел вращения и цилиндров, с уменьшением коэффициента полноты (отношения l/d) критическое число Маха, т.е. такое число Маха невозмущенного потока, при котором в некоторой точке на контуре тела впервые достигается скорость звука, опускается до очень низкого значения. Как видно из графиков, приведенных на рис. 11.21 справа, даже при значении числа Маха меньше критического уже имеет место увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления с ростом числа Маха, что связано с проявлением сжимаемости потока, учесть это для формы автомобиля еще сложнее, чем учитывать влияние числа Рейнольдса на место отрыва потока.

При измерениях в аэродинамической трубе с использованием моделей самолетов более высокое число Рейнольдса иногда имитируется за счет того, что искусственно повышают степень турбулентности потока. Благодаря этому отрыв потока от поверхности крыла может сместиться в сторону больших углов атаки, т.е. получается эффект, аналогичный тому, который имеет место с увеличением числа Рейнольдса. Но искусственное создание повышенной турбулентности потока сопряжено с трудностями, поскольку первоначально установленная турбулентность по хо-

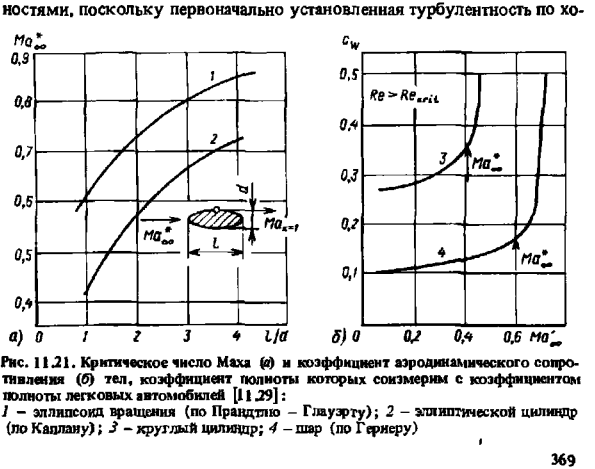


Рис. 11.21. Критическое число Маха (*а*) и коэффициент аэродинамического сопротивления (*б*) тел, коэффициент полноты которых соизмерим с коэффициентом полноты легковых автомобилей [11.29]:
1 – эллипсоид вращения (по Прандтлю – Глауэрту); *2* – эллиптической цилиндр (по Каплану); *3* – круглый цилиндр; *4* – шар (по Гернеру)

ду потока снова уменьшается. По этой причине описанный выше образ действия еще нельзя рекомендовать для использования в автомобильной аэродинамике.

11.5. ПРИМЕРЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБ

11.5.1. ОБЗОР

Сведения об аэродинамических трубах, климатических каналах и климатических камерах с обдувом, применяемых в настоящее время в промышленности и исследовательских центрах для работ по аэродинамике автомобиля, приведены в табл. 11.1. Аэродинамические трубы расположены в таблице в зависимости от площади поперечного сечения потока в рабочей части.

Аэродинамические трубы с площадью поперечного сечения потока свыше 30 м^2 могут применяться для нужд аэродинамики легковых автомобилей без каких-либо ограничений. В них могут испытываться также автомобили-фургоны в натуральную величину. Для больших грузовых автомобилей рекомендуется масштаб 1:2,5; при малом коэффициенте блокировки в этом случае еще можно получить число Рейнольдса, равное числу Рейнольдса для модели в натуральную величину. Для климатических каналов достаточно иметь площадь поперечного сечения потока от 10 до 12 м^2. При этом необходимо с помощью градуировочных измерений в большой аэродинамической трубе или на дороге определить эмпирическую поправку на блокировку, которая учитывается при регулировании скорости набегающего потока. Частично пытаются с помощью направляющих лопаток распределить поток по сечению рабочей части таким образом, чтобы распределение давления по поверхности автомобиля как можно точнее соответствовало распределению давления в случае движения автомобиля на дороге. Для этого лучше иметь ограничивающие стенки закрытой рабочей части в форме линий тока, имеющих место на некотором удалении от поверхности автомобиля (см. рис. 11.7), что на практике до сегодняшнего дня встречается довольно редко.

Аэродинамические трубы с площадью поперечного сечения потока от 15 до 25 м^2 для целей климатических испытаний легковых автомобилей и небольших автомобилей-фургонов излишне велики; для аэродинамических исследований с автомобилями в натуральную величину они подходят не в полной мере. В какой степени аэродинамические трубы такого плана могут быть приравнены к большим благодаря соответствующему конструктивному решению ограждающих стенок рабочей части (с продольными щелями, в форме линий тока) в настоящее время сказать еще нельзя.

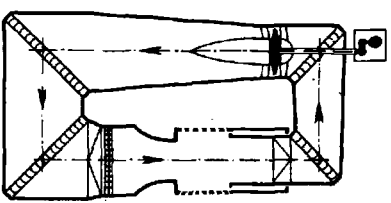
Климатические камеры с обдувом с площадью поперечного сечения потока 5 м^2 и меньше для климатических измерений годны условно, при разработке радиатора их можно применять без ограничений. Чем меньше площадь поперечного сечения потока, тем больше затраты на градуировку и обеспечение нужного направления распространения потока (направляющие устройства).

11.1. Аэродинамические трубы, климатические каналы и климатические камеры с обдувом, используемые в автомобилестроении

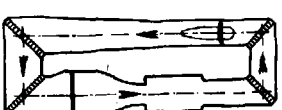
Фирма или организация, которой принадлежит установка	A_D, м²	L_M, м	V_{max}, км/ч	T	K	L, м	P, кВт	λ	Источник информации
"Дженерал Моторс"	65,9	23	240	*б*	5	303	2950	–	[11.50]
"Фольксваген"	37,5	10.00	180	*а*	4,0	114,0	2600	1,13	[11.32]
"Локхид-Джорджия"	35,1	13,10	406	*б*	7,02	238,0	6700	4,70	[11.33]
МИРА	35,0	15,24	133	*б*	1,45	50,5	970	1,14	[11.34]
"Даймлер Бенц"	32,6	10,00	270	*а*	3,53	125,0	4000	2,15	[11.35]
ФИАТ (аэродинамическая труба)	30,0	10,50	200	*а*	4,0	144,0	1865	1,72	[11.36]
"Форд" (США)	23,2	9,15	201	*б*	3,80	–	1865	1,36	[11.37]
"Ниссан"	21,0	10.00	119	*б*	2,86	–	–	–	[11.19]
"Тойота"	17,5	8,00	200	*б*	3,66	95,0	1500	1,25	[11.38]
Аэротехнический институт	15,0	10.00	144	*г*	5,0	39,2	516	1,17	[11.10]
ФИАТ (2 климатические камеры)	12,0	11,60	160	*а*	4,0	99,0	560	1,18	[11.36]
I.A.R.I.	12,0	10,00	205	*б*	4,06	83,3	1200	1,16	[11.39]
"Пининфарина"	11,75	9,5	150	*а*	6,2	27,3	625	0,85	[11.40]
"Форд" (г. Кельн)	11,0	9,00	180	*б*	6,0	113,4	1120	0,77	[11.41]
"Софика"	11,0/ /4,3	16,5/ /14,0	80/ /170	*б*	–	–	380	0,75	[11.42]
"Крайслер"	4,74	8,6	190	*а*	5,56	58,8	560	0,78	[11.43]
"Вольво"	4,32	8,6	190	*а*	6,60	93,2	500	0,80	[11.44]
"Опель"	4,30	–	120	*б*	–	–	460	0,22	[11.45]
"Бэр"	5,24	14,00	120	*б*	6,0	48,0	147	0,51	[11.46]
"Ауди *NSU*"	1,5	11,0	95	*б*	4,3	21,0	60	0,29	–
"Порше"	1,5	10,0	150	*б*	–	–	160	0,42	–
БМВ (*BMW*)	20,0	12,5	160	*г*	3,66	45	1676	0,66	–

Примечание. A_D – площадь сопла на выходе; L_M – длина рабочей части; T – тип рабочей части трубы (см. рис. 11.6): *а* – открытая; *б* – закрытая; *г* – с продольными прорезями; K – коэффициент поджатия сопла; V_{max} – максимальная скорость потока; P – мощность привода; λ – фактор качества аэродинамической трубы; L – длина оси трубы (*длина средней линии конструкции*).

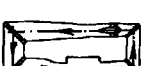
Графическое сравнение размеров аэродинамических труб различных видов представлено на рис. 11.22. В какой мере полученное в малых климатических камерах с обдувом (с учетом градуировки скорости обдува) распределение давления по контуру передка соответствует действительности показывает рис. 11.23. Расхождения в эпюрах распределения давления в области входа охлаждающего воздуха находятся в пределах вполне допустимых при разработке радиатора.



а)



б)



в)



г)

Рис. 11.22. Сравнение размеров большой аэродинамической трубы, климатического канала и двух конструкций климатических камер с обдувом:
а – универсальная аэродинамическая труба концерна "Фольксваген" (г. Вольфсбург); *б* – климатический канал концерна "Форд" (г. Кельн); *в* – климатическая камера с обдувом концерна "Крайслер" (штат Мичиган, США); *г* – климатическая камера с обдувом фирмы "Ауди – *NSU*" (г. Ингольштадт)

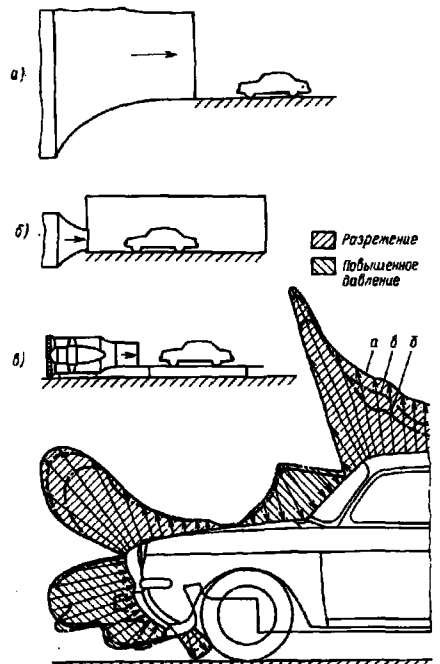


Рис. 11.23. Сравнение эпюр распределения давления (среднее продольное сечение автомобиля, $\beta = 0$) по поверхности передка автомобиля, полученных при изменениях в большой аэродинамической трубе, климатической камере с обдувом и при обдуве воздухом из направляющего сопла (измерения выполнены Унгером); коэффициент блокировки $\varphi = F_{\text{авт}}/F_{\text{сопла}}$:
а – климатическая аэродинамическая труба концерна "Фольксваген", $\varphi = 5\%$ (—);
б – климатическая камера с обдувом фирмы "Порше", $\varphi = 124\%$ (– – – –);
в – обдув воздухом из направляющего сопла, испытательное устройство исследовательского института по транспортной технике и автомобильным двигателям, $\varphi = 89\%$ (– · – · –)

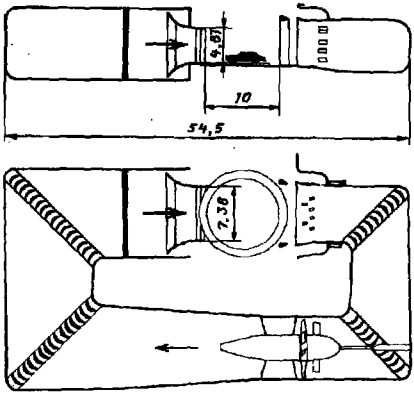


Рис. 11.24. Большая аэродинамическая труба фирмы "Даймлер Бенц" (раньше принадлежала Исследовательскому институту по транспортной технике и автомобильным двигателям) для испытаний автомобилей и моделей в масштабе 1 : 1, размеры указаны в метрах. Данные аэродинамической трубы: площадь поперечного сечения потока 32,6 м²; максимальная скорость потока 270 км/ч; мощность привода 3000 кВт

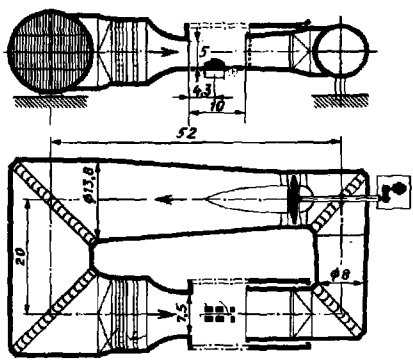


Рис. 11.25. Большая аэроклиматическая труба концерна "Фольксваген", размеры указаны в метрах. Данные аэродинамической трубы: площадь поперечного сечения потока 37,5 м²; максимальная скорость потока 160 км/ч; мощность привода 2600 кВт; диапазон изменения температур от −35° С до +40° С

11.5.2. БОЛЬШИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ АВТОМОБИЛЕЙ И МОДЕЛЕЙ В МАСШТАБЕ 1:1

В качестве примера большой аэродинамической трубы на рис. 11.24 представлена аэродинамическая труба фирмы "Даймлер Бенц" (см. работу Куна [11.35]). Эта труба отличается очень высокой скоростью обдува $V_{max} = 270$ км/ч. Столь высокая скорость предпочтительна при работе над динамичными автомобилями; в этом случае можно непосредственно изучать изменение положения автомобиля вследствие воздействия аэродинамических сил и моментов, а также обратное влияние изменения положения автомобиля на аэродинамические характеристики.

Для сравнения на рис. 11.25 показана большая аэроклиматическая труба концерна "Фольксваген" в г. Вольфсбурге. Эта труба (см. работу Мерхена [11.32]) полностью климатизирована; она лучше всего пригодна для любых исследований по аэродинамике автомобиля. Ограничение скорости обдува значением $V_{max} = 180$ км/ч вполне удовлетворяет запросы разработчиков легковых автомобилей и небольших автомобилей-фургонов, тем более что при таких высоких скоростях можно не опасаться влияния числа Рейнольдса, его влияние действительно отсутствует.

Преимущества и недостатки такой универсальной испытательной установки, как аэроклиматическая труба концерна "Фольксваген" по сравнению с аэродинамическим комплексом, состоящим из большой аэродинамической трубы и климатического канала (см. работу Антонуччи и других [11.21]) подробно рассмотрены Гухо в [11.6].

11.5.3. МАЛЫЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ АВТОМОБИЛЕЙ И МОДЕЛЕЙ В МАСШТАБЕ 1:1

В качестве примера малой аэродинамической трубы, предназначенной для измерений с использованием автомобилей в натуральную величину, на рис. 11.26 показана аэродинамическая труба фирмы "Пининфа-

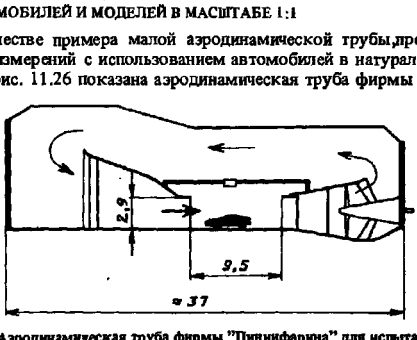


Рис. 11.26. Аэродинамическая труба фирмы "Пининфарина" для испытаний автомобилей и моделей в масштабе 1 : 1 [11.40], размеры указаны в метрах. Данные аэродинамической трубы: площадь поперечного сечения потока 11,75 м^2; максимальная скорость потока 145 км/ч; мощность привода 625 кВт

рина" в г. Турине (см. работу Морелли [11.40]). Эта труба является наглядным примером конструкции Эйфеля с обратным возвратом воздуха через измерительный зал, имеющий такую форму, что возврат потока происходит почти без потерь. Аэродинамическая доводка на моделях в масштабе 1:1 в такой малой аэродинамической трубе сопряжена с определенным риском при переносе данных измерений в трубе на автомобиль в дорожных условиях. Использование эффектов взаимодействия отдельных местных потоков, что является основой метода оптимизации формы, возможно только тогда, когда локальные поля потока, обтекающего автомобиль, одинаковы с теми, которые имеют место в дорожных условиях. За счет введения поправок на блокировку этого обеспечить нельзя. Тем не менее рассмотренное в п. 11.5.7 сравнение результатов измерений в трубе фирмы "Пининфарина" и в большой аэродинамической трубе свидетельствует о хорошем их совпадении.

11.5.4. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МОДЕЛЯХ В УМЕНЬШЕННОМ МАСШТАБЕ

Сведения об аэродинамических трубах, используемых для работы с моделями в уменьшенном масштабе, в таблице 11.1 не приведены; множество из таких аэродинамических труб используется при случае и для исследований в области аэродинамики автомобилей. Сооружение испытательных устройств подобного типа не сопряжено со слишком высокими затратами. Примером тому может служить показанная на рис. 11.27 аэродинамическая труба МИРА (см. работу Кэрра [11.47]).

Специально для изучения процессов обтекания автомобилей и отдельных его компонентов были разработаны дымовые каналы. Фирма "Исуцу Моторс" эксплуатирует дымовой канал с площадью поперечного сечения 1 м^2, который позволяет увидеть трехмерные процессы; об этом сообщили Ода и Хосино [11.31]. Фирма "Ниссан" располагает дымовым каналом, который используется преимущественно для исследований двухмерных воздушных потоков, например, в воздуховодах распределения охлаждающего воздуха системы вентиляции.

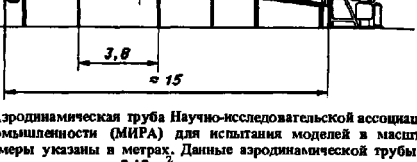


Рис. 11.27. Аэродинамическая труба Научно-исследовательской ассоциации автомобильной промышленности (МИРА) для испытания моделей в масштабе 1 : 4 [11.47], размеры указаны в метрах. Данные аэродинамической трубы: площадь поперечного сечения потока 2,12 м^2; максимальная скорость потока 160 км/ч; мощность привода 37,3 кВт

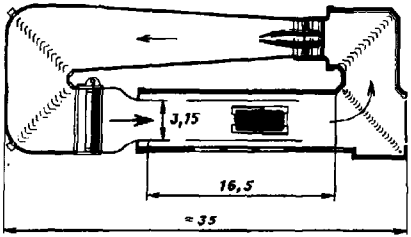


Рис. 11.28. Климатический канал фирмы "Софика" [11.42], размеры указаны в метрах. Данные климатического канала: площадь поперечного сечения потока 11/4,3 м^2; максимальная скорость потока 80/170 км/ч; мощность привода 280 кВт; диапазон изменения температур от –50°С до +50° С

11.5.5. КЛИМАТИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ

На рис. 11.28 в качестве типичного климатического канала показана установка, применяемая фирмой "Софика" (см. работу Шенега [11.42]). С помощью сменных сопел сечение потока можно подобрать для исследований легковых автомобилей и небольших автомобилей-фургонов. При разработке системы отопления и радиатора климатические каналы такой конструкции представляют собой очень хорошее экономичное решение. Климатические каналы с размерами такого порядка имеются на фирме "ФИАТ" (г. Турин) и фирме "Форд" (г. Кельн), см. табл. 11.1.

11.5.6. КЛИМАТИЧЕСКИЕ КАМЕРЫ С ОБДУВОМ

При сооружении показанной на рис. 11.29 климатической камеры с обдувом задача состояла в том, чтобы разместить это устройство в имеющемся в распоряжении ограниченном пространстве и одновремен-

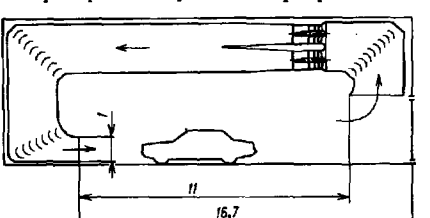


Рис. 11.29. Климатическая камера с обдувом фирмы "Ауди *NSU*", размеры указаны в метрах. Данные климатической камеры: площадь поперечного сечения потока 1,5 м^2; максимальная скорость потока 100 км/ч; мощность привода 60 кВт; диапазон изменения температур от – 40° С до +60° С

но обеспечить простой въезд автомобиля в камеру. Проведенные в этой камере измерения для радиатора показали хорошее совпадение с результатами измерений, полученными в климатической аэродинамической трубе концерна "Фольксваген". Такая камера также с успехом может использоваться при работе над системой отопления.

11.5.7. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЕВРОПЕЙСКИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ

Чтобы обеспечить сопоставимость результатов измерений в различных аэродинамических трубах (см. п. 11.1.2), по инициативе Гухо было положено начало сравнению результатов измерений в различных европейских автомобильных аэродинамических трубах. Измерением ряда одинаковых автомобилей в различных аэродинамических трубах необходимо идентифицировать возможные недостатки имитации дорожного движения в аэродинамической трубе и вывести отсюда поправку аэродинамической трубы. Этим гарантировалось получение одинаковых результатов измерений для одинаковых автомобилей в различных аэродинамических трубах. Первые результаты этого сравнения были представлены Буххаймом и др. [11.48]. При сравнении использовались данные, полученные в следующих аэродинамических трубах (см. табл. 11.1): фирм "Даймлер Бенц", "ФИАТ", "Фольксваген" и МИРА – в "больших" полномасштабных аэродинамических трубах, описанных в п. 11.5.2; кроме того, в аэродинамической трубе фирмы "Пининфарина" – в "малой" полномасштабной аэродинамической трубе (см. п. 11.5.3); и, наконец, в канале фирмы "Вольво", который является промежуточным устройством между климатическими каналами (п. 11.5.4) и климатическими камерами с обдувом (п. 11.5.5).

В качестве первого автомобиля, выбранного для выполнения измерений, был "Фольксваген 1600" со ступенчатой формой задка (подробно этот материал изложен в [11.48]), это та модель, для которой проводились исследования по корреляции между подъемной силой и силой аэродинамического сопротивления (см. также рис. 4.13).

В результате измерений, проводимых в трех больших аэродинамических трубах с открытой рабочей частью (фирм "Даймлер Бенц", "ФИАТ", "Фольксваген") никакие поправки не вносились. В аэродинамической трубе МИРА была использована принятая для нее поправка площади (см. [11.48]). При измерениях в аэродинамической трубе фирмы "Пининфарина" была использована практикуемая для нее поправка на блокировку, которая зависит только от коэффициента блокировки, а не от формы или коэффициента аэродинамического сопротивления испытуемого образца. Распределение скоростей потока вокруг объекта испытаний в климатическом канале фирмы "Вольво" ранее проведенными измерениями было приведено в соответствие с полем потока, полученным в аэродинамической трубе МИРА.

Как видно из рис. 11.30, по значению коэффициента аэродинамического сопротивления во всех аэродинамических трубах получается хоро-

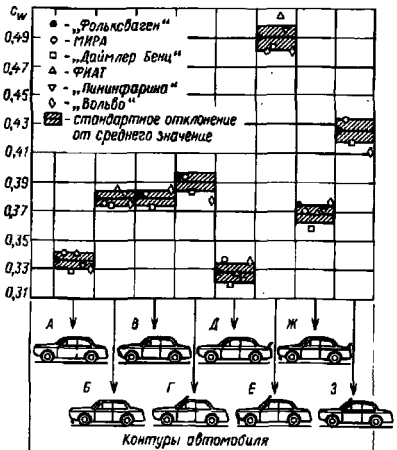


Рис. 11.30. Сравнение результатов измерений коэффициента аэродинамического сопротивления в шести европейских автомобильных аэродинамических трубах [11.48]

шее совпадение. Небольшое систематическое отклонение результатов измерений имеется для аэродинамических труб фирм "Даймлер Бенц" и "Фольксваген"; значения, полученные в трубе фирмы "Фольксваген", всегда несколько выше тех, которые получены в аэродинамической трубе фирмы "Даймлер Бенц". Имеет ли это место и при других формах автомобилей (например, с плавно спускающейся формой задка), должно проясниться при последующих измерениях. Следует отметить, что результаты, полученные в аэродинамической трубе фирмы "Пининфарина", хорошо совпадают с данными, полученными в больших аэродинамических трубах.

Как показали в [11.48] Буххайм и другие, совпадение данных по коэффициенту подъемной силы в различных аэродинамических трубах не столь хорошее. Являются ли зафиксированные различия следствием различия характеристик потока (например, углов скоса потока в вертикальной плоскости) в каждой из рассматриваемых аэродинамических труб или же различной техники проведения измерений (например, учет подъемной силы, действующей на платформы весов), до сих пор еще не выяснено.

В аэродинамической трубе фирмы "ФИАТ", оснащенной устройством

отсоса прилежащего к основанию пограничного слоя, сравнительные из мерения проводились без отсоса и с ним. При этом получили подтвержде ние высказывания Гухо, Янссена, Шварца [11.16], а также измерения на моделях Кэрра и Гасселя [11.24]: отсос прилежащего к основанию пограничного слоя не оказывает существенного влияния на силу сопро тивления воздуха легковых автомобилей.

11.6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большое число испытательных установок, предназначенных для ре шения задач автомобильной аэродинамики, свидетельствует о том, како весомое значение имеет эта дисциплина для автомобильной техники Мировой автомобильный парк отличается большим разнообразием авто мобилей по форме и размерам. Примерно при идентичной постановке задач различные автомобильные фирмы приходят к сильно отличающим ся друг от друга решениям. Далеко не последняя роль в этом принадле жит тому, что отдельным направлениям работ по улучшению аэродина мических свойств автомобиля не везде уделяется одинаковое внимание а также тому, что с течением времени имеют место изменения в поста новке целей автомобильной аэродинамики.

В силу того, что все большее внимание уделяется снижению расхода топлива, все сильнее на первый план выдвигается задача по снижени аэродинамического сопротивления. Поэтому повышается важность проб лем, связанных с обеспечением возможности достоверного измерения этого параметра в аэродинамической трубе.

По уже имеющимся результатам сравнительных испытаний и по тем которые еще предстоит получить в будущем, необходимо вывести обяза тельные поправочные коэффициенты аэродинамических труб. Анализируя результаты измерений одних и тех же объектов в различных аэродинами ческих трубах, можно подтвердить правильность принятых в них попра вок на широкой основе.

Известно, например, что отдельные автомобильные фирмы, пользую щиеся большой аэродинамической трубой "Локхид-Джорджия" приме няют для результатов измерений в этой трубе различные, специфичные для фирм, поправочные коэффициенты аэродинамической трубы. Это ведет к тому, что при одинаковых неоткорректированных данных измерений в зависимости от пользующегося аэродинамической трубой получаются разные значения коэффициента c_W. Благодаря разработке и согла сованию обязательных поправочных коэффициентов аэродинамических труб необходимо преодолеть это положение, затрудняющее работу специалистов по аэродинамике автомобиля.

11.7. ОБОЗНАЧЕНИЯ

A – площадь лобового сопротивления автомобиля, рис. 1.3;
A – подъемная сила, рис. 11.2 и 11.3;
A_D – площадь поперечного сечения потока аэродинамической трубы;

A_V – площадь поперечного сечения форкамеры;
K – коэффициент поджатия, рис. 11.8;
$K_{нов}$, K_0 – коэффициент поджатия, рис. 11.9;
L_K – длина рабочей части трубы;
M – продольный аэродинамический момент, рис. 11.2 и 11.3;
Ma – число Маха, рис. 11.21;
P – мощность привода аэродинамической трубы;
$P_{нов}$, P_0 – мощность привода аэродинамической трубы, рис. 11.9;
Q_L – тепловой поток;
Q – объемный расход отсасываемого воздуха, рис. 11.13;
Re – число Рейнольдса, уравнение (2.4);
Tu – степень турбулентности, рис. 11.8;
U – скорость потока;
V_∞ – скорость набегающего потока;
V – скорость ветра;
V_B – скорость ленты, рис. 11.12;
V_F – скорость движения автомобиля;
W – сила сопротивления воздуха, рис. 11.2 и 11.3;
b – длина щели для отсоса пограничного слоя, рис. 11.13;
b – ширина автомобиля;
c_p – коэффициент давления, уравнение (2.8);
c_W – коэффициент аэродинамического сопротивления, уравнение (1.2);
c_Q – параметр отсоса, рис. 11.13;
d – диаметр, рис. 11.8;
e – дорожный просвет, рис. 4.42;
z – высота над основанием, рис. 11.14, *б*;
l – длина автомобиля;
p – статическое давление;
p_∞ – статическое давление в невозмущенном потоке;
r – радиус;
s – ширина щели для отсоса пограничного слоя, рис. 11.13;
$\bar{u}$ – среднее значение турбулентной пульсации скорости;
v_S – скорость воздуха в щели для отсоса пограничного слоя, рис. 11.13;
x, y, z – координаты в прямоугольной системе координат;
α – угол подъема, рис. 11.1;
β – угол скоса потока, рис. 11.1;
δ – толщина пограничного слоя;
δ_1 – вытесняемая толщина пограничного слоя;
λ – показатель качества аэродинамической трубы;
ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха;
ρ – плотность воздуха;
φ – коэффициент блокировки, рис. 11.23;
ω – угловая скорость вращения колеса, рис. 11.18.

12. МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

Гергюн А. Некати

12.1. МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

12.1.1. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ И МОМЕНТОВ

Одной из важнейших задач при испытаниях в аэродинамической трубе является измерение аэродинамических сил и моментов, действующих на автомобиль при обтекании его потоком воздуха. К ним относятся: *сила сопротивления воздуха, боковая сила, подъемная сила, продольный* аэродинамический момент (момент галопирования), поперечный аэродинамический момент (момент крена) и поворачивающий аэродинамический момент (момент рыскания).

Система координат при измерениях аэродинамических сил и моментов. Для однозначного определения названных выше трех сил и трех моментов необходима однозначно установленная система координат. До сих пор она еще не унифицирована, поэтому при сравнении результатов измерений друг с другом из-за различных систем отсчета могут возникнуть ошибки.

На рис. 12.1 показана система координат, которая широко применяется в настоящее время. Система координат жестко привязана к автомобилю, начало координат располагается в плоскости опорной поверхности колес в точке пересечения средних линий базы и колеи автомобиля. Эта система координат идентична показанной на рис. 4.42. В противоположность ей приводившаяся ранее на рис. 2.14 система координат, заимствованная из самолетостроения, отличается от рассматриваемой в этом

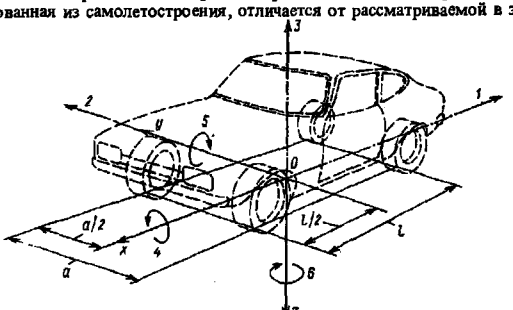


Рис. 12.1. Система координат для измерения аэродинамических сил и моментов: *1* – сила аэродинамического сопротивления; *2* – боковая сила; *3* – подъемная сила; *4* – поперечный момент (момент крена); *5* – продольный момент (момент галопирования); *6* – поворачивающий

разделе книги. Оси x и y расположены в плоскости опорной поверхности колес. Ось x параллельна продольной оси автомобиля (положительные значения сил совпадают с направлением движения автомобиля), ось y перпендикулярна к оси x, и если смотреть с места водителя, то положительные значения сил отсчитываются вправо. Ось z перпендикулярна к плоскости, в которой расположены оси x и y, положительное направление оси вниз. В соответствии с принятой системой координат аэродинамические составляющие называются следующим образом: в направлении оси x – сила сопротивления воздуха, иначе говоря, аэродинамическое сопротивление (положительное значение в направлении $-x$); в направлении оси y – боковая сила; в направлении оси z – подъемная сила (положительное значение в направлении $-z$). Момент относительно оси x называется поперечным моментом (или моментом крена); относительно оси y – продольным моментом (или моментом галопирования); относительно оси z – поворачивающим моментом (или моментом рыскания). Положительное направление моментов совпадает с вращением часовой стрелки,если смотреть из начала осей координат.

Аэродинамические весы. Для измерения трех сил и трех моментов нужны шестикомпонентные весы. Если поток набегает на автомобиль строго в направлении его продольной оси, то достаточно измерить силу сопротивления воздуха, продольный момент и подъемную силу. Для таких измерений можно использовать трехкомпонентные весы.

Конструкция аэродинамических весов должна удовлетворять ряду требований, обусловленным своеобразием таких измерений.

1. Весы не должны изменять поле скоростей вокруг испытуемого объекта. Если автомобиль связан с весами с помощью подвешивающего устройства или рычага (в аэродинамических трубах для испытания моделей), то влияние крепления должно компенсироваться.

2. Измерение сил и моментов должно осуществляться практически без перемещений, чтобы положение автомобиля в процессе измерения не изменялось.

3. Так как измеряемые параметры, особенно подъемная сила, малы по сравнению с весом автомобиля, то необходимы специальные мероприятия по обеспечению высокой точности измерений. Начальные нагрузки могут компенсироваться, например, с помощью веса контрогрузов на аэродинамических весах.

4. В случае измерения шести компонентов весовое устройство должно иметь возможность вращаться относительно оси z.

5. Во время измерений передача сил к динамометрическим датчикам должна осуществляться практически без трения. По этой причине необходимо использовать гидростатические или пневматические опоры, или специальные шарнирные опоры.

Разложение аэродинамических сил. Для отдельного определения каждой из трех сил и каждого из трех моментов измеряемые параметры соответствующим образом разлагаются. В зависимости от конструкции весов это происходит по-разному.

1. Испытуемый автомобиль устанавливается на платформе. Возни-

кающие в процессе испытания силы и моменты передаются через платформу (или ее подвеску) на динамометрические элементы и измеряются.

2. Колеса автомобиля стоят на четырех отдельных платформах. Силы, измеряемые на отдельных колесах параллельно осям системы координат, в последующем складываются в определяемые три силы и три момента.

3. Конструкция весов аналогична указанной выше, но непосредственно измеряются только подъемные силы на четырех колесах; боковая сила, поворачивающий момент и сила сопротивления воздуха измеряются через "плавающую" раму, имеющую четыре платформы и установленную на опоры без трения над рамой, жестко соединенной с основанием.

4. Объект измерения подвешивается на четырех растяжках и с помощью двух других растяжек фиксируется в направлениях осей x и y. Измеряя силы, возникающие в отдельных растяжках, можно определить результирующие силы и моменты.

Измерение сил может осуществляться чисто механически, при этом за основу берется принцип коромысла. Так как измерение происходит без перемещения, то смещение груза весов может служить мерой измеряемых параметров (весы с подвижным грузом).

Если измеряемые силы с помощью рычагов передаются на динамометрические датчики, то речь идет об *электромеханических* весах.

В процессе измерения аэродинамических сил и моментов следует обратить внимание на продолжительность замера. Поскольку, как правило, имеют место заметные колебания значений сил и моментов во время измерения, то необходимо предусмотреть определенный отрезок времени для выполнения замера, достаточный, чтобы измеряемый сигнал отразил среднее значение. Причина колебания значений аэродинамических сил и моментов заключается в вибрации системы "автомобиль – весы", которая возбуждается имеющимися многочисленными отрывами нестационарного характера.

Необходимо обратить внимание на возможную погрешность при измерении *подъемной силы* в случае, если автомобиль для измерения устанавливается на одну или несколько платформ. При такой установке поле потока вокруг колес вызывает перераспределение давления по поверхностям платформы. Результат измерения подъемной силы искажается на величину силы, которая соответствует разности давлений между верхней и нижней сторонами платформы. Сила, которую следует вычесть из измеренной подъемной силы, может быть оценена и учтена благодаря одновременному измерению распределения статического давления по платформам (см. также п. 11.2.4).

12.1.2. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

При испытаниях в аэродинамической трубе возникает необходимость измерения статического или динамического давления свободного потока воздуха или коэффициента статического давления на поверхности тела.

Насадки для измерения давления. Измерение статического и полного давления в свободном воздушном потоке в простейшем случае можно

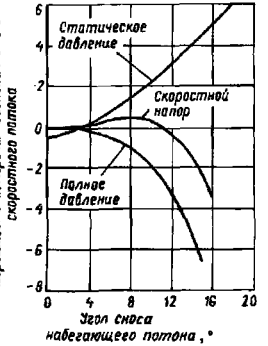


Рис. 12.2. Погрешность измерения гидрометрической трубки с полусферической головкой при косом обтекании [12.1]; погрешность измерения статического давления нанесена с обратным знаком

осуществлять с помощью гидрометрической трубки, например трубки Прандтля (см. рис. 2.5). Измеренные статическое и полное давление используются для вычисления скорости свободного воздушного потока, см. формулу (2.10).

При использовании гидрометрической трубки следует обращать внимание на то, чтобы приемная носовая часть трубки была параллельна направлению потока, и чтобы он в зоне измерения не имел завихрений.

Если ось носовой части гидрометрической трубки не точно совпадает с направлением распространения потока, то при измерении как полного напора, так и статического давления возникают погрешности. Погрешность для гидрометрической трубки с полусферической головкой показана на рис. 12.2 в зависимости от угла скоса набегающего потока (см. работу Попа и Гарпера [12.1]). Из приведенных зависимостей видно, что при углах скоса набегающего потока примерно до 12° существенного искажения результатов измерения скоростного напора не наблюдается. Кроме того, следует отметить, что на зависимость статического и полного давления от угла скоса набегающего потока можно существенно повлиять благодаря целенаправленным конструктивным изменениям головки гидрометической трубки (см. работу Горлина и Слезингера [12.2]).

Особый интерес представляет измерение распределения статического давления по кузову, особенно в местах входных и выходных вентиляционных отверстий (см. п. 6.2.2). Эти измерения могут осуществляться либо благодаря установке измерительной насадки для приема статического давления ("клопа") в интересующем месте, или, если позволяет объект испытания, в местах измерения статического давления на кузове выполняются отверстия и устанавливаются соединительные трубки между местом измерения и измерителем давления. Первый способ прост и требует малых затрат времени. Однако измерительная насадка вызывает изменение условий обтекания в месте измерения, особенно в местах с малыми радиусами, что приводит к искажению распределения давления.

Погрешность, вносимую измерительной насадкой, следует изучить и при необходимости исключить соответствующей градуировкой датчика. На рис. 12.3 в качестве примера показана необходимая поправка при использовании круглой насадки. Поправка настолько мала, что обычно ею можно пренебречь. Если требуется измерить давление с помощью "кло-

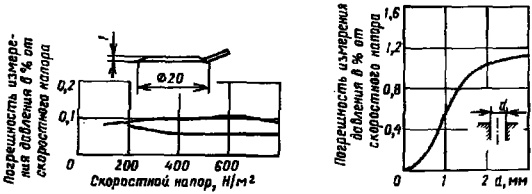


Рис. 12.3. Поправка для круглой насадки ("клона")

Рис. 12.4. Влияние диаметра отверстия на погрешность измерения приемником статического давления [12.3]

пов" во многих местах одновременно, то следует обратить внимание на то, чтобы "клопы" и их трубки не мешали друг другу.

Очень точные измерения могут осуществляться с помощью отверстий, выполняемых на кузове в местах интересующего давления. Погрешность, возникающая из-за отверстия и зависимая от его диаметра, как правило, очень мала (рис. 12.4) [12.3].

Приборы для измерения давления. Измерительные насадки, как правило, с помощью пластмассовых трубок соединяются с приборами для измерения давления. Очень часто значения измеряемых давлений очень малы (от 10 до 1000 Н/м^2). Во многих случаях измеряется не абсолютное давление на поверхности, а относительное его значение, например, относительно значения статического давления в рабочей части аэродинамической трубы. Для этой цели используются приборы для измерения разности давлений, например манометр Бетца, элемент Бартона, жидкостные или мембранные измерительные устройства. Подробные сведения об этих приборах можно найти в работе Вузса [12.2]. Для измерения колебаний статического давления в отдельных местах кузова упомянутые измерительные устройства из-за особенностей их конструкции, а также из-за наличия соединительных трубок, оказывающих демпфирующее действие, использовать нельзя. В этих случаях применяют пьезоэлектрический датчик давления, который можно установить непосредственно в интересующем месте измерения.

Исследования, связанные с распределением давления по отдельным поверхностям кузова, требуют проведения замеров статического давления во многих точках поверхности кузова. В этом случае точки измерения давления последовательно подключаются к измерительному устройству с помощью механического переключателя (пневмокоммутатора).

12.1.3. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ

Точное измерение скорости потока в аэродинамической трубе имеет очень важное значение для правильного проведения испытаний. Кроме

того, возникает необходимость измерения скорости воздуха вокруг автомобиля, в салоне, или степени турбулентности.

Измерение скорости потока в аэродинамической трубе. Скорость потока в аэродинамической трубе может определяться исходя из величины скоростного напора свободного потока воздуха:

$$v = \sqrt{(2/\rho)\,\Delta p_{\text{дин}}}, \qquad (12.1)$$

где v – скорость потока, м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; $\Delta p_{\text{дин}}$ – скоростной напор, Н/м^2.

Плотность воздуха может изменяться в зависимости от атмосферного давления, температуры и влажности, это можно учесть следующим образом

$$\rho = (349p - 131\,p_e)/T_1, \qquad (12.2)$$

где T_1 – абсолютная температура воздуха, K; p – атмосферное давление, бар; $p_e = UE/100$ – парциальное давление ненасыщенного водяного пара, бар; U – относительная влажность, %; E – парциальное давление насыщенного водяного пара при существующей температуре, бар.

Для измерения скорости потока в аэродинамической трубе может использоваться гидрометрическая трубка, установленная *в сопле.* Измеренное таким образом значение, как правило, должно корректироваться. Для этого в качестве базы может использоваться распределение статического давления по поверхности автомобиля, полученное сначала на дороге, а затем в аэродинамической трубе для одного или нескольких базовых автомобилей. Корреляционный анализ таких измерений позволяет осуществить корректировку показаний скорости.

Следует отметить, что такой способ измерения скорости, особенно для аэродинамических труб с большим коэффициентом блокировки, позволяет одновременно в измеряемой скорости учесть поправку на блокировку, см. п. 11.3.3.

Другой способ определения скорости потока в аэродинамической трубе заключается в измерении статического давления воздуха в двух соответствующим образом выбранных для этого точках аэродинамической трубы. Оно может измеряться, например, в форкамере сопла и на выходе из него.

Разность измеренных значений Δp используется для определения скоростного напора $\Delta p_{\text{дин}}$:

$$\Delta p_{\text{дин}} = (\rho/2)\,v^2 = k\,\Delta p, \qquad (12.3)$$

где k – фактор сопла, обычно зависимый от числа Рейнольдса, поэтому его можно определить с помощью градуировки сопла.

Измерение скорости воздуха. В процессе испытаний в аэродинамической трубе может возникнуть необходимость измерения скорости воздуха в определенных местах – внутри автомобиля или вне его.

Если скорости, которые нужно измерить, малы (менее 10 км/ч), то приближенное их значение можно измерить с помощью гидрометрической трубки. Хорошими устройствами для этих целей являются крыльчатый анемометр и термоанемометр. Степень турбулентности воздушного потока можно измерить с помощью термоанемометра.

Крыльчатый анемометр состоит из крыльчатки, помещенной в цилиндрический корпус. Скорость вращения крыльчатки соответствует скорости воздуха, которую требуется измерить, поэтому измеряемым параметром является число оборотов крыльчатки. Крыльчатые анемометры аналогично трубкам Прандтля чувствительны к направлению потока.

Принцип работы *термоанемометра* базируется на зависимости электрического сопротивления металла от температуры. Измерение осуществляется по степени охлаждения набегающим потоком воздуха расположенных перпендикулярно к потоку проволочных зондов, нагреваемых электрическим током. Для проведения измерения проволочный зонд включается в мостовую схему. Питание осуществляется либо постоянным током, в этом случае температура, а значит, и сопротивление зонда уменьшаются с увеличением скорости воздуха; либо рабочее напряжение моста регулируется с помощью сервоусилителя таким образом, что температура зонда остается постоянной. В качестве измеряемого параметра для определения скорости воздуха в первом случае служит разность потенциалов моста, во втором случае – рабочее напряжение моста.

Термозонды перед их применением градуируются с помощью миниатюрной аэродинамической трубы.

12.1.4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

При проведении многих испытаний в аэродинамической трубе, когда определяются производительность системы охлаждения, системы отопления, системы кондиционирования, а затем эксплуатационные температуры таких систем и узлов автомобиля, как система выхлопа, тормоза, детали кузова и т.д., исключительное значение имеет правильное измерение температур.

При проведении испытаний различают два вида измерений температур: измерение абсолютных температур, измерение разности температур. Измерение абсолютных температур интересует в том случае, когда нужно исследовать пригодность систем автомобиля (например, системы охлаждения двигателя и т.д.) при различных условиях окружающей среды. Разность температур в большинстве случаев используется для составления теплового баланса, здесь требуется более высокая точность измерений.

Датчики для измерения температур. 1. Термопары. Для измерения температур при испытаниях в аэродинамических трубах широкое распространение получили термопары, которые представляют собой два проводника из различных материалов, концы которых попарно соединены друг с другом пайкой или сваркой (рис. 12.5). Как известно, принцип измерения базируется на том, что если два таких спая поместить в облас-

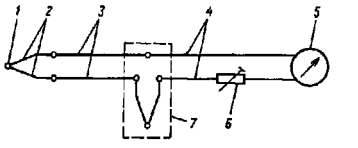


Рис. 12.5. Измерение температуры с помощью термопары:
1 – место измерения температуры с помощью термопары; *2* – термопара; *3* – сбалансированные провода; *4* – проводники тока (Cu); *5* – милливольтметр; *6* – балансовое сопротивление; *7* – точка отсчета

Рис. 12.6. Характеристики различных термопар:
1 – платинородий – платина (PtRd – Pt); *2* – железо – константан (Fe – Konst); *3* – медь – константан (Cu – Konst); *4* – никельхром – никель (NiCr – Ni)

ти с различной температурой, то между ними возникает термоэлектродвижущая сила, соответствующая разности температур. Если в одном из спаев поддерживать постоянную температуру (например, 0 или 50°С – точка отсчета), то с помощью второго спая можно осуществить измерение температуры (см. рис. 12.5).

Точка отсчета может имитироваться с помощью электрической уравнительной схемы. Мост, состоящий из зависимых от температуры сопротивлений, обеспечивает уравнительное напряжение.

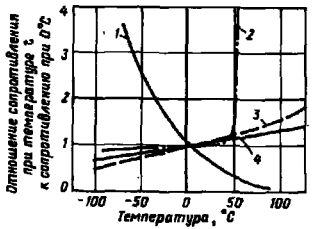
Термоэлектродвижущие силы наиболее часто применяемых термопар при температуре в точке отсчета 0°С определены в стандарте *DIN* 43710 (табл. 12.1). На рис. 12.6 приведены характеристики этих термопар.

Термопары "медь – константан" и "железо – константан" пригодны для измерения температур в диапазоне от – 200 до +500°С, а первые до +700°С. Они обеспечивают создание высоких термоэлектродвижущих сил, но при высоких температурах склонны к окислению.

Термопары "Никельхром – никель" и "хромель – алюмель" пригодны для измерения температур до 1000°С и выше, не окисляются, имеют почти линейную характеристику и обеспечивают создание относительно

12.1. Характеристики термопар по *DIN* 43710

Температура, °С	Медь-константан, мВ	Железо-константан, мВ	Хромель-алюмель, никельхром-никель, мВ	Платинородий-платина, мВ
–100	–3,40	–4,75		
0	0	0	0	0
100	4,25	5,37	4,10	0,643
500	27,40	27,84	20,65	4,221
1000			41,31	9,570
1500				15,530



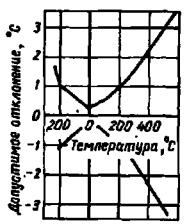


Рис. 12.7. Изменение сопротивления различных измерительных элементов в зависимости от температуры:
1 – терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом; *2* – терморезистор с положительным температурным коэффициентом; *3* – никель (Ni); *4* – платина (Pt)

Рис. 12.8. Допустимое отклонение измеряемых значений температуры для Pt 100 (по *DIN*43760)

высоких термоэлектродвижущих сил. Благодаря этим свойствам они очень хорошо подходят для использования при испытаниях в аэродинамической трубе.

По стандарту *DIN 43710* допустимы следующие погрешности измерений:

а) термопары из неблагородных металлов (NiCr – Ni, Fe – Konst, Cu – Konst):

от 0 до 400°C:	±3°C;
свыше 600°C:	±0,75% измеряемой температуры;

б) термопары из благородных металлов (PtRh – Pt):

от 0 до 600°C:	±3°C;
свыше 600°C:	±0,5% измеряемой температуры.

Полоса разброса уменьшается на половину или до 1/3 указанного значения, если термопара освидетельствована с допуском на разброс, равным 1/2 или 1/3 допуска по стандарту *DIN*.

2. Термометры сопротивления. Другим температурным измерительным элементом, применяемым при испытаниях в аэродинамической трубе, является термометр сопротивления. Металлы и полупроводники под воздействием температуры изменяют свое электрическое сопротивление. Изменение сопротивления является мерой изменения температуры.

Металлы имеют почти линейную зависимость сопротивления от температуры. Сопротивление полупроводников с ростом температуры может уменьшаться или увеличиваться (терморезисторы с отрицательным или положительным температурным коэффициентом). Полупроводники обычно имеют нелинейную характеристику.

На рис. 12.7 показана зависимость сопротивления от температуры двух чаще всего используемых металлов – платины и никеля.

Для очень точных измерений температуры используются термометры сопротивления из чистой платины (от -200 до $+750^{\circ}$C). Требования к платиновым термометрам сопротивления изложены в *DIN* 43760. Для нормального сопротивления 100 Ом при 0°C (называется Pt 100) установлены допустимые отклонения (рис. 12.8). Точность измерения повышается, если термометр сопротивления освидетельствован с допуском на разброс, равным 1/2 или 1/3 допуска по стандарту *DIN*.

В качестве измерительной схемы для термометра сопротивления наряду с мостовыми схемами по индикаторному методу используется и компенсационный метод. Следует заметить, что во время измерения имеет место самонагревание термометра сопротивления из-за измерительного тока (по меньшей мере, 10 мА), но при обычных условиях измерения оно мало, им можно пренебречь.

Типичные погрешности при измерениях температур. Из-за невнимательности или неправильных действий в процессе измерения температур могут регистрироваться значения, не соответствующие действительным температурам. Особые трудности возникают при измерении температур на поверхностях, поскольку приклеенный, прикрученный или привареный измерительный элемент (например, термопара) по своим проводам отводит теплоту от объекта измерения (рис. 12.9, *а*). Из-за этого изменяются первоначальные изотермы объекта измерения. В результате этого показание температуры отличается от истинного значения. Эта погрешность тем больше, чем меньше теплопроводность объекта измерения, чем хуже передача теплоты к датчику температуры и чем выше теплопроводность датчика температуры. Такая ситуация может иметь место, например, при измерениях температуры на пластмассовых деталях или кабелях. Чтобы уменьшить погрешность при измерении, рекомендуется часть соединительной проводки, расположенную ближе к спаю, приклеивать к поверхности, а не отводить сразу от нее (рис. 12.9, *б*).

Зависимость погрешности от длины приклеенного отрезка соединительного провода приведена на рис. 12.10.

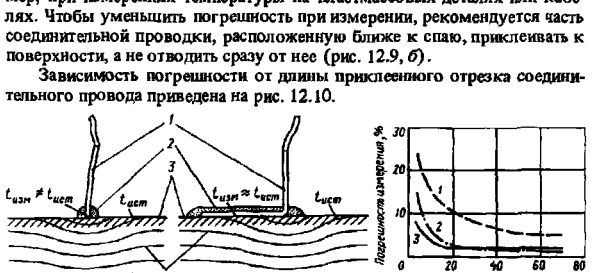


Рис. 12.9. Погрешности при измерении температур поверхности:
1 – термопара; *2* – клеящий материал; *3* – поверхность, на которой измеряется температура: *а* – большая погрешность при измерении; *б* – малая погрешность при измерении

Рис. 12.10. Погрешность при измерении с помощью термопары "медь – константан" в зависимости от приклеиваемой длины и диаметра спая термопары:
1 – диаметр 1,0 мм; *2* – диаметр 0,5 мм; *3* – диаметр 0,3 мм

При этом не следует забывать также о том, что установочный термодатчик не должен изменять теплоизлучающие свойства поверхности. Для этого соединительный провод и поверхность по возможности должны иметь одинаковые теплопроводные и теплоизлучающие свойства. Если измеряются температуры тела, то эти соображения должны оставаться в силе, чтобы изотермы объекта измерения в месте измерения не искажались.

При измерении температур охлаждающей жидкости из-за невнимательности при монтаже датчик температуры может прикасаться к стенкам бачка или трубопроводов, по которым протекает жидкость. Это вызывает появление при измерениях погрешности.

Неправильно подобранные балансирующие провода термодатчиков или неправильная полярность их соединения могут привести к существенным погрешностям при измерениях.

Не должно оставаться без внимания и изменение свойств термодатчиков в результате старения, которое может составлять несколько градусов в год. Химические изменения в спае термопары (окисление и т.д.) также могут привести к существенным погрешностям при измерениях.

При использовании термометров сопротивления следует обратить внимание на хорошую изоляцию термометра.

12.1.5. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА

Часто требуется измерить объем воздуха, который поступает через вентиляционные отверстия в салон и выходит из салона через вытяжные отверстия и возможные неплотности кузова.

Расход воздуха зависит от скорости набегающего потока V_∞ и угла скоса потока, от положения заслонок и числа оборотов вентилятора системы отопления и вентиляции.

Измерение расхода с помощью характеристик расхода воздуха через неплотности в кузове и вытяжные отверстия. Для определения расхода воздуха через салон часто используется описанный ниже способ (см. также п. 10.4.1). Измерение осуществляется в два этапа.

Сначала определяются так называемые характеристики расхода воздуха через неплотности в кузове и вытяжные отверстия.

Испытание проходит следующим образом. Заклеиваются приточные вентиляционные отверстия. Расположенный вне автомобиля вентилятор, расход воздуха которого можно точно измерить, соединяется гибким воздуховодом с салоном автомобиля (рис. 12.11, *а*). Это можно осуществить, применив вместо обычного заднего стекла специальное запасное с вмонтированным в него присоединительным патрубком, соединяющимся при помощи гибкого воздуховода с вентилятором.

В салон автомобиля вентилятором подается различный объемный расход воздуха, при этом измеряется возникающая разность между давлением в салоне и статическим давлением в аэродинамической трубе. Эти измерения проводятся при различных скоростях потока воздуха в трубе, а также при отсутствии потока. Так как речь идет о малых перепадах

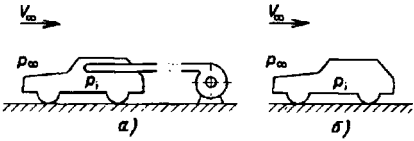


Рис. 12.11. Порядок проведения испытания по измерению расхода воздуха:
а – определение характеристик расхода воздуха через неплотности и вытяжные отверстия (приточные вентиляционные отверстия закрыты; вытяжные отверстия закрыты или открыты); *б* – определение давления внутри салона $\Delta p_i = p_i - p_\infty$ в зависимости от скорости натекания потока; приточные и вытяжные вентиляционные отверстия открыты

давления, то место измерения давления в салоне следует защитить от возможных перемещений воздуха, например, закрыть перфорированной коробкой, наполненной распушенной стекловатой.

Определенное таким образом семейство кривых представлено на рис. 12.12 (штриховые линии). Так как приточные вентиляционные отверстия были заклеены, а воздух подавался в салон от расположенного вне автомобиля вентилятора, то эти кривые характеризуют объемный расход воздуха, который в случае естественных условий движения попадал бы через приточные вентиляционные отверстия в салон, а затем через вытяжные отверстия и неплотности кузова выходил бы из салона. По этим кривым, измеряя перепад между давлением воздуха в салоне и статическим давлением в аэродинамической трубе при открытых приточных вентиляционных отверстиях, можно определить действительное количество воздуха, поступающее в салон через приточные вентиляционные отверстия.

Чтобы установить ту часть объемного расхода воздуха, которая истекает из салона через неплотности кузова, можно повторить описанное выше измерение, дополнительно заклеив и вытяжные отверстия. Полученное семейство кривых (см. рис. 12.12, сплошные линии) называется характеристикой расхода воздуха через неплотности кузова. Эти кривые характеризуют часть объемного расхода воздуха, которая в реальных условиях движения поступала бы через приточные вентиляционные отверстия в салон и затем истекала бы из него через неплотности кузова.

Второй этап измерения. Расположенный вне автомобиля вентилятор, воздуховод и соединительные детали убираются, заднее стекло ставится на место. Заклеенные приточные вентиляционные и вытяжные отверстия вновь открываются (см. рис. 12.11, *б*). Проводится серия испытаний, в процессе которых автомобиль обдувается воздухом со скоростями, взятыми за основу в предыдущем этапе испытаний. При этом устанавливаются различные режимы работы системы отопления и вентиляции за счет изменения положений заслонок и частоты вращения вентилятора отопителя. Возникающее при этом давление в салоне (Δp_i) измеряется относительно статического давления в аэродинамической трубе и фикси-

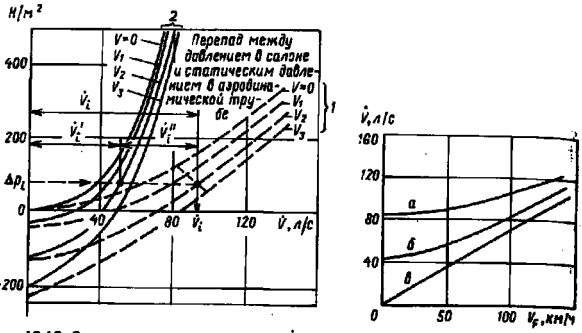


Рис. 12.12. Определение расхода воздуха $\dot{V}_i$ через салон с помощью замеряемого в салоне давления Δp_i:

1 – характеристики расхода воздуха через неплотности и вытяжные отверстия; *2* – характеристики расхода воздуха через неплотности кузова

Рис. 12.13. Расход воздуха в зависимости от скорости движения

руется. Затем с помощью представленной на рис. 12.12 характеристики расхода воздуха через вытяжные отверстия и неплотности кузова можно определить расход воздуха $(\dot{V}_i)$, соответствующий этой измеренной разности давлений. Если такие измерения выполнить для нескольких скоростей потока, то можно получить семейство точек для заданного режима работы вентиляции, определяемого положением заслонок и числом оборотов вентилятора, по которому можно построить рабочую характеристику (см. рис. 12.12).

Измеренные значения расхода воздуха в зависимости от скорости потока показаны на рис. 12.13. Полученные рабочие характеристики позволяют произвести оценку системы вентиляции. В качестве примера показан расход воздуха при неработающем вентиляторе (кривая в) и с вентилятором, работающим на двух различных ступенях (кривые *а* и *б*).

Нанесение отдельных рабочих точек на график, показанный на рис. 12.12, позволяет инженеру-испытателю получить дополнительную информацию, например, о том, какая часть измеренного объемного расхода воздуха истекает через вытяжные отверстия, а какая через неплотности кузова. На рис. 12.12 в качестве примера показано, каким образом распределяется между вытяжными отверстиями и неплотностями в кузове объемный расход выходящего из салона воздуха при определенной скорости движения v_2.

Из графика, приведенного на рис. 12.12, можно получить необходимую для сравнений информацию по так называемым эквивалентным

сечениям неплотностей кузова и вытяжных отверстий (см. п. 10.4.1) (площадь отверстия, эквивалентного по сопротивлению выходу воздуха неплотностям кузова). При этом предполагается, что отдельные неплотности могут быть представлены одним отверстием эквивалентного сечения. Исходя из характеристики расхода воздуха через неплотности кузова при $v = 0$, можно рассчитать эффективную площадь эквивалентного сечения; согласно работе Экка [12.13] это можно сделать по следующей формуле:

$$A = \dot{V}/\sqrt{2\Delta p/\rho}. \qquad (12.4)$$

Недостатком рассмотренного выше метода измерения расхода является то, что в этом случае учитывается только то количество воздуха, которое попадает в салон через приточные вентиляционные отверстия. В действительности же часть проходящего через салон объемного расхода воздуха проникает в него через неплотности кузова.

Другие методы измерения расхода воздуха. Неучтенный объемный расход воздуха, о котором сказано выше, может быть определен с помощью другого, правда, более трудоемкого метода. Весь расход воздуха можно рассчитать косвенным путем с помощью уравнения теплового баланса, составляемого при тепловых испытаниях. Для такого способа измерений, однако, необходимо заранее точно знать потерю теплоты через стенки кузова (см. работу Крэмера и других [12.6]).

Другой метод заключается в подмешивании небольшого количества радиоактивного газа к воздуху, находящемуся в салоне, и в последующем измерении изменения его концентрации во время обдува автомобиля потоком воздуха в аэродинамической трубе. Изменение концентрации радиоактивного газа является следствием расхода воздуха и поэтому может использоваться для расчета действительного расхода воздуха [12.6]. Вместо радиоактивного газа может использоваться и другой, концентрацию которого можно легко измерить, например углекислый газ CO_2.

Следует также напомнить, что угол скоса потока, обдувающего автомобиль (β), влияет на результаты измерений расхода воздуха. Однако, как правило, его влияние на расход воздуха при измерениях не учитывается.

12.2. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВНЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

12.2.1. ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОМ ВЫБЕГА

Измеренные в аэродинамической трубе аэродинамические коэффициенты очень трудно перепроверить при дорожных испытаниях, если это и возможно, то с недостаточной степенью точности. Причина этого кроется в недостаточно точном измерении различных влияющих факторов, а также в зависимости результатов измерения от условий окружающей среды, имевших место в процессе испытания.

Одним из методов определения коэффициента сопротивления воздуха на дороге является испытание выбегом. Для проведения таких испытаний нужно иметь достаточно длинный прямой испытательный участок, который по всей длине не имеет перепадов по высоте. Во время испытания естественный ветер должен быть как можно меньше, чтобы им можно было пренебречь. Взлстон и другие [12.14] показали, каким образом даже при наличии естественного ветра можно определить коэффициент сопротивления воздуха, пользуясь методом выбега.

Испытуемый автомобиль разгоняется до высокой скорости движения (по возможности близкой к максимальной скорости). После выключения сцепления автомобиль движется по инерции пока не достигнет установленной скорости, причем изменение скорости непрерывно фиксируется. Оценка зарегистрированных данных и расчет коэффициента сопротивления воздуха осуществляются следующим образом (см. работу Беда [12.7]).

Для процесса выбега можно записать следующее уравнение движения:

$$m_r\,[dv(t)/dt] = W_r + W_l\,, \qquad (12.5)$$

где m_r – приведенная масса автомобиля (масса автомобиля плюс соответствующая добавка из-за вращающихся колес, валов и шестерен), кг; $v(t)$ – скорость движения, м/с; W_r – сопротивление качению, состоящее из сопротивления качению шин, сопротивления в подшипниках колес и сопротивления трансмиссии, Н; W_l – сила сопротивления воздуха = $= \rho/2\ v^2 F c_W$, Н; c_W – коэффициент сопротивления воздуха; F – площадь лобового сопротивления автомобиля, м^2; ρ – плотность воздуха, кг/м^3.

Если мгновенное значение замедления $dv(t)/dt$ известно на основании построенной по зарегистрированным значениям кривой скоростей $v(t)$, то по приведенному выше уравнению можно рассчитать общее сопротивление. Оценку можно повторить для нескольких скоростей и в заключение вычислить среднее значение коэффициента c_W.

Несмотря на простоту идеи определение значения c_W по этому методу затруднительно, прежде всего из-за того, что точно неизвестно сопротивление качению. Оно зависит от множества параметров – температуры, давления воздуха, состояния поверхности дороги, скорости, нагрузки на колеса и т.д. – и определить его можно только довольно приблизительно (см. рис. 3.2).

Чтобы исключить возможные неточности, суммарное сопротивление качению определяется при тех же условиях, которые имели место при испытаниях выбегом. Чтобы исключить сопротивление воздуха, испытуемый автомобиль накрывается движущимся коробом, и сопротивление качению определяется непосредственно при буксировке автомобиля (см. работу Кэрра и Розе [12.18]). Действуя таким образом, можно исключить влияние многих трудноконтролируемых параметров, если испытание выбегом и испытание по определению сопротивления качению про-

водить непосредственно друг за другом. Недостатком является то, что при движении с коробом водитель в отдельных случаях вынужден производить корректировку курса, что вызывает некоторое увеличение сопротивления качению.

Кроме того, как при движении с коробом, так и при выбеге скорость в процессе испытания вследствие достаточно тяжелых условий движения должна оставаться относительно невысокой. Это обстоятельство ведет к тому, что сила сопротивления воздуха при относительно малых скоростях относительно мала по сравнению с сопротивлением качению, и значение c_W может быть определено менее точно.

Другой метод для определения коэффициента сопротивления воздуха, в принципе аналогичный рассмотренному выше испытанию выбегом, состоит в том, что испытуемый автомобиль толкается с помощью штанги. Если штанга имеет достаточную длину, такую, чтобы интерференция между испытуемым автомобилем и толкающим автомобилем была по возможности минимальной, то силу толкания, которая состоит из силы сопротивления качению и силы сопротивления воздуха, по аналогии с испытанием выбегом можно использовать для расчета значения c_W (*см.* работу Романи [12.9]).

12.2.2. ИСПЫТАНИЕ ПРИ ИМИТАЦИИ БОКОВОГО ВЕТРА РАЗЛИЧНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Возможность исследовать чувствительность автомобиля к действию бокового ветра в процессе дорожных испытаний предоставляют устройство, имитирующие боковой ветер. В данном случае речь идет об устройстве, искусственно создающем боковой ветер, действующий перпендикулярно к направлению движения автомобиля, т.е. имитируется порыв бокового ветра. В качестве характерного показателя чувствительности автомобиля к боковому ветру чаще всего принимается отклонение от курса автомобиля, движущегося вдоль такого устройства с постоянной скоростью и при зафиксированном положении рулевого колеса (см. также п. 5.4). На рис. 12.14 представлена схема такого испытания [12.10].

Боковое отклонение в принципе можно измерить двумя различными методами.

1. Расположенные на полотне дороги или под ним метки, например пилоны, или установленные под полотном дороги сенсорные датчики, позволяют наблюдать и определять боковое отклонение.

2. Установленные на автомобиле измерительные приборы, например стабилизированная платформа и пятое колесо, фиксируют траекторию движения испытуемого автомобиля.

Если испытание проводится с зафиксированным положением рулевого колеса (*fixed control*), то при использовании первого метода измерения возникают трудности следующего порядка: водителю испытуемого автомобиля предписывается "направляющая линия" (см. рис. 12.14), с помощью которой он должен выровнять направление движения своего автомобиля при въезде на измерительный участок. Боковое отклонение



Рис. 12.14. Схематичное изображение испытания на определение устойчивости автомобиля к действию бокового ветра с помощью устройства, имитирующего такой ветер (устройство состоит из 36 винтомоторных установок) [12.10]:
1 – "направляющая линия"; *2* – траектория движения автомобиля

измеряется относительно этой линии. Если водитель при въезде на измерительный участок отклонился от обязательного направления, то по мере увеличения пройденного автомобилем расстояния имеет место увеличивающаяся по линейному закону погрешность в значении бокового отклонения.

Если измерение осуществляется по второму методу, то возможность возникновения погрешности такого рода отсутствует.

Испытания с помощью установки, имитирующей боковой ветер, позволяют сделать вывод о чувствительности автомобилей к действию бокового ветра. Вывода по значениям коэффициента боковой силы и коэффициента поворачивающего момента сразу сделать невозможно, поскольку наряду с аэродинамическими свойствами испытуемого автомобиля на боковое отклонение существенно влияют его ездовые качества.

Конструкции и размеры испытательных участков существующих установок, имитирующих боковой ветер, не идентичны друг другу, поэтому сравнить можно только те результаты, которые были получены на одной и той же установке.

Эпюра скоростей бокового ветра в направлении его действия обычно не остается постоянной, она изменяется по форме и среднему значению скорости по мере приближения к самой установке, имитирующей боковой ветер. Поэтому место въезда на измерительный участок должно быть всегда одним и тем же, чтобы результаты были сопоставимыми.

Эпюры скоростей естественных порывов бокового ветра и бокового ветра, созданного искусственно с помощью установки, как правило, имеют не одинаковую форму [12.10]. Этот факт влияет на правильность выводов, полученных при испытании (рис. 12.15).

Испытания с помощью установки, имитирующей боковой ветер, зачастую проводятся в нереальных условиях. Как правило, измерения про-

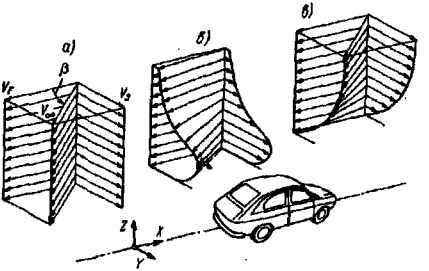


Рис. 12.15. Сравнение эпюр скоростей бокового ветра, полученных в аэродинамической трубе, с помощью имитирующей боковой ветер установки и эпюры скоростей ветра в реальных условиях [12.10]: *а* – аэродинамическая труба (без прилежащего к основанию пограничного слоя); *б* – установка, имитирующая боковой ветер; *в* – естественный боковой ветер

изводят при скорости движения $v_F = 100$ км/ч и скорости бокового ветра $v_S = 100$ км/ч. Получающийся при этом угол натекания потока $\beta = 45^\circ$ слишком большой, он является нереальным (см., например, рис. 8.9). Правильнее было бы ограничиваться углом $\beta \leqslant 30^\circ$. Если же автомобили сравниваются при угле натекания $\beta = 45^\circ$, то это может привести к ошибочным выводам. Коэффициенты поворачивающего момента и боковой силы (см, например, рис. 5.7, где приведено изменение этих коэффициентов при углах скоса потока до 30°), измеренные при $\beta \leqslant 30^\circ$ для различных автомобилей, распределяются по отношению друг к другу в определенной последовательности, а при больших углах натекания эта последовательность может нарушиться. То есть автомобиль, который при $\beta \leqslant 30^\circ$ из-за своей неудовлетворительной аэродинамики был оценен как обладающий повышенной чувствительностью к боковому ветру, в случае проведения измерений при $\beta = 45^\circ$ может перейти в разряд автомобилей, обладающих меньшей чувствительностью к боковому ветру.

Эксплуатируемые в настоящее время установки состоят либо из последовательно расположенных винтомоторных установок (установки фирм "Фольксваген", "Даймлер Бенц", "Тойота"), или из одного реактивного двигателя, отработавшие газы которого используются для обдува автомобилей на измерительном участке (установка МИРА). Кроме того, следует отметить, что имеются устройства, имитирующие боковой ветер, предназначенные для испытания моделей автомобилей. Они пригодны в основном для принципиальных исследований (см. рис. 5.11).

12.2.3. ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Как правило, испытания системы охлаждения двигателя проводятся в аэродинамической трубе или климатическом канале с обдувом, осна-

щенном роликовым испытательным стендом. Испытания системы охлаждения, в частности, предусматривают определение температуры окружающей среды, при которой охлаждающая жидкость при заданной нагрузке двигателя, атмосферном давлении и условиях движения закипела бы – *ATB*, °С:

$$ATB = t_{ks} - (t_k - t_l) = (t_{ks} - t_k) + t_l, \qquad (12.6)$$

где t_{ks} – точка вскипания охлаждающей жидкости (в системе с повышенным давлением); t_k – температура охлаждающей жидкости на входе в радиатор; t_l – температура окружающего воздуха.

Теоретически температура *ATB* не должна бы зависеть от температуры окружающей среды до тех пор, пока термостат открыт на 100%, и температура охлаждающей жидкости ниже температуры вскипания. Но практически это условие не соблюдается, поскольку состав приготовляемой рабочей смеси двигателя изменяется в зависимости от температуры всасываемого воздуха. Если пренебречь этой погрешностью или иметь ее количественную оценку, то испытания системы охлаждения двигателя можно проводить на дороге. Эмпирическое корректирующее уравнение, выведенное для большинства различных двигателей, и используемое для приведения измеренной при любой температуре окружающего воздуха температуры *ATB* к условиям температуры окружающей среды 20°С, гласит:

$$ATB_{20} = ATB + 0{,}16(20 - t_l). \qquad (12.7)$$

На практике используется целый ряд видов испытаний системы охлаждения, имитирующих определенный, критический для системы охлаждения двигателя, режим эксплуатации. Важнейшие виды испытаний: эксплуатация с высокой или максимальной скоростью с последующим холостым ходом; движение на подъем с максимальной нагрузкой и с прицепом; движение в условиях, приближенных к горным Альпам.

Первые два вида испытаний преимущественно проводятся в аэродинамической трубе или климатическом канале с обдувом; если в наличии имеются соответствующие испытательные участки, то их можно проводить и на дороге. Имитация движения в условиях горных Альп в аэродинамической трубе затруднительна, поскольку существующее в горах пониженное атмосферное давление в аэродинамической трубе воспроизвести нельзя. Соответствующей корректировки минимальной температуры *ATB* недостаточно, поскольку хотя и возможно учесть уменьшение температуры кипения охлаждающей жидкости, однако изменение мощности двигателя с уменьшением атмосферного давления остается неучтенным. Поэтому надежнее проводить измерения производительности системы охлаждения в третьем из указанных режимов движения непосредственно путем дорожных испытаний на местности.

Результаты испытания системы охлаждения двигателя в дорожных условиях, как и результаты всех других дорожных испытаний, зависят

от климатических условий, таких, как естественный ветер, дождь, солнечное излучение и т.д. Кроме того, поскольку многие испытания требуют стабилизации измеряемых параметров, то необходимо иметь еще и испытательный участок достаточной длины.

12.2.4. ЗАГРЯЗНЕНИЕ СТЕКОЛ И ДЕТАЛЕЙ КУЗОВА

Испытания автомобилей на загрязняемость проводятся с целью разработки и внедрения мероприятий по уменьшению забрызгивания грязью и залепливания снегом поверхностей автомобиля. Различные конструктивные решения, принимаемые для этой цели, должны сравниваться друг с другом по их эффективности с учетом затрат на реализацию этих решений. Это предполагает наличие возможности количественной оценки *эффективности* принимаемых конструктивных решений.

Испытания на загрязняемость могут проводиться как в аэродинамической трубе, так и на дороге. В аэродинамической трубе требуется реально воспроизвести завихрение грязи и разбрызгиваемой воды. Так как вращение колес в аэрдинамической трубе обычно не воспроизводится, то завихрение грязи колесом необходимо моделировать. Количество грязи, оседающей за определенный промежуток времени, можно достаточно точно фиксировать, что является необходимой предпосылкой для проведения количественных измерений. Однако насколько точно воспроизведенная картина разбрызгивания соответствует действительности до сих пор оценивается лишь субъективно. Поэтому обобщение и распространение результатов, полученных в аэродинамической трубе, на движение в дорожных условиях требует осторожности.

При испытаниях на дороге основная проблема заключается в том, чтобы *обеспечить* одинаковые условия испытаний при проведении или оценке различных мероприятий. Применяемый в настоящее время метод, описанный Гухо и Янссеном в [12.11], заключается в следующем. Испытательный участок покрывается слоем грязи определенной толщины. Испытуемый автомобиль и автомобиль, с которым производится сравнение, попеременно проезжают этот испытательный участок несколько раз. В последующем загрязнение соответствующих поверхностей кузова сравнивается друг с другом либо качественно, либо количественно.

Измерение количества грязи, оседающей на единице площади, может осуществляться с помощью испытательных пластинок, накладываемых на исследуемые поверхности автомобиля и фиксируемых с помощью магнитной силы или приклеиванием. Количество грязи можно определить, сравнивая веса каждой из пластинок до и после испытания. Этот метод хорошо оправдал себя как при испытаниях на дороге, так и в аэродинамической трубе. Если для пластинок выбрать водопоглощающий материал, то испытание в аэродинамической трубе можно проводить с чистой водой.

На рис. 12.16 представлены результаты испытания в дорожных условиях [12.10]. Сравнение производилось с автомобилем "Фольксваген

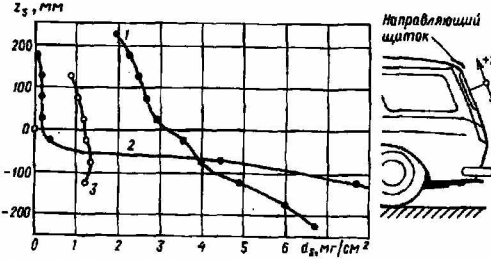


Рис. 12.16. Испытания на загрязняемость автомобиля в дорожных условиях [12.10]:

1 – без направляющего щитка; 2 – с направляющим щитком; 3 – автомобиль "Фольксваген, Вариант 1600"

Вариант 1600". В исходном состоянии испытуемый автомобиль имел втрое большую загрязняемость стекла задка. Благодаря правильно расположенному направляющему щитку над задней кромкой крышки удалось существенно уменьшить загрязнение стекла задка. При этом, правда, существенно возросло загрязнение торцевой панели задка.

Другим методом исследования в дорожных условиях загрязняемости автомобиля является имитация завихряющейся грязи с помощью талька [12.11]. На интересующие с точки зрения загрязнения поверхности наносятся маслом тонкие полосы, и во время движения в вихревом следе за автомобилем подается тальк. Картина распределения талька по исследуемым поверхностям позволяет сделать вывод о том, каким образом в действительности происходят загрязнение автомобиля.

Описанный метод испытания с использованием талька может применяться и в аэродинамической трубе. Недостатком является то, что аэродинамическая труба при этом сильно загрязняется. Этот метод очень удобен в тех случаях, когда необходимо в принципе оценить попадает ли грязь на интересующую поверхность или нет. В этом случае тальк, не обращая внимания на картину разбрызгивания, может вдуваться в вихревой след.

12.2.5. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ ШУМ

Шум ветра, который ощущается в салоне автомобиля, возникает из-за колебаний давления при образовании вихрей и срыва потока от кромок автомобиля (см. пп. 2.3.4. и 6.5.2). Эти воспринимаемые водителем колебания давления воздуха могут проникать в салон непосредственно через неплотности уплотнителей дверей, через приточные, вытяжные или какие-либо другие отверстия, или же проходить через материалы кузова и обивки салона, демпфируясь в большей или меньшей степени. На указанных путях проникновения колебаний давления в салон могут

expert22 для http://rutracker.org

возникнуть резонансные явления, что существенно увеличивает уровень шума.

Непрерывно продолжающиеся работы по созданию малошумной трансмиссии ведут к тому, что аэродинамический шум в салоне легкового автомобиля, особенно при высоких скоростях движения, ощущается все сильнее, т.е. его доля в общем уровне шума увеличивается. Для эффективного уменьшения доли аэродинамического шума необходимо в общем шуме выделить отдельные составляющие.

Сравнительные измерения уровней шума ветра при различных изменениях, вносимых в автомобиль, позволяют сделать довольно приблизительные выводы об их влиянии на снижение аэродинамического шума, поскольку отсутствует возможность эффективного подавления остальных составляющих общего шума таких, как механические шумы от двигателя, трансмиссии, дополнительных агрегатов, шумы сгорания топлива, шумы качения.

Возможности для выделения из общего шума составляющей аэродинамического шума и исследования ее изменения в зависимости от различных мероприятий, реализуемых на автомобиле, довольно ограничены. Для этого автомобиль разгоняется до возможно более высокой скорости, а затем, для измерения уровня шума выключается сцепление и глушится двигатель (выключается зажигание). Уровень шума, измеренный во время движения по инерции, содержит только аэродинамический шум и шум от качения колес. Из проводимых по этой методике исследований с целью снижения аэродинамического шума правильные выводы можно сделать только тогда, когда составляющая шума от качения колес, по меньшей мере, на 7 дБ меньше, чем уровень общего шума. Как проверку, так и соблюдение этого условия практически осуществить весьма затруднительно.

Отмеченные выше трудности отсутствуют при проведении испытаний в аэродинамической трубе.

Обязательной предпосылкой пригодности аэродинамической трубы для исследования аэродинамического шума является, по меньшей мере, на 7 дБ меньший шум аэродинамической трубы по сравнению с шумом в салоне исследуемого автомобиля.

Кроме отмеченного преимущества, заключающегося в отсутствии других, кроме аэродинамического, составляющих шума в аэродинамической трубе имеется возможность использования ЭВМ для анализа результатов измерений непосредственно в ходе испытаний, а также возможность вносить в автомобиль изменения, которые при испытаниях в дорожных условиях были бы недопустимы.

12.3. ОБОЗНАЧЕНИЯ

A – эквивалентная площадь поперечного сечения;

ATB – температура воздуха, при которой происходит вскипание охлаждающей жидкости при заданном нагрузочном режиме движения (сокращение от англ. *air-to-boil*);

c_W – коэффициент сопротивления воздуха;

E – парциальное давление насыщенного водяного пара в воздухе при заданной температуре;
F – площадь лобового сопротивления автомобиля;
k – фактор сопла аэродинамической трубы;
m_r – приведенная масса автомобиля;
p – атмосферное давление;
p_e – парциальное давление водяного пара в воздухе;
p_i – статическое давление в точке i;
p_∞ – статическое базовое давление;
T_l, t_l – температура окружающего воздуха;
t_k – температура охлаждающей жидкости на входе в радиатор;
t_{ks} – точка вскипания охлаждающей жидкости;
U – относительная влажность воздуха;
v – скорость ветра или скорость движения;
$\dot{V}$ – расход воздуха;
W_r – суммарная сила сопротивления качению;
W_l – сила сопротивления воздуха;
$\Delta p_{дин}$ – скоростной напор;
ρ – плотность воздуха;
β – угол скоса потока (угол натекания потока).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Глава 1

1.1. Schlichting, H., Truckenbrodt, E. Aerodynamik des Flugzeuges, Bd. I u. II, Berlin: Springer, 1967/69.

1.2. Ahmed, S.R., Hucho, W.-H. The Calculation of the Flow Field Past a Van with the Aid of a Panel Method.

1.3. SAE-Paper 770 390, Detroit 1977. Ahmed, S.R., Hucho, W.-H. Berechnung der Umstromung eines Fahrzeuges nach dem Panel-Verfahrem. ATZ, Bd. 80, (1978), S. 183–186.

1.4. Hoerner, S. Fluid-Dynamic Drag. Selbstverlag des Autors, Midland Park, N.J. 1965.

1.5. Ackert, J. Anwendung der Aerodynamik im Bauwesen. ZfW, Bd. 13, (1965) S. 109–122.

1.6. Sachs, P. Wind Forces in Engineering. Oxford: Pergamon Press, 1972.

1.7. Houghton, E. L., Carruthers, N.B. Wind Forces on Buildings and Structures. London: E. Arnold. Publ. Ldt., 1976.

1.8. Boden, N. Zur Ermittlung des Luftwiderstandes von Schienenfahrzeugen. Diss. TH Hannover, 1969.

1.9. Hillmann, W., Boden, N., Mölbert, F. Aerodynamische Untersuchungen zur Entwicklung der DB–Lpkomotive 103 fur hohe Fahrgeshwindigkeiten. Glasers Analen, Bd. 92(1968) S. 269 bis 276 und S. 352–360.

1.10. Collin, P.E. Impulsive Pressures in the Train Passing Problem. Proc. of the First Symp. on Road Vehicle Aerodynamics, London 1969, Paper 11.

1.11. Neppert, H., Sanderson, R. Untersuchungen zur Schnellbahn Aerodynamik, ZfW, Bd. 22 (1974) S. 347–359.

1.12. Thieme, H. Beitrag zur Schornsteinaerodynamik. Schiff und Hafen, Jahrg. 1952, S. 453–455.

1.13. Gould, R.W.F. Measurements of the Wind Forces on a Series of Models of Merchant Ships. NPL Aero Rep. 1233, 1967.

1.14. Hucho, W.-H., Janssen, L.J., Emmelmann, H.-J. The Optimization of Body Details – A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Vehicles. SAE–Paper 760, 185, Detroit, 1976.

1.15. Everling, E. Kraftfahrzeugaufbauten mit geringem Luftwiderstand. Forschungen und Fortschritte, Bd. 15, (1939) S. 138–139.

1.16. Kamm, W. Einfluss der Reichsfautobahn auf die Gestaltung von Kraftfahrzeugen. ATZ, Bd. 37 (1934) S. 341–354.

1.17. Kamm, W. Der Weg zum wirtschaftlichen autobahn – und strassentuchtigen Fahrzeug. Strasse, Bd. 6 (1939) S. 104–109.

1.18. Janssen, L.J., Hucho, W.H. Aerodynamische Formoptimierung von VW Golf und VW Scirocco. ATZ, Bd. 77 (1975) S. 1–5.

1.19. v. Koenig–Fachsenfeld, R. Aerodynamik des Kraftfahrzeuges, Bd. I und II. Frankfurt: Umschau–Verlag, 1951.

1.20. v. Franckenberg, R., Matteucci, M. Geschichte des Automobils. Künzelsau: Sigloch Service Fd. 1973.

1.21. Riedler, A. Wissenschaftliche Automobilbewertung. Verl. Oldenburg, 1911 und Automobiltechn. Handbuch, 10. Auflage, Berlin: Verlag M. Krayn, 1921.

1.22. Aston, W.G. Body Design and Wind Resistance. The Autocar, August 1911, 364–366.

1.23. Heller, A. Der neue Kraftwagen von Dr.–Ing. Rumpler. ZDVI, Bd. 39 (1931) S. 1011–1015.

1.24. Eppinger, E. Tropfenwagen – Anwendung der Flugzeug – Aerodynamik. Zeitschrift f. Flugtechnik u. Motorluftschiffahrt, Bd. 12 (1921) S. 287–289.

1.25. Rumpler, E. Das Auto im Luftstrom. Zeitshrift f. Flugtechnik u.Motorluftschiffahrt, Bd. 15 (1924) S. 22–25.

1.26. Klemperer, W. Luftwiderstandsuntersuchungen an Automobilmodellen. Zeitschrift fur Flugtechnik u. Motorloftschiffahrt, Bd. 13 (1922) S. 201–206.

1.27. Jaray, P. Der Stromlinienwagen – Eine neue Form der Automobil – Karosserie. Der Motorwagen, Heft 17, 1922, S. 333–336.

1.28. Bröhl, H.P. Paul Jaray – Stromlinienpionier. Bern: Selbstverlag des Autors, 1978.

1.29. Jaray, P. Grundlagen für die Berechnung des Leistungsaufwandes von Kraftwagen, ATZ, Bd, 37 (1934) S. 86–92.

1.30. Mauboussin, P. Voitures Aerodynamiques. L'Aerodynamique, Nov. 1933, S. 239–245.

1.31. v. Koenig – Fachsenfeld, R. Luftwiderstandsmessungen an einem Modell des Tatra – Wagens Typ 87. ATZ, Bd. 44 (1941) S. 286–287.

1.32. Lange, A. Vergleichende Windkanalversuche an Fahrzeugmodellen. Berichte deutscher Kraftfahrzeugforschung im Auftrag des RVM, Nr. 31, 1937.

1.33. Lay, W.E. Is 50 Miles per Gallon Possible with Correct Streamlining? SAE – Journal, Bd. 32 (1933) S. 144–156; S. 177–186.

1.34. Everling, E. Die Stromlinie sitzt vrun. Neues Kraftfahrzeug Fachblatt, Bd. 1 (1948) S. 19–22.

1.35. v. Koenig – Fachsenfeld, R., Rühle, D., Eckert, A., Zeuner, M., Windkanalmessungen an Omnibusmodellen. ATZ, Bd. 39 (1936) S. 143–149.

1.36. Dörr, E. Vergleichsmessungen an einem Fahrzeug mit Everling – Aufbau und einem Fahrzeug mit üblichem Aufbau. Deutsche Kraftfahrtforschung. Zwischenbericht Nr. 33 (1938).

1.37. White, R.G.S. A Rating Method for Assessing Vehicle Aerodynamic Drag Coefficients. MIRA – Rep. Nr. 1967/9.

1.38. Kamm, W. Anforderungen an Kraftwagen bei Dauerfahrten. ZVDI, Bd. 77 (1933) S. 1129–1133.

1.39. Sawatzki, E. Die Luftkräfte und ihre Momente am Kraftwagen. Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 50, VDI – Verlag, Berlin, 1941.

1.40. Huber, L. Die Fahrtrichtungsstabilität des schnellfahrenden Kraftwagens. Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 44, VDI – Verlag, Berlin, 1940.

1.41. Fiedler, F., Kamm, W. Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Personenwagens. ZVDI, Bd. 84 (1940) S. 485–491.

1.42. Schmitt, H. Der Leistungsbedarf zur Kühlung des Fahrzeugmotors und seine Verminderung. Deutsche Kraftfahrtforschung, Helf 45, VDI – Verlag, Berlin, 1940.

1.43. Eckert, B. Das Kühlgebläse im Kraftfahrzeug und sein betriebliches Verhalten. Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 51, VDI – Verlag, Berlin, 1940.

1.44. Persu, A. Luftwiderstand und Schnellwagen. Zeitschrift fur Flugtechnik u. Motorluftschiffahrt, Bd. 15 (1924) S. 25–27.

1.45. Fishleigh, W.T. The Tear–Drop Car. SAE – Journal, 1931, S. 353–362.

1.46. Heald, R.H. Aerodynamic Characteristics of Automobile Models. US Dept. of Commerce, Bureau of Standards, Res. Paper RP 591 (1933) S. 285–291.

1.47. Reid, E.G. Farewell to the Horseless Carriage, SAE – Journal, Bd. 36 (1935) S. 180–189.

1.48. Hansen, M., Schlör, K. Der AVA – Versuchswagen. AVA – Bericht 43 W 26, Gottingen, 1943.

1.49. Hucho, W.-H. The Aerodynamic Drag of Cars-Current Understanding, Unresolved Problems, and Future Prospects. S. 7–44 in Aerodynamic Drag Mech. of Bluff Bodies and Road Vehicles. Ed. by G. Sovran, T. Morel, W.T. Mason, Plenum Press, New York, 1978.

1.50. Götz, H. The Influence of Wind Tunnel Tests on Body Design, Ventilation and Surface Deposits of Sedans and Sportscars. SAE – Paper 710 212, Detroit, 1971.

1.51. Krell, K. Wirksamkeit von Geschwindigkeitbegrenzungen auf Ausserortsstrassen in Deutschland. 10. Internat. Studienwoche fur Strassenverkehr u. Verkerssicherheit.

1.52. Steinheuer, J. Calculation of Unsteady Pressures During Passing and Tunnel Entrance of Trains. Aerodynamics of Transportation, ASME-CSME Conference, Niagara Falls, 18 bis 20. Juni 1979, S. 177–191.

1.53. Ludvigsen, K.E. The Time Tunnel – An Historical Survey of Automotive Aerodynamics. SAE – Paper 700 035, Detroit, 1970.

1.54. McDonald, A.T. A Historical Survey of Automotive Aerodynamics. Aerodynamics of Transportation, ASME – CSME Conference, Niagara Falls, 18 bis 20. Juni 1979, S. 61–69.

1.55. Entwicklung in Europa angebotener Personenkraftwagen, Ausgabe 1978, VW – FE – Dokumentation, Bericht D07801/4.

Глава 2

2.1. Schlichting, H. Grenzschicht – Theorie. 5. Aufl., Karlsruhe: Braun, 1965.

2.2. Becker, E. Technische Strömungslehre. Stuttgart: Teubner, 1971.

2.3. Eck, B. Technische Strömungslehre. 7. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 1966.

2.4. Gersten, K. Einführung in die Strömungsmechanik. Düsseldorf: Bertelsmann, 1974.

2.5. Prandtl, L., Oswatitsch, K. Wieghardt, K. Führer durch die Stromungslehre. 7. Aufl., Braunschweig: Vieweg, 1969.

2.6. Richter, H. Rohrhydraulik. Berlin: Springer, 1962.

2.7. Truckenbrodt, E. Strömungsmechanik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 1968.

2.8. Akad. Ver. Hütte. Des Ingenieurs Taschenbuch. 28. Aufl., Berlin: Ernst, 1960.

2.9. Hoerner, S. Fluid-Dynamic Drag. 2nd ed., Midland Park, New Jersey 1965.

2.10. Hucho, W.-H. The Aerodynamic Drag of Cars – Current Understanding, Unresolved Problems and Future Prospects. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Ed.): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. Plenum Press, 1978, S. 7–44.

2.11. Hummel, D. On the Vortex Formation over a Slender Wing at Large Angles of Incidence. AGARD CPP – 247 (1978), S. 15–1–15–17.

2.12. Thwaites, B. (Ed.) Incompressible Aerodynamics. Clarendon Press, Oxford: 1960.

2.13. Janssen, L.J., Hucho, W.-H. Aerodynamische Formoptimierung der Typen VW Golf und VW Scirocco. Kolloquium uber Industrieaerodynamik, Aachen 1974, Teil 3, S. 46–69.

2.14. Morel, T. The Effect of Base Slant on the Flow Pattern and Drag of Three-Dimensional Bodies with Blunt Ends. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Ed.): Aerodynamic Drag Mechanisms od Bluff Bodies and Road Vehicles. Plenum Press 1978, S. 191–226.

2.15. Hucho, W.-H. Einfluss der Vorderwagenform auf Widerstand, Giermoment und Seitenkraft von Kastenwagen. ZfW, Bd. 20 (1972) S. 341–351.

2.16. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) VDI – Warmeatlas. 2. Aufl., VDI – Verlag, Dusseldorf 1974.

2.17. Heller, H.H., Dobrzynski, W.M. A Comprehensive Review of Airframe Noise Research. Proceedings of the 11 th Congress of ICAS, Lisboa, Portugal, 1978, S. 42–60.

2.18. Förschling, H. Grundlagen der Aeroelastik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 1974.

2.19. Brun, E.A. (Ed.) Icing Problems and Recommended Solutions. AGAR-Dograph 16 (1956).

2.20. Schlichting, H., Gersten, K. Berechnung der Strömung in rotationssymmetrischen Diffusoren mit Hilfe der Grenzschichttheorie. ZfW, Bd. 9 (1961) S. 135–140.

2.21. Sprenger, H. Experimentelle Untersuchungen an geraden und gekrümmten Diffusoren im inkompressiblen Geschwindigkeitsbereich, Mitt. Nr. 27 des Inst. Aerodynamik Zurich, 1959.

Глава 3

3.1. Buckley, F.T. Marks, C.H., Walston, W.H. An Evaluation of the Aerodynamic Drag Reductions Produced by Various Cab Roof Fairings and a Gap on Tractor – Trailer Trucks. SAE – Paper 760 150, Detroit, 1976.

3.2. Schubert, K. Bewertung untershiedlicher Antriebsaggregate in Lkw und Omnibussen durch rechnerische Methoden. VDI-Vortragsreihe "100 Jahre Ottomotoren". 26.04.–28.04. 1976, Koln.

3.3. Bussien Automobiltechnisches Handbuch. Berlin: Technischer Verlag Herbert Cram, 1965.

3.4. Janssen, L.J., Emmelmann, H.-J. Senkung des Kraftstoffverbrauchs durch Aerodynamik, Formoptimierung der Karosserie von Pkw. VDI/ATG-Jahrestagung "Fahrzeugtechnik" in Stuttgart 9. bis 11. 1977.

3.5. Fiala, E. Die Nützlichkeit der Verringerung des Luftwiderstandes für die Hochstgeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen. ATZ, Bd. 58 (1956) S. 292–294.

3.6. Hucho, W.-H., Janssen, L.J., Schwars, G. The Wind Tunnel's Ground Plane Boundary Layer – Its Interference with the Flow Underneath Cars. SAE – Paper 750 066, Detroit, 1975.

3.7. Hucho W.-H., Emmelmann, H.-J. Aerodynamische Formoptimierung, ein Weg zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Nutzfahrzeugen. VDI/ATG – Jahrestagung "Fahrzeugtechnik" in Stuttgart 9. bis 11.11. 1977.

3.8. Hucho W.-H., Janssen, L.J., Emmelmann, H.-J. The Optimization of Body Details – A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles. SAE – Paper 760 185, Detroit, 1976.

Глава 4

4.1. Schlichting, H. Grenzschichttheorie, 5. Auflage, Verlag Braun, Karlsruhe 1965; 6th Edition, McGraw Hill, New York, 1968.

4.2. Tanner, M. Ein Verfahren zur Berechnung des Totwasserdruckes und Widerstandes von stumpfen Körpern bei inkompressibler, nicht periodischer Strömung, Dissertation, T.H. Braunschweig, 1967.

4.3. Hirt, C.W., Ramshaw, J.D. Prospects for Numerical Simulatuon of Bluff – Body Aerodynamics. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

4.4. Hucho, W.-H. The Aerodynamic Drag of Cars, Current Understanding, Unresolved Problems and Future Prospects. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors) : Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

4.5. Ahmed, S.R., Baumert, W. The Structure of Wake Flow Behind Road Vehicles. Aerodynamics of Transportation, ASME – CSME Conference, Niagara Falls, 18. bis 20. Juni 1979, S. 93–103.

4.6. Ahmed, S.R. Aerodynamik von Strassenfahrzeugen. TU, Sicherheit und Zuverlässigkeit in Wirtschaft und Verkehr, 19 (1978), S. 347–351, Dusseldorf: VDI-Verlag, 1978.

4.7. Howell, J. Wake Properties of a Saloon Car. Koll. Industrie Aerodynamik, Teil 3, Aerodynamik von Strassenfahrzeugen, S. 85–95, Aachen, 1974.

4.8. Hummel, D. On the Vortex Formation over a Slender Wing at Large Angles of Incidence. AGARD CPP – 247 (1978), S. 15–1 – 75–17.

4.9. Barth, R. Einfluss der Form und der Umstromung von Kraftfahrzeugen auf Widerstand, Bodenhaftung und Fahrtrichtungshaltung. VDI – Zeitschrift, Bd. 98 (1956) S. 1265–1312.

4.10. Hoerner, S. Fluid-Dynamic Drag, Selbstverlag des Autors, Midland Park, N.J., 1965.

4.11. Hucho, W.-H. Untersuchungen über den Einfluss einer Heckschraube auf die Druckverteilung und die Grenzschicht schiffsähnlicher Körper. Ing. Arch., Bd. 37 (1969), S. 288–303.

4.12. Schlichting, H., Truckenbrodt, E. Aerodynamik des Flugzeuges, Bd. I und II, Berlin: Springer – Verlag, 2. Aufl., 1967/69.

4.13. Wieselsberger, C. Uber den Flügelwiderstand in Bodennähe. Zeitschrift fur Flugtechnik und Motorluftfahrt, Bd. 12, (1921) S. 145–147.

4.14. Morelli, A. Metodo teorico per la determinazione della destributione di portanza sul di un veicolo. ATA, Bd. 17 (1964) S. 599–606.

4.15. Potthoff, J. Einfluss des Auftriebes auf den Luftwiderstand in Abhängigkeit vom Bodenabstand und vom Anstellwinkel. Diplomarbeit TH Stuttgart 1960.

4.16. Jones, R.T. Diskussionsbeitrag zu [4.4]. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

4.17. Hucho, W.-H. Einfluss der Vorderwagenform auf Widerstand, Giermoment und Seitenkraft von Kastenwagen. ZfW, Bd. 20 (1972) S. 341–351.

4.18. Scibor-Rylski, A. J. Road Vehicle Aerodynamics. London: Pentech Press, 1975.

4.19. Lay, W.E. Is 50 Miles per Gallon Possible with Correct Streamlining. SAE – Journal, Bd. 32 (1933) S. 144–156 und 177–186.

4.20. Watanabe, M., Harita, M., Hayashi, E. The Effect of Body Shapes on Wind Noise. SAE – Paper 780 266, Detroit, 1978.

4.21. Nakaguchi, H. Recent Japanese Research on Three-Dimensional Bluff-Body-Flows Relevant to Road-Vehicle Aerodynamics. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

4.22. Roshko, A., Lau, J.C. Some Observations on Transition and Reattachment of a Free Shear Layer in Incompersible Flow, Proc. Heat Transfer and Fluid Mech. Inst., Stanford: Univ. press, 1965.

4.23. Maull, D. J. Mechanisms of Two and Three-Dimensional Base Drag. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

4.24. Mair, W.A. Drag-Reducing Techniques for Axi-Symmetric Bluff Bodies. In: Sovran, G., Morel T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

4.25. Morel, T. The Effect of Bast Slant on the Flow Pattern and Drag of Three-Dimensional Bodies with Blunt Ends. In: Sovran., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

4.26. Janssen, L.J., Hucho, W.-H. Aerodynamische Entwicklung von VW Golf und VW Scirocco, ATZ, Bd. 77 (1975) S. 1–5.

4.27. Carr, G.W. Influence of Rear Body Scape on the Aerodynamic Characteristics of Saloon Cars. MIRA – Rep. Nr. 1974/2.

4.28. Arnold, K.O. Untersuchungen über den Einfluss der Absaugung durch einen Einzelschlitz auf die turbulente Grenzschicht in anliegender und abgelöster Strömung. Unverofft. Bericht des Institutes für Strömungsmechanik der TH Braunschweig, 1965.

4.29. Wieghardt, K. Erhöhung des turbulenten Reibungswiderstandes durch Oberflächenstörungen. Techn. Berichte, Bd. 10, Heft 9 (1943), vgl. Forschungshefte Schiffstechnik, Bd. 1 (1953) S. 65–81.

4.30. Morelli, A. Aerodynamic Actions on an Automobile Wheel. Paper 5; Proc. 1st Symp. Road Vehicle Aerodynamics, London, 1969.

4.31. Stapleford, W.R., Carr, G.W. Aerodynamic Characteristics of Exposed Rotating Wheels. MIRA-Pep. Nr. 1970/2.

4.32. Hucho, W.-H., Janssen, L.J., Schwarz, G. The Wind Tunnel's Ground Plane Boundary Layer-Its Interference with the Flow Underneath Cars. SAE – Paper 750 066, Detroit, 1965.

4.33. Kramer, G., Gerhardt, H.J., Jäger, E., Stein, H. Windkanalstudien zur Aerodynamik der Fahrzeugunterseite. Koll. Industrie Aerodynamik. Teil 3, Aerodynamik von Strassenfahrzeugen, S. 71–83, Aachen, 1974.

4.34. Schenkel, F.K. The Origins of Drag and Lift Reductions on Automobiles with Front and Rear Spoiler. SAE – Paper 770 389, Detroit, 1977.

4.35. Ohtani, K., Takei, M., Sakamoto, H. Nissan Full Scale Wind Tunnel – Its Application to Passenger Car Design, SAE – Paper 720 100, Detroit, 1972.

4.36. Emmenthal, K.D., Hucho, W.-H. A Rational Approach to Automotive Radiator Systems Design, SAE – Paper 740 088, Detroit, 1974.

4.37. Klemperer, W. Luftwiderstandsuntersuchungen an Automodellen, Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, Bd. 13 (1922), S. 201–206.

4.38. v. König – Fachsenfeld, R. Aerodynamik des Kraftfahrzeuges. Verlag der Motor Rundschau, Umschau Verlag, Frankfurt, 1951.

4.39. Hansen, M., Schlör, K. Der AVA – Versuchswagen. AVA – Bericht 43W16, Göttingen, 1943.

4.40. Stollery, J.L., Burns, W.K. Forces on Bodies in the Presence of the Groud. Paper 1: Proc. 1st Symp. Road Vehicle Aerodynamics, London, 1969.

4.41. Morelli, A. Principali influenze sul coefficiente di resistenza aerodinamica dei veicoli. ATA, April 1960, S. 123–131.

4.42. Morelli, A. Low Drag Bodies Moving in Proximity of the Ground. Aerodynamics of Transportation, ASME-CSME Conferences, Niagara Falls, 18 bis 20 Juni 1979, S. 241–248.

4.43. Morelli, A., Fioravanti, L., Cogotti, A. The Body Shape of Minimum Drag. SAE-Paper 760 186, Detroit, 1976.

4.44. Carr, G.W. The Aerodynamics of Basic Shapes for Road Vehicles, Part 3, Streamlined Bodies, MIRA-Rep. Nr. 1970/4.

4.45. Carr, G.W. The Aerodynamics of Basic Shapes dor Road Vehicles, Part 1, Simple Rectangular Bodies. MIRA – Rep. Nr. 1968/2.

4.46. Carr, G.W. The Aerodynamics of Basic Shapes for Road Vehicles, Part 2, Saloon Car Bodies. MIRA – Rep. Nr. 1968/ 0

4.47. Carr, G.W. The Study of Road Vehicle Aerodynamics Using Wind Tunnel Models. Paper 14, Proc. 1st Symp. Road Vehicle Aerodynamics, London, 1969.

4.48. White, R.G.S. A Rating Method for Assessing Vehicle Aerodynamic Drag Coefficients. MIRA-Rep. Nr. 1967/9.

4.49. Norbye J.P. Streamlining and Car Aerodynamics. TAB Books, Blue Ridge Summit, Pa 17214, 1977.

4.50. Janssen, L.J., Hucho, W.-H. The Effect of Various Parameters on the Aerodynamic Drag of Passenger Cars. Advances in Road Vehicle Aerodunamics; British Hydromech. Ass. Cranfield, U.K., 1973.

4.51. Hucho, W.-H., Janssen, L.J. Beiträge der Aerodynamik im Rahmen einer Fahrzeugentwicklung. ATZ, Bd. 74 (1972) S. 1–5.

4.52. Carr, G.W. Aerodynamic Effects of Modifications to a Typical Car Model. MIRA-Rep. Nr. 1963/4.

4.53. Hucho, W.-H., Janssen, L.J., Emmelmann, H.-J. The Optimization of Body Details – A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles. SAE – Paper 760 185, Detroit, 1976.

4.54. Carr, G.W. Aerodynamic Effects of Underbody Details on a Typical Car Model. MIRA-Rep. Nr. 1965/7.

4.55. Hucho, W.-H., Emmelmann, H.-J. Aerodynamische Formoptimierung, ein Weg zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Nutzfahrzeugen. Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften Reihe 12, Nr. 31, 1972, S. 163–185.

4.56. Hucho, W.-H. Diskussionsbeitrag zu General Discussion and Outlook for the Future. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

4.57. Hucho, W.H. Benzin sparen durch optimale Karosserieform. Automobil Revue, Katalog Nummer 77, S. 104–112, Bern, 1977.

4.58. Schlichting, H. Aerodynamische Untersuchungen an Kraftfahrzeugen. Berichtsband der Technischen Hochschule Braunschweig, 1954, S. 130–139.

4.59. Werner, H. Die Wahrheit aus dem Windkanal. Stern, Nr. 38, 1978. S. 144–150.

4.60. Heil, B. Stromlinie hilft Benzin sparen. mot, Nr. 26, 1978, S. 42–45; mot, Nr. 1, 1979, S. 39–35.

4.61. George, A.R. Aerodynamics of Simple Blutt Bodies Including Effects of Body Shape, Ground Proximity, and Pitch. Aerodynamics of Transportation, ASME – CSME – Conf. Niagara Falls, 18. bis 20. Juni 1979, S. 71–81.

4.62. Carr, G.W. Alternative Routes to a Low – Drag Automobile. Aerodynamics

of Transportation. ASME – CSME Conference, Neagara Falls, 18–20. Juni 1979. S. 105–112.

4.63. Hucho, W.-H. Die optimale Karosserieform. Volkswagen – Workshop. "Das Auto der 80er Jare", Wolfsburg, 28.11.1978, S. 17–23.

4.64. Buchheim, R., Piatek, R. Walzer, P. Contribution of Aerodynamics to Fuel Economy Improvements for Future Passenger Cars. First International Automotive Fuel Economy Coference, Waschington, 30.10. bis 2.11. 1979.

4.65. Hucho, W.-H. Fahrzeugaerodynamik – Stand der Technik und Autgaben für die Forschung. Forschung und Endwicklung auf dem Gebiet der Strömungsmechanik und Aerodynamik in Deutschland. Bonn, 29.11. bis 1.12. 1978, DGLR – Bericht 79–02, Köln, 1979, S. 401–417.

4.66. Ahmed, S.R., Hucho, W.-H. The Calculation of the Flow Field Past a Van with the Aid of a Panel Method. SAE – Paper 770 390, Detroit, 1977.

4.67. Ahmed, S.R., Hucho, W.-H. Berechnung eines Fahrzeuges nach dem Panel-Verfahren. ATZ, Bd. 80 (1978). S. 183–186.

4.68. Liebold, H., Fortnagel, M., Götz, H., Reinhard, T. Aus der Entwicklung des C 111, III. Automobil-Industrie, Nr. 2 (1979) S. 29–36.

Глава 5

5.1. Davenport, A.G. Some Aspects of Wind Loading. Transactions of the Institute of Canada. Paper – Nr. EIC '63-CIV-3.

5.2. Bitzl, F. Die Einwirkung von Seitenwidkräften auf den Strassenverkehr. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 3 (1961) und Heft 2 (1962). Dr. Arthur Tetzlaff. Verlag, Frankfurt/M.

5.3. Karrenberg, H. Der Einfluss von Wind auf die Sicherheit im Strassenverkehr. Dissertation TH Aachen, 1973.

5.4. Smith, N.P. Wind Custs Measured on High Speed Roads. MIRA-Rep. Nr. 1972/7.

5.5. Barth, R. Der Einfluss unsymmetrischer Strömung auf die Luftkräfte an Fahzeugmodellen und ähnlichen Körpern. ATZ, Bd. 62 (1960) S. 80–95.

5.6. Squire, H.B. and Pankhurst, R.C. ARC CR 80, 1952.

5.7. Schlichting, H. Aerodynamische Untersuchungen an Kraftfahrzeugen. Aus dem Institut für Strömungsmechanik, TU Braunschweig, 1953.

5.8. Hucho, W.-H. Einfluss der Vorderwagenform auf Widerstand, Giermoment und Seitenkraft von Kastenwagen, ZfW, Bd. 20 (1972) S. 341–351.

5.9. Reichard, H. Gesetzmässigkeiten der freien Turbulenz. VDI-Forschungsheft 414 (1942) 2. Aufl. 1951.

5.10. Hucho, W.-H., Emmelmann, H.-J. Teoretical Prediction of the Aerodynamic Derivatives of a Vehicle in Cross Wind Gusts. SAE – Paper 730 232, Detroit, 1973.

5.11. Hummel, D. Berechnung der Druckverteilung an schlanken Flugkörpern. ICAS-Paper Nr. 68–44.

5.12. Woolard, H.W. Slender Body Aerodynamics for High Speed Ground Vehicles. AIAA Paper Nr. 70-139, New York, 1970.

5.13. Beauvais, F.N. Transient Nature of Wind Gust Effects an Automobile. SAE-Paper 670 608, Detroit, 1967.

5.14. Muto, S., Yoshida, Y., imaizumi, T. Transient Aerodynamic Forces and Moments of Vehicle Passing Through Cross – Wind. SAE-Paper 770 391, Detroit, 1977.

5.15. Blenk, H., Trienes, H. Strömungstechnische Beiträge zum Windschutz. Grundlagen der Landtechnik. VDI – Verlag, Heft 8, 1956.

5.16. Emmelmann, H.-J. Aus "Technologien für die Sicherheit im Strassenverkehr, Einfluss der Luftkräfte auf Fahrdynamik, unfallträchtige Fahrsituationen" S. 308–311 (BMFT) TUV Rheinland GmbH, Köln 1976.

5.17. Fiala, E. Lenkreaktionen bei Seitenwind. VDI-Zeitung, Bd. 108, (1966) S. 1333.

5.18. Fiala, R. Die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Fahrer. ATZ, Bd. 69 (1967), S. 345–348.

5.19. Gnadler, R. Umfassendes Ersatzsystem zur theoretischen Untersuchung der Fahreigenschaften von vierrädrigen Kraftfahrzeugen. Automobil Industrie, Bd. 16 (1971) S. 75–84.

5.20. Gnadler, R. Beitrag zum Problem Fahrer-Fahrzeug-Seitenwind. Automobil Industrie, Bd. 18, (1973) S. 109–135.

5.21. Mitschke, M. Fahrer – Fahrzeug – Windböen. ATZ, Bd. 71 (1969) S. 347–351.

5.22. Mitschke, M. Zur Auswertung von Versuchen zum Verhalten von Fahrern in Kraftfahrzeugen bei Seitenwind. Institut für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, Bericht Nr. 420, 1975.

5.23. Sorgatz, U. Simulation of Directional Behaviour of Road Vehicles. Vehicle Systems Dynamics, Vol. 5, August 1975, Swets & Zeitlinger B.V. – Amsterdam.

5.24. Niemann, K. Messungen und Berechnungen über das Regelverhalten von Autofahrern. Dissertation, TU Braunschweig 1972.

5.25. Emmelmann, H.-J. Messungen von Seitenkraft und Giermoment mit einer Modellseitenwindanlage, unveröffentlicht.

Глава 6

6.1. Hucho, W.-H. Versuchstechnik in der Fahrzeug – Aerodynamik. Kolloquium über Industrieaerodynamik, Teil 3: Aerodynamik von Strassenfahrzeugen, S. 1–48, Aachen, 1974.

6.2. Janssen, L.J., Hucho, W.-H. Aerodynamische Formoptimierung von VW Golf und VW Scirocco. ATZ, Bd. 77 (1975) S. 309–313.

6.3. Hucho, W.-H. The Aerodynamic Drag of Cars – Current Understanding Unresolved Puoblems, and Future Prospects. Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles, New York: Plenum Press, 1978.

6.4. Howell, J. Wake Properties of a Saloon Car, siehe 6.1, S. 119–128.

6.5. Watanabe, M., Harita, M., Hayashi, E. The Effect of Body Shapes on Wind Noise. SAE-Paper 780 266, Detroit, 1978.

6.6. Hucho, W.-H., Janssen, L.J. Flow Vesualization Techniques in Vehicle Aerodynamics. The International Symposium on Flow-Vesualization, S. 99–108, Tokyo, 1977.

6.7. Koessler, P. Kotflügeluntersuchungen. Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik, Heft 175, 1965, VDI-Verlag, Dusseldorf.

6.8. Götz, H. Schüttguttransport, Verschmutzung und Abrgasgeruch bei Kraftfahrzeugen – Auswirkungen und aerodynamische Abhilfemassnahmen, siehe 6.1, S. 97–108.

6.9. Gunter, B.C., Hansen, K.-H., Veit, I. Technische Akustik. Kontakt + Studium, Band 18, Lexika-Verlag, Grafenau, 1978.

6.10. Zboralski, D. Geräuschbekämpfung im Fahrzeugbau, Eisenbahn – Kraftfahrzeug – Schiff. Dr. Arthur – Textlaff – Verlag, Frankfurt, 1963.

6.11. Stapleford, W. R., Carr, G.W. Aerodynamic Noise in Road Vehicles. MIRA–Rep. Nr. 1971/2.

6.12. Stapleford, W.R. Aerodynamic Noise in Road Vehicles. Part 2: A Study of the Sources and Significance of Aerodynamic Noise in Saloon Cars. MIRA-Rep. 1972/6.

6.13. Jagtiani, H. The Objective Method of Evaluating Aspiration Wind Noise. SAE-Paper 720 506, Detroit, 1972.

6.14. Aspinall, D.T. An Empirical Investigation of Low Frequency Wind Noise in Motor Cars. MIRA-Rep. No. 1966/2.

6.15. Barth, R. Über aerodynamische Eigenschaften von Scheibenwischern. ATZ, Bd. 66 (1964) S. 323–329 und 349–352.

6.16. Hucho, W.-H., Janssen, L.J. Beiträge der Aerodynamik im Rahmen einer Fahrzeugentwicklung. ATZ, Bd. 74 (1972) S. 1–5.

6.17. Volkswagenwerk AG (Herausgeber): Der Wind, der Autos besser macht. Selbstverlag VW AG, Wolfsburg, 1977.

Глава 7

7.1. **Flegl, H.** Die aerodynamische Gestaltung von Sportwagen. Christopherus, Nr. 98, 1969, S. 18–29.

7.2. **Morelli, A.** Low Drag Bodies Moving in Proximity of the Ground. Aerodynamics of Transportation, ASME-CSME-Conf. Niagara Falls, 18. bis 20. Juni 1979, S. 241–248.

7.3. **Schenkel, F.K.** The Origins of Drag and Lift Reductions on Automobiles with Front and Rear Spoilers. SAE-Paper 770 389, Detroit, 1977.

7.4. **Hucho, W.-H.** The Aerodynamic Drag of Cars, Current Understanding, Unresolved Problems, and Future Prospects. Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

7.5. **Braess, H.-H., Burst, H., Hannes, R., Hamm, L.** Verbesserung der Fahreigenschaften von Personenkraftwagen durch Verringerung des aerodynamischen Auftriebs. ATZ, Bd. 77 (1975) S. 119–124.

7.6. **Schlichting, H.** Aerodynamische Probleme des Höchstauftriebes. ZfW, Bd. 13 (1965) S. 1–14.

7.7. **Flegl, H.** Die Fahrleistungsgrenze heutiger Rennwagen – erläutert am Beispiel des Porsche 917/10 Can – Am. Kolloquium über Industrieaerodynamik, Teil 3: Aerodynamik von Strassenfahrzeugen, S. 141–152, Aachen, 1974.

7.8. **Potthoff, J.** Aerodynamische Hilfsmittel am Rennsportwagen. Vortrag VDI – Jahrestagung Fahrzeugtechnik. Stuttgart, Nov. 1977.

7.9. **Rompe, K.** Zum Lenkverhalten von Kraftfahrzeugen bei stationarer und instationärer Kreisfahrt im Grenzbereich der Bodenhaftung. Dissertation TU Hannover, 1972.

7.10. **Romberg, G.F., Chianese, F., Lajoie, R.G.** Aerodynamics of Race Cars in Drafting snd Passing Situations. SAE-Paper 710 213, Detroit, 1971.

7.11. **Jim Clark Foundation, London:** Aerofoil Report. Research Report 1969.

7.12. **Larrabee, E.E.** Aerodynamics of Road Vehicles or Aerodynamics as an Annoyance. Second AIAA Symposium: The Aerodynamics of Sports and Competition Cars, Los Angeles, Mai 1974.

7.13. **Mezger, H.** Der Porsche 4,5–l-Rennsportwagen Typ 917. Teil 2. ATZ, Bd. 71 (1969) S. 417–423.

7.14. **Herrmann, J.** Mercedes-Benz Weltrekordwagen T80. Chistopherus, Nr. 152, 1978, S. 10–15.

Глава 8

8.1. **Götz, H.** Die Aerodynamik des Nutzfahrzeuges – Massnahmen zur Kraftstoffeinsparung. Fortschr.-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 12, Nr. 31, 1977.

8.2. **Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M.** 1963: Die flugklimatischen Verhältnisse an den internationalen Flughäfen in der Bundesrepublik Deutschland.

8.3. **Marks, C.H., Buckley, F.T., Walston, W.H.** An Evaluation of the Aerodynamic Drag Reductions Produced by Various Cab Roof Fairings and a Cap on Tractor – Trailer Trucks. SAE-Paper 760 105, Detroit, 1976.

8.4. **Hocho, W.-H., Emmelmann, H.-J.** Aerodynamische Formoptimierung, ein Weg zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Nutzfahrzeugen. Fortschr.-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 12, Nr. 31, 1977.

8.5. **Pawlowski, F.W.** Wind Resistance of Automobiles. SAE-Journal, Bd. 27 (1930), S. 5–14.

8.6. **Hucho, W.-H., Janssen, L.J., Emmelmann, H.-J.** The Optimization of Body Details – A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles. SAE-Paper 760 185, Detroit, 1976.

8.7. **Morel, T., Bohn, M.** Flow over Two Circular Disks in Tandem, Aerodynamics of Transportation. ASME-CSME-Conf. Niagara Falls, 18. bis 20. Juni 1979, S. 23–32.

8.8. **Hau, E., Gilhaus, A., Kunstler, R., Potthoff, J.** Über den Luftwiderstand von Fernlastzügen, Ergebnisse aus Modellmessungen im Windkanal. Fortschr.-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 12, Nr. 31, 1977 und Automobil-Industrie 1979, S. 125–137.

8.9. **Roscko, A., Koenig, K.** Interaction Effects on the Drag of Bluff Bodies in

Tandem. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

8.10. Choulet, R. Quelques aspects de l'aerodynamique des poinds lourds. Le Poids Lourd, Decembre 1976, Nr. 738.

8.11. Im Kampf gegen dem Luftwiderstand, Zeitschrift Nutzfahrzeug, August 1978, S. 39–41.

8.12. Mehr Nutzraum fur den Lastzug, Zeitschrift Fahrzeug und Karosserie, Oktober 1979, S. 12–14.

8.13. Lausta uto Omnibus, Stuttgart, Nr. 10, Oktober 1977, S. 121.

8.14. Young, R.A. Bluff Bodies in a Shear Flow. Ph. D. Thesis, University of Cambridge, 1972.

8.15. Frey, K. Verminderung des Strömungswiderstandes von Körpern durch Leitflächen. Forschung Ing. Wesen, März 1933, S. 67–74.

8.16. Kirsch, J.W. Drag Reduction of Trucks with S3 Air Vanes. Second Symposium The Aerodynamics of Sports and Competition Cars, Volume 16, AIAA, 1974, S. 251–263.

8.17. Daimler – Benz, Omnibus-Verkehrssystem, Mercedes-Benz-Schriftenreihe Nr. 1.

8.18. Gackenholz, L. Beiträge zur Ermittlung der aerodynamischen Verhältnisse in langen Eisenbahntunnelen bei schneller Zugdurchfahrt. Dissertation TU Hannover, 1973.

8.19. Neppert, H., Sanderson, R. Untersuchungen zur Schellbahnaerodynamik, ZfW, Bd. 22 (1974), S. 347–359.

8.20. Mackrodt, P. Schnellbahnaerodynamik in der DFVLR. DFVLR-AVA Bericht Nr. 251 77 A 12 (1977).

8.21. Götz, H. Schuttguttransport, Verschmutzung und Abgasgeruch bei Kraftfahrzeugen – Auswirkungen und aerodynamische Abhilfe-Massnahmen, Kolloquium uber Industricaerodynamik, Teil 3: Aerodynamik von Strassenfahrzeugen, S. 97–108, Aachen, 1974.

8.22. Götz, H. The Influence of Wind Tunnel Tests on Body Design, Ventilation and Surface Deposits of Sedans and Sport Cars. SAE – Paper 710 212, Detroit, 1971.

8.23. Koessler, P. Kotflügeluntersuchungen. Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik, Heft 175, 1965.

8.24. Braun, H. Neue Erkenntnisse über Radabdeckungen. Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik, Heft 223, 1972.

8.25. Yamanaka, A., Nagaike, N. Measurements and Control of Truck Spary on Wet Roads. Mitsubishi Motors Corp., Japan.

8.26. Möller, E. Luftwiderstandsmessungen an Volkswagen-Lieferwagen. ATZ. Bd. 53 (1951) S. 1–4.

8.27. Hucho, W.-H. Einfluss der Vorderwagenform auf Widetstand, Giermoment und Seitenkraft von Kastenwagen. ZfW, Bd. 20 (1972) S. 341–351.

8.28. Mason, W.T. Wind Tunnel Development of the Dragfoiler – A System for Reducing Tractor-Trailer Aerodynamic Drag. SAE-Paper 750 705, Detroit, 1975.

8.29. Servais, R.A., Bauer, P.T. Aerodynamic Devices Can Significantly Reduce Feul Consumption, Experience with the CECA-Designs. SAE-Paper 750 707, Detroit, 1975.

8.30. Holmes, H.R. Practical Economic Aspects of Tractor/Trailer Aerodynamics. SAE-Paper 760 109, Detroit, 1976.

8.31. Buckley, F.T., Sekscienski, W.S. Comparison of Effectiveness of Commercially Available Devices for the Reduction of Aerodynamic Drag on Tractor – Trailers. SAE-Paper 750 704, Detroit, 1975.

8.32. Flynn, H., Kyropoulos, P. Truck Aerodynamics. SAE-Transactions, Bd. 70, (1962) S. 297–308.

8.33. Nakaguchi, H. Recent Japanese Research on Three-Dimensional Bluff Body Flows Relevant to Road – Vehicle Aerodynamics. In Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

8.34. Mason, W.T., Beebe, P.S. The Drag Related Flow Fied Characteristics of

Trucks and Buses. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

8.35. Morel, T. The Effect of Base Slant on the Flow Pattern and Drag of Three – Dimensional Bodies with Blunt Ends. In: Sovran, G., Morel, T., Mason, W.T. (Editors): Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum Press, 1978.

8.36. Bearman, P.W. Bluff Body Flow Applicable to Vehicle Aerodynamics. Aerodynamics of Transportation. ASME-CSME-Conf., Niagara Falls, 18. bis 20. Juni 1979, S. 1–11.

8.37. McDonald, A.T. A Historical Survey of Automotive Aerodynamics. Aerodynamics of Transportation. ASME-CSME-Conf., Niagara Falls, 18. bis 20. Juni 1979, S. 61–69.

8.38. George, A.R. Aerodynamics of Simple Bluff Bodies Including Effects of Body Scape, Ground Proximity and Pitch. Aerodynamics of Transportation. ASME-CSME-Conf., Niagara Falls, 18. bis 20. Juni 1979, S. 71–81.

8.39. Lissaman, P.V.S. Research in Aerodynamic Drag Reluction of Trucks. Proceedings of the Second AIAA Symposium on Aerodynamics of Sports and Competition Automobiles, Vol. 16, May 1974.

8.40. Ahmed, S.R., Hucho, W.-H. The Calculation of the Flow Field Past a Van with the Aid of a Panel Method. SAE-Paper 770 390, Detroit, 1977.

8.41. Ahmed, S.R., Hucho, W.-H. Berechnug der Umströmung eines Fahrzeuges nach dem Panelverfahren. ATZ, Bd. 80 (1978), S. 183–186.

8.42. Mischke, A. 15 Prozent Kraftstoff sparen und wie man das macht. Zeitschrift Nutzfahrzeug, Juli 1975.

8.43. Mischke, A. Energieeinsparung im Nutzfahrzeugbetrieb. Internationaler Nutzfahrzeugkatalog, Ausgabe Januar 1976, siehe auch VDI-Nachrichten, 18.7.1976, S. 27–29.

8.44. Steers, L.L., Montoya, L.C., Saltzman, E.J. Aerodynamic Drag Reduction Tests on a Full – Scale Tractor – Trailer Combination and a Representative Box – Shaped Ground Vehicle. SAE-Paper 750 703, Detroit, 1975.

8.45. Fiat-Vehicoli Industriali S.P.A. Im Kampf gegen den Luftwiderstand. Fiats Versuche mit Windschildern und Aufbauformen. Zeitschrift Nutzfahrzeuge, August 1978.

Глава 9

9.1. Haas, W. Stromungsprobleme an der Kühlanlage wassergekühlter Kraftfahrzeuge, Dissertation Darmstadt, 1967.

9.2. "Äthylenglykol", Badische Anilin u. Soda Fabrik AG.

9.3. Beauvais, F.N. Aerodynamic Characteristic of a Car-Trailer Combination, SAE-Paper 670 100, Detroit, 1967.

9.4. Drucker, E. Kühlwasserwärme raschlaufender Verbrennungsmotoren. VDI – Zeitschrift, Bd. 77 (1933), S. 912–913.

9.5. Cramer, R. Wärmeabgabe und Kühlungsanforderungen fur Brennkraftmaschinen. SAE-Paper 670 524, Detroit, 1967.

9.6. Linke, W. Systematische Messungen über die Einflüsse der Öffnungsverhältnisse und der Kühlerbeheizung auf Durchfluss und Wilerstand von Düsenkühlern. Lilienthal-Gesellschaft fur Luftfahrtforschung, Sondertagung Kuhlungsfragen, April 1937, Abhandlungen aus dem aerodynamischen Institut, Heft 16.

9.7. Taylor, G.I. Air Resistance of a Flat Plate of Very Porous Material, ARC R. u. M. No. 2236 (1948).

9.8. Hoerner, S. Fluid Dynamic Drag, Selbstverlag des Autors. Midland Park, N.J., 1965.

9.9. Schenkel, F.K. The Origins of Drag and Lift Reluctions on Automobiles with Front and Rear Spoiler, SAE-Paper 770 389, Detroit, 1977.

9.10. Dehn, K. Untersuchungen von Automobilkühlern. VDI-Forschungsheft. Nr. 342, 1931.

9.11. Lorenz, H. Wärmeabgabe und Widerstand von Kühlerelementen. Abhandlung AIA (Aachen) 13, Springer, Berlin, 1933.

9.12. Kays, W. London, A.L. Compact Heat Exchanger, 2. Auflage, McGraw Hill, New York, 1964.

9.13. Eckert, B. Axialkompressoren und Radialkompressoren, Springer, Berlin, 1953.

9.14. Eckert, B. Das Kühlgebläse des Kraftfahrzeuges und sein betriebliches Verhalten. Deutsche Kraftfahrtforschung, Nr. 51, Berlin, 1941.

9.15. Eckert, B. Kuhlgeblase fur Verbrennungskraftmotoren. MTZ, Vd. 2 (1940), S. 316–327.

9.16. Marcinowski, H. Einfluss des Laufradspaltes und der Luftführung bei einem Kühlgebläse axialer Bauart, MTZ, Bd. 14 (1953), S. 259–262.

9.17. Pfleiderer, C. Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase. 4. Auflage, Springer, Berlin, 1955.

9.18. Emmenthal, K.-D. Verfahren zur Auslegung des Wasserkühlsystems von Kraftfahrzeugen. Dissertation RWTH Aachen, Februar, 1975.

9.19. Nusselt, W. Eine neue Formel für den Wärmedurchgang im Kreuzstrom. Techn. Mech. Thermodyn. Bd. 1, 1930, S. 417–422.

9.20. Bosnjakovoc, F., Vilicic, M., Slipcevic, B. Einheitliche Berechnung von Rekuperatoren, VDI-Forschungsheft, Nr. 432.

9.21. Beauvais, F.N. An Aerodynamic Look at Automotive Radiators. SAE-Paper 650 470, Detroit, 1965.

9.22. Paish, M.G. Airflow Measurements through Vehicle Cooling Systems; MIRA-Bulletin No. 6, 1966.

9.23. Wong, L.T., Smith, M.C. Airflow Phenomena in the Louvered – Fin Heat Exchanger. SAE-Paper 730 237, Detroit, 1973.

9.24. Emmenthal, K.-D., Hucho, W.-H. A Rational Approach to Automotive Radiator Systems Design. SAE-Paper 740 088, Detroit, 1974.

9.25. Hucho, W.-H. Strömungsmechanische Probleme an Fahrzeug-Kühlsystemen. Festschrift zum 65. Geburtstag von Professor H. Schlichting, Bericht 72/5 des Institutes für Strömungsmechanik der TU Braunschweig, 1972.

9.26. Emmenthal, K.-D., Hucho, W.-H. Optimierung von Aluminiumkühlern unterschiedlicher Bauart. Aluminium und Automobil, International Conference, Düsseldorf, März 1976.

Глава 10

10.1. Amano, Y., Imai, H. Eine Kraftfahrzeugklimaanlage, Jidosha Gijutsu (Die Kraftfahrzeugtechnik) Bd. 25 (1971) S. 1096–1101.

10.2. Asakai, U., Sakai, Y. Cooling Effect of Car Ventilators, SAE-Journal 1974, S. 75–82.

10.3. Bauer, K. Entwicklung einer neuen Heizungs- und Lüftungsanlage für den Audi 100, ATZ, Bd. 71 (1969) S. 6–10.

10.4. DIN 1946: Lüftungstechnische Anlagen (VDI-Lüftungsregeln) Blatt 1: Grundregeln (1960), Blatt 2: Lüftung von Versammlungsräumen (1960), Blatt 3: Lüftung von Fahrzeugen (1962), Beuth-Verlag, Berlin/Köln.

10.5. Diebschlag, W., Muller-Limmroth, W., Mauderer, V. Klima im Auto, Arzt und Juli 1974, S. 2–10.

10.6. Fanger, P.O. Beurteilung der thermischen Behaglichkeit des Menschen in der Praxis. Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Präventivmedizin, Bd. (1974) S. 265–269.

10.7. Fanger, P.o. Thermal Comfort. Analysis and Application in Environmental Engineering. Danish Technical Press, Kopenhagen, 1970.

10.8. Frank, W. Fragen der Beheizung und Belüftung von Kraftfahrzeugen. ATZ, Bd. 13 (1971) S. 369–376.

10.9. Frank, W. Die Bedienung von Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen. Vortrag beim VDI Arbeitskreis Fahrzeugtechnik am 25. 4. 74.

10.10. Green, G.H. Die Wirkung der relativen Luftfeuchtigkeit auf Abwesenheit und Erkältungen in Schulen. Klima und Kälte-Ing. 1975, S. 51–56.

10.11. Hettinger, Th., Müller – Limmroth, W. Gesund und fit am Steuer. G. Thieme Verlag, Stuttgart, 1970.
10.12. Leusden, P., Freymark, H. Derstellungen der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch. Gesundheits-Ing., Bd. 72 (1951), S. 271–273.
10.13. Liese, W. Über den jahreszeitlichen Gang der Stirntemperatur und ihre Bedeutung für die objektive Behaglichkeitsbeurteilung. Gesundheits-Ing., Bd. 62 (1939) S. 345–350.
10 14. Lutz., H. Thermische Behaglichkeit in Wohn- und Arbeitsraumen. Gesundheits-Ing., Bd. 91 (1970) S. 338–350.
10.15. Miura, T. Studies on the Optimum Temperature. On Some Factors Affecting the Shift of Optimum Temperature J. Science of Labour, Bd. 44 (1968) S. 431–453.
10.16. Müllejans, H., Illg, M. Probleme der Klimatisierung von Strassenfahrzeugen. Kälte-Klima-Ing. 1975, S. 99–104.
10.17. Nitz, J., Hucho, W.-H. The Heat Transfer Coefficient of a Passenger Car s Body. SAE-Paper 790 399, Detroit, 1979.
10.18. Rohles, F.H., Nevins, R.G. Thermische Behaglichkeit: neue Richtlinien und Normen. Klima- und Kälte-Ing. 1975, S. 205–212.
10.19. Rohles, F.H., Wallis, S.B. Comfort Criteria for Air Conditioned Automotive Vehicles. SAE – Paper 790 122, Detroit, 1979.
10.20. Roose, H. Neue Untersuchungen über die Wandtemperatur im Raumklima. Schweipzerische Blatter fur Heizung und Lüftung, Bd. 5 (1938) S. 49–54.
10.21. Stolz, H. Heutige Anforderungen an die Heizung, Lüftung, Scheibenentfrostung und- trocknung im Personenwagen. VS-Bericht 69/583 (Sindelfingen 24. 10. 1969) interner Bericht der Daimler Benz AG.
10.22. Temming, J., Hucho, W.-H. Passenger-Car Ventilation for Thermal Comfort. SAE-Paper 790 398, Detroit, 1979.
10.23. Veil, W. Lüften und Kühlen in Personenfahrzeugen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1965.
10.24. Wenzel, H.G., Muller, E.A. Untersuchungen der Behaglichkeit des Raumklimas bei Deckenheizung. Int. Z. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol., Bd. 16 (1957) S. 335–355.
10.25. Yaglou, C.P. Temperature, Humidity and Air Movement in Industries: The Effective Temperature Index. The Journal of Industrial Hygiene, Bd. 9 (1927) S. 297–309.

Глава 11

11.1. Hucho, W.-H. The Aerodynamic Drag of Cars, Current Understanding, Unresolved Problems and Future Prospects. G. Sovran, T. Morel, W.T. Mason (Editors): Aerodynamics Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. Plenum Press, New York, 1978.
11.2. Hucho, W.-H. Von der Stromlinienform zum Optimierungsverfahren. Autohaus, Bd. 18 (1976) S. 1093–1096.
11.3. Pankhurst, R.C., Holder, D.W. Wind Tunnel Technique. Sir Isaac Pitmann, Sons, London, 1965.
11.4. Pope, A. Wind – Tunnel Testing. John Wiley, Sons, New York, 2. Auflage, 1964.
11.5. Wuest, W. Strömungsmesstechnik. Verlag F. Vieweg, Braunschweig, 1969.
11.6. Hucho, W.-H. Versuchstechnik in der Fahrzeugaerodynamik, Kolloquium uber Industrie-Aerodynamik, Teil 3, Aerodynamik von Strassenfahrzeugen, S. 1–48, Aachen, 1974.
11.7. Stafford, L.G. "Streamline" Wind Tunnel Working Section for Testing at High Blockage Ratios. Vorabkopie eines zur Veröffentlichung vorgesehenen Beitrages, erhalten vom Autor.
11.8. Vandrey, F., Wieghardt, K. Experiments on a Slotted Wall Working Section in a Wind Tunel. ARC CP No. 206, 1955.
11.9. Vandrey, F. Further Experiments with a Slotted Wall Test Section. ARC CP No. 207, 1955.

11.10. Peters, J.-L. Windkanal S4 im Institut Aerotechnique von Saint-Cyr. ATZ, Bd. 80, (1978) S. 333–343.

11.11. Bradshaw, P., Pankhurst, R.C. The Design of Low Speed Wind Tunnels. Progr. in Aeron. Sc. Bd. 5, Herausgeber D. Küchemann und L.H.G. Sterne, Pergamon Press, London, 1964.

11.12. Piatek, R. Windkanalantriebsleistung und Kontraktionsverhältnis, unveröffentlicht.

11.13. Witoszynski, E. Über Strahlerweiterung und Strahlablenkung. Vorträge über Hydro- und Aeromechanik, Innsbruck, 1922, Herausgeber Th. v. Karman, T. Levi-Civita, Berlin, 1924, S. 245–251.

11.14. Börger, G.-G. Optimierung von Windkanaldüsen für den Unterschallbereich, ZfW, Bd. 23 (1975), S. 45–50.

11.15. Hucho, W.-H., Janssen, L.J. Flow Visualization Techniques in Vehicle Aerodynamics. Proc. Internat. Symp. on Flow Visualization, Tokyo, 1977, S. 99–108.

11.16. Hucho, W.-H., Janssen, L.J., Schwarz, G. The Wind Tunnel's Ground Plane Boundary Layer – Its Interference with the Flow Underneath Cars. SAE-Paper 750 066, Detroit, 1975.

11.17. Beauvais, F.N., Tignor, S.C., Turner, T.R. Problems of Ground-Simulation in Automotive Aerodynamics. SAE-Paper 680 121, Detroit 1968.

11.18. Rose, M.J., Carr, G.W. Wind Tunnel Tests of Vehicle Models Using a Moving Ground Surface. MIRA-Rep. Nr. 1966/13.

11.19. Ohtani, K., Takei, M., Sakamoto, H. Nissan Full-Scale Wind Tunnel – Its Application to Passenger Car Design. SAR-Paper 720 100, Detroit, 1972.

11.20. Arnold, K.O. Untersuchungen über den Einfluss der Absaugung durch einen Einzelschlitz auf die turbulente Grenzschicht in anlitgender und abgelöster Strömung. Braunschweig, 1965, unveröffentlichter Bericht des Instituts für Strömungsmechanik der TH Braunschweig.

11.21. Antonucci, G., Ceronetti, G., Costelli, A. Aerodynamic and Climatic Wind Tunnels in the FIAT Research Center. SAE-Paper 770 392, Detroit, 1977.

11.22. Williams, C. persönlice Information.

11.23. Gould, R.W.F. Measurments of the Wind Forces in a Series of Models of Merchant Ships. NPL Aero Rep. 1232, 1967.

11.24. Carr, G.W., Hassell, T.P. A Simple Device for Reducing Wind Tunnel Boundary Layer Thickness. MIRA-Bulletin, Nr № 5. 1968, S. 12–16.

11.25. Carr, G.W. Wind Tunnel Blockage Corrections for Road Vehicles. MIRA-Rep. Nr. 1971/4.

11.26. Hucho, W.-H., Emmelmann, H.-J. Theoretical Predicition of the Aerodynamic Derivatives of a Vehicle in Cross Wind Gusts. SAE-Paper 730 232, Detroit, 1973.

11.27. Williams, C. persönliche Information.

11.28. Schlichting, H., Truckenbrodt, E. Aerodynamik des Flugzeuges, BD. I und II, Springer-Verlag, Berlin, 2. Aufl., 1967/69.

11.29. Hucho, W.-H., Janssen, L.J., Emmelmann, H.-J. The Optimization of Body Details – A Method for Reducing the Aerodynamic Drag of Road Vehicles. SAE-Paper 760 185, Detroit, 1976.

11.30. Pawlowski, F.W. Wind Resistance of Automobiles. SAE-Journal, Bd. 27 (1930), S. 5–14.

11.31. Oda, N., Hoshino, T. Three-Dimensional Airflow Visualization by Smoke Tunnel. SAE-Paper 741 029, Toronto, 1974.

11.32. Mörchen, W. The Climatic Wind Tunnel of Volkswagenwerk AG. SAE-Paper 680 120, Detroit, 1968.

11.33. Low Speed Wind Tunnel – User Manual/Lockheed-Georgia Company, Marietta, Georgia, 30060.

11.34. Fosberry, R.A.C., White, R.G.S. The Mira Full Scale Wind Tunnel. MIRA-Rep. 1961/8.

11.35. Kuhn, A. Der grosse DB-Windkanal. ATZ, Bd. 80, 1978, S.27–32.

11.36. Aerodynamic and Climatic Wind Tunnels, FIAT Torschnngs-Zentrum, Orbassano, Finnenschrift der FIAT Spa, Turin.

11.37. McConnell, W.A. Climatic Testind Indoors – FORD s Hurricane Road. SAE-Preprint 22S, Detroit, 1959.
11.38. Kimura, Y. Toyota's All Weather Wind Tunnel, Firmenschrift.
11.39. Muto, S., Ishihara, T. The JARI Full Scale Wind Tunnel. SAE-Paper 780 586, Detroit, 1978.
11.40. Morelli, A. The New Pininfarina Wind Tunnel for Full-Scale Automobile Testing, Advances in Road Vehicle Aerodynamics. Cranfield, U. K. 1013, S. 335–366.
11.41. Bengsch, H. Der neue Klima-Windkanal bei Ford, Köln, ATZ, Bd. 80 (1978) S. 17–26.
11.42. Chenet, M.J. Reflexions sur l'exploitation d'une soufflerie climatique. Ingenieurs de l'Automobile, Bd. 5 (1974), S. 375–382.
11.43. Lindsay, J.P., Lauktree, H.E. The New Chrysler Wind Tunnel. SAE-Paper 730 239, Detroit, 1973.
11.44. Christensen, F.M. Die Klimaversuchsanlage von Volvo. ATZ, Bd. 75 (1973), S. 42–45.
11.45. Bartsch Der Rüsselsheimer Universalprüfstand, Motor-Rundschau G/1965.
11.46. Veil, W. Ein temperierter Windkanal zur Untersuchung strömungs und wärmetechnischer Fragen an originalgrossen Kraftfahrzeugen, VDI-Bericht, Bd. 34 (1959) S. 39–45.
11.47. Carr, G.W. The MIRA Quarter Scale Wind Tunnel. MIRA-Rep. Nr. 1961/11.
11.48. Buchheim, R., Unger, R., Carr, G.W., Cogotli, A., Garone, A., Kuhn, A., Nilsson, L. Comparison Tests between Major European Automotive Wind Tunnels. SAE-Paper 800 140, Detroit, 1980.
11.49. Morel, T. Comprehensive Design of Axisymmtric Wind Tunnel Contractions. ASME-Paper 75-FE-17, New York, 1975.
11.50. Kelly, K.B. persönliche Information.
11.51. Cogotti, A., Buchheim, E., Garrone, A., Kuhn, A. Comparison Tests between Some Full-Scale European Automotive Wind Tunnels – Pininfarina Reference Car. SAE-Paper 800 139, Detroit, 1980.

Глава 12

12.1. Pope, A., Harper, J.J, Low Speed Wind Tunnel Testing. J. Wiley Sons, 1966.
12.2. Wuest, W. Strömungsmesstechnik, Vieweg, Braunschweig, 1969.
12.3. Gorlin, S.M., Slezinger, LL Wind Tunnels and their Instrumentation, Jerusalem, 1966.
12.4. Lindorf, H., Marchevka, F. Der richtige Einbau von Berührungs und Strahlungsthermometer, Technische Akademie Esslingen, 1973.
12.5. Merz, L. Grundkurs der Messtechnik, Oldenburg Verlag, 1968.
12.6. Krämer, W., Maisch, G., Sailer, S., Schanzer, H.-P. Lufttechnische Messungen in Kraftfahrzeugen mit Hilfe der Isotopenmesstechnik, ATZ, Bd. 78 (1976), S. 439–442.
12.7. Bez, U. Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes bei Kraftfahrzeugen durch Auslaufversuch, ATZ, Bd. 76 (1974), S. 345–350.
12.8. Carr, G.W. , Rose, M.J. Correlation of Full – Scale Wind Tunnel and Road Measurments of Aerodynamic Drag, MIRA-Rep. 1963 (unveröffentlicht).
12.9. Romani, L. La Mesure sur Piste de la Resistance a l'Avancement, Paper 15, Road Vehicle Aerodynamics, I. Symposium, London, 1969.
12.10. Hucho, W.-H. Versuchstechnik in der Fahrzeugaerodynamik, Kolloquium über Industrieaerodynamik, Teil 3: Aerodynamik von Striassenfahrzeugen, S. 1–48, Aachen, 1974.
12.11. Hucho, W.-H., Janssen, L.J. Flow Visualisation Techniques in Vehicle Aerodynamics, Int. Symposium on Flow Visualisation, S. 99–108, Tokyo, 1977.
12.12. Goetz, H. The Influence of Wind Tunnel Tests on Body Design, Ventilation and Surface Deposits of Sedans and Sport Cars, SAE-Paper 710 212, Detroit, 1971.
12.13. Eck, B. Ventilatoren. Springer-Verlag, Berlin, 5. Aufl. 1972.
12.14. Walston, W.H., Buckley, F.T., Marks, C.H. Test Procedures for the Evaluation of Aerodynamic Drag on Full-Scale Vehicles in Windy Environments. SAE-Paper 760 106, Detroit, 1976.

Производственное издание

АЭРОДИНАМИКА АВТОМОБИЛЯ

Редактор *А.С. Игнатьев*
Художественный редактор
Переплет художника *С.Н. Орлова*
Технический редактор *Г.Г. Семенова*
Корректор *В.П. Петошина*

ИБ № 5346

Сдано в набор 26. 11. 86 г. Подписано в печать 21.10.87. Формат 60×88 1/16.
Бумага офсетная № 2. Гарнитура Пресс Роман. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 25,97. Усл. кр.-отт. 26,22. Уч.-изд. л. 28,0.
Тираж 10 000 экз. Заказ 1736. Цена 2 р. 20 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Машиностроение",
107076, Москва, Стромынский пер., 4

Отпечатано в Московской типографии № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли 101898, Москва, Хохловский пер., 7,
с оригинала-макета, изготовленного в издательстве "Машиностроение"
на наборно-пишущих машинах.

expert22 для http://rutracker.org

2р. 20к.



МАШИНОСТРОЕНИЕ