ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ (ФГБОУ ВПО «МГИУ»)

На правах рукописи

ШВЕДОВ Сергей Борисович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ЛЕГКОВОГО АВТОПОЕЗДА С ВЫСОКИМ ПРИЦЕПОМ

Специальность 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Евграфов Анатолий Николаевич

Москва, 2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ....3

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗВИТИЯ АЭРОДИНАМИКИ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ. ОБЗОР ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ....8

ГЛАВА 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБТЕКАЕМОСТИ ЛЕГКОВОГО АВТОПОЕЗДА С ВЫСОКИМ ПРИЦЕПОМ....25

2.1. Особенности обтекания легкового автопоезда с высоким прицепом....25

2.2. Влияние формы прицепа на аэродинамические свойства легкового автопоезда....29

2.3. Разработка мероприятий по улучшению обтекаемости легкового автопоезда с высоким прицепом....36

2.4. Зависимость аэродинамического сопротивления легкового автопоезда от радиуса закругления фронтальных кромок прицепа....43

2.5. Метод расчета установочных параметров лобового обтекателя на автомобиле-тягаче легкового автопоезда....51

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОПОЕЗДА С ВЫСОКИМ ПРИЦЕПОМ....59

3.1. Испытания модели легкового автопоезда в аэродинамической трубе....59

3.2. Дорожные испытания легкового автопоезда....77

3.3. Повышение топливной экономичности легкового автопоезда с высоким прицепом....80

ГЛАВА 4. МЕТОДИКИ И ОБЪЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ....87

4.1. Методики экспериментальных исследований....87

4.2. Оценка погрешности измерений в аэродинамической трубе....106

4.3. Объекты экспериментальных исследований....109

ЗАКЛЮЧЕНИЕ....116

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ....117

ПРИЛОЖЕНИЯ....132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Получившие достаточно широкое распространение легковые автопоезда с высокими прицепами имеют большой расход топлива и невысокую скорость движения. Одной из причин этого является плохая обтекаемость серийных высоких прицепов. Они, как правило, имеют прямоугольную форму и практически незакругленные фронтальные кромки, что, в сочетании со значительным превышением прицепа над автомобилем-тягачом, значительно увеличивает их аэродинамическое сопротивление. Для его снижения необходимо разработать мероприятия по улучшению обтекаемости работающего в составе легкового автопоезда высокого прицепа, что позволит снизить его расход топлива и повысить скоростные свойства. Поскольку данная работа направлена на решение этих вопросов, тема ее является актуальной.

Степень проработанности проблемы.

Вопросам исследования и совершенствования аэродинамики автомобилей посвящено значительное количество работ. Следует отметить авторов монографий по аэродинамике автомобилей: Е.В. Михайловского, В.А. Петрушова, А.Н. Евграфова, Р. Бухгайма, В. Гухо; авторов работ по исследованию и совершенствованию аэродинамики легковых автомобилей: С.Л. Бартенева, С.П. Загородникова, Д.Р. Кульмухамедова, Г.Я. Тура, П. Джерея, В. Камма, В. Лэя, А. Морелли и авторов работ по исследованию и совершенствованию аэродинамики пассажирских поездов: А.Н. Евграфова, В. Суматрана, Д. Соврана.

Значительный вклад в развитие отечественной автомобильной аэродинамики внес Е.В. Михайловский и его научная школа. Развитию и разработке новых методов аэродинамических испытаний посвящены работы В.А. Петрушова.

Следует отметить исследования аэродинамики легковых автомобилей, выполненные С.П. Загородниковым и Д.Р. Кульмухамедовым. Результаты их расчетных и экспериментальных исследований позволили установить влияние

внешней формы кузова на аэродинамических характеристики автомобиля. Были получены полуэмпирические полиномные зависимости, связывающие коэффициент аэродинамического сопротивления C_x с рядом конструктивных параметров кузова.

Однако практически все эти исследования были выполнены применительно к одиночным автомобилям. Комплексных исследований аэродинамики легковых автомобилей с высокими прицепами с применением различных обтекателей практически не проводилось.

Цель работы.

Повышение топливной экономичности и скоростных свойств легкового автопоезда с высоким прицепом путем улучшения его обтекаемости и снижения аэродинамического сопротивления автопоезда.

Основные задачи выполняемой работы:

- разработка расчетной модели обтекания легкового автопоезда с высоким прицепом воздушным потоком;
- разработка конструктивных мероприятий по улучшению обтекаемости высокого прицепа, работающего в составе легкового автопоезда;
- получение математических зависимостей, связывающих коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с радиусом закругления фронтальных кромок высокого прицепа, углом наклона его передней стенки и углом натекания воздушного потока;
- разработка метода расчета оптимальных конструктивных и установочных параметров лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача легкового автопоезда с высоким прицепом;
- определение возможностей повышения топливной экономичности и скоростных свойств легкового автопоезда с высоким прицепом при реализации разработанных мероприятий по улучшению обтекаемости прицепа;
- проведение испытаний модели легкового автопоезда с высоким прицепом в аэродинамической трубе и его натурного образца на дороге для

оценки эффективности разработанных мероприятий по улучшению обтекаемости прицепа и адекватности полученных расчетных зависимостей.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что:

- исследованы особенности взаимодействия с воздушной средой легкового автопоезда в составе автомобиля-тягача и высокого прицепа, с учетом отработки формы высокого прицепа и применения лобовых обтекателей как на автомобиле-тягаче, так и на высоком прицепе;
- разработаны мероприятия по улучшению обтекаемости легкового автопоезда, в составе легкового автомобиля ВАЗ и высокого прицепа «Туртранс» производства ООО «МАЗ-Купава»;
- получены расчетные зависимости, связывающие коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с радиусом закругления фронтальных кромок высокого прицепа, углом наклона его передней стенки и углом натекания воздушного потока;
- разработан метод расчета оптимальных конструктивных и установочных параметров лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача легкового автопоезда с высоким прицепом;
- проведены экспериментальные исследования легкового автопоезда в аэродинамической трубе и на дороге для оценки эффективности разработанных мероприятий по улучшению обтекаемости высокого прицепа и адекватности полученных расчетных зависимостей.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит:

Конструктивные мероприятия по улучшению обтекаемости легкового автопоезда путем отработки формы высокого прицепа и применения лобовых обтекателей могут использоваться при разработке перспективных обтекаемых автопоездов.

Расчетные зависимости, связывающие коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с радиусом закругления фронтальных

кромок высокого прицепа, углом наклона его передней стенки и углом натекания воздушного потока могут использоваться при проектировании прицепов улучшенной обтекаемости.

Метод расчета оптимальных конструктивных и установочных параметров лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача может применяться при создании обтекателей для тюнинга легковых автопоездов с прицепами различной высоты.

Методология и методы исследования.

Расчетно-аналитические исследования с использованием компьютерной техники и математического моделирования. Экспериментальные исследования в аэродинамической трубе А-6 Института Механики МГУ им. М.В. Ломоносова и на динамометрической дороге НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ».

Основные положения, выносимые на защиту:

- исследование взаимодействия с воздушной средой легкового автопоезда в составе автомобиля-тягача и высокого прицепа для разработки мероприятий по улучшению его обтекаемости;
- конструктивные мероприятия для улучшения обтекаемости легкового автопоезда путем отработки формы высокого прицепа и применения лобовых обтекателей на автомобиле-тягаче и прицепе;
- расчетные зависимости, связывающие коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с радиусом закругления фронтальных кромок высокого прицепа, углом наклона его передней стенки и углом натекания воздушного потока;
- метод расчета оптимальных конструктивных и установочных параметров лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача легкового автопоезда с высоким прицепом;
- результаты экспериментальных исследований модели и натурного легкового автопоезда в аэродинамической трубе и на дороге для оценки эффективности разработанных мероприятий по улучшению обтекаемости высокого прицепа и адекватности полученных расчетных зависимостей.

Степень достоверности результатов работы:

Достоверность результатов, полученных в данной работе, подтверждается сопоставлением расчетных данных с результатами модельных и натурных испытаний в аэродинамической трубе и на дороге.

Апробация работы.

Материалы диссертации доложены: на VII Международной научной конференции (МГИУ, г. Москва) в 2007г.; на 6-м Международном научном форуме МАНФ-2008 (ГНЦ РФ «НАМИ», г. Москва) в 2008г.; на Научной конференции молодых ученых (МГИУ, г. Москва) в 2009г.; на кафедре «Автомобили» БНТУ в 2014г. и кафедре «Автомобили» ФГБОУ ВПО «МАДИ» в 2015г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ в издательствах, рекомендуемых ВАК Российской Федерации.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, основной части из 4 глав, заключения, списка литературы из 171 наименований. Объем работы: 140 стр. машинописного текста, 41 рисунок, 6 таблиц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗВИТИЯ АЭРОДИНАМИКИ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ. ОБЗОР ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аэродинамика в значительной степени влияет на такие важные показатели автомобиля как топливная экономичность, динамика, безопасность, производительность, экологичность, а также на уровень его потребительских качеств. Поскольку влияние аэродинамики проявляется при высоких скоростях движения, то основное внимание уделяется исследованию и улучшению аэродинамических характеристик скоростных автотранспортных средств.

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к аэродинамике автомобиля. На сегодня насчитывается более двадцати сложных аэродинамических и аэроклиматических комплексов, которые стали неотъемлемой частью некоторых автомобильных фирм или научно-технических центров, занимающихся постройкой и доводкой автомобилей. Затраты на строительство таких комплексов и стоимость проведения исследования в них значительны. Так, например, стоимость аэродинамического комплекса на фирме «Порше» составляет около 19 млн. евро, а один час испытаний в аэродинамической трубе там обходится в 1500 евро. Однако, несмотря на высокую стоимость, строительство подобных комплексов расширяется, поскольку сегодня автомобильная техника стала показателем технического уровня не только фирмы, но и государства в целом. Автомобильное оборудование базируется на сложной электронной технике, к разработке автомобиля привлекаются специалисты из различных областей науки и техники. Одним из важнейших направлений этой работы стало аэродинамическое проектирование автомобиля, основанное на системной оптимизации его аэродинамических свойств, позволяющей существенно повысить топливную экономичность, динамические качества, производительность автомобиля, снизить загрязняемость и уровень шума. При этом достижение минимального значения коэффициента аэродинамического сопротивления не является единственной задачей аэродинамического проектирования автомобиля.

В ходе его решается целый ряд важных задач, влияющих на технико-экономические, потребительские и экологические качества автомобиля.

Наряду с экспериментальной аэродинамической развиваются и совершенствуются численные методы определения аэродинамических характеристик автотранспортных средств с разработкой соответствующих алгоритмов и программ расчетной оптимизации их параметров обтекаемости. Разрабатываются новые методы определения и доводки аэродинамических характеристик автомобилей в дорожных условиях, когда обеспечивается полное геометрическое и кинематическое аэродинамическое подобие.

Исследованиями установлено, что снижение аэродинамического сопротивления на 4% обеспечивает уменьшение расхода топлива автотранспортным средством примерно на 1%. Учитывая имеющуюся в настоящее время необходимость повышения уровня аэродинамических качеств отечественных легковых и грузовых автомобилей, а также автопоездов, можно ожидать, что совершенствование их позволит обеспечить снижение расхода топлива на 4-5%. При этом за счет разработки, постановки на производство и накопления в автомобильном парке страны автотранспортных средств со сниженным на 15-20% аэродинамическим сопротивлением ориентировочно может быть достигнута экономия топлива около 2 млн. т.

Наряду с экономикой топлива весьма остро стоит проблема повышения производительности автотранспортных средств, улучшения их аэродинамической устойчивости и управляемости, снижения уровня загрязнения и аэродинамического шума. Таким образом, вопросы исследования и совершенствования аэродинамики автотранспортных средств следует отнести к числу важных для нашей страны технико-экономических проблем.

Одним из основных направлений работ, обеспечивающих их решение, являются экспериментальные исследования автотранспортных средств в аэродинамических трубах. При этом, учитывая необходимость достаточно быстрого повышения технического уровня и качества отечественной автомобиль-

ной продукции, что возможно при сокращении сроков исследований и разработок в 3-4 раза с максимальным использованием стендового оборудования, возрастает роль модельных исследований, поскольку масштабное моделирование позволяет значительно интенсифицировать аэродинамические исследования, существенно уменьшить продолжительность и стоимость аэродинамического проектирования. Это подтверждается и мировой практикой, где при аэродинамическом проектировании первым обязательным и наиболее ответственным этапам являются модельные исследования. Если стоимость одного часа работы в большой зарубежной аэродинамической трубе составляет от 1000 до 1500 долларов, а стоимость одного поточного часа работы в большой трубе Т-104 ЦАГИ, в которой могут испытываться натурные автомобили, составляет 30000 руб., то стоимость одного часа работы на моделях в аэродинамической трубе А-6 Института механики МГУ составляет около 3000 руб. Таким образом, экономическая выгода от применения модельных аэродинамических исследований очевидна.

Наряду с модельной аэродинамической доводкой остро стоит вопрос о развитии и совершенствовании численных методов определения аэродинамических характеристик автотранспортных средств. Как известно, применительно к отечественному автомобильному транспорту это направление аэродинамического проектирования проходит период развития. В этой связи также значительна роль модельных испытаний в малой аэродинамической трубе, поскольку в ней можно быстро и качественно смоделировать процесс или вид обтекания той или иной зоны автомобиля и его кузова для последующего правильного математического описания взаимодействия потока с автомобилем. В трубе возможна также достаточно быстрая проверка правильности предлагаемых конструктивных мероприятий по улучшению обтекаемости автомобиля.

В настоящее время широкое распространение получили высокие жилые прицепы, буксируемые легковыми автомобилями. Характерным для такого легкового автопоезда является наличие существенного, достигающего 1м и более, превышения прицепа над автомобилем-тягачом, а также большая ширина

прицепа и наличие у него острых или малозакругленных передних кромок. При движении такого легкового автопоезда в зоне между автомобилем-тягачом и прицепом, а также на верхней, нижней и боковых кромках его передней стенки возникают сильные отрывные течения, на образование и отрыв которых тратится значительная энергия. Наличие большого превышения кузова над автомобилем-тягачом приводит к тому, что значительная часть передней стенки прицепа находится под давлением встречного воздушного потока, двигающегося над автомобилем-тягачом. Существенно большая лобовая площадь и плохая обтекаемость прицепа в сочетании с наличием зазора между ним и автомобилем-тягачом значительно увеличивает аэродинамическое сопротивление такого легкового автопоезда в сравнении с одиночным автомобилем.

Плохая обтекаемость прямоугольного прицепа значительно увеличивает расход топлива, снижает скоростные и динамические свойства легкового автопоезда, а также его безопасность, поскольку возникает значительная подъемная сила, действующая на прицеп. Поэтому необходимы исследования и разработки, направленные на улучшение обтекаемости высокого прицепа и снижение аэродинамического сопротивления легкового автопоезда.

Для снижения аэродинамического сопротивления легковых автопоездов с высокими прицепами используются различные конструктивные мероприятия, направленные на улучшение обтекаемости прицепа. При этом, как показывают исследования, основной выигрыш в части улучшения его обтекаемости дает совершенствование формы прицепа. Однако отработка формы прицепа связана с большими затратами при их проектировании и требует значительных капиталовложений для создания оборудования и их производства.

Наряду с этим способом улучшения аэродинамики легкового автопоезда с высоким прицепом хорошие результаты может обеспечить тюнинг в направлении улучшения его обтекаемости.

Как показал обзор литературных источников, приведенный в первой главе данного исследования, эффективным мероприятием, улучшающим обтекаемость высокого прицепа легкового автопоезда, является установка лобовых обтекателей на автомобиле-тягаче и прицепе.

Лобовые обтекатели широко используются для улучшения обтекаемости магистральных автопоездов. По данным работы применение лобовых обтекателей позволяет снизить аэродинамическое сопротивление магистрального автопоезда на 25-30%, что эквивалентно уменьшению расхода топлива на 5-6%. Наряду со снижением аэродинамического сопротивления установка лобовых обтекателей обеспечивает уменьшение действующей на автопоезд подъемной аэродинамической силы, что улучшает курсовую устойчивость и управляемость автопоезда, повышает безопасность движения.

На магистральных автопоездах лобовые обтекатели устанавливаются либо на крыше кабины, либо на передней стенке кузова, что зависит от расстояния между ними. Тюнинг магистрального автопоезда путем применения лобовых обтекателей сравнительно недорогой, достигаемый за счет их использования эффект в части повышения топливной экономичности, скоростных свойств и безопасности движения автопоезда достаточно высок.

Следует отметить, что наряду с установкой лобовых обтекателей, на магистральных автопоездах, в процессе их тюнинга, применяются другие аэродинамические устройства, к их числу относятся: нижний обтекатель на переднем бампере, боковые щитки, задние обтекатели, аэродинамические закрылки на фронтальных кромках кабины и кузова. Такие закрылки могут использоваться в качестве тюнингового мероприятия для улучшения обтекаемости высокого прицепа легкового автопоезда. Установка аэродинамических закрылков на фронтальных кромках высокого прицепа позволяет практически устранить отрыв воздушного потока за ними, что снижает аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда и действующую на него подъемную силу.

Вопросам исследования и совершенствования аэродинамики автотранспортных средств посвящены работы отечественных ученых: С.Л. Бартеньева, А.С. Безверхого, В.Е. Благоразумова, Ю.С. Виноградова, М.Н. Возного, К.А. Гостева, СП. Загородникова, А.Н. Евграфова, Ю.Г. Зейтванга, Е.В. Ильина, А.А. Капустина, Е.В. Королева, Д.Р. Кульмухамедова, А.В. Кутяева, А.Н. Литвинова, Е.В. Михайловского, А.И. Никитина, И.В. Носакова, Ю.И. Палутина,

В.Н. Парфенова, СБ. Переверзева, С.Н. Петренко, В.А. Петрушова, В.А. Смирнова, Е.Я. Тура, Ф.М. Узбекова, О.М. Чумакова, а также зарубежных исследователей: С.А. Ахмеда, Р. Бухайма, Х. Гетуа, А. Гилхауза, В. Гухо, П. Джерея, В. Камма, Г. Карра, В. Лея, А. Морелли, Г. Шмита и других.

С.Л. Бартеневым в работе [10] рассмотрены вопросы влияния аэродинамических характеристик на управляемость автомобиля. Показано влияние на аэродинамическую устойчивость и управляемость автомобиля формы его кузова, наличия навесных устройств, силы и направления бокового ветра. Отмечается улучшение курсовой устойчивости автомобиля при установке на нем переднего и заднего спойлеров.

А.С. Безверхим [11] выполнен комплекс экспериментальных, расчетных и технологических исследований, направленных на разработку и освоение технологии испытаний натурных автомобилей в большой аэродинамической трубе Научно-исследовательского центра по испытаниям и доводке автомототехники ФГУП «НАМИ» (НИЦИАМТ). По разработанной им методике в большой аэродинамической трубе НИЦИАМТ проведено значительное количество экспериментальных исследований отечественных легковых автомобилей, микроавтобусов, автобусов, грузовых автомобилей. Выполненные исследования и разработанные конструктивные мероприятия по улучшению отечественных автотранспортных средств позволили существенно снизить их аэродинамическое сопротивление и повысить их аэродинамическую устойчивость.

В.Е. Благоразумовым [17] исследована взаимосвязь формы кузова с параметрами автомобиля. Исследования были проведены на мелкомасштабной модели, при этом было мало количество исследованных вариантов формы кузова. Поскольку исследования проводились на мелкомасштабной модели, не представляется возможным использовать полученные результаты применительно к натурному легковому автомобилю.

С.П. Загородниковым [71] проведен комплекс параметрических исследований масштабных моделей автомобилей ВАЗ в аэродинамической трубе. В

работе приведены результаты этих исследований, которые позволили отработать форму кузова перспективного легкового автомобиля ВАЗ с точки зрения его обтекаемости. Получены зависимости, связывающие значения коэффициента аэродинамического сопротивления модели автомобиля с двухобъемным кузовом с рядом его геометрических параметров: углами наклона облицовки радиатора, ветрового и заднего стекол, радиуса закругления фронтальных кромок. Все исследования проводились в присутствии гладкого неподвижного экрана. Как известно, при неподвижном экране возможны погрешности при измерении аэродинамических коэффициентов.

А.Н. Евграфовым проведено значительное количество расчетных и экспериментальных исследований в области аэродинамики пассажирских автомобилей и магистральных автопоездов. Им разработаны теоретические основы аэродинамики магистральных автопоездов и методология аэродинамического проектирования на базе численных методов и испытаний их масштабных моделей. Создана и обоснована методика исследований крупномасштабных моделей магистральных автопоездов с учетом загромождения рабочей части аэродинамической трубы и возможности переноса результатов модельных испытаний на натуру [51]. Испытано значительное количество натурных автомобилей и магистральных автопоездов на дорогах НИЦИАМТ и однотипных с ними масштабных моделей в аэродинамической трубе. Сопоставление результатов этих испытаний и их регрессионный анализ позволил получить значения переходных коэффициентов от модели к натуре [46]. В работе [60] представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований аэродинамических свойств легковых автомобилей, автобусов, грузовых автомобилей и автопоездов. Рассмотрены вопросы совершенствования методики испытаний масштабных моделей автомобилей и автопоездов в малых аэродинамических трубах.

Е.В. Ильиным [74] исследована аэродинамика поддницевой зоны легкового автомобиля. Им разработана математическая модель обтекания поддницевой зоны, в которой днище имитируется шероховатой пластиной большого

удлинения, и методика расчета аэродинамического сопротивления подднищевой зоны автомобиля. Рассмотрены особенности формирования пограничного слоя на днище автомобиля и неподвижном экране, вызывающего увеличение аэродинамического сопротивления и подъемной силы. Экспериментальные исследования масштабных моделей с высоким уровнем подобия выполнены в модельной трубе с уровнем загромождения ее рабочей части, не превышавшей 2%. Исследованиями установлено, что погрешность определения коэффициентов C_x и C_z модели при испытаниях с неподвижным аэродинамическим экраном составляет 3% и 5% соответственно. Показано влияние вертикального и углового расположения кузова относительно поверхности дороги на аэродинамические характеристики автомобиля. Для снижения аэродинамического сопротивления автомобиля и действующей на него подъемной силы путем улучшения обтекаемости подднищевой зоны предлагается использовать плоское днище в сочетании с отрицательным тангажом кузова.

Д.Р. Кульмухамедовым [92] проведены обстоятельные расчетные и экспериментальные исследования легковых автомобилей. При этом использовалась разработанная при его участии оригинальная аэродинамическая установка, в которой воздушный поток создавался тремя авиационными винтовыми двигателями. На этой установке были проведены испытания масштабных моделей и однотипных с ними натурных легковых автомобилей, что позволило получить корреляционные коэффициенты для пересчета результатов модельных испытаний на натуру, величина которых составила: 1,09-1,10. Следует отметить, что масштабные модели имели упрощенное – плоское днище, что отразилось на величине корреляционных коэффициентов. С использованием результатов экспериментальных исследований получены расчетные зависимости для численного определения коэффициента C_x легковых автомобилей с кузовами различного типа. Адекватность результатов расчетных исследований оценивалась сопоставлением с экспериментальными данными, полученными на аэродинамической установке, смонтированной на автополигоне НИЦИАМТ. Было установлено, что погрешность не превышала 5-6%.

А.В. Кутяевым [77] исследовано влияние аэродинамики на формообразование кузова при проектировании автомобиля. Разработана методика аэродинамической доводки проектируемого автомобиля путем использования расчетных зависимостей и испытаний масштабных моделей. Для повышения точности и ускорения изготовления масштабных моделей автомобилей для дизайнерского и аэродинамического проектирования предлагается методика их производства методом быстрого прототипирования из композитных материалов.

Е.В. Михайловским и созданной им научной школой выполнен большой объем исследований, охватывающих различные аспекты автомобильной аэродинамики, включая вопросы теории обтекания, методологии аэродинамических испытаний, влияния конструктивных параметров автомобилей на их аэродинамические характеристики. Приведенные в работах [20], [28], [80], [81], [102] результаты экспериментальных исследований, проведенных в аэродинамической трубе в основном на масштабных моделях легковых автомобилей ГАЗ и ВАЗ, позволили установить степень влияния типа, формы и конструктивных параметров кузова на их аэродинамические характеристики. На основании результатов параметрических исследований масштабных моделей с изменявшимися по форме элементами передней, средней и задней части кузова были получены полуэмпирические полиномные зависимости, позволяющие определить значения коэффициента C_x, а также оценить степень влияния ряда конструктивных параметров кузова на аэродинамические характеристики автомобиля.

И.В. Носаковым [104] разработана методика оценки особенностей конструкции легкового автомобиля на стадии проектирования с учётом его конкурентоспособности. В работе для оценки конкурентоспособности проектируемого автомобиля предлагается маркетинговая модель его свойств. Матрица бальных оценок свойств получается на основе дерева свойств и экспертных оценок. При этом считается, что цена автомобиля образуется, в основном, как сумма составляющих стоимостей свойств, а стоимость каждого свойства получается как произведение оценки свойства (в баллах) на цену балла. Однако в

приведенном дереве оцениваемых свойств автомобиля отсутствуют его аэродинамические свойства, которые очень важны для скоростного автотранспортного средства с точки зрения безопасности, динамичности и топливной экономичности.

С.Б. Переверзевым [109] рассмотрены возможности улучшения обтекаемости легкового автомобиля путем совершенствования параметров кузова. Исследовано влияние бокового ветра на аэродинамическое сопротивление автомобиля.

В.А. Петрушовым разработан новый метод определения сопротивления движению автомобиля [111], [112], использование которого позволяет разделить аэродинамическое сопротивление и сопротивление качению по результатам дорожных испытаний. Основой усовершенствованного метода явился найденный способ интегрирования уравнения выбега автомобиля, в котором функция суммарного сопротивления движению описывается полным полиномом второй степени скорости в переменных «путь-время», с исключением скорости движения за счет введения параметров «полное время выбега». В результате получена формула пути выбега в функции полного времени, в которую не входит скорость. При этом отпала необходимость измерения скорости или замедления выбега и тем самым исключена большая группа существенных источников погрешностей измерения. С использованием этого метода было проведено значительное количество дорожных испытаний автомобилей различного типа. По результатам испытаний получены значения коэффициента C_x для целого ряда отечественных и зарубежных автомобилей и автобусов [114]. В работе [115] приведено полученное В.А. Петрушовым уравнение регрессии и предлагается следующая зависимость, связывающая значение коэффициента $C^{м}_{x}$ для масштабной модели с коэффициентом $C^{н}_{x}$ для натурного автомобиля:

$$C_x^{н} = \sqrt[8]{C_x^{м}} + 0{,}11. \qquad (1.1)$$

Е.А. Туром [129] исследован целый ряд вопросов, связанных с методикой аэродинамических испытаний масштабных моделей и натурных автомобилей. Им проведены аэродинамические испытания моделей автомобилей на стадии

разработки формы кузова [126], проведена сравнительная оценка методов дорожных испытаний автомобилей по определению коэффициента аэродинамического сопротивления [127], предложена методика определения реакций от аэродинамических сил и моментов на передней и задней осях автомобиля.

О.И. Чумаков [135] исследовал аэродинамические характеристики разборной модели легкового автомобиля масштаба 1:5. Было оценено влияние параметров формы кузова, подкапотного пространства и формы днища на аэродинамическое сопротивление автомобиля. Однако в предложенной им математической зависимости для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления C_x автомобиля изменяемый геометрический параметр кузова только один. Кроме того, базовая форма кузова легкового автомобиля, использованная в его исследованиях, на сегодняшний день сильно устарела.

В работах [46], [51], [60], [67] изучено влияние факторов масштабного моделирования на аэродинамические характеристики автомобиля и его масштабных моделей при испытаниях в трубе. Показано, что неполная имитация геометрических и кинематических факторов, а также условий движения натурного автомобиля относительно поверхности дороги на масштабных моделях приводит к значительному, достигающему 30-40%, занижению значения коэффициента C_x. Поэтому при проведении испытаний масштабных моделей необходимо обеспечить наиболее полное подобие с их натурными прототипами по конструктивным параметрам, характеру обтекания и числу Рейнольдса. Установлено, что при соблюдении условий геометрического и кинематического подобия модели и натурного автомобиля между результатами модельных и натурных испытаний существует достаточно устойчивое корреляционное соотношение, зависящее от типа автомобиля.

В работе [6] отмечаются недостатки использования способа зеркального отражения с применением при испытаниях двух одинаковых масштабных моделей, установленных колесами друг к другу. Отмечается, что наличие второй модели, при условии неизменности коэффициента загромождения рабочей части трубы, требует увеличения поперечного сечения потока в ней вдвое. В

этой же работе отмечается эффективность отсоса пограничного слоя для уменьшения его толщины. При этом отсос пограничного слоя рекомендуется производить через прорезь или через узкую полосу пористого материала в передней части аэродинамического экрана. В этой же работе указывается, что в большой аэродинамической трубе «Локхид-Джорджия» (США) для уменьшения толщины пограничного слоя производится вдувание воздуха. При исследовании поля скоростей в сечении на расстоянии двух метров от ряда сопел, через которые вдувается воздух, потеря импульса пограничного слоя почти полностью выравнивается. Здесь же рассматривается способ уменьшения толщины пограничного слоя посредством установки на экране реек в виде стрелы. Указывается, что применение этого метода уменьшает толщину пограничного слоя в двое.

Аэродинамика автомобильного колеса исследована в работах [47], [57]. Получены значения коэффициентов C_x и C_z для вращающегося и неподвижного колеса, а также показано влияние его конструкции, в том числе типа шины и ее рисунка протектора, на аэродинамические характеристики. Отмечается значительное влияние на величину коэффициентов C_x и C_z колеса способа его установки относительно кузова. Наибольшее значение этих коэффициентов наблюдается для открытых колес. Размещение их в колесных нишах кузова существенно уменьшает величину коэффициентов C_x и C_z, в том числе и для автомобиля в целом.

В работе [124] предлагается новый метод определения аэродинамического сопротивления автомобиля в дорожных условиях. Методика определенного сопротивления воздуха основана на использовании специального аэродинамического экрана, внутри которого размещается испытуемый автомобиль, соединенный с экраном тензозвеньями. Вся эта система буксируется посредством длинного фала автомобилем-тягачом, при этом суммарная сила ее сопротивления движению замеряется динамометром. После этого тем же фалом буксируют отдельно испытуемый автомобиль. Тогда, зная определенные посредством тензозвеньев силу сопротивления качению и потери в трансмиссии

испытуемого автомобиля, можно вычислить его аэродинамическое сопротивление путем вычитания этих двух сил из суммарной силы сопротивления движению.

В работе [6] рассмотрены вопросы устойчивости и управляемости легкового автопоезда с высоким прицепом при движении в транспортном потоке. Показано, как меняется распределение давлений по поверхности кузова прицепа при прохождении рядом с легковым автопоездом междугородного автобуса. Оценивается степень влияния создаваемых автобусом турбулентных потоков на курсовую устойчивость легкового автопоезда с высоким прицепом.

В работе [5] приведены результаты модельных и дорожных испытаний легковых автопоездов с высокими жилыми прицепами. Оценивалось влияние на аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда установки лобового обтекателя на автомобиле-тягаче, длины сцепного устройства, формы передней стенки прицепа, бокового ветра. Отмечается, что при установке лобового обтекателя на автомобиле-тягаче расход топлива легкового автопоезда при скорости 80км/ч снижается на 8-10%.

В работе [150] приведены результаты испытаний в аэродинамической трубе масштабной модели легкового автопоезда в трех вариантах, когда автомобиль-тягач буксировал серийный высокий прицеп, с установленным на автомобиле обтекателем, прицеп со скошенной передней стенкой кузова. Приведены экспериментальные зависимости нагрузки на сцепном устройстве легкового автопоезда от скорости натекания воздушного потока. Отмечается, что скошенная передняя стенка прицепа способствует улучшению устойчивости и управляемости легкового автопоезда.

В работе [153] рассмотрены вопросы устойчивости и управляемости легкового автопоезда с высоким одноосным жилым прицепом. Исследовано влияние на демпфирование колебаний и рысканье прицепа следующих параметров: расстояния от задней оси автомобиля-тягача до центра сцепного шарнира, момента инерции прицепа, колесной базы автомобиля-тягача. Исследовано

также поведение легкового автопоезда с высоким прицепом при обгоне автобуса. Изучено влияние бокового ветра на устойчивость и управляемость легкового автопоезда с высоким прицепом. Установлено, что при скорости движения 90км/ч и боковом ветре скоростью 80км/ч курсовая устойчивость и управляемость легкового автопоезда с высоким прицепом значительно отличаются от параметров устойчивости и управляемости одиночного автомобиля.

В работе [6] исследовано влияние конструктивных особенностей высокого прицепа и элементов его крепления к автомобилю-тягачу на эксплуатационные показатели легкового автопоезда, в том числе при движении под воздействием ветровых нагрузок различного направления. Особенно сильно влияние бокового ветра на устойчивость и управляемость легкового автопоезда с высоким прицепом при движении по открытым участкам шоссе. Показатели устойчивости и управляемости, а также безопасность движения легкового автопоезда зависят от следующих конструктивных параметров: расстояния от задней оси автомобиля-тягача до центра сцепного шарнира, момента инерции прицепа, колесной базы автомобиля-тягача.

Исследовано также поведение легкового автопоезда с высоким прицепом при обгоне автобуса. Изучено также влияние бокового ветра на устойчивость и управляемость легкового автопоезда с высоким прицепом при движении с различной скоростью. Установлено, что при скорости движения 90 км/ч и боковом ветре скоростью 80 км/ч курсовая устойчивость и управляемость легкового автопоезда с высоким прицепом значительно отличаются от параметров устойчивости и управляемости одиночного автомобиля.

В работе [144] исследовано влияние высокого прицепа на топливную экономичность легкового автопоезда. Испытания показали, что легковой автомобиль среднего класса при использовании его с высоким жилым прицепом расходует топлива при скорости 90 км/ч примерно в два раза больше, чем одиночный автомобиль. Отмечается, что основным способом снижения расхода топлива легкового автопоезда с высоким прицепом является установка лобо-

вого обтекателя на автомобиле-тягаче. Сообщается, что аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда можно снизить на 70%, если крышу прицепа сделать складывающейся и уменьшить его высоту, сделав ее ровной высоте автомобиля-тягача.

В работе [145] рассмотрены вопросы корреляции значений коэффициента аэродинамического сопротивления автомобиля или его масштабной модели, получаемых по результатам их испытаний в аэродинамической трубе. Такая корреляция необходима, чтобы учесть влияние ряда факторов на величину коэффициента аэродинамического сопротивления. К числу этих факторов относятся следующие: неподвижное дорожное полотно, масштабный эффект, не вращающиеся колеса, влияние мелких элементов на поверхности кузова, неполная имитация характера протекания воздушного потока в подднищевой зоне. Из-за воздействия этих факторов значения коэффициентов аэродинамического сопротивления и подъемной силы, получаемые при испытаниях в аэродинамической трубе, занижены. Это обстоятельство следует учитывать при использовании результатов трубных испытаний.

В работе [148] отмечается, что легковой автопоезд с высоким прицепом имеет большое аэродинамическое сопротивление. Указывается, что значение коэффициента аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с высоким прямоугольным прицепом составляет 0,75-0,85. При этом доля аэродинамического сопротивления автомобиля-тягача составляет около 10% от общего сопротивления легкового автопоезда. Испытаниями установлено, что наклон передней стенки высокого прицепа с одновременным закруглением его верхней фронтальной кромки снижает коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автопоезда до 0,6.

В работе [150] приведены результаты испытаний в аэродинамической трубе модели легкового автопоезда в составе легкового автомобиля Мерседес-Бенц – 190 и высокого жилого прицепа Е450ТК. Модель легкового автопоезда была изготовлена в масштабе 1:10. Сообщается, что путем наклона передней стенки высокого прицепа и установки стекла окна заподлицо с него удалось

снизить аэродинамическое сопротивление модели легкового автопоезда на 17%.

В работе [165] рассмотрено влияние бокового ветра на аэродинамические характеристики пассажирских автомобилей, в том числе легковых автопоездов с высокими прицепами. Отмечается значительное увеличение аэродинамического сопротивления и расхода топлива легкового автопоезда при воздействии бокового ветра. Боковой ветер также отрицательно влияет на аэродинамическую устойчивость и управляемость автомобиля. Особенно сильно это влияние на автомобиль с высоким прицепом. Большая парусность высокого прицепа вызывает неустойчивое движение и склонность к опрокидыванию легкового автопоезда при сильных порывах бокового ветра.

В работе [171] рассмотрено влияние геометрических параметров кормовой части автомобиля на величину его коэффициента аэродинамического сопротивления. Основное влияние оказывает угол наклона задней панели кузова. При правильно выбранном угле наклона обтекающий автомобиль воздушный поток при сходе с крыши кузова не срывается с нее, а плавно перетекает на заднюю стенку. При этом уменьшаются отрывные течения, снижается аэродинамическое сопротивление и действующая на автомобиль подъемная сила.

Однако, как показал анализ выполненных работ, недостаточно исследован механизм обтекания легкового автопоезда с высоким прямоугольным прицепом, практически не проводились теоретические исследования аэродинамики легкового автопоезда с мероприятиями по улучшению обтекаемости высокого прицепа. Экспериментальные исследования проводились на мелкомасштабных моделях при большом загромождении рабочей части аэродинамической трубы. Не всегда соблюдались законы аэродинамического подобия модели и натуры, что снижало точность получаемых результатов.

В этой связи актуальным является проведение данного исследования, цель которого совершенствование аэродинамики легкового автопоезда с высоким прицепом с решением следующих задач:

- исследование особенностей взаимодействия легкового автопоезда с высоким прицепом различной конфигурации с воздушной средой;

- разработка мероприятий по улучшению обтекаемости легкового автопоезда путем отработки формы высокого прицепа и применения лобовых обтекателей на автомобиле-тягаче и прицепе;

- получение расчетных зависимостей, связывающих коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с радиусом закругления фронтальных кромок высокого прицепа, углом наклона его передней стенки и углом натекания воздушного потока;

- разработка метода расчетного определения конструктивных и установочных параметров лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача легкового автопоезда с высоким прицепом;

- оценка адекватности расчетных исследований и эффективности разработанных мероприятий по улучшению обтекаемости высокого прицепа путем экспериментальных исследований модели легкового автопоезда в аэродинамической трубе;

- проведение дорожных испытаний для определения снижения расхода топлива и повышения максимальной скорости легкового автопоезда с высоким прицепом за счет установки лобового обтекателя на автомобиле-тягаче.

ГЛАВА 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБТЕКАЕМОСТИ ЛЕГКОВОГО АВТОПОЕЗДА С ВЫСОКИМ ПРИЦЕПОМ

2.1. Особенности обтекания легкового автопоезда с высоким прицепом

Обтекание легкового автопоезда с высоким прицепом носит сложный характер, что объясняется его конструктивными особенностями. Наличие высокого, превышающего автомобиль-тягач на 1-1,5м, и достаточно тяжелого прицепа значительно увеличивает аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда. Так, аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда вдвое больше одиночного автомобиля. На рис. 2.1 показан характер обтекания легкового автопоезда с высоким прямоугольным прицепом.

Встречный воздушный поток, пройдя над автомобилем-тягачом, оказывает повышенное давление на переднюю стенку прицепа. При этом часть турбулизированного воздуха попадает в зазор между автомобилем-тягачом и прицепом, а затем его подднищевую зона, создавая условия для возникновения подъемной силы. Соответственно, из-за большого давления встречного воздуха на переднюю стенку прицепа, значительно увеличивается аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда.

Наличие острых или малозакругленных фронтальных кромок приводит к отрыву пограничного слоя на них и образованию срывных вихревых течений за ними. Из-за этого явления заметно возрастает аэродинамическое сопротивление прицепа и автопоезда в целом. В разделе 2.3 подробно рассмотрен механизм обтекания фронтальной кромки кузова прицепа.

За высоким прицепом, на задней стенке которого возникает достаточно большое разряжение, образуется длинный вихревой спутный след. Это завихренный воздушный поток, сорвавшийся с боковых стенок и крыши прицепа. В результате этого процесса также увеличивается аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда.

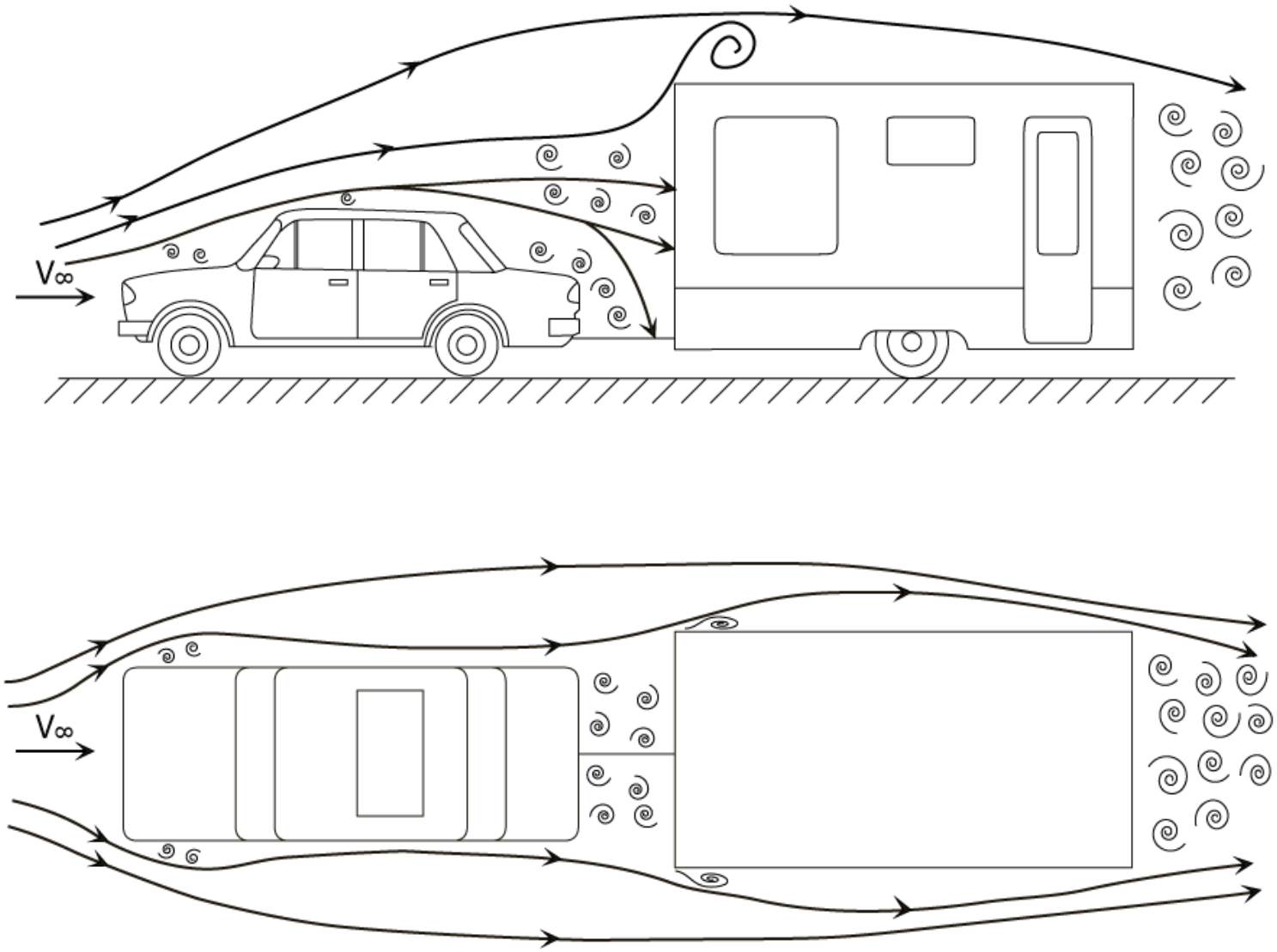


Рис. 2.1. Схема обтекания легкового автопоезда с высоким прицепом

Значительное влияние на обтекаемость легкового автопоезда оказывает боковой ветер. При кососимметричном натекании воздушного потока он попадает в зазор между автомобилем-тягачом и прицепом, и, скользя вдоль его передней стенки, «вылетает» с подветренной стороны. При этом возрастает лобовая площадь прицепа и аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда.

Легковой автопоезд с высоким прицепом, так же, как и автомобиль, относится к разряду плохообтекаемых тел, взаимодействие которых с воздушной средой носит сложный характер. Течение реального газа, возникающего при перемещении в нем плохообтекаемого или среднеобтекаемого тела, состоит из трех потоков: потенциального, вблизи поверхности тела (пограничного слоя) и верхнего, возникающего в следе за телом или его элементами из-за отрыва пограничного слоя. Многочисленными опытами установлено, что при обтекании тела воздушным потоком на самой его поверхности воздух неподвижен – он как бы «прилипает» к ней и его скорость равна скорости тела, а на некотором расстоянии от тела воздух уже приобретает скорость, сопоставимую со скоростью тела, перемещающегося в воздушной среде. Слой воздуха, в котором происходит нарастание скорости от нуля до местной скорости обтекания, принято называть пограничным слоем. В пограничном слое величина действующих на частицы воздуха сил внутреннего трения и сил инерции - одного порядка. Действующие в пограничном слое силы вязкости вызывают касательные напряжения, уменьшающие скорость частиц воздуха. Толщина пограничного слоя определяется расстоянием от поверхности тела до точки, в которой скорость воздуха отличается от скорости внешнего натекающего потока менее чем на 1%, и может, в зависимости от формы и размеров тела, меняется в пределах от 1 до 100мм.

В настоящее время вычислены теоретически и подтверждены экспериментально потери энергии в пограничном слое для небольшого количества тел: плоской пластинки в параллельном ей потоке, заостренного тела вращения.

Для других тел, например, цилиндра, призмы, параллелепипеда такие вычисления затруднены из-за отрыва пограничного слоя и возникновения за ним вихревой структуры – так называемого «вихревого следа». На образование этих вихрей тратится дополнительная энергия. При этом, чем больше вихревой след, тем больше вихревое сопротивление тела. Причиной отрыва пограничного слоя от поверхности тела и вихреобразованний является наличие плохой обтекаемости и зон торможения потока: неправильно выбранная форма тела, неоптимальные углы наклона его поверхностей, наличие выступающих элементов и т.д. Для устранения срыва пограничного слоя и вихреобразований применяется ряд конструктивных мероприятий: увеличивают скорость потока вблизи поверхности, отсасывают заторможенный пограничный слой внутрь тела, сдувают этот слой струей воздуха вдоль поверхности тела в направлении основного потока и др. Своеобразным отображением картины отрыва пограничного слоя и вихреобразований являются характер распределения давлений по поверхности тела. Наличие зон отрицательных давлений свидетельствует об имеющемся в этих местах отрыве пограничного слоя и вихреобразований.

За плохообтекаемыми телами, к числу которых относятся автомобили и легковые автопоезда образуется вихревой спутный след. След образуется и позади обтекаемых воздухом неподвижных тел, в том числе автомобилей и их масштабных моделей при испытаниях в аэродинамических трубах. В следе позади неподвижного тела скорость меньше, чем во внешнем течении. Такое понижение скорости означает, что здесь происходит потеря импульса, причиной которого является сопротивление тела. Ширина следа возрастает по мере увеличения расстояния от тела, но разность между скоростями внешнего течения и течения в следе тем меньше чем больше расстояние от тела.

При взаимодействии легкового автопоезда с натекающим на него воздушным потоком образуются зоны повышенного и пониженного давления, ярко выраженные отрывные течения, например, из-за мало закругленных фронтальных кромок кузова высокого прицепа.

2.2. Влияние формы прицепа на аэродинамические свойства легкового автопоезда

Аэродинамические свойства легкового автопоезда в значительной мере зависят от показателей обтекаемости высокого прицепа. Отечественные серийные высокие прицепы имеют прямоугольную форму с острыми фронтальными кромками, что значительно ухудшает аэродинамические свойства наших легковых автопоездов.

Одним из важнейших аэродинамических свойств легкового автопоезда является его аэродинамическое сопротивление. Как уже отмечалось в разделе 2.1, из-за плохой обтекаемости высокого прицепа прямоугольной формы аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда с таким прицепом большое его коэффициент аэродинамического сопротивления C_x=0,70÷0,75. Изменением формы высокого прямоугольного прицепа в направлении улучшения его обтекаемости можно значительно снизить аэродинамическое сопротивление. На рис. 2.2 показаны возможности снижения коэффициента аэродинамического сопротивления легкового автопоезда путем совершенствования формы высокого прицепа для обеспечения его наилучшего обтекания. Видно, что отработка Формы прицепа позволила более чем вдвое снизить коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с высоким прямоугольным прицепом. Надо отметить, что, как показали наши исследования, основное влияние на улучшения обтекаемости высокого прицепа оказывает совершенствование Формы его лобовой части. Отработка формы кормовой части высокого прицепа, учитывая сравнительно невысокие скорости движения легкового автопоезда, не дает заметного улучшения его обтекаемости.

Здесь следует отметить, что такая основательная отработка формы высокого прицепа, как это показано па рис. 2.2, требует значительных капиталовложении. При этом, как установлено нашими исследованиями, можно также добиться значительного снижения аэродинамического сопротивления легкового автопоезда, изменяя форму высокого прицепа в направлении

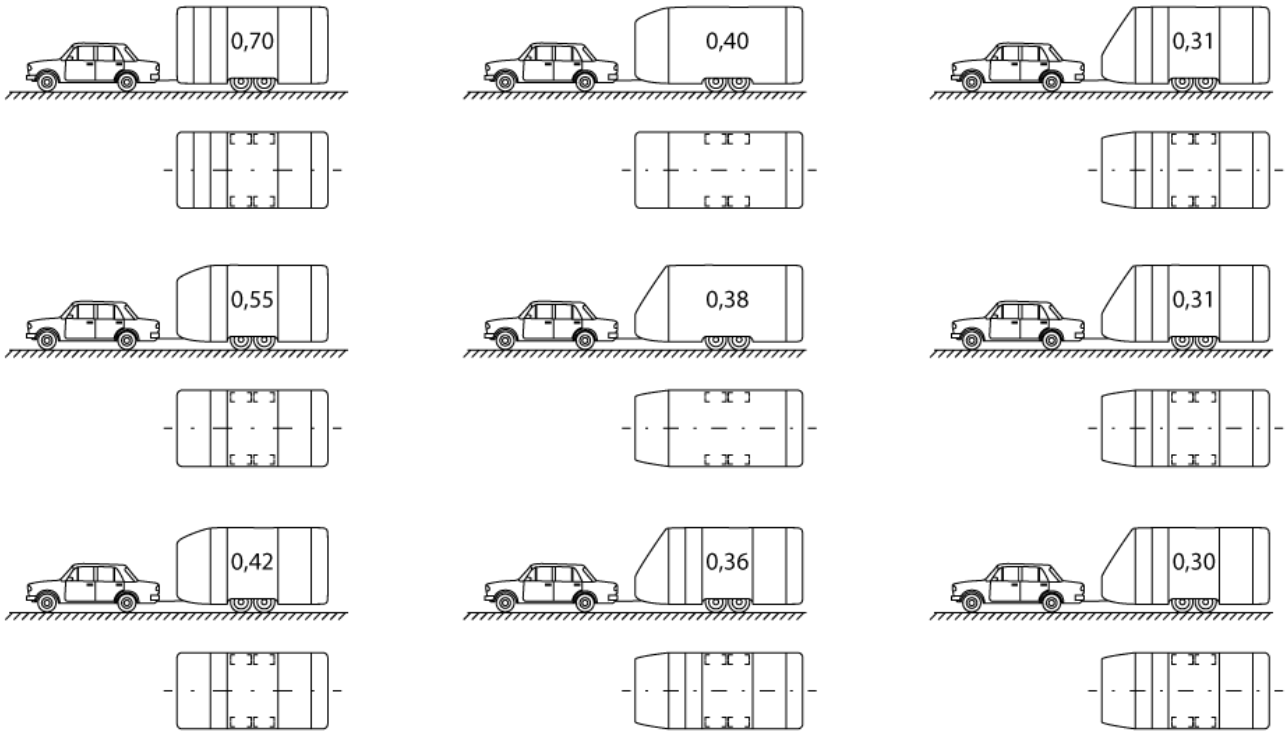


Рис. 2.2. Влияние формы прицепа на величину коэффициента C_x модели легкового автомобиля с прицепом

улучшения его обтекаемости, но с меньшими материальными затратами. На рис. 2.3, а показан легковой автопоезд с высоким прицепом, фронтальные кромки которого закруглены радиусом 120мм. Такое конструктивное решение высокого прицепа позволило снизить аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда на 35%.

На рис. 2.3, б показана схема обтекания автопоезда с высоким прицепом, имеющим наклоненную лобовую стенку. При такой форме высокого прицепа за счет уменьшения сопротивления давления на его лобовую стенку аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда снижается на 25%. Величину снижения аэродинамического сопротивления легкового автопоезда за счет угла наклона лобовой стенки высокого прицепа можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$\Delta Cx_{ф}=K_{\varphi}\varphi_{c}\,, \qquad (2.1)$$

где K_{φ} – коэффициент, учитывающий влияние радиуса закругления верхней фронтальной кромки высокого прицепа;

φ_{c} – угол наклона лобовой стенки высокого прицепа. При радиусе закругления верхней фронтальной кромки высокого прицепа: 120-150мм, значение коэффициента K_{φ}=0,005. При незакругленной верхней фронтальной кромке K_{φ}=0,008.

В реальных дорожных условиях на легковой автопоезд воздействует боковой ветер, вызывающий заметное увеличение его аэродинамического сопротивления и расхода топлива. Поэтому при аэродинамического проектировании легкового автопоезда с высоким прицепом следует отрабатывать параметры обтекаемости и при кососимметричном натекании воздушного потока. Анализ экспериментальных зависимостей $C_x=f(\beta)$ показывает, что оценка уровня обтекаемости легкового автопоезда при кососимметричном натекании воздушного потока может проводится по следующей формуле:

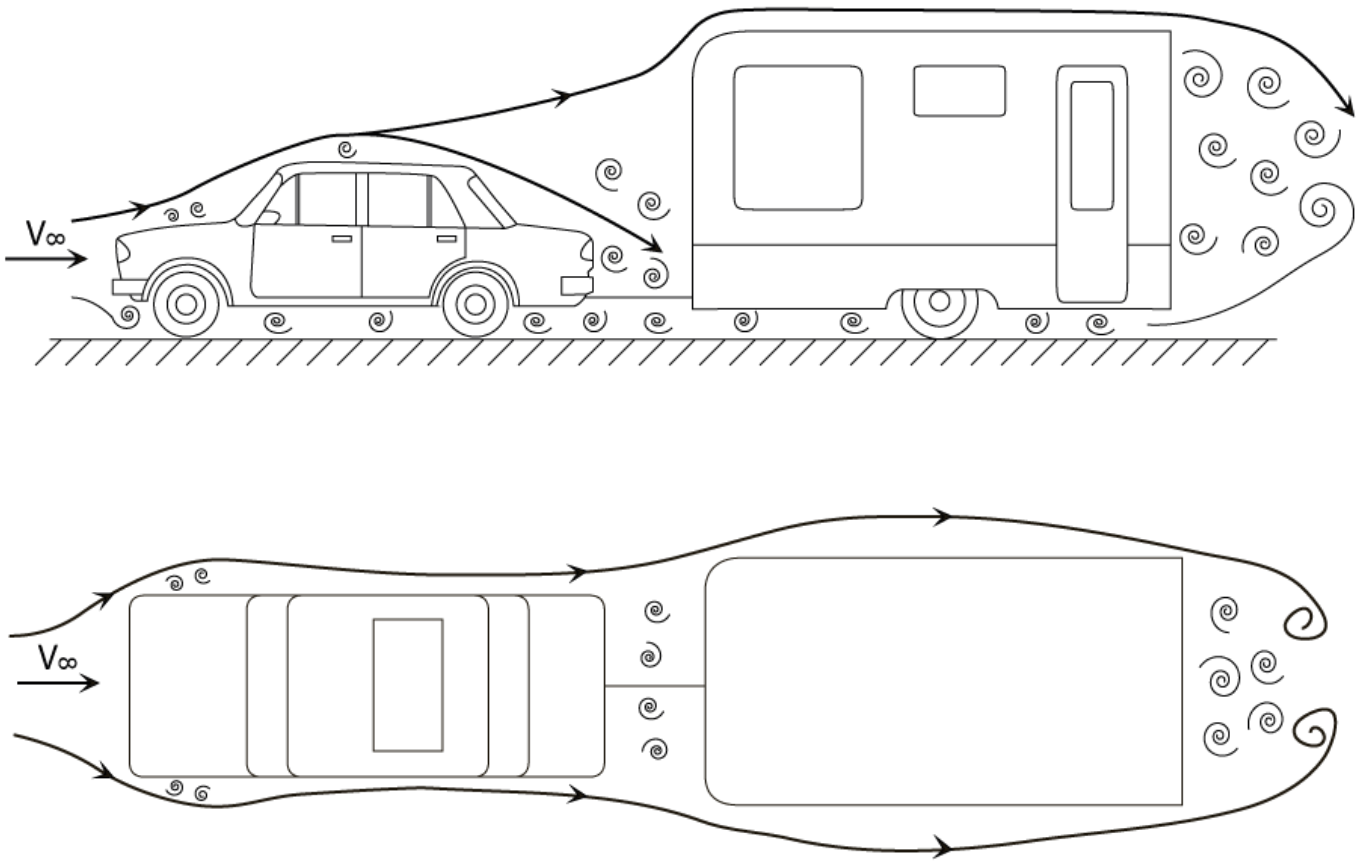


Рис. 2.3, а. Схема обтекания легкового автопоезда с закруглёнными фронтальными кромками высокого прицепа

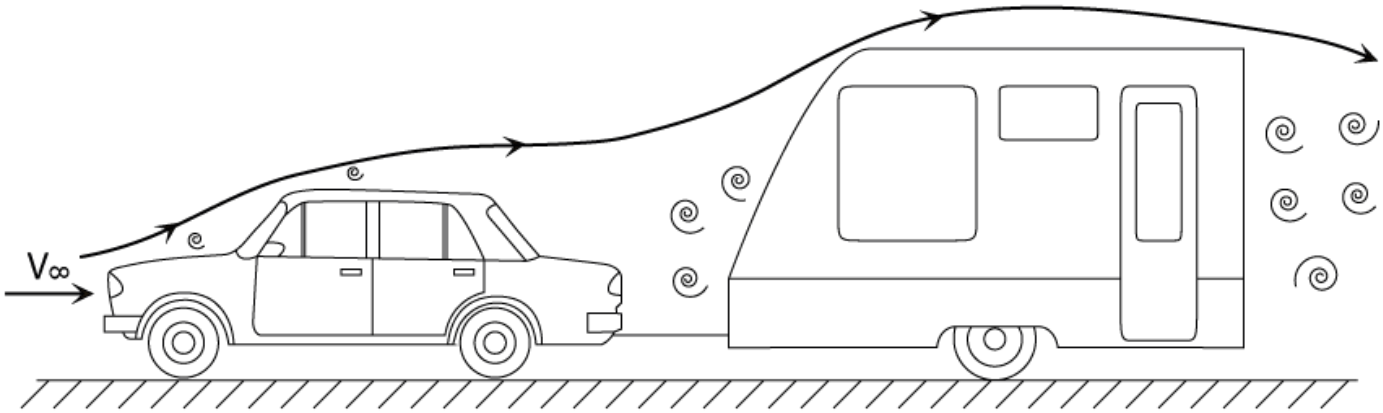


Рис. 2.3, б. Схема обтекания легкового автопоезда с наклоненной передней стенкой высокого прицепа

$$C_{x\beta}=C_{xo}+K_{\beta}*\beta, \qquad (2.2)$$

где: $C_{x\beta}$, C_{xo} – значения коэффициента C_x при косом и оссимметричном натекании потока;

β – угол натекания потока;

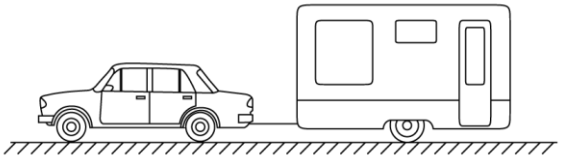
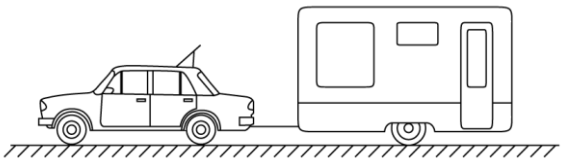
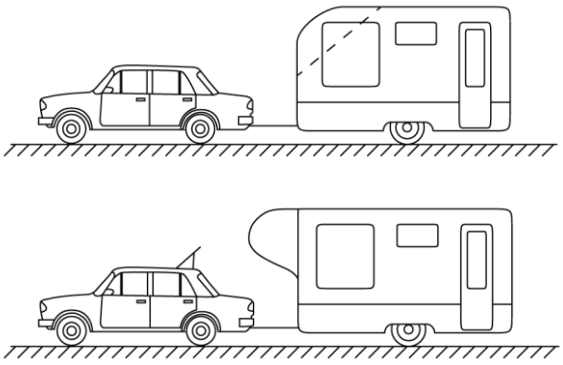
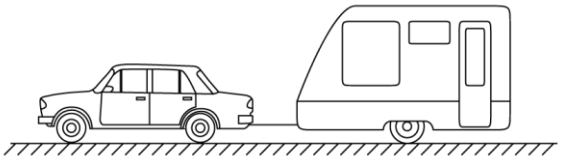
K_{β} – коэффициент бокового обтекания, зависящий от формы кузова высокого прицепа. Чем меньше величина коэффициента K_{β}, тем лучше боковое обтекание легкового автопоезда с высоким прицепом.

В табл. 2.1 приведена предлагаемая классификация легковых автопоездов по уровню обтекаемости, а также значения параметров C_{xo} и K_{β}, что позволяет рассчитать величину $C_{x\beta}$ при различном угле натекания бокового ветра.

Из рассмотрения табл. 2.1 видно, что умеренно обтекаемый легковой автопоезд, у которого на крыше автомобиля-тягача установлен щитовой лобовой обтекатель, имеет меньшие значения коэффициента аэродинамического сопротивления Схо при осесиметричном натекании воздушного потока и коэффициента K_{β} бокового обтекания, чем автопоезд с серийным прямоугольным прицепом. Ещё большее снижение значений коэффициентов C_{xo} и K_{β} наблюдается у хорошо обтекаемого автопоезда, у которого закруглены фронтальные кромки высокого прицепа, наклонена его передняя стенка или на ней установлен объемный лобовой обтекатель. При этом следует отметить, что учитывая большую парусность высокого прицепа, создающую опасность при движении легкового автопоезда по длинным мостам или на открытых участках шоссе с сильным боковым ветром, устойчивость автопоезда повышается при наличии прицепа с наклонённой передней стенкой. Наименьшие значения коэффициентов C_{xo} и K_{β} имеет легковой автопоезд с обтекаемым высоким прицепом, т.е. при воздействии бокового ветра он более эффективен, чем закругление фронтальных кромок и применение лобовых обтекателей, на автомобиле-тягаче и высоком прицепе.

Таблица 2.1.

Влияние конфигурации легкового автопоезда на показатели его обтекаемости при воздействии бокового ветра

Уровень обтекаемости легкового автопоезда	Конфигурация легкового автопоезда	Значение коэффициента C_{xo}	Значение коэффициента K_β
Плохо обтекаемый		0,70÷0,75	0,008
Умеренно обтекаемый		0,55÷0,60	0,007
Хорошо обтекаемый		0,40÷0,45	0,006
Обтекаемый		0,35÷0,40	0,004

2.3. Разработка мероприятий по улучшению обтекаемости легкового автопоезда с высоким прицепом

Анализ механизма обтекания легкового автопоезда с высоким прицепом показывает, что для его улучшения необходима разработка мероприятий, устраняющих влияние отмеченных выше отрицательных факторов. Эта задача может решаться двумя способами: разработкой на стадии проектирования новых высоких прицепов обтекаемой формы и тюнингом выпускаемых прицепов в направлении улучшения их обтекаемости.

В разделе 2.2 были показаны возможности снижения аэродинамического сопротивления легкового автопоезда путем отработки формы высокого прицепа, что позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда вдвое. Однако такой путь решения задачи улучшения обтекаемости высокого прицепа и снижения аэродинамического сопротивления легкового автопоезда требует больших капиталовложений для организации производства новых прицепов. В этой связи нами разработаны мероприятия, позволяющие путем соответствующей модернизации с меньшими затратами, существенно улучшить обтекаемость высоких прицепов, в том числе серийно выпускаемых.

На рис. 2.4 представлена схема модели легкового автопоезда с предлагаемыми конструктивными мероприятиями по улучшению обтекаемости высокого прицепа. Они включают следующие элементы: закругление фронтальных кромок прицепа, наклон его передней стенки, установку лобовых обтекателей на крыше автомобиля-тягача и на передней стенке прицепа. Как показали проведенные нами визуализационные испытания, эти конструктивные мероприятия позволяют значительно улучшить обтекаемость высокого прямоугольного прицепа. Подтверждением этого являются приведенные в разделе 3.1 результаты весовых испытаний модели легкового автопоезда с этими мероприятиями в аэродинамической трубе.

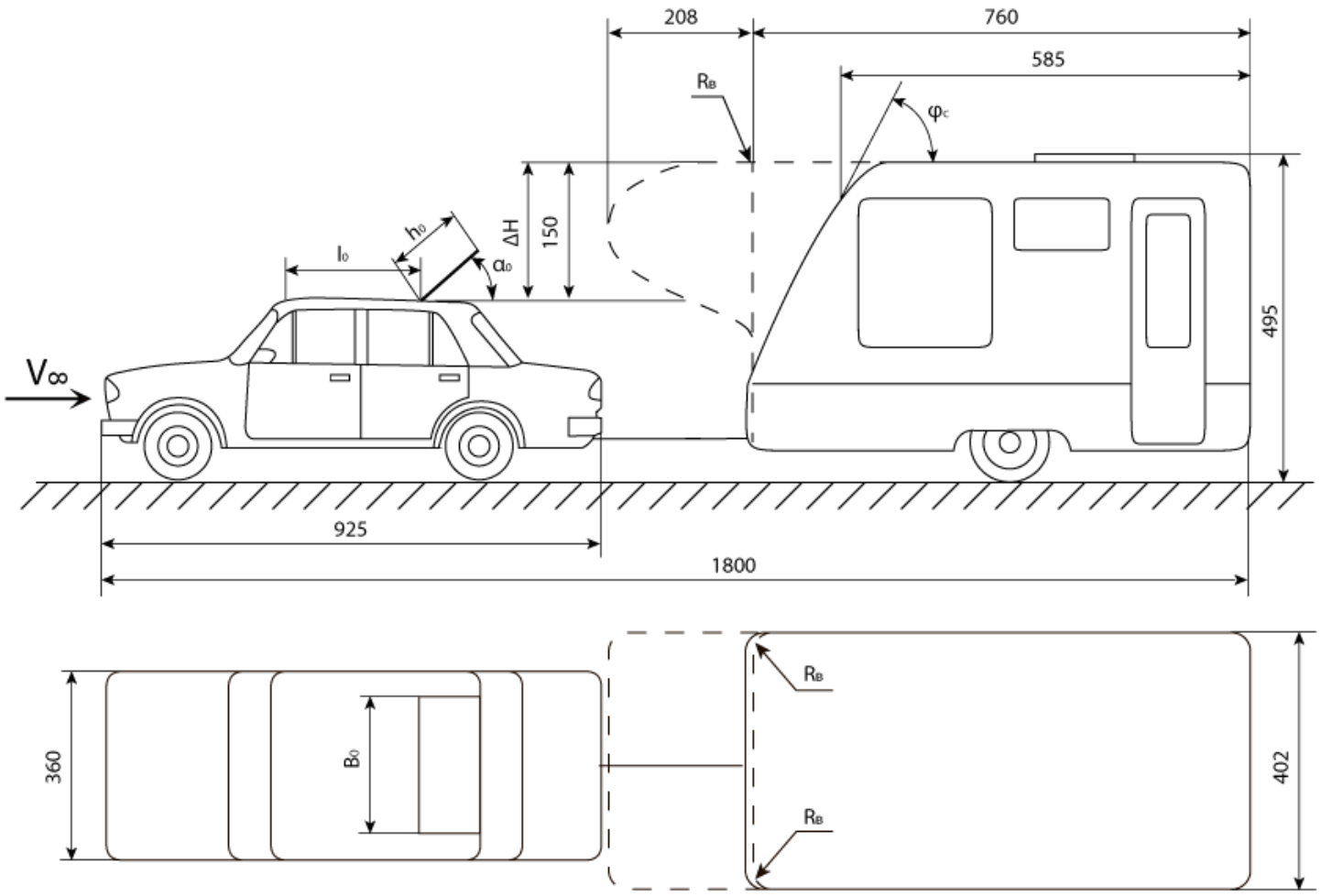


Рис. 2.4. Масштабная модель легкового автопоезда с высоким прицепом с основными геометрическими параметрами и изменениями его конфигурации

Если при этом происходит повторное прилегание потока, то образуется так называемые обратные (циркулирующие) воздушные потоки. Такие вихревые течения возникают за фронтальными кромками кузова прицепа, за передним бампером автомобиля, за его наружными зеркалами заднего вида. Повышенное давление наблюдается на ветровом стекле автомобиля. За отрывными течениями возникают зоны пониженного давления, что наблюдается при обтекании острых фронтальных кромок высокого прицепа.

Сложным является характер обтекания подднищевой зоны и кормовой части автомобиля и прицепа. Наличие на днище выступающих конструктивных элементов ходовой части и трансмиссии приводит к торможению протекающего под автомобилем воздушного потока и большим гидравлическим потерям. Из-за образования на его днище и днище прицепа пограничного слоя, под ними возникает дополнительное торможение воздушного потока. Из-за влияния этих факторов возрастает давление на их днища и увеличивается действующая на автомобиль и прицеп подъемная сила.

Кроме повышенного аэродинамического сопротивления форма и расположение прицепа относительно автомобиля создают предпосылки для возникновения действующей на них значительной подъемной силы. Из-за воздействия подъемной силы уменьшаются вертикальные нагрузки на колеса автомобиля тягача и прицепа, их сцепные качества с дорогой ухудшаются, что отрицательно сказывается на управляемости и устойчивости автомобиля легкового автопоезда. Это снижает безопасность движения, особенно при возникновении бокового ветра, поскольку возможна потеря управляемости легковым автопоездом и нарушение рядности движения в потоке двигающегося автомобильного транспорта.

Рассмотренные выше факторы ухудшают обтекаемость высокого прицепа и легкового автопоезда в целом. В результате этого значительно возрастает аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда с высоким прицепом, что увеличивает его расход топлива и уменьшает максимальную скорость.

Проведенная визуализация характера обтекания легкового автопоезда дает возможность рассмотреть особенности взаимодействия с воздушной средой легкового автопоезда с предлагаемыми конструктивными мероприятиями по улучшению обтекаемости высокого прицепа. Одним из эффективных мероприятий, улучшающих обтекаемость высокого прицепа является закругление его фронтальных кромок. На рис. 2.3, а была приведена схема обтекания легкового автопоезда, прицеп которого имеет закругленные фронтальные кромки. Видно, что закругление фронтальных кромок большим радиусом позволяет практически устранить отрывные течения за ними. В результате существенно улучшается обтекаемость передней части прицепа, что обеспечивает значительное уменьшение аэродинамического сопротивления автопоезда и снижает его загрязняемость.

Другим мероприятием, улучшающим обтекаемость высокого прицепа, является наклон его передней стенки при одновременном закруглении верхней фронтальной кромки. На рис. 2.3, б была показана схема обтекания легкового автопоезда с высоким прицепом, имеющим наклоненную переднюю стенку. При такой форме прицепа уменьшается давление натекающего воздушного потока на его переднюю стенку, а также практически устраняются вихревые течения за верхней фронтальной кромкой. За счет этого снижаются аэродинамическое сопротивление и действующая на прицеп подъемная сила.

Заметное улучшение обтекаемости высокого прицепа достигается путем установки навесных аэродинамических элементов на нем и автомобиле-тягаче. На рис. 2.5, 2.6 показан характер обтекания высокого прицепа при установке лобовых обтекателей на крыше автомобиля-тягача и передней стенке прицепа. Видно, что, обтекатель, установленный на автомобиле направляет воздушный поток непосредственно на крышу прицепа. При этом уменьшается давление встречного воздуха на переднюю стенку прицепа. Лобовой обтекатель, установленный на передней стенке прицепа, заметно улучшает

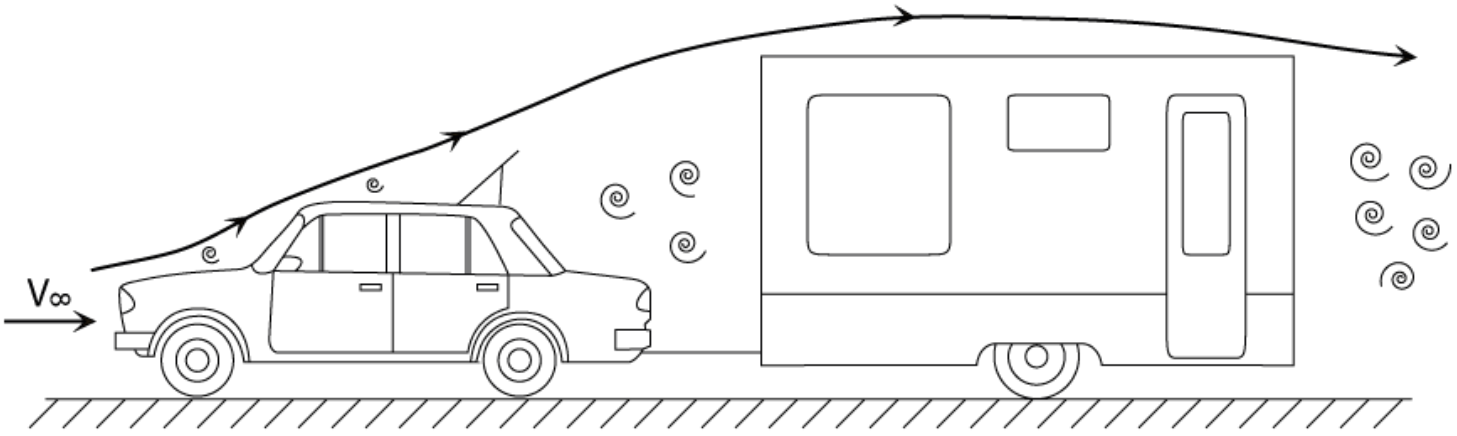


Рис. 2.5. Схема обтекания легкового автопоезда с обтекателем на автомобиле-тягаче

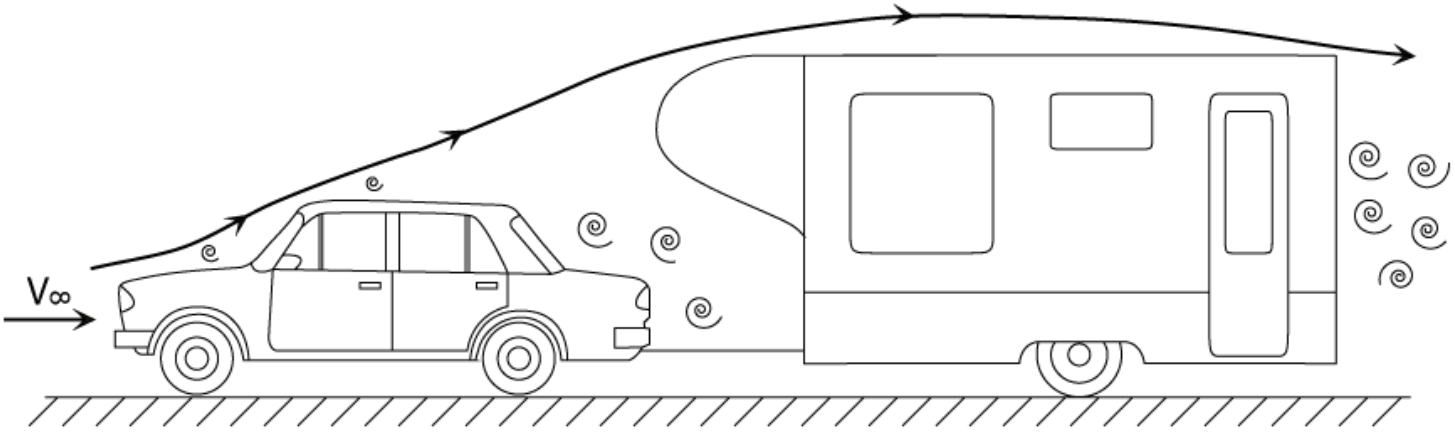


Рис. 2.6. Схема обтекания легкового автопоезда с лобовым обтекателем на высоком прицепе

обтекаемость ее верхней части, что практически исключает отрицательное влияние превышения прицепа над автомобилем-тягачом.

Представляет научный интерес расчетное определение и выбор оптимальных значений радиуса закругления фронтальных кромок прицепа, угла наклона его передней стенки, установочных параметров лобовых обтекателей на автомобиле-тягаче и прицепе для максимального снижения аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с высоким прицепом.

Здесь следует отметить, что сложный характер обтекания легкового автопоезда с высоким прицепом, подробно рассмотренный в разделе 2.1, не даёт возможности решить указанные выше задачи чисто расчётным методом. Это объясняется тем, что при натекании воздушного потока на автопоезд возникают многочисленные отрывные течение и вихреобразования.

Так обтекание верхней части кузова автомобиля-тягача сопровождается отрывными течениями, которые возникают за передними верхней и боковыми кромками. За автомобилем-тягачом и в пространстве между ним и высоким прицепом формируются отрывные течения.

Передняя стенка высокого прицепа находится под давлением встречного воздушного потока, в то время как на задней стенке прицепа наблюдается отрицательное давление. Образующееся на задней стенке высокого прицепа разряжение является причиной возникновения за ним длинного спутного вихревого следа.

За фронтальными кромками прицепа образуются значительные отрывные течения, которые оказывают заметное влияние на характер обтекания всего легкового автопоезда.

Такое сложное обтекание легкового автопоезда не позволяет решить сформулированные выше задачи чисто теоретическим путём. Поэтому в данной работе был использован расчётно-экспериментальный метод, в основе которого лежит анализ результатов, проведенных в аэродинамической трубе исследований масштабной модели легкового автопоезда с последующим их математическим описанием и получением соответствующих полуэмпирических расчётных зависимостей.

2.4. Зависимость аэродинамического сопротивления легкового автопоезда от радиуса закругления фронтальных кромок прицепа

Одним из конструктивных мероприятий, улучшающих обтекаемость легкового автопоезда является закругление фронтальных кромок прицепа. На рис. 2.3,а была приведена схема обтекания легкового автопоезда, прицеп которого имеет закругленные фронтальные кромки. Видно, что закругление фронтальных кромок большим радиусом позволяет практически устранить отрывные течения за ним. Это объясняется тем, что образующийся на поверхности фронтальных кромок пограничный слой практически не отрывается от них, а обтекающий их воздушный поток плавно перетекает на боковые стенки и крышу прицепа. В результате значительно улучшается обтекаемость передней части прицепа, что обеспечивает значительное уменьшение аэродинамического сопротивления автопоезда и снижает его расход топлива.

Для изучения механизма взаимодействия фронтальной кромки с натекающим на неё воздушным потоком были проведены специальные исследования, в ходе которых моделировалось обтекание параллелепипеда с удлинением, равным 3. Исследования включали дренажные и весовые испытания при числе $Re = 2 \cdot 10^6$. На рис. 2.7 показана схема обтекания фронтальной кромки параллелепипеда. Основанием для её построения послужили результаты проведённых в аэродинамической трубе Института Механики МГУ исследований распределения давлений на фронтальной кромке при закруглении её с различным радиусом. При натекании на переднюю стенку параллелепипеда с острыми незакруглёнными кромками происходит торможение потока и сразу же наблюдается отрыв пограничного слоя с возникновением струйных и отрывных течений. По мере увеличения радиуса закругления фронтальных кромок параллелепипеда число Re в этой зоне при натекании воздушного потока возрастает и на закруглённых кромках образуется энергоёмкий пограничный слой, который стремится удержаться на них.

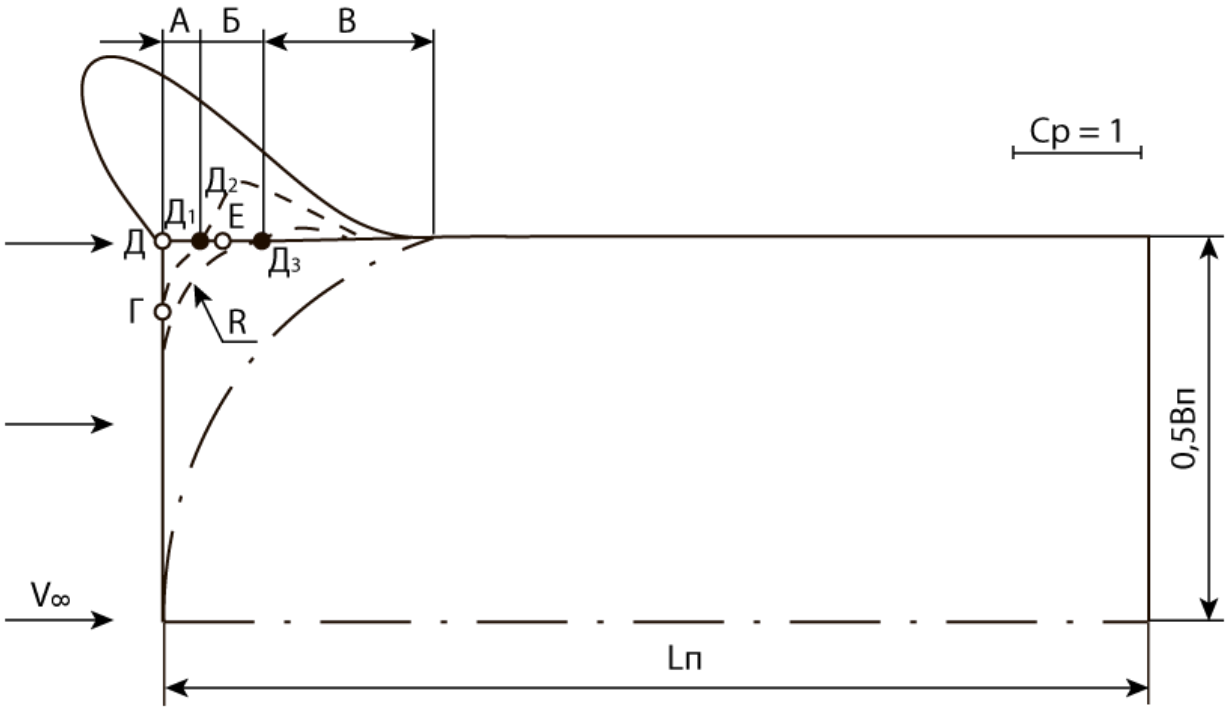


Рис. 2.7. Схема обтекания фронтальной кромки параллелепипеда при различном радиусе ее закругления, $Re = 2 \cdot 10^6$

Как известно, особенностью пограничного слоя, возникающего на перемещающемся в воздушном потоке теле, является наличие сил трения между частицами воздуха, в то время как основной обтекающий поток принято считать невязким. При натекании потока на параллелепипед, воздушная частица, находящаяся в образующемся пограничном слое, должна переместиться через его фронтальную кромку – с его лобовой части на боковую поверхность. При этом в процессе движения частицы по периметру фронтальной кромки её энергия давления вначале – на участке Г-Д переходит в кинетическую энергию, а затем, после перемещения на участке Д-Е, за счёт накопленной кинетической энергии в т. Е, снова стремится перейти в энергию давления.

Если частички воздуха основного потока, где практически нет сил вязкости, могут обтекать даже острую фронтальную кромку, то частичкам в пограничном слое – из-за влияния сил трения, энергии не хватает, они начинают тормозиться, а затем двигаться в зону пониженного давления – за острой кромкой. В результате происходит отрыв пограничного слоя от фронтальной кромки параллелепипеда, увеличение спутной струи за ним и повышение аэродинамического сопротивления.

Закругление фронтальной кромки позволяет устранить отрыв пограничного слоя. При движении частиц пограничного слоя по закруглённой фронтальной кромке торможение их уменьшается и возникают предпосылки для уменьшения степени отрыва пограничного слоя за счёт переформирования его из-за ламинарного в турбулентный, а при большом радиусе закругления возможно достижение безотрывного обтекания фронтальной кромки. По мере увеличения радиуса закругления фронтальной кромки, степень отрыва потока уменьшается, а линия отрыва смещается назад - по потоку. Если при острой кромке линия отрыва пограничного слоя проходит через т. Д, то по мере увеличения радиуса закругления она перемещается в т.т. $Д_1$, $Д_2$, $Д_3$.

На рис. 2.8 представлена зависимость снижения коэффициента C_x параллелепипеда от относительного радиуса закругления верхней

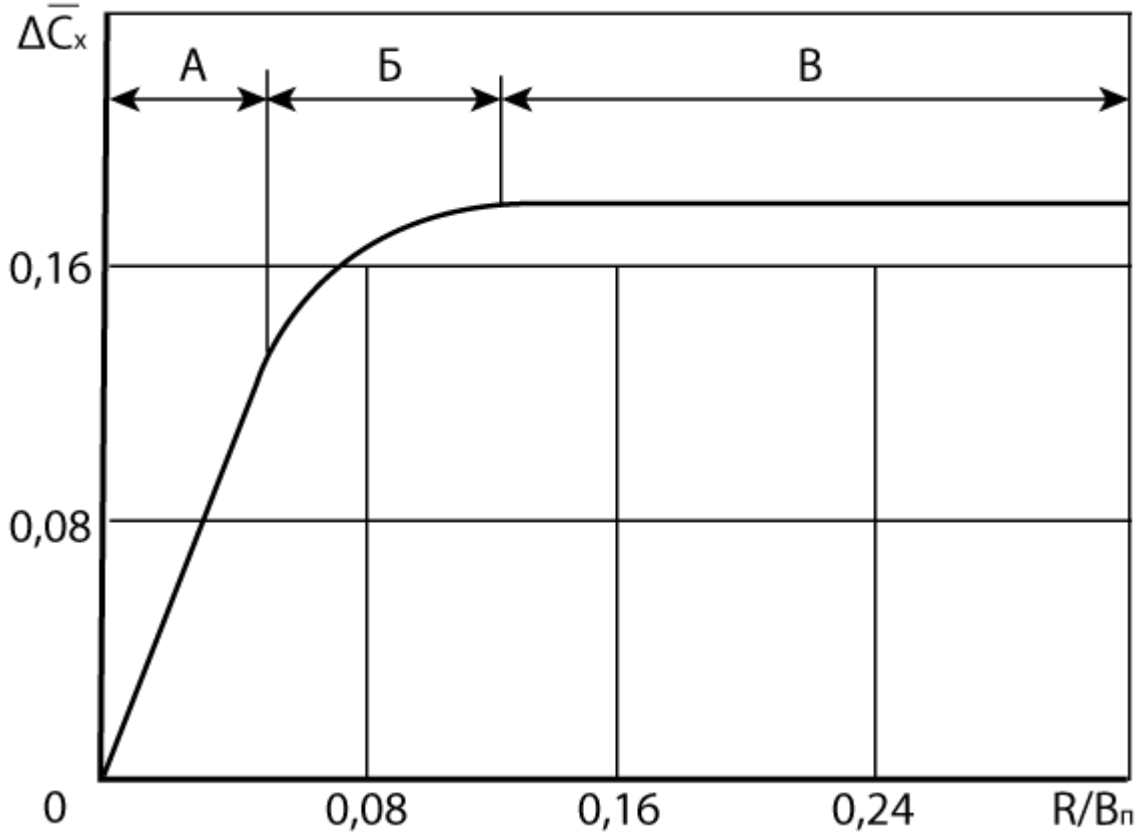


Рис. 2.8. Зависимость снижения коэффициента аэродинамического сопротивления параллелепипеда C_x от относительного радиуса закругления его верхней фронтальной кромки, $B_п$ – ширина параллелепипеда

фронтальной кромки, полученная путём обработки результатов экспериментальных исследований его в аэродинамической трубе. Обращает внимание наличие трёх характерных зон изменения функции $\Delta C_x = f\,(R / B_a)$. Зона А – это интенсивное линейное снижение коэффициента Cx параллелепипеда в диапазоне изменения аргумента: $0 < (R / B_a) < 0{,}005$. В этой зоне происходит переформирование пограничного слоя на фронтальной кромке из ламинарного в турбулентный, который за счёт градиента давлений держится на ней плотнее. При этом резко уменьшаются пики отрывных течений и сопровождающие их энергозатраты. В зоне В с диапазоном изменения аргумента $0{,}05 \le (R / B_a) \le 0{,}12$ завершается переформирование ламинарного пограничного слоя на фронтальной кромке в турбулентный. Достигаемое в этой зоне снижение коэффициента C_x меньше, чем в зоне А, но достаточно заметное. В конце зоны Б создаются предпосылки к безотрывному обтеканию фронтальной кромки, о чём свидетельствует незначительное, примерно на пять порядков меньше, чем в зоне А, приращение коэффициента C_x модели, обеспечиваемое при дальнейшем увеличении радиуса закругления в зоне В с диапазоном изменения аргумента $0{,}12 < (R / B_a) < 0{,}50$.

Опираясь на проведенные физические исследования, нами разработана методика определения зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления легкового автопоезда от радиуса закругления фронтальных кромок прицепа путем аппроксимации результатов испытаний модели легкового автопоезда в аэродинамической трубе, которые представлены на рис. 2.9. Полученные экспериментальные данные были обработаны и представлены в виде зависимостей относительного снижения коэффициента аэродинамического сопротивления $\Delta C_x^{м}$ модели автопоезда от относительного радиуса закругления фронтальных кромок прицепа ($R_З/B_{пр}$).

Такой методический подход позволяет использовать полученные математические зависимости, связывающие коэффициент аэродинамического сопротивления с радиусом закругления фронтальных кромок, для легковых автопоездов различных типоразмеров.

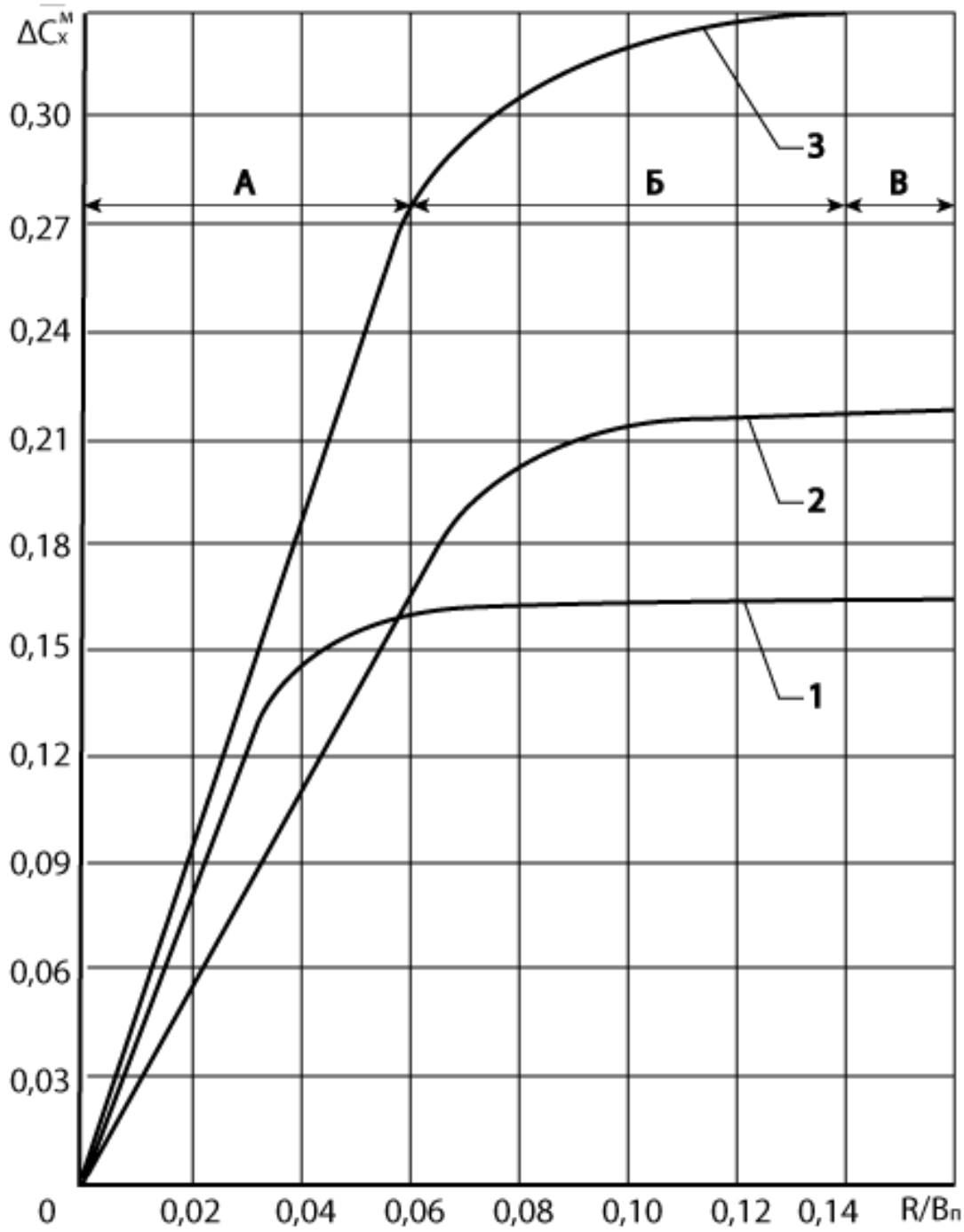


Рис. 2.9. Зависимость снижения коэффициента C_x легкового автопоезда с высоким прицепом от величины радиуса закругления его фронтальных кромок: 1 – закруглены только боковые кромки; 2 – закруглена только верхняя кромка; 3 – закруглены одновременно боковые и верхняя кромки

Здесь:

$$\Delta C_x^м=(C_x^м{}_п - C_x^м{}_з)/ C_x^м{}_п \qquad (2.3)$$

где $C_x^м{}_п$, $C_x^м{}_з$ – значения коэффициента $C_x^м$ модели автопоезда, прицеп которого имеет прямоугольные и закруглённые фронтальные кромки соответственно;

$R_З$ – радиус закругления фронтальных кромок прицепа;

$B_{пр}$ – ширина прицепа.

Для графических зависимостей на рис. 2.9 характерны три зоны: линейная зона А, где наблюдается интенсивное снижение $\Delta C_x^м$; дроболинейная зона Б с умеренным снижением $\Delta C_x^м$; линейная зона В, в которой снижением $\Delta C_x^м$ незначительно. Такой характер кривых позволил математически описать характер протекания зависимостей $\Delta C_x^м = f(R_З/B_{пр})$ путем аппроксимации экспериментальных кривых в каждой из трех зон. В табл. 2.2 приведены полученные по такой методике расчетные формулы для определения степени снижения коэффициента аэродинамического сопротивления легкового автопоезда по мере закругления фронтальных кромок высокого прицепа.

Проведенные исследования показали возможность значительного улучшения обтекаемости и снижения аэродинамического сопротивления легкового автопоезда путем закругления фронтальных кромок высокого прицепа. Установлено, что закругление фронтальных кромок радиусом 200-250 мм позволяет снизить аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда на 30-35%.

Закругление задних кромок высокого прицепа мало влияет на аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда. Снижение коэффициента аэродинамического сопротивления C_x легкового автопоезда с высоким прямоугольным прицепом за счет закругления его задних кромок не превышает 5%. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании перспективных прицепов, чтобы не уменьшать полезный объем их кузовов.

Таблица 2.2.

Зависимости для расчетного определения снижения аэродинамического сопротивления закругления фронтальных кромок высокого прицеп

Объект расчетных исследований	Исследуемый параметр		Зона и диапазон изменения Исследуемого параметра		Расчетные формулы для определения величины снижения коэффициента аэродинамического сопротивления легкового автопоезда
	Наименование	Обозначение	Зона	Диапазон	
Легковой автопоезд с высоким прицепом	Относительный радиус закругления верхней фронтальной кромки прицепа	$R_{зв}/B_{пр}$	А	0÷0,06	$\Delta C_{хв} = 2{,}86(\frac{R_{зв}}{B_{пр}})$
			Б	0,06÷0,10	$\Delta C_{хв} = 0{,}155 + \sqrt{0{,}003 - (\frac{R_{зв}}{B_{пр}} - 0{,}1)^2}$
			В	0,10÷0,50	$\Delta C_{хв} = 0{,}207 + 0{,}083(\frac{R_{зв}}{B_{пр}})$
	Относительный радиус закругления боковых фронтальных кромок прицепа	$R_{зб}/B_{пр}$	А	0÷0,03	$\Delta C_{хб} = 4.55(\frac{R_{зб}}{B_{пр}})$
			Б	0,03÷0,055	$\Delta C_{хб} = 0{,}125 + \sqrt{0{,}001 - (\frac{R_{зб}}{B_{пр}} - 0{,}06)^2}$
			В	0,055÷0,50	$\Delta C_{хб} = 0{,}157 + 0{,}0263(\frac{R_{зб}}{B_{пр}})$
	Относительный радиус одновременного закругления верхней и боковых фронтальных кромок прицепа	$R_{зв,б}/B_{пр}$	А	0÷0,06	$\Delta C_{хв,б} = 4{,}77(\frac{R_{зв,б}}{B_{пр}})$
			Б	0,06÷0,14	$\Delta C_{хв,б} = 0{,}241 + \sqrt{0{,}009 - (\frac{R_{зв,б}}{B_{пр}} - 0{,}14)^2}$
			В	0,14÷0,50	$\Delta C_{хв,б} = 0{,}336 + 0{,}015(\frac{R_{зв,б}}{B_{пр}})$

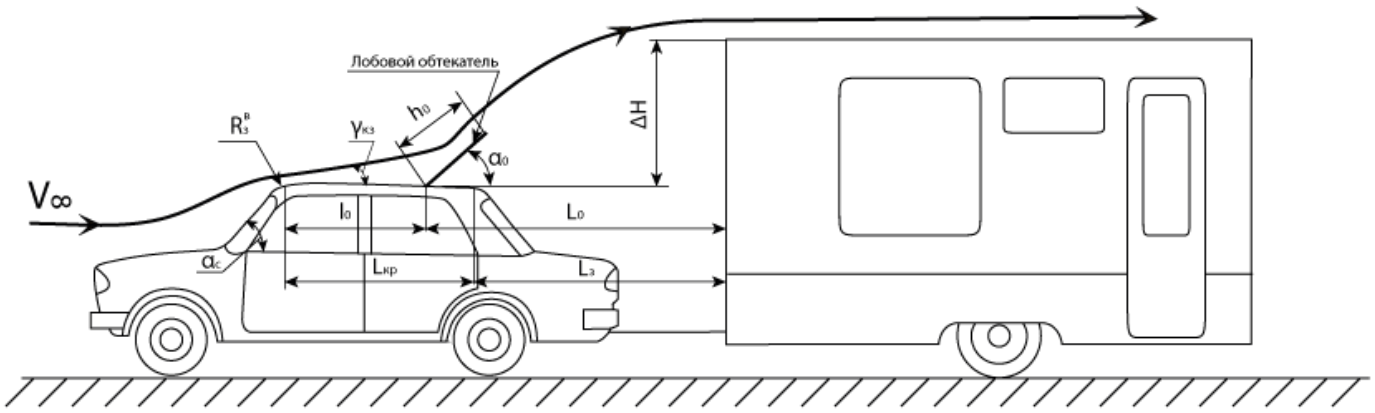
2.5. Метод расчета установочных параметров лобового обтекателя на автомобиле-тягаче легкового автопоезда

Одним из способов улучшения обтекаемости высокого прицепа легкового автопоезда является применение лобового обтекателя, установка которого на крыше автомобиля-тягача, позволяет направить натекающий воздушный поток непосредственно на крышу прицепа. На рис. 2.5 был показан характер обтекания высокого прицепа легкового автопоезда при установке лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача. Применение лобового обтекателя на крыше позволяет значительно улучшить обтекаемость высокого прицепа. При этом уменьшается давление воздуха на переднюю стенку прицепа и практически устраняются отрывные течения за верхней фронтальной кромкой. В результате уменьшается аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда и действующей на него подъемной аэродинамической силы.

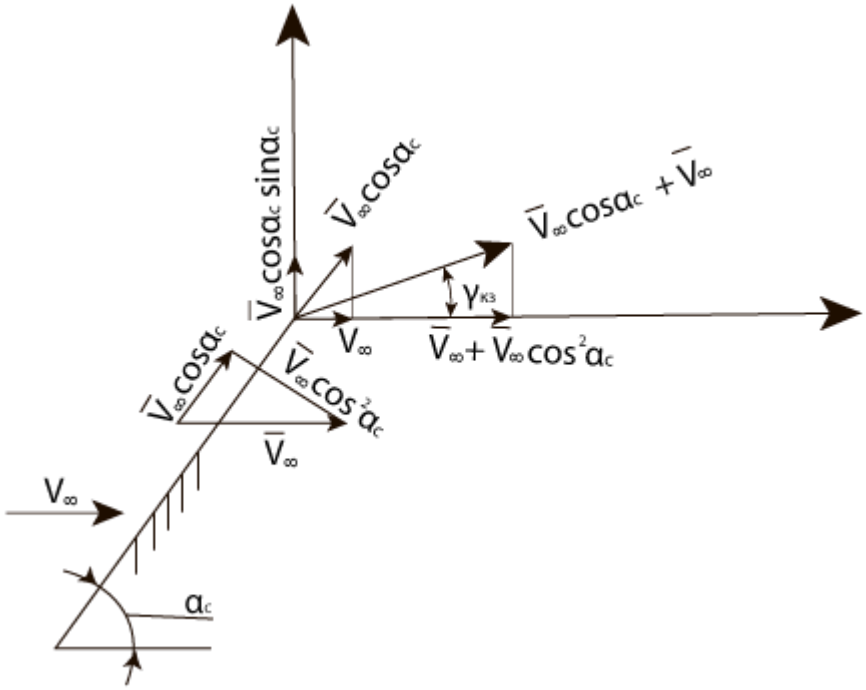
Эффективность лобового обтекателя зависит от того, насколько оптимально выбраны его конструктивные и установочные параметры, что в свою очередь определяется размером и взаимным расположением друг относительно друга автомобиля-тягача и прицепа. Для решения этой задачи предлагается метод расчетного определения оптимальных параметров лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача легкового автопоезда.

На рис. 2.10 представлена расчетная схема установки плоского лобового обтекателя на автомобиле-тягаче легкового автопоезда и векторная диаграмма скоростей обтекающих его воздушных потоков для определения оптимальных параметров обтекателя. Как показали наши исследования плоский лобовой обтекатель обеспечивает значительное снижение аэродинамического сопротивления и подъемной силы легкового автопоезда. Значения коэффициентов аэродинамического сопротивления C_x и подъемной силы C_z легкового автопоезда с серийным высоким прямоугольным прицепом снижаются на 30% и 40% соответственно при установке на крыше автомобиля-тягача плоского лобового обтекателя.

Предлагаемый метод расчета параметров лобового обтекателя позволяет оценить влияние кривизны экрана на его эффективность в сравнении с плоским щитовым обтекателем.



а)



б)

Рис. 2.10. Схема установки лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача (а) и векторная диаграмма обтекающих его воздушных потоков (б): V_∞ – скорость невозмущенного воздушного потока; α_c – угол наклона лобового стекла; $R_З^В$ – радиус закругления верхней кромки кузова; α_0 – угол наклона обтекателя; $L_З$ – расстояние от задней кромки крыши автомобиля до прицепа; $\gamma_{кз}$ – угол наклона воздушного потока, натекающего на обтекатель; h_0 – высота обтекателя; $L_{кр}$ – длина крыши автомобиля; l_0 – расстояние от передней кромки крыши кузова до обтекателя; ΔH – превышение прицепа над автомобилем-тягачом

Основными конструктивными и установочными параметрами, определяющими степень его эффективности в части улучшения обтекаемости головной части автопоезда, являются: форма и кривизна лобовой поверхности, угол наклона обтекателя α_0, его высота h_0 и ширина b_0, расстояние L_0 от начала крыши автомобиля до передней кромки обтекателя. Высота и ширина обтекателя как правило выбираются из конструктивных соображений. Для плоских и выпуклых лобовых обтекателей высота h_0 и b_0 составляет 0,4-0,6м и 1,5-1,8м соответственно. При правильно выбранных форме и кривизне лобовой поверхности определяющей становится оптимальная установка обтекателя относительно высокого кузова. При оптимальной установке обтекатель должен направлять встречный поток воздуха непосредственно на крышу и боковые стенки прицепа, чем практически исключается отрицательное воздействие на обтекаемость его лобовой части превышения прицепа над автомобилем и зазора между ними. Поэтому основными конструктивными параметрами легкового автопоезда, влияющими на рабочие качества обтекателя, являются: превышение прицепа над крышей автомобиля-тягача ΔH и расстояние между ними $L_з$ (см. рис. 210, а)

Для расчетного определения оптимальных установочных параметров лобового обтекателя используется представленная на рис. 2.10, б векторная диаграмма обтекающих автомобиль воздушных потоков. Обтекатель и лобовое стекло автомобиля моделируются плоскими пластинами заданной длины. Для обеспечения возможности теоретического решения поставленной задачи будем считать, что крыша автомобиля-тягача с установленным на ней обтекателем находятся в практически однородном осесимметричном воздушном потоке, натекающим с установившейся скоростью V_∞, составляющей векторную сумму скоростей автопоезда и встречного ветра, если последний имеет место. Однако, условия обтекания лобовой поверхности кузова не одинаковы. Как показывает анализ эпюр распределения

давлений на кузове автомобиля-тягача нижней части лобового стекла панели, перпендикулярной встречному потоку, имеет место полный переход динамического напора в статическое давление, что характеризует отсутствие существенных перетеканий воздуха вдоль этой панели. В связи с этим будет правомерно рассматривать характер обтекания поверхности лобового стекла без учёта влияния крышки капота.

Поверхность лобового стекла находится под воздействием динамического напора встречного воздуха. При исследовании эпюры распределения давления можно установить уменьшение статического давления по поверхности передней наклонной панели кузова и лобового стекла, происходящее по закону близкому к линейному. При этом имеет место течение воздуха по касательной к исследуемой поверхности наклонной панели лобового стекла. Указанную панель также моделируем плоской пластиной, наклонённой под углом α_c к встречному потоку. При движении потока вдоль пластины будет формироваться равная ей по ширине струя воздуха, скорость которой будет нарастать по мере удаления от нижней кромки стекла и у его верхней кромки составит $V_\infty \cos\alpha_c$.

Рассмотрим представленную на векторной диаграмме (рис. 2.10, б) траекторию линии воздушного тока при обтекании верхней части кузова с лобовым обтекателем на его крыше. Будем считать, что струйка воздуха стекает с лобового стекла аналогично тому, как это имеет место для установленной под углом α_c плоской пластины. Примем, что отклонение стекающей с лобового стекла струйки воздуха под воздействием натекающего на кузов, невозмущённого потока происходит без перемешивания и дополнительных энергетических потерь. Тогда, распространяя эти допущения на весь массив воздушного потока по ширине кабины $B_{кб}$, получаем, что линии тока стекающего с лобового стекла потока воздуха имеют направление, определяемое углом $\gamma_{кб}$, величина которого без учёта трения воздуха о воздух определяется посредством решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} x = \int_0^{t_{кр}} (V_\infty cos^2\alpha_c + V_\infty)dt \\ z = \int_0^{t_{кр}} (V_\infty cos\alpha_c sin\alpha_c + gt)dt \end{cases} \quad (2.4)$$

Здесь: x, z – горизонтальная и вертикальная координаты линии воздушного тока, стекающей с лобового стекла;

V_∞ – скорость невозмущённого потока;

α_c – угол наклона лобового стекла кабины;

$t_{кр}$ – координата, характеризующая время достижения двигающейся вверх по лобовому стеклу линии воздушного тока верхней кромки кабины;

g – ускорение свободного падения.

Решая систему уравнений (2.4), получаем :

$$z = \left[\frac{xsin\alpha_c}{2(1+cos^2\alpha_c)}\right] - \frac{0{,}5gx^2}{V_\infty^2(1+cos^2\alpha_c)^2} \quad (2.5)$$

Поскольку по сравнению с первым второе слагаемое существенно меньше, что объясняется наличием в его знаменателе значительного по величине параметра V_∞^2, то этим слагаемым можно пренебречь и записать:

$$z = \frac{xsin\alpha_c}{2(1+cos^2\alpha_c)} \quad (2.6)$$

Тогда, учитывая что $tgy_{кз}$ определяется величиной коэффициента при координате x, поскольку $z/x = tg\gamma_{кз}$, и вводя параметр $(l\text{-}R_b/L_{кр})$, учитывающий степень закругления фронтальной кромки крыши кабины, получаем следующую формулу для определения искомого угла $\gamma_{кб}$, под которым воздушный поток, сойдя с лобового стекла, натекает на обтекатель:

$$\gamma_{кб} = [arctg(\frac{sin\alpha_c}{2(1+cos^2\alpha_c)}](1 - \frac{Rb}{L_{кр}}) \quad (2.7)$$

где: R_b – радиус закругления верхней кромки крыши кабины;

$L_{кр}$ – длина крыши кузова.

Аналитическое исследование взаимодействия экрана обтекателя с потоком приемом, аналогичным описанному выше для лобового стекла, позволяет получить искомую расчетную формулу, связывающую оптимальный, с аэродинамической точки зрения, угол наклона экрана $\alpha_0^{опт}$ с остальными параметрами автопоезда и обтекателя, показанными на рис 2.10, а. При этом критерием оптимизации является условие попадания нижней линии воздушного тока, сходящей с экрана обтекателя, на верхнюю кромку кузова. Аналитическая зависимость, устанавливающая взаимосвязь между установочными параметрами обтекателя, его профилем, местом установки и геометрическими параметрами автопоезда имеет вид:

$$\Delta H = h_0 sin\alpha_0^{опт} + \cos(\alpha_0^{опт} - \gamma_{кб} + \Delta\alpha_0)\, sin(\alpha_0^{опт} + \Delta\alpha_0)A - \frac{g}{2V_\infty^2}A^2, \qquad (2.8)$$

где $\Delta\alpha_0$ - параметр, учитывающий кривизну профиля лобовой поверхности обтекателя.

Адекватность расчетной модели верхнего лобового обтекателя проверялась сопоставлением расчетных и экспериментальных данных. На рис. 2.11 приведены построенные на базе зависимости (2.8), расчетные кривые, соответствующие оптимальному углу $\alpha_0^{опт}$ наклона экрана обтекателя при заданных значениях расстояния $L_0 = L_к + L_з - l_0$ от передней кромки обтекателя до передней стенки прицепа и превышения последнего над автомобилем-тягачом. Там же точками отмечены полученные на основании экспериментальных исследований значения оптимальных углов наклона обтекателей с экранами различной кривизны. Разброс экспериментальных и расчетных данных для экранов различного профиля составляет 3-5%, что свидетельствует об адекватности разработанной расчетной модели оптимизации установочных параметров обтекателя.

Использование предлагаемой методики позволяет расчетным путем определять оптимальные установочные параметры лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача легкового автопоезда.

Параметр А, связывающий размеры автомобиля-тягача и автопоезда с кривизной профиля лобового обтекателя, определяется следующим образом:

$$A = \frac{L_{кр}+L_з-l_0-h_0 cos\propto_0^{опт}}{cos\propto_c \cdot \cos(\propto_0^{опт}-\gamma_{кз}+\Delta\alpha_0)\cdot\cos(\propto_0^{опт}+\Delta\alpha_0)+1}, \quad (2.9)$$

где: $\Delta\alpha_0$ – приращение угла наклона обтекателя, учитывая кривизну профиля его лобовой поверхности;

$\propto_c$ – угол наклона лобового стекла.

Влияние кривизны лобовой поверхности обтекателя учитывается изменением угла его наклона $\Delta\alpha_0$. Величина приращения $\Delta\alpha_0$ определяется следующим образом:

– для плоского щита $\Delta\alpha_0$;

– для сферического и цилиндрического:

$$\Delta\alpha_0 = arctg(\frac{h_0}{\sqrt{4R_0^2-h_0^2}}), \quad (2.10)$$

где: R_0 – радиус сферы или цилиндра;

– для квадратичного параболического профиля:

$$\Delta\alpha_0 = arctg(\frac{h_0}{8^4\sqrt{1+4a^2h_0^2}}), \quad (2.11)$$

где: α – коэффициент квадратичности;

– для эллиптического профиля:

$$\Delta\alpha_0 = arctg(\frac{h_0}{8^4\sqrt{1+4a^2h_0^2}}), \quad (2.12)$$

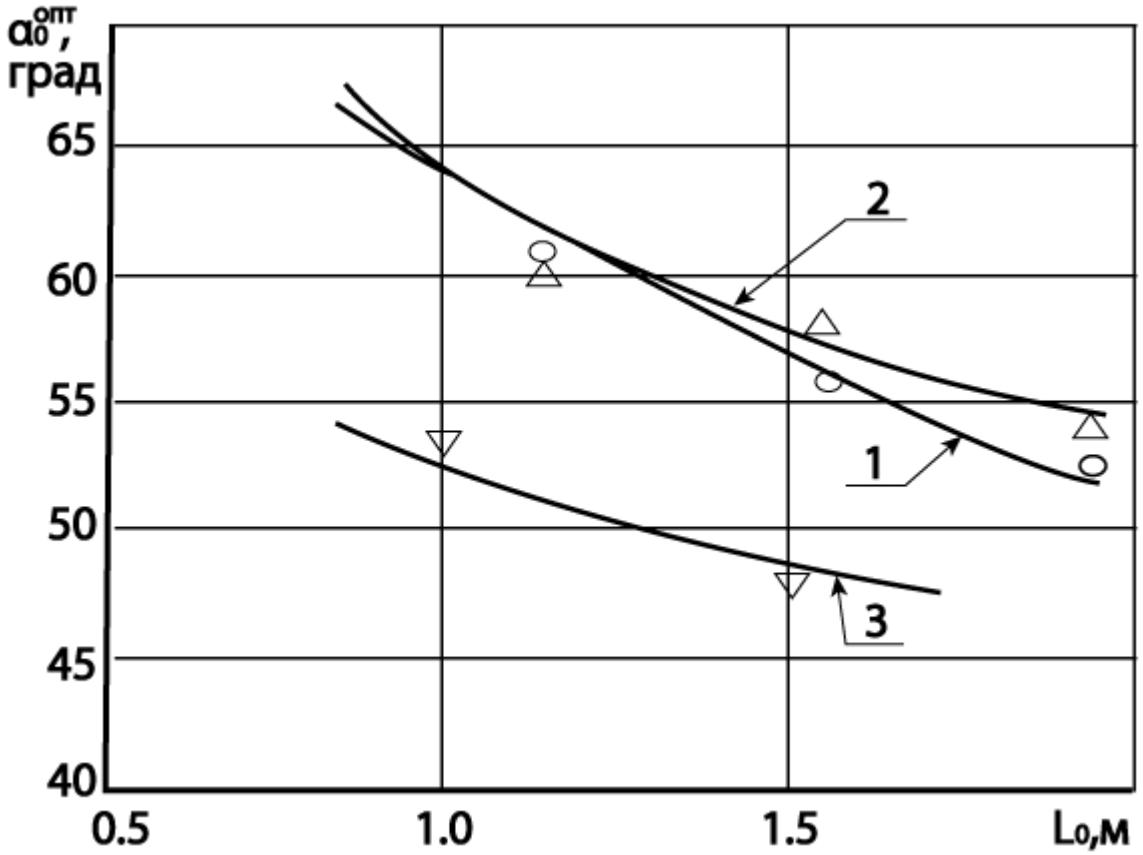


Рис. 2.11. Зависимость оптимального угла наклона обтекателя от расстояния между ним и передней стенкой прицепа: 1 – плоский обтекатель; 2 – сферический обтекатель; 3 – эллиптический обтекатель; линии – расчет, точки – экспериментальные данные

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОПОЕЗДА С ВЫСОКИМ ПРИЦЕПОМ

3.1. Испытания модели легкового автопоезда в аэродинамической трубе

Весовые испытания легкового автопоезда проводились на его масштабной модели в аэродинамической трубе А-6 НИИ Механики МГУ. Модель была изготовлена из дерева и пенополиуретана в масштабе 1:5. Подробное описание модели приведено в разделе 4.3.

В разделе 4.1 дано описание аэродинамической трубы А-6 и методики проведения в ней экспериментальных исследований.

На рис. 2.4 была показана схема масштабной модели легкового автопоезда с основными размерами и менявшимися в процессе аэродинамических испытаний его конфигурациями.

Результаты испытаний модели легкового автопоезда в аэродинамической трубе представлены ниже в виде графических зависимостей.

На рис. 3.1 приведены экспериментальные зависимости коэффициента C_x от угла (3 натекания воздушного потока для всех испытанных в трубе конфигураций легкового автопоезда с высоким прицепом.

В соответствии с результатами испытаний, представленными на рис. 3.1, значения коэффициента C_x модели легкового автопоезда с высоким прицепом различной конфигурации: высоким прямоугольным и прямоугольным с лобовым обтекателем на передней стенке при нулевом угле натекания воздушного потока ($\beta=0°$) составили: 0,63 и 0,43 соответственно, что увеличивает C_x модели автомобиля ГАЗ-24-10 ($C_x=0,37$) на 70% и 15%. Значение коэффициента C_x модели легкового автопоезда с закругленными фронтальными кромками и установленным на автомобиле-тягаче обтекателем при $\beta=0°$ составили: $C_x=0,41$ и 0,445 соответственно.

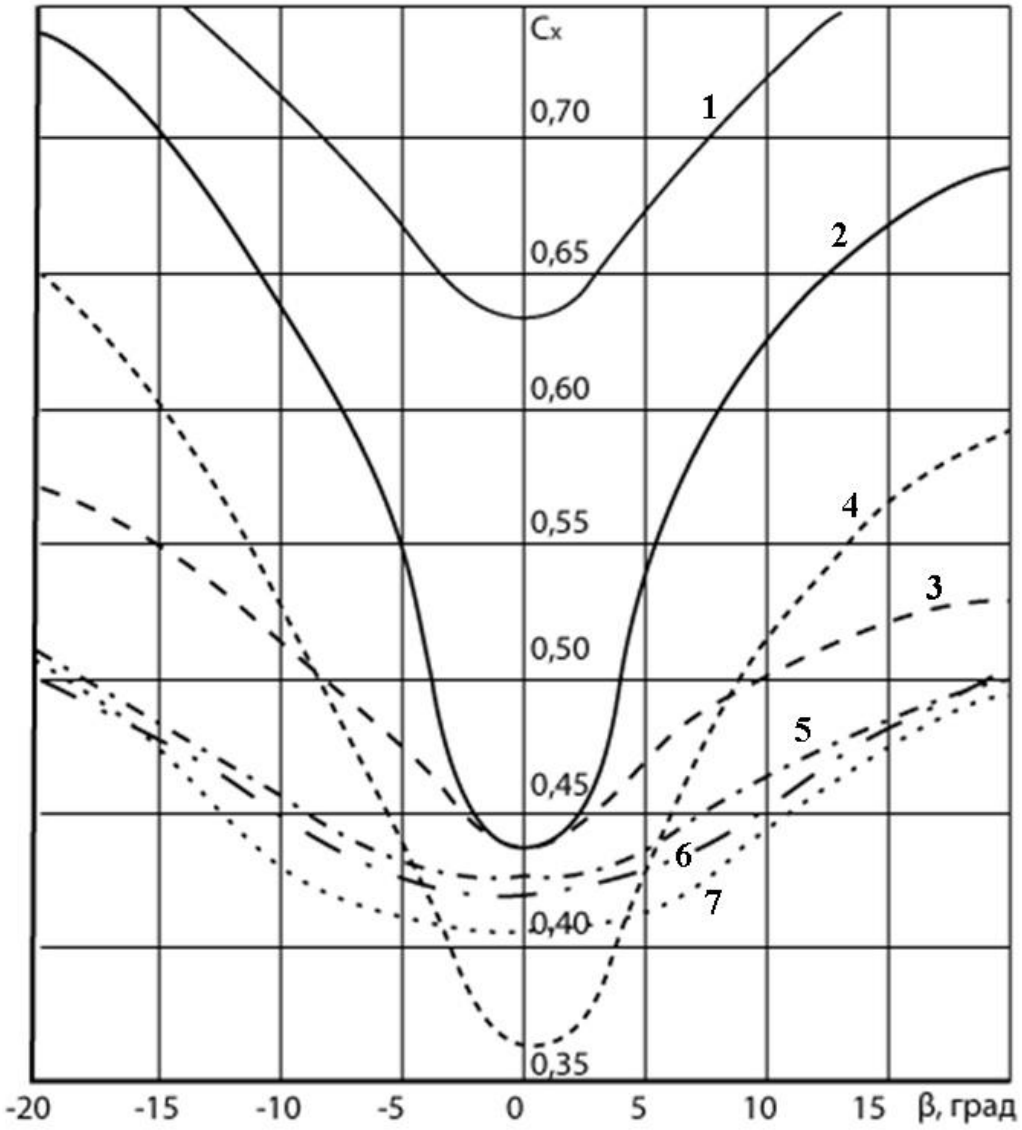


Рис.3.1. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления C_x модели легкового автопоезда различной конфигурации от угла натекания воздушного потока β:

1 – с серийным прямоугольным, прицепом; 2 – с лобовым обтекателем на тягаче по вар. 1; 3 – по вар. 1 с обтекателем на передней стенке прицепа; 4 – по вар. 3 с обтекателем на тягаче ($\propto_0 = 50^o$, l_0 — 0,25 м); 5 – исходный с наклоненной передней стенкой; 6 – по вар. 5 с обтекателем, на тягаче ($\propto_0 = 50^o$, $l_0 = 0{,}25$ м); 7 – по вар. 1 со скругленными передними кромками кузова (R=40 мм)

Таким образом, установка лобового обтекателя на прямоугольном прицепе снижает величину коэффициента C_x автопоезда на 30%. Автопоезд с высоким прицепом с наклоненной передней стенкой имеет на 32% меньший коэффициент C_x, чем с прямоугольным прицепом (см. рис. 3.1)

При угле натекания воздушного потока $\beta=9°$, соответствующего среднестатистическим значениям боковых ветров, воздействующих на автотранспортные средства, двигающихся по европейской части СНГ, небольшое аэродинамическое сопротивление легкого автопоезда обеспечивают: прямоугольный прицеп с обтекателем на передней стенке ($C_x=0,50$) и серийный с наклоненной передней стенкой ($C_x=0,46$). Наименьшее значение коэффициента C_x при воздействии бокового ветра под углом 9° имеет автопоезд с высоким прицепом и обтекателем на автомобиле-тягаче ($C_x=0,44$) и с прямоугольным прицепом, имеющим закругленные радиусом R=40mm передние верхнюю и боковые кромки ($C_x=0,43$).

При этом по сравнению с прямоугольным прицепом достигается снижение аэродинамического сопротивления автопоезда с указанными выше модификациями прицепов на: 30%, 36%, 39%, и 40% соответственно.

Для определения конструктивных и установочных параметров обтекателя на автомобиле-тягаче были проведены соответствующие параметрические исследования, результаты которых представлены ниже. В ходе испытаний модели плоского щитового обтекателя шириной 270мм варьировались три параметра: высота h_0, угол наклона a_0 и расстояние l_0 от обтекателя до передней кромки крыши автомобиля-тягача (см. рис. 2.4).

На рис. 3.2 показаны зависимости коэффициента C_x модели легкового автопоезда от высоты и угла наклона α_0 лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача. Видно, что оптимальными для данного легкового автопоезда являются следующие параметры лобового обтекателя: высота $h_0=80$мм (400мм для натурного автопоезда) и угол наклона его относительно крыши автомобиля-тягача $\alpha_0=50°$.

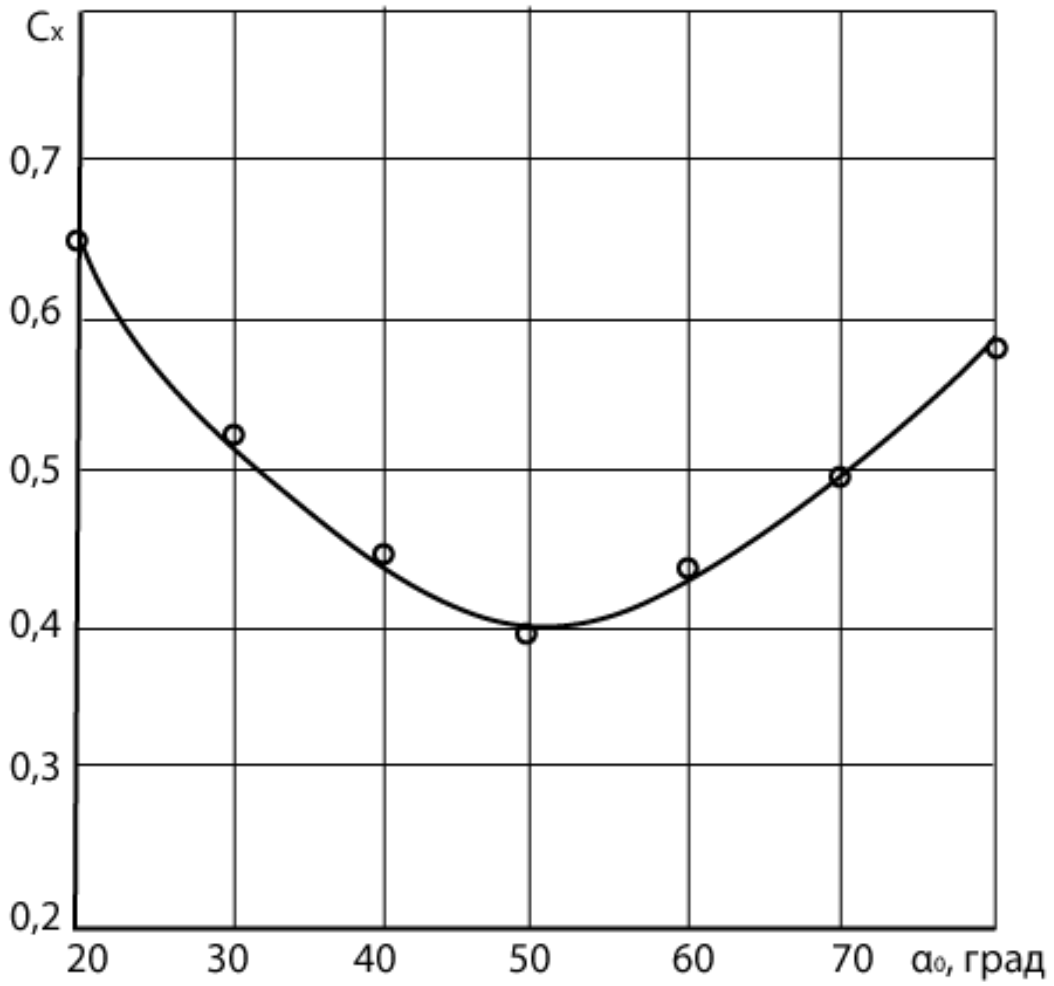


Рис. 3.2, а. Зависимость коэффициента C_x модели легкового автопоезда от угла наклона лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача; h_0 = 80 мм; l_0 = 250 мм

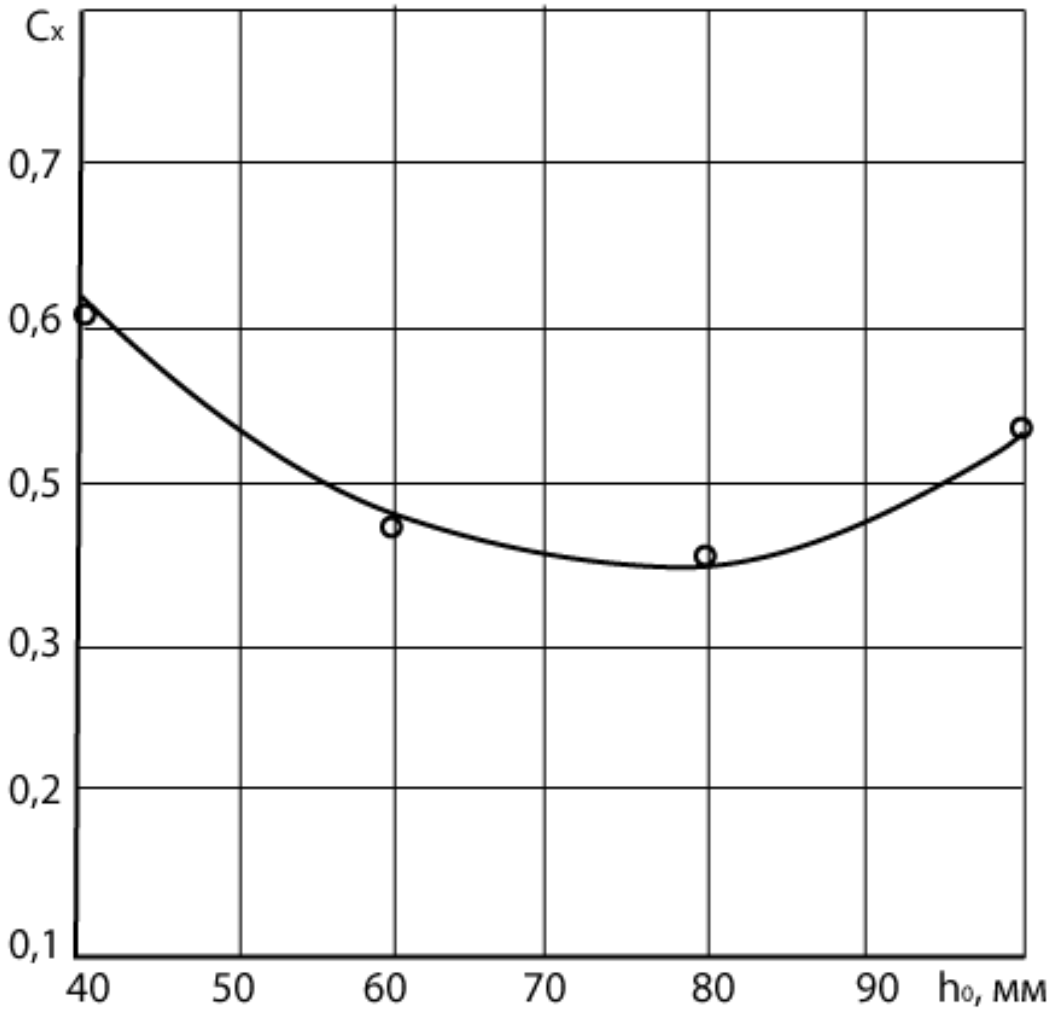


Рис. 3.2, б. Зависимость коэффициента C_x модели легкового автопоезда от высоты лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача; $\propto_0$=50°; l_0 = 250мм

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что для высоких прицепов оптимальными конструктивными и установочными параметрами плоского щитового обтекателя являются: h_0=0,4м; α_0=50°; l_0=1,25м (размеры даны для натурного автопоезда). Установка обтекателя с такими параметрами снижает коэффициент C_x автопоезда с прямоугольным прицепом на 30%, настолько же как с обтекателем на передней стенке.

Наряду со снижением аэродинамического сопротивления легкового автопоезда важно обеспечение его курсовой устойчивости, т.е. наименьшего момента рысканья, величина которого в значительной мере зависит от коэффициента подъемной силы C_z. Конструктивные мероприятия, разработанные для снижения аэродинамического сопротивления высокого прицепа, позволили существенно уменьшить и величину коэффициента C_z, а, следовательно, улучшить курсовую устойчивость легкового автопоезда при движении с таким прицепом. Так, по сравнению с прямоугольным прицепом, значение коэффициента C_z автопоезда с лобовым обтекателем на этом прицепе, с прицепом с наклоненной передней стенкой, с обтекателем на автомобиле-тягаче при прямоугольном прицепе и при прямоугольном прицепе с лобовым обтекателем на его передней стенке и обтекателем на автомобиле-тягаче уменьшилось на: 26%, 47%, 68% и 77% соответственно (см. рис. 3.3).

Следует отметить, что значительное снижение аэродинамического сопротивления легкового автопоезда обеспечивает закругления только фронтальных кромок прицепа. Закругление задних кромок прицепа снижает аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда незначительно чем говорят данные приведенные на рис. 3.4.

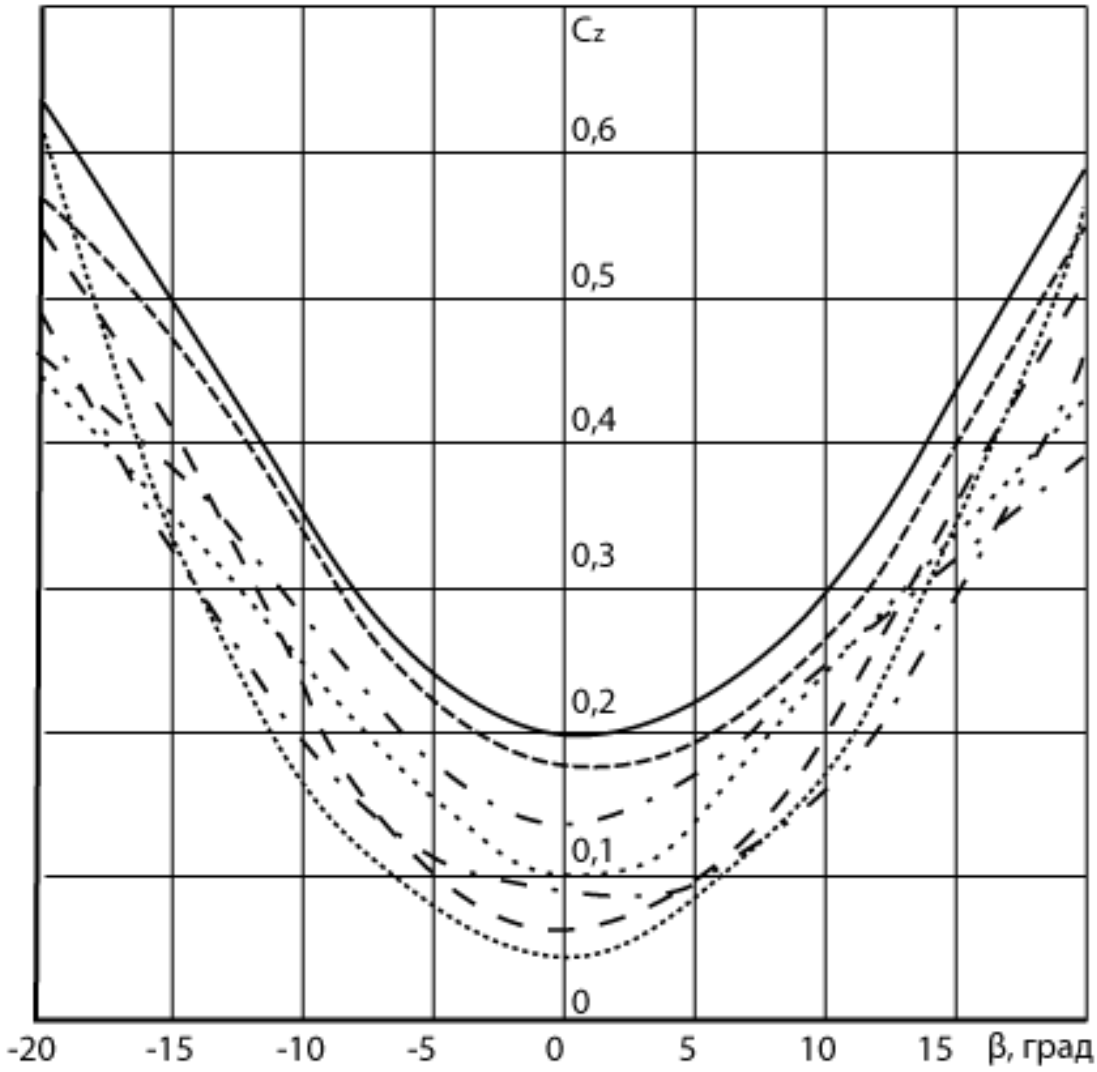
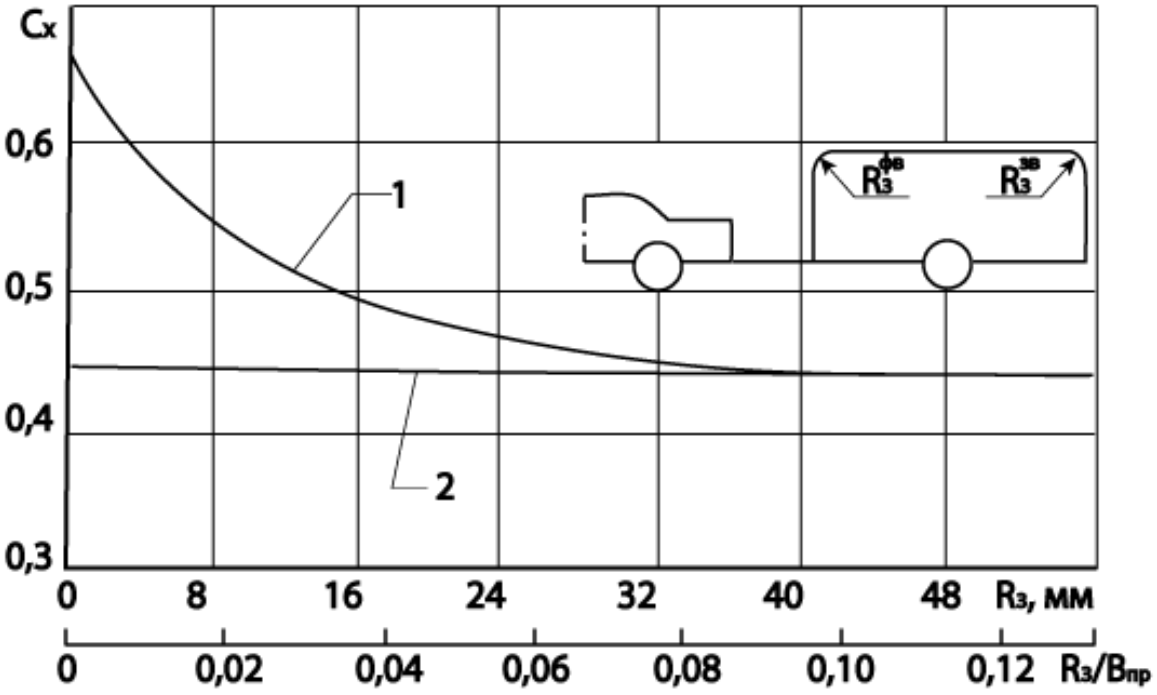
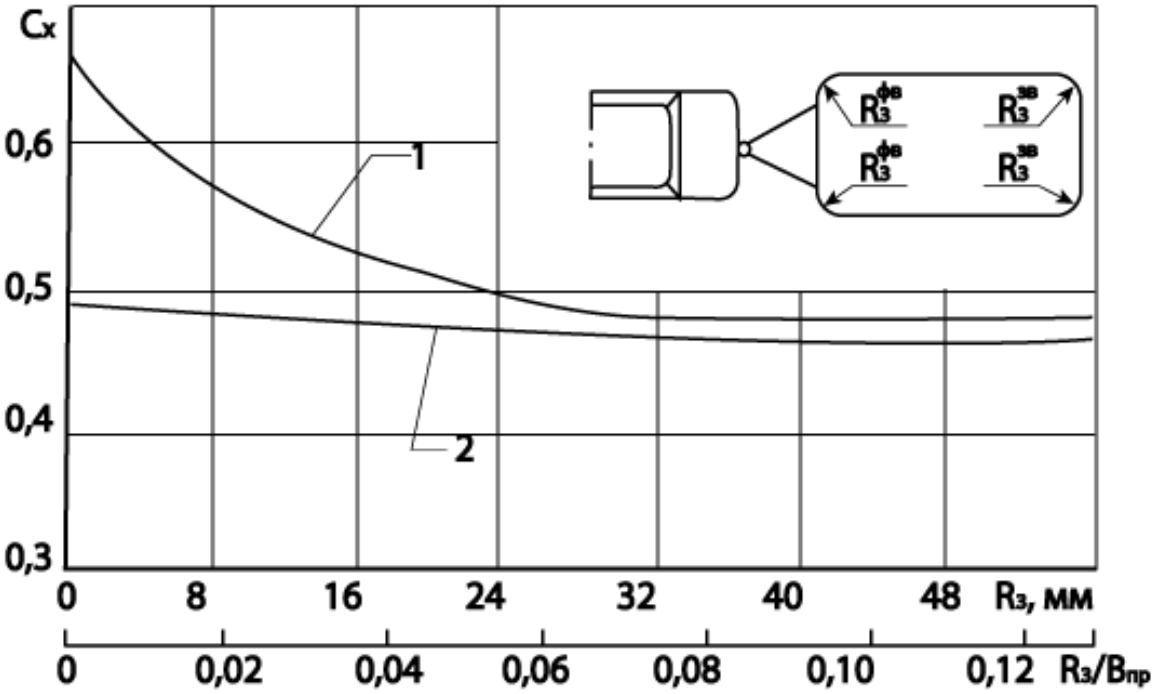


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента подъёмной силы C_z от угла натекания воздушного потока β для модели легкового автопоезда с прицепами различной конфигурации: 1 – прямоугольным; 2 – по вар. 1 с обтекателем на автомобиле-тягаче (α_0 =50°, l_0=0,25м); 3 – по вар.1 с обтекателем на передней стенке прицепа; по вар.3 с обтекателем на автомобиле-тягаче (α_0 =50°, l_0=0,25м); 5 – с наклонённой передней стенкой; 6 – по вар. 5 с обтекателем на автомобиле-тягаче (α_0 =50°, l_0=0,25м); 7 – по вар. 1 со скруглёнными фронтальными кромками прицепа (R=40мм)



а)



б)

Рис. 3.4. Зависимость коэффициента C_x модели легкового автопоезда от радиуса закругления кромок высокого прицепа: а) – верхних; б) – боковых; 1 – фронтальные кромки прицепа; 2 – задние кромки прицепа

Исследование распределения давлений на высоком прицепе легкового автопоезда

Для исследования механизма обтекания легкового автопоезда с высоким прицепом были проведены дренажные испытания прицепа, результаты которых позволили построить эпюры избыточного статического давления на его поверхности. При проведении дренажных испытаний масштабная модель установилась в рабочей части аэродинамической трубы и обдувалась воздушным потоком со скоростью 20м/с.

В данной работе использовался раздельный способ дренирования модели высокого прямоугольного прицепа. Дренирование производилось в центральной продольной плоскости и в горизонтальной (на высоте пола) плоскостях высокого прицепа. Схема установки дренажных трубок при исследовании распределения давлений раздельным способом показана на рис. 3.5. Для проведения дренирования в этих плоскостях сверлились вертикальные отверстия с шагом 50мм, в которые вставлялись отожженные медные дренажные трубки размером 3×2 мм, к наружным концам которых припаивались трубки длинной 50 мм размером 5×3 мм для соединения с резиновыми или хлорвиниловыми трубками, идущими к батарейному манометру. После установки дренажных трубок в корпусе модели её внешняя поверхность защищалась, внутренние каналы трубок продувались струёй сжатого воздуха, проверялась их герметичность. Затем дренажные отверстия нумеровались в соответствии со схемой разметки, их координаты переносятся в соответствующую таблицу. При транспортировке дренированных моделей с места их изготовления для испытания в аэродинамической трубе места, где находятся дренажные отверстия, были защищены от засорения отверстий дренажных трубок, например, путём заклеивания 2-3-мя слоями изоляционной ленты. На рис. 3.6 показаны эпюры распределения статических давлений по поверхности высокого прямоугольного прицепа.

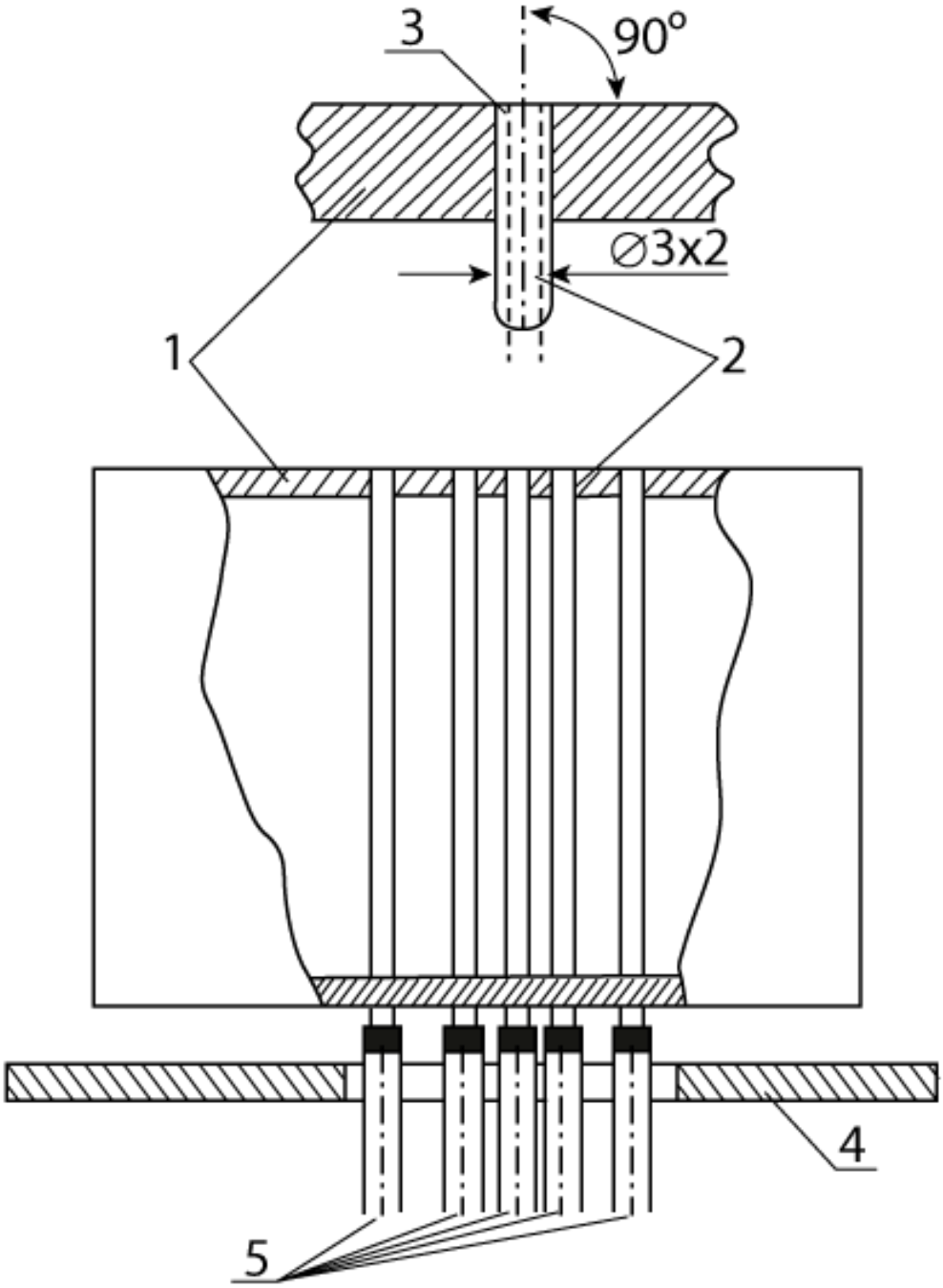


Рис. 3.5.Схема установки дренажных трубок при исследовании распределения давлений раздельным способом: 1– стенка модели; 2 – медные трубки 3×2мм; 3 – торец медной трубки; 4 – аэродинамический экран; 5 – резиновые трубки 5×3мм, идущие к батарейному манометру

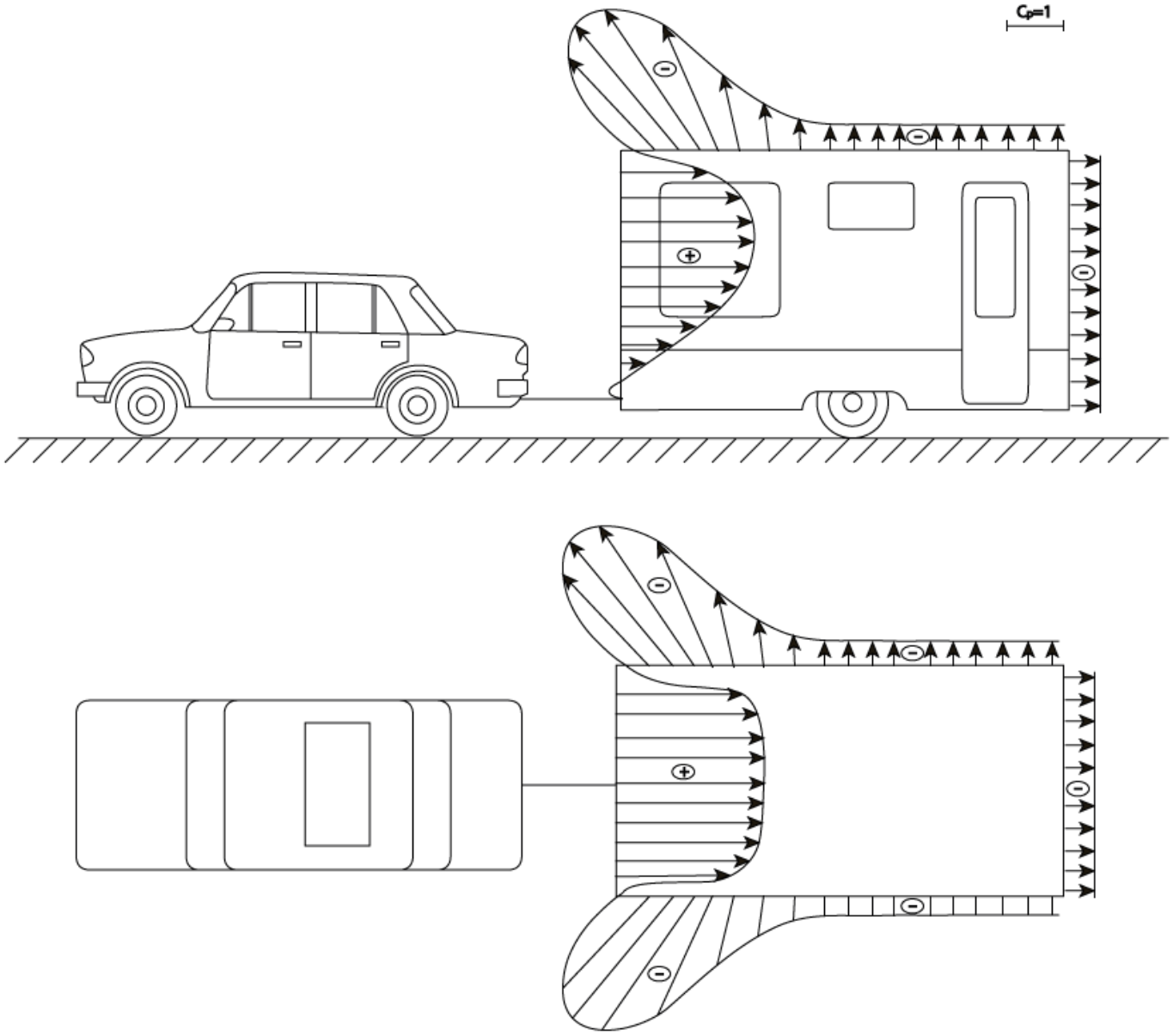


Рис. 3.6. Эпюры распределения статического давления по поверхности высокого прицепа; C_p – коэффициент давления

Видно, что на передней стенке прицепа наблюдается зона повышенного давления – величина коэффициента давления Ср=1. За фронтальными кромками происходит отрыв воздушного потока и образуются зоны разряжения. На поверхности крыши и боковых стенках наблюдается небольшое разряжение. На задней стенке высокого прицепа образуется зона достаточно большого разряжения, что является причиной образования за легковым автопоездом длинного вихревого спутного следа.

Установка лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача позволяет значительно улучшить характер обтекания высокого прицепа. На рис. 2.4 был показан механизм обтекания легкового автопоезда с обтекателем на автомобиле-тягаче. Как уже отмечалось, значительное превышение высокого прицепа над автомобилем-тягачом является основной причиной большого аэродинамического сопротивления легкового автопоезда. Кроме этого, заметное увеличение аэродинамического сопротивления автопоезда происходит из-за отрывных течений за острыми фронтальными кромками высокого прицепа.

Лобовой обтекатель на крыше автомобиля-тягача позволяет устранить отрицательное влияние указанных факторов на обтекаемость легкового автопоезда.

Анализ эпюр давлений показывает, что положительное давление на передней стенке прицепа сменилось на отрицательное. Практически устранено отрывное течение за верхней фронтальной кромкой прицепа. Улучшение обтекаемости верхней фронтальной кромки и разряжение на передней стенке высокого прицепа способствует уменьшению аэродинамического сопротивления и подъёмной силы, действующей на легковой автопоезд.

На рис. 3.7 представлены эпюры распределения статических давлений высокого прицепа легкового автопоезда на автомобиле-тягаче которого установлен лобовой обтекатель.

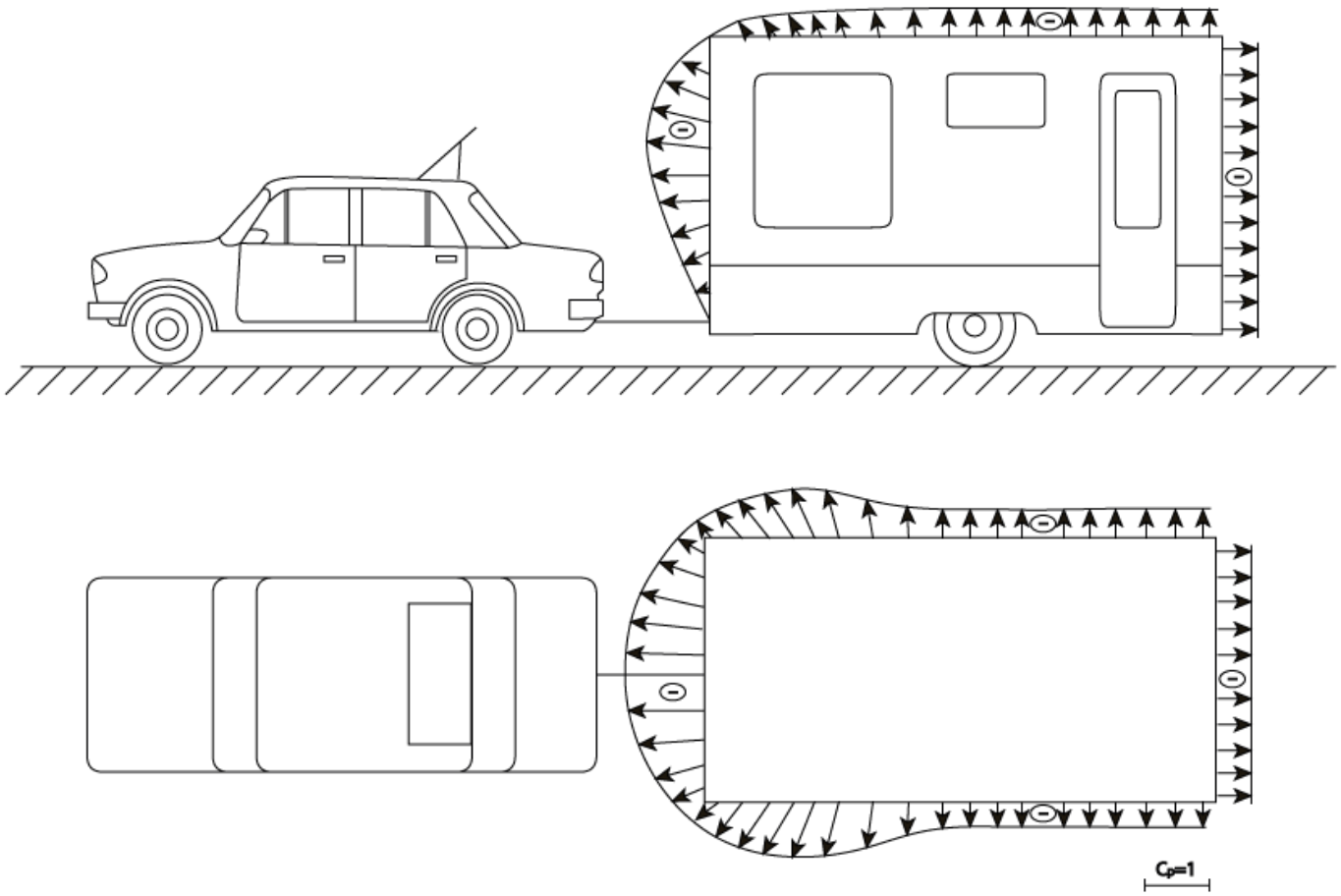


Рис. 3.7. Эпюры распределения статического давления по поверхности высокого прямоугольного прицепа при установке лобового обтекателя на автомобиле-тягаче

Когда модель не пустотелая или дренируемые зоны труднодоступны изнутри корпуса, применяется дренирование коллекторным способом. В этом случае на наружной поверхности модели делаются специальные канавки, в которые заподлицо с поверхностью укладываются медные дренажные трубки. Один конец каждой них запаивается оловом, а другой выводится наружу модели при помощи резиновых или хлорвиниловых трубок присоединяется к батарейному манометру.

В заданных местах замера давлений поверхности трубок зачищаются до толщины стенок 0,2 мм. В них перпендикулярно к поверхности модели просверливаются дренажные отверстия диаметром 0,35...0,50 мм. Образовавшиеся при сверлении отверстий заусенцы тщательно зачищаются. После этого все просверленные отверстия заклеиваются скотчем. При проведении испытаний отверстия последовательно открываются, и по показаниям батарейного манометра измеряется статическое давление в каждом отверстии исследуемой зоны модели. Затем результаты измерений статического давления во всех дренажных отверстиях обобщаются и строятся эпюры давлений по поверхности модели. Эпюры давлений позволяют анализировать характер обтекания модели, определять зоны повышенного и пониженного давления на ее поверхности.

На рис. 3.8 показана схема расположения дренажных отверстий на поверхности высокого прицепа при дренировании его раздельным способом. На рис. 3.9 приведена схема расположения медных трубок и отверстий в них при дренировании модели легкового автомобиля коллекторным способом. Видно, что медные трубки с дренажными отверстиями располагаются поперек корпуса модели автомобиля. При этом один кончик каждой трубки запаян (п. 3), а другой посредством резиновой трубки (п. 5) соединен с батарейным манометром.

При проведении дренажных испытаний скорость обтекавшего модель легкового автопоезда с высоким прицепом воздушного потока составляла 20 м/с.

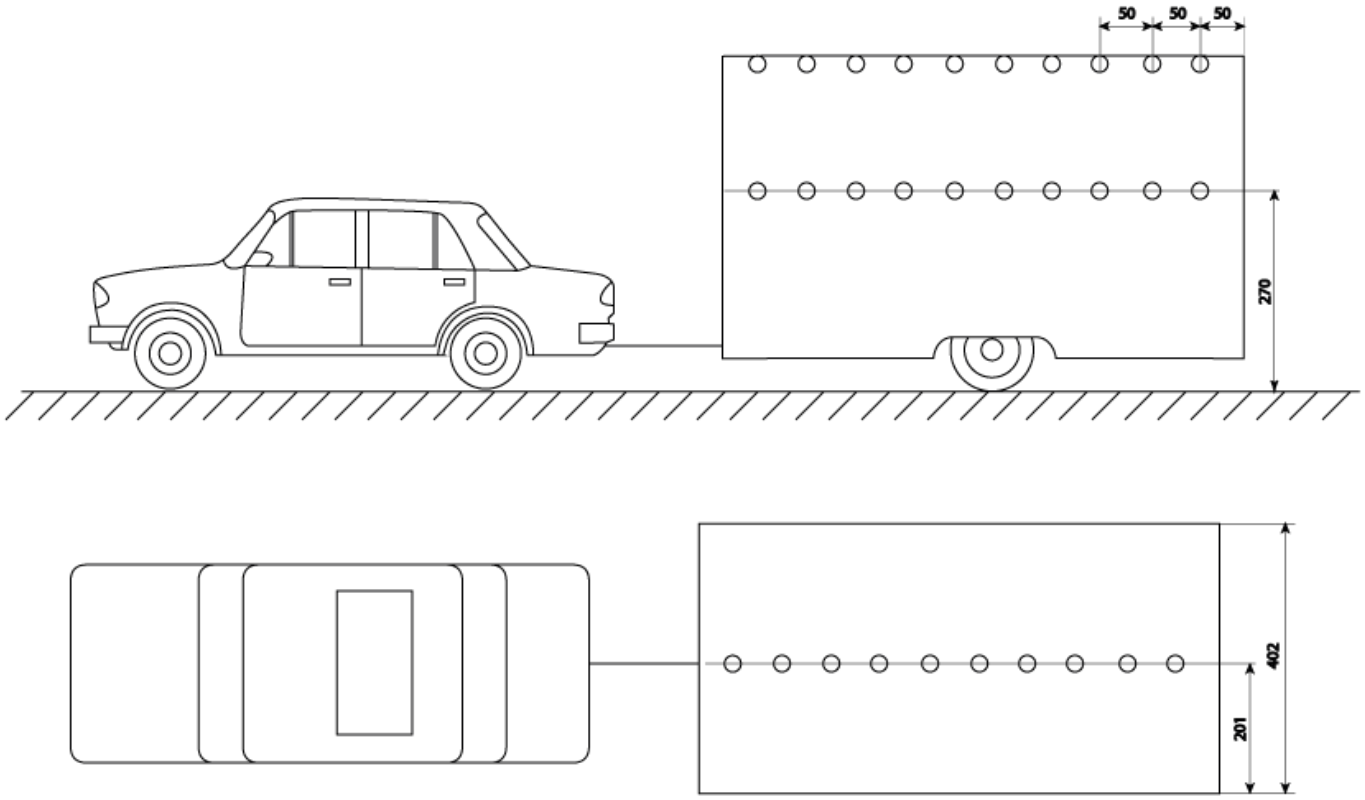


Рис. 3.8. Схема расположения дренажных отверстий на модели высокого прицепа для исследования распределения давлений на его поверхности

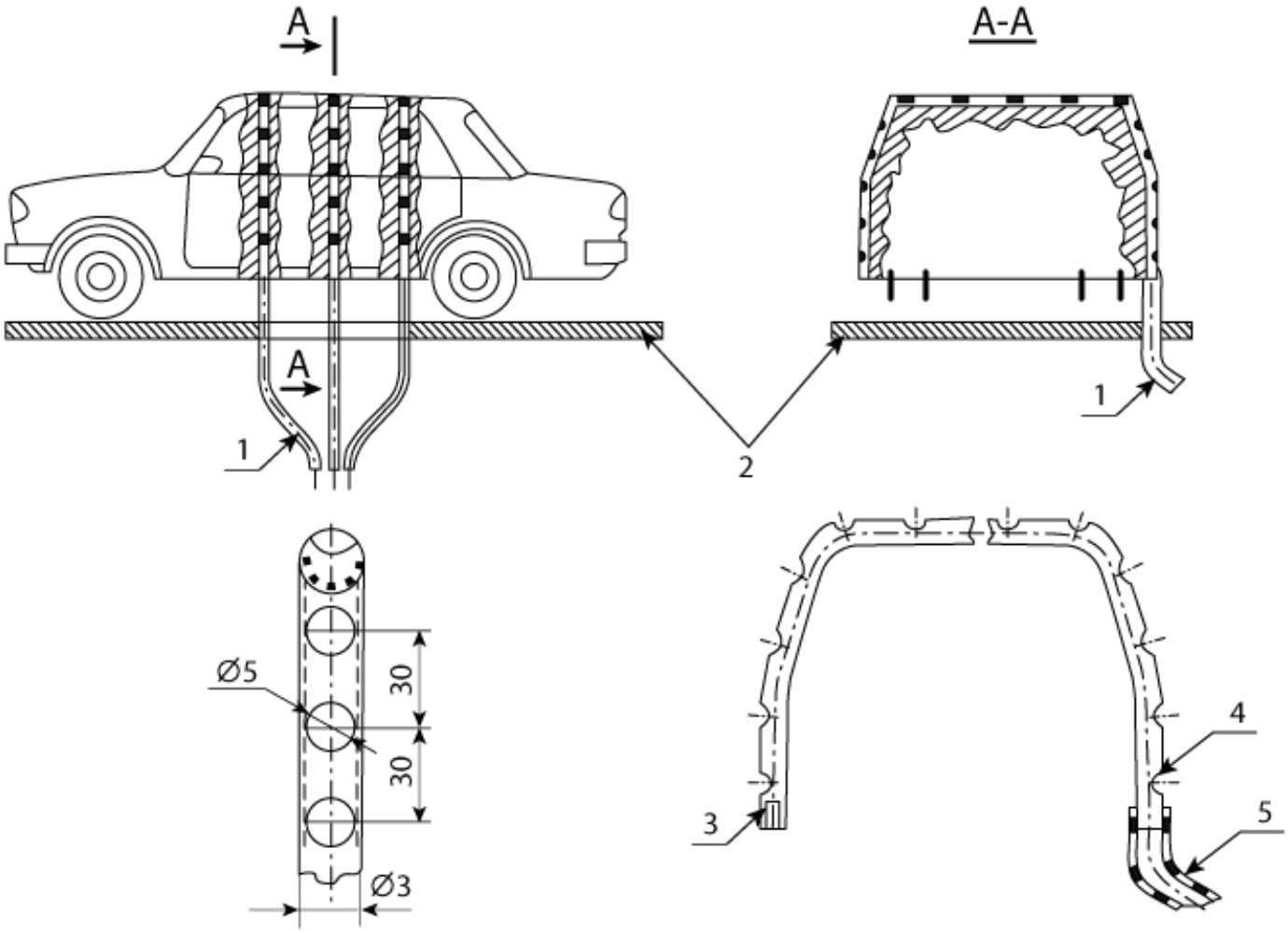


Рис. 3.9. Схема расположения медных трубок и отверстий в них при дренировании модели легкового автомобиля коллекторным способом: 1 – медные трубки; 2 – стол; 3 – запаянный конец трубки; 4 – отверстия; 5 – резиновые трубки

Для изучения характера обтекания воздушными потоками масштабной модели легкового автопоезда с высоким прицепом была проведена визуализация характера его обтекания с наклеенными на нем шелковыми нитями. Перед наклеиванием нитей поверхность прицепа была обезжирена и проведена разметка таким образом, что расстояние между точками по горизонтали и вертикали составляло 50 мм. Затем производилось приклеивание шелковых нитей клеем БФ точечным способом. Длина нитей составляла 50 мм.

Наряду с использованием шелковых нитей визуализация характера обтекания моделей производится другими методами [67].

Метод визуализации с использованием масляных пленок, содержащих письменные вещества, которые наносятся на поверхность модели, позволяет определить направление обтекающего ее воздушного потока, а также его приблизительную скорость путем анализа сетчатой структуры (рисунка) масляной пленки.

Весьма эффективным является метод визуализации, основанный на использовании флуоресцентных масляных пленок. Для получения такой пленки в обычное легкое моторное масло добавляют небольшое количество флуоресцентного порошка. Поверхность модели покрывается этой смесью и обдувается в аэродинамической трубе при скорости воздушного потока 10-15 м/с. В ходе испытаний модель освещается ультрафиолетовым светом ламп накаливания и флуоресцентных ламп. Под воздействием воздушного потока масло растекается по поверхности модели и через несколько минут картина ее обтекания стабилизируется. Через специальный светофильтр картина обтекания может быть сфотографирована. Наблюдая структуру флуоресцентной масляной пленки на поверхности модели, можно оценить детальный характер ее обтекания.

Широкое распространение получил метод визуализации с помощью использования дымовых струн. При этом методе полоски (струйки) дыма выпускаются непосредственно в воздушный поток, обтекающий модель, и служат своеобразным индикатором характера ее обтекания. На рис. 3.10 представлена картина обтекания модели легкового автопоезда с высоким прицепом, полученная методом дымовой визуализации. Хорошо видно, как воздушный поток «ударяет» в переднюю стенку прицепа, что увеличивает аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда.

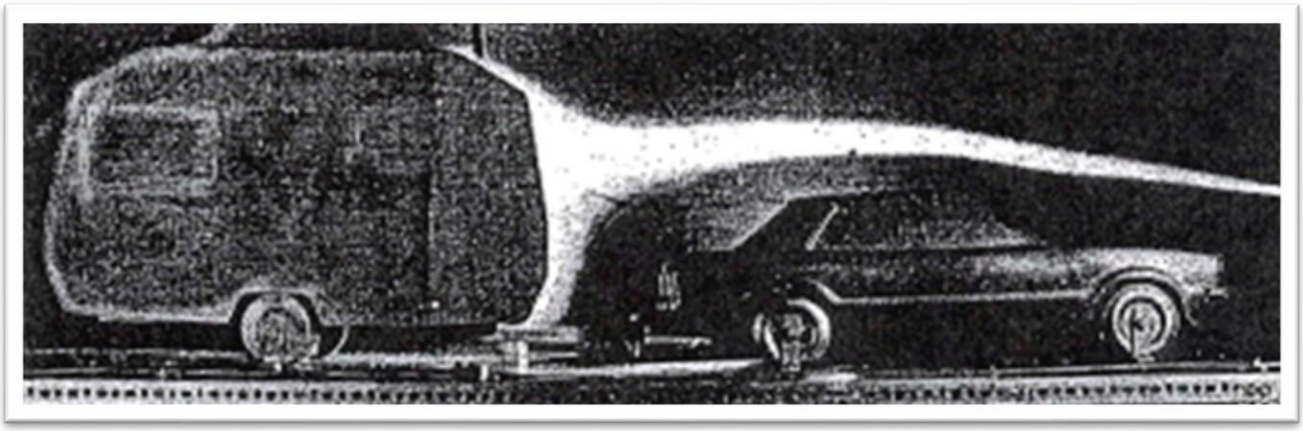


Рис. 3.10. Дымовая визуализация обтекания легкового автопоезда с высоким прицепом

3.2. Дорожные испытания легкового автопоезда

Дорожные испытания легкового автопоезда с высоким прицепом проводились с целью определения возможности снижения расхода топлива и повышения скоростных свойств автопоезда путем установки на крыше автомобиля-тягача лобового обтекателя. Испытания проводились на динамометрической дороге Научно-исследовательского центра по испытаниям автомототехники ФГУП «НАМИ» (НИЦИАМТ).

На рис. 3.11 показана полученная по результатам дорожных испытаний легкового автопоезда в составе легкового автомобиля-тягача ВАЗ и высокого прицепа «Туртранс» зависимость снижения расхода топлива от скорости движения за счет установки лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача. При скорости движения 80 км/ч расход топлива легкового автопоезда уменьшился на 1,7 л/100км или на 9% по сравнению с серийным легковым автопоездом.

Как уже отмечалось выше, большое аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда с высоким прицепом является причиной, как повышения расхода топлива, так и снижения скоростных свойств автопоезда. Значительное уменьшение аэродинамического сопротивления легкового автопоезда при установке лобового обтекателя на автомобиле-тягаче обеспечило заметное увеличение максимальной скорости автопоезда. На рис. 3.12 приведены кривые разгона серийного легкового автопоезда с высоким прицепом и оборудованного лобовым обтекателем на автомобиле-тягаче. Видно, что за счет снижения аэродинамического сопротивления высокого прицепа при установке лобового обтекателя на автомобиле-тягаче максимальная скорость легкового автопоезда возросла на 8%.

При проведении дорожных испытаний легкового автопоезда с высоким прицепом использовались соответствующие методики и исследовательское оборудование лаборатории дорожных испытаний НИЦИАМТ.

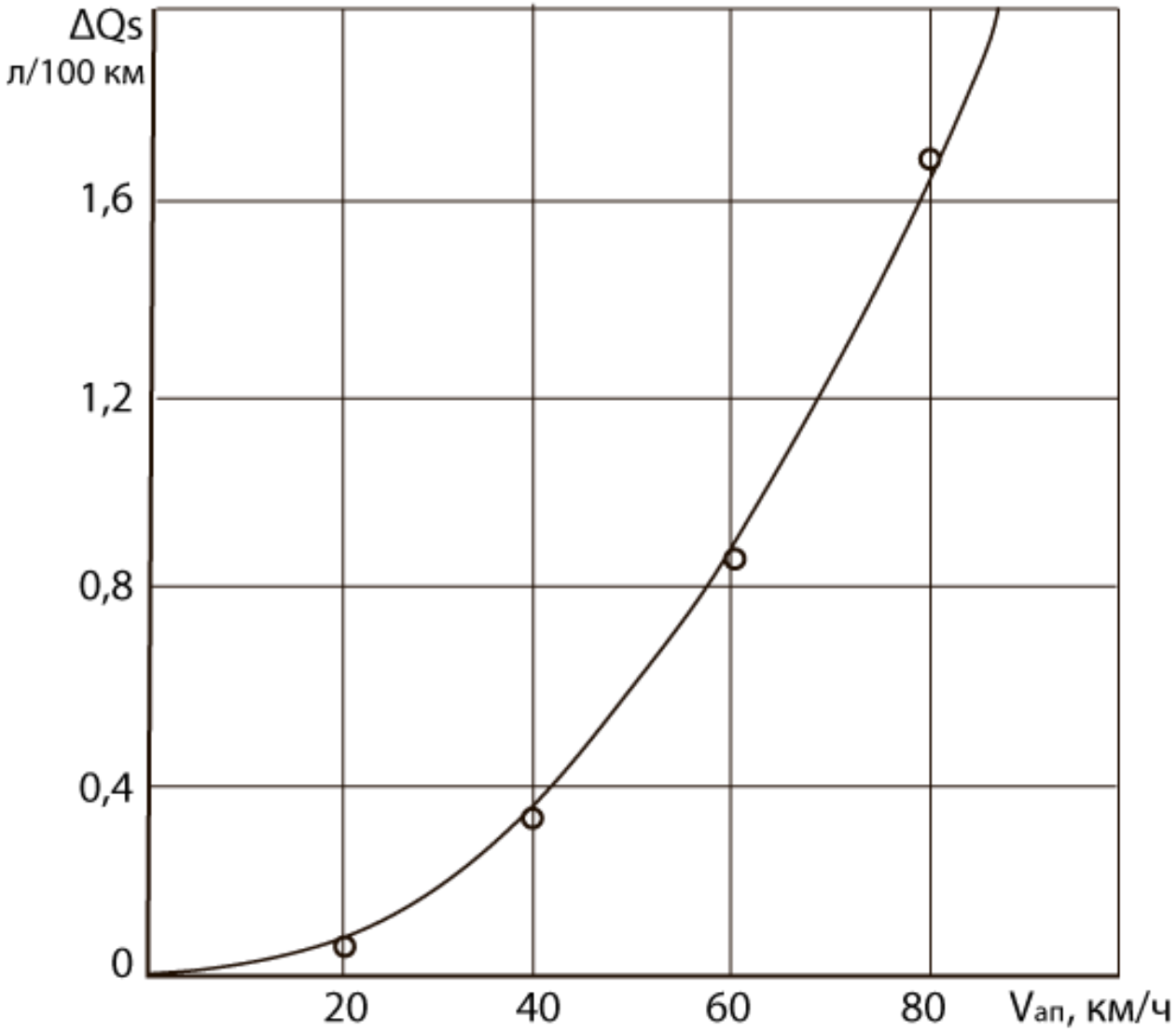


Рис. 3.11. Зависимость снижения расхода топлива легкового автопоезда за счет установки лобового обтекателя на автомобиле-тягаче от скорости его движения по бетонному шоссе

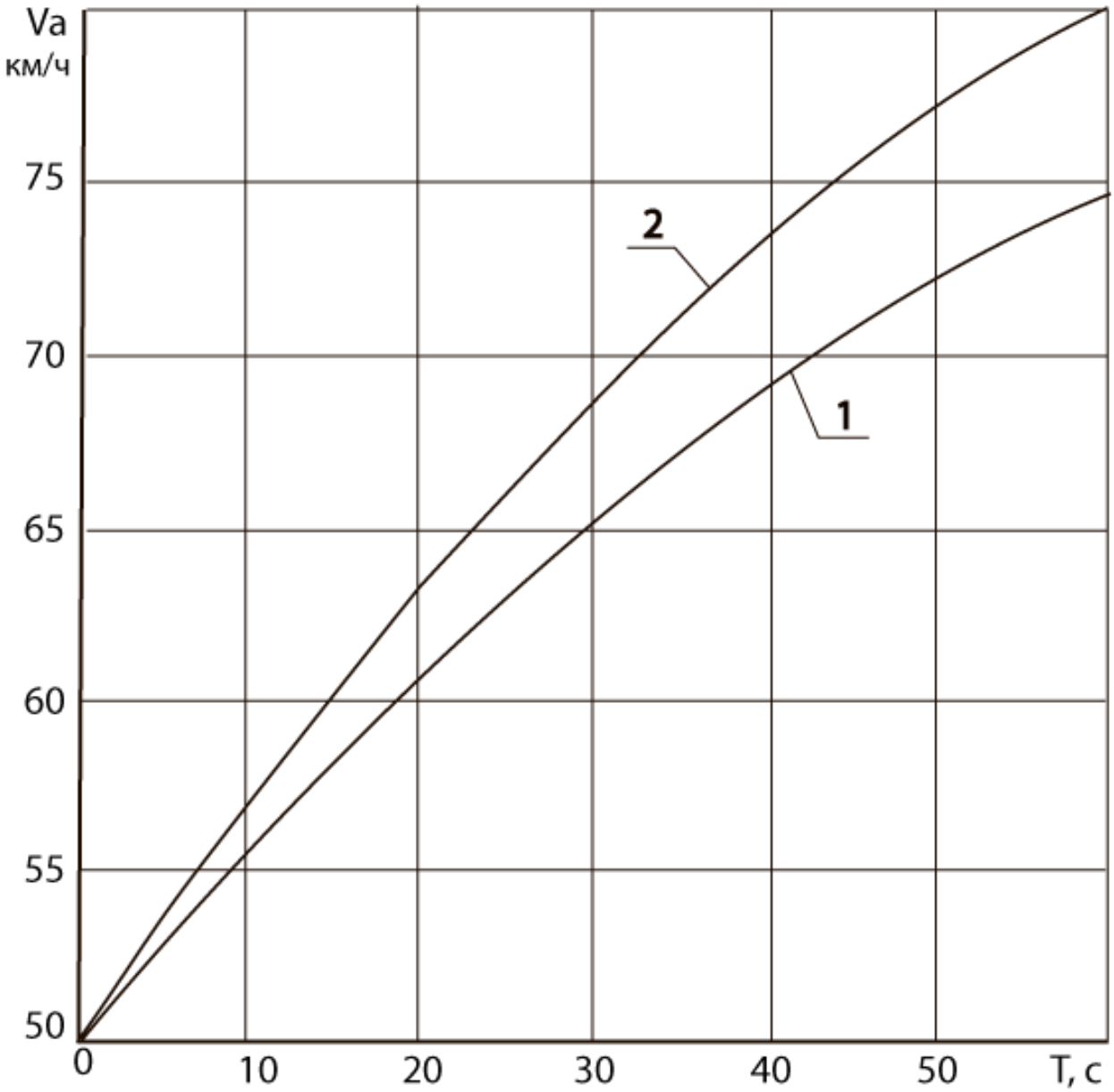


Рис. 3.12. Динамика разгона легкового автопоезда с высоким прицепом на 4-й передаче: 1 – серийного; 2 – оборудованного лобовым обтекателем на автомобиле-тягаче

3.3. Повышение топливной экономичности легкового автопоезда с высоким прицепом

Наличие в составе легкового автопоезда высокого прямоугольного прицепа значительно увеличивает расход топлива автомобиля-тягача. Это происходит из-за плохой обтекаемости серийного высокого прицепа, что значительно увеличивает аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда. Повышение расхода топлива автомобиля-тягача происходит не только за счет увеличения аэродинамического сопротивления, но и из-за возрастания общей массы легкового автопоезда сопротивления качению шин при наличии высокого прицепа.

Одним из эффективных направлений снижения расхода топлива легкового автопоезда является уменьшение его аэродинамического сопротивления путем улучшения обтекаемости высокого прицепа. Как было показано выше аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда можно снизить более чем в два раза за счет оптимизации формы высокого прицепа (см. рис. 2.2)

Для оценки степени снижения расхода топлива легкового автопоезда за счет уменьшения его аэродинамического сопротивления можно использовать следующее соотношение:

$$\Delta Q_s(\%) = 5\Delta C_x(\%), \qquad (3.1)$$

где ΔQ_s, ΔC_x – снижение расхода топлива и аэродинамического сопротивления легкового автопоезда.

То есть уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления C_x, на 5% позволяет снизить расход топлива автомобиля на 1%. Таким образом, приведенные на рис. 2.2 данные о снижении аэродинамического сопротивления легкового автопоезда за счет мероприятий по улучшению обтекаемости, позволяют говорить о возможном уменьшении его расхода топлива на 6-8%.

На рис. 3.13 приведены зависимости расхода топлива легкового автопоезда с прицепами различной конфигурации от скорости движения по отношению к одиночному автомобилю. Видно, что наличие прямоугольного высокого прицепа значительно увеличивает расход топлива автомобиля.

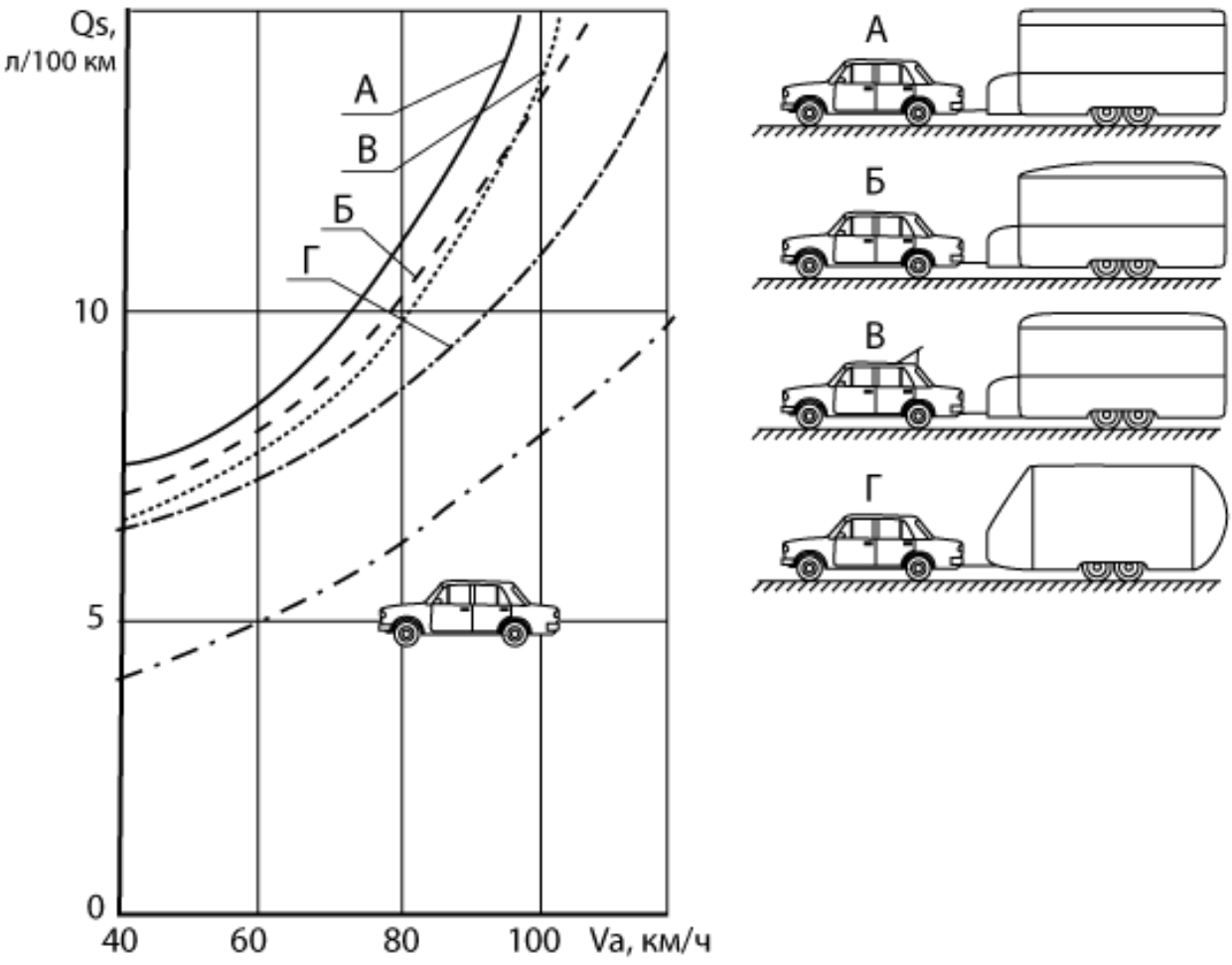


Рис. 3.13. Зависимость расхода топлива легковых автопоездов с различными по форме и обтекаемости прицепами от скорости движения в сравнении с одиночным автомобилем

Значительное снижение расхода топлива автопоезда с высоким прицепом обеспечивает установка лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача. При установке лобового обтекателя на автомобиле-тягаче встречный поток воздуха направляется на крышу прицепа, что уменьшает давление воздуха на переднюю стенку прицепа. Применение лобового обтекателя позволяет снизить аэродинамическое сопротивление легкового автопоезда на 25-30%, что эквивалентно уменьшению расхода топлива на 5-6%.

Таблица 3.1.

Конструктивные и установочные параметры лобовых обтекателей на легковых автомобилях с прицепами и обеспечиваемое ими снижение расхода топлива ΔQ_s

Автомобиль+прицеп	ΔH, м	L_0, м	h_0, м	α_0, град	B_0, м	Q_s, л/100км
Трабант-601 +Юниор	0,65	0,94	0,3	70	1,5	3,5
Шкода-S 100+Интеркамп	0,90	0,94	0,3	70	1,5	3,2
Варбург-353+ Интеркамп	0,90	0,94	0,3	70	1,5	1,8
ВАЗ-2101+Интеркамп	0,88	0,94	0,4	50	1,5	1,4
ВАЗ-2111+ИФАБастай	0,92	1,10	0,4	65	1,5	2,1
ГАЗ-24+ Интеркамп	0,83	0,94	0,3	70	1,5	1,6
Фиат-1500+ Интеркамп	0,86	0,94	0,3	70	1,5	1,4
ВАЗ-2101+Туртранс	0,89	1,12	0,4	50	1,5	1,6

Здесь: ΔH – превышение прицепа над автомобилем-тягачом; L_0 – расстояние от передней кромки крыши автомобиля до лобового обтекателя; h_0, B_0 – высота и ширина обтекателя; α_0 – угол наклона обтекателя.

В табл. 3.1 приведены конструктивные и установочные параметры лобовых обтекателей для различных легковых автомобилей с прицепами и достигаемая за счет их (обтекателей) установки экономия топлива при скорости движения 70 км/ч. В среднем, по результатам испытаний 8-ми легковых автопоездов, установка лобового обтекателя снижает их расход топлива на 1,8 л/100 км.

На рис. 3.11 была представлена полученная по результатам дорожных испытаний зависимость снижения расхода топлива легкового автопоезда с высоким прицепом за счет установки лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача от скорости его движения по бетонному шоссе. Видно, что по мере увеличения скорости легкового автопоезда эффективность лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача возрастает. Так при скорости движения 60 км/ч за счет установки лобового обтекателя расход топлива легкового автопоезда уменьшился на 0,9л/100км, или на 6%. В то время как при скорости 80 км/ч расход топлива легкового автопоезда с высоким прицепом и лобовым обтекателем на автомобиле-тягаче снизился более чем на 1,6л/100км, то есть на 9%.

Используя полученное соотношение (3.1), устанавливающее взаимосвязь между снижением аэродинамического сопротивления автомобиля и его расхода топлива, можно оценить достигаемое за счет реализации предлагаемых конструктивных мероприятий по улучшению обтекаемости высокого прицепа снижение расхода топлива легкового автопоезда. В табл. 3.2 показано снижение аэродинамического сопротивления легкового автопоезда за счет: установки лобовых обтекателей на автомобиле-тягаче и прицепе, закругления фронтальных кромок и наклона передней стенки прицепа, а также достигаемое при этом уменьшение расхода топлива. На рис. 3.14 приведена диаграмма, показывающая экономию расхода топлива легкового автопоезда при скорости 70 км/ч при реализации приведенных выше мероприятий по улучшению обтекаемости высокого прицепа.

Таблица 3.2.

Снижение аэродинамического сопротивления и расхода топлива легкового автопоезда за счет улучшения обтекаемости высокого прицепа

Уменьшение аэродинамического сопротивления (ΔC_x) и расхода топлива (ΔQ_s)	Комплектация легкового автопоезда с высоким прицепом				
	С закругленными кромками у высокого прицепа	С наклоненной передней стенкой высокого прицепа	С лобовым обтекателем на автомобиле-тягаче	С лобовым обтекателем на высоком принце	С лобовыми обтекателями на автомобиле-тягаче и прицепе
ΔC_x, %	40	32	30	36	44
ΔQ_s, %	8	6	6	7	9

Рис. 3.14. Достигаемое снижение расхода топлива легкового автопоезда с высоким прицепом при движении по бетонному шоссе со скоростью 70 км/ч за счет реализации разработанных мероприятий по улучшению обтекаемости прицепа

Одновременно со снижением расхода топлива установка лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача позволила повысить скоростные и динамические свойства легкового автопоезда. На рис. 3.9 показана динамика разгона серийного легкового автопоезда и оборудованного лобовым обтекателем на крыше автомобиля-тягача. Видно, что легковой автопоезд с лобовым обтекателем разгоняется динамичнее, чем серийный легковой автопоезд без обтекателя. При этом максимальная скорость легкового автопоезда с лобовым обтекателем составила 80 км/ч, в то время как у серийного легкового автопоезда она была менее 74 км/ч. Таким образом, максимальная скорость легкового автопоезда за счет установки лобового обтекателя на автомобиле-тягаче увеличилась на 6%.

Наличие в составе легкового автопоезда высокого прицепа, который часто является жилым, достаточно остро ставит вопрос повышения его безопасности во время движения. С точки зрения аэродинамики на безопасность движения легкового автопоезда с высоким прицепом оказывают влияние величина подъемной силы P_z и коэффициента подъемной силы C_z, момента тангажа M_y, коэффициента момента тангажа m_y опрокидывающего момента M_x, коэффициента опрокидывающего момента m_x.

Для повышения безопасности легкового автопоезда необходимо минимизировать значения указанных выше параметров. Разработанные в диссертации конструктивные мероприятия и результаты проведенных исследований позволяют решить эту задачу и повысить безопасность легкового автопоезда с высоким прицепом. На рис. 3.3 представлены результаты испытаний модели легкового автопоезда с высоким прицепом в аэродинамической трубе. Видно, что установка лобового обтекателя на автомобиле-тягаче, на передней стенке прицепа и одновременная установка обоих обтекателей позволяет снизить коэффициент подъемной аэродинамической силы C_z, действующей на легковой автопоезд и влияющей на его курсовую устойчивость и безопасность движения, на 10%, 25% и 50% соответственно. При закруглении фронтальных кромок прицепа и наклоне его передней стенки коэффициент C_z уменьшается на 70% и 55%.

ГЛАВА 4. МЕТОДИКИ И ОБЪЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Методики экспериментальных исследований

Стендовые испытания масштабной модели легкового автопоезда проводились в аэродинамической трубе А-6 НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Аэродинамическая труба А-6 - одноканальная, замкнутого типа с открытой рабочей частью. На рис. 4.1 показана схема аэродинамической трубы А-6. Длина рабочей части 4,5м. Сопло и диффузор имеют эллиптическое сечение с размерами: большой оси эллипса 4м, малой оси 2,34м. Площадь поперечного сечения рабочей части трубы 7,32 м^2. Коэффициент поджатая сопла n=5,09. Труба оборудована шестилопастным вентилятором диаметром 4,4 м, вращаемым двигателем постоянного тока мощностью 2000 кВт. Максимальная скорость воздушного потока в рабочей части трубы может достигать 100 м/с. Скорость потока варьируется изменением частоты вращения коленчатого вала двигателя в пределах от 0 до 750 мин$^{-1}$, осуществляемым по известной схеме Леонардо.

Параметры потока в рабочей части трубы характеризуются следующими величинами: неравномерность поля скоростей не выше ±0,5%; скос потока в вертикальной и горизонтальной плоскостях не более ±0,25°; градиент статистического давления по оси трубы d_P/d_X= 0,002 1/м; продольная составляющая интенсивности турбулентности ее в рабочей части ε_0 = 0,2%; критическое число Рейнольдса для шара диаметром D=150 мм Re = 375 000. Такая низкая степень турбулентности в рабочей части трубы достигнута благодаря установке непосредственно перед хойнейкомбом и за ним детурбулизирующих сеток с размером ячейки 1,6 мм при толщине проволоки 0,35 мм. Начальная турбулентность потока в зависимости от задаваемых условий экспериментальных исследований может иметь различные величины, близкие к натурным. Это осуществляется с помощью турбулизирующих сеток, закрепляемых на срезе сопла аэродинамической

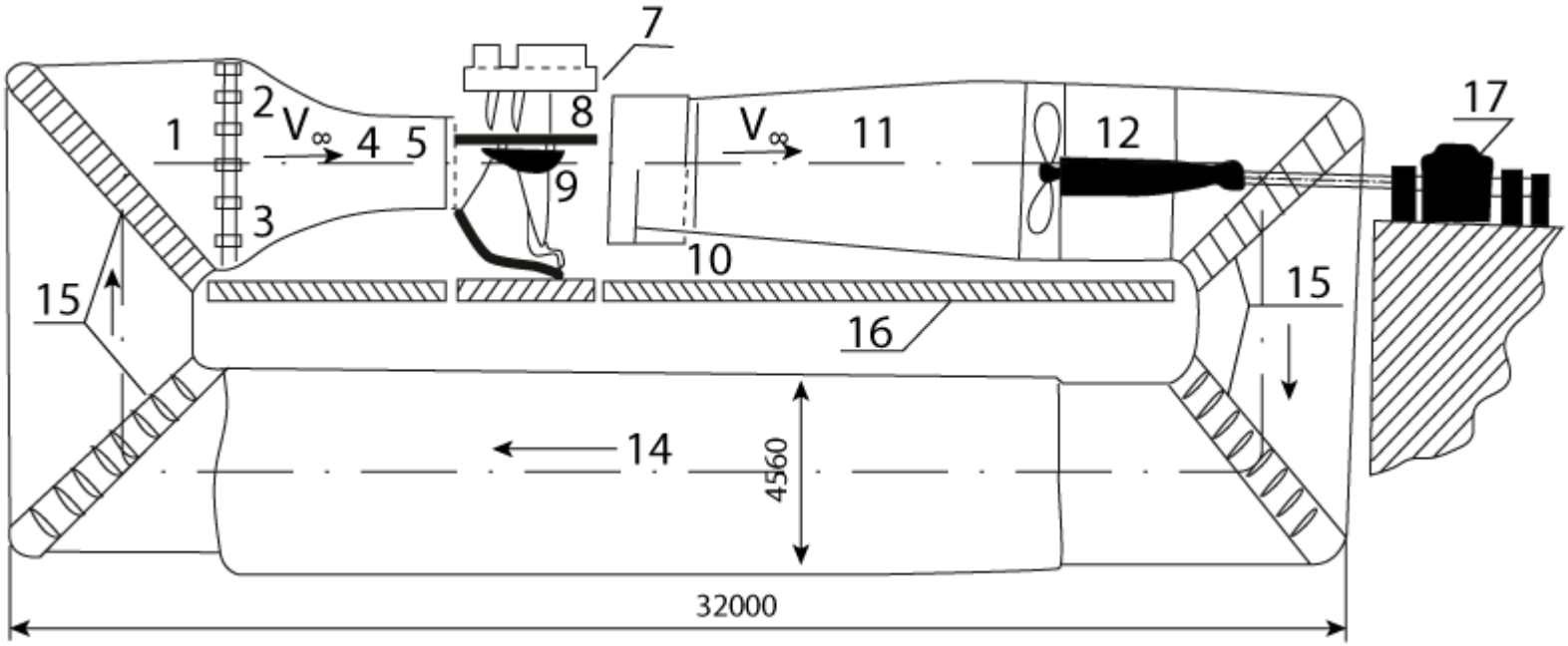


Рис. 4.1. Схема аэродинамической трубы А-6 НИИ Механики МГУ им М В Ломоносова: 1 – форкамера; 2 – хонейкомб; 3 – детурбулизирующие стенки; 4 –сопло; 5 – турбулизирующие устройства; 6 – рабочая часть; 7 – рама весов; 8 – экран; 9 – модель; 10 – профилированный насадок; 11 – диффузор; 12 – вентиляторная установка; 13 – двигатель; 14 – обратный канал; 15 – колонна споворотными лопатками; 16 – пол трубы

трубы. Интенсивность турбулентности в рабочей части по оси трубы на расстоянии от среза сопла X=1,5 м при установке различных турбулизаторов может меняться от 0,79 до 16,4.

Труба оборудована шестикомпонентными аэродинамическими весами АВМ-2 с гибкой ленточной подвеской. Весы смонтированы на платформе, которая поддерживается на колоннах передвижной тележки, располагаемых вне воздушного потока в рабочей части трубы. Рама с весами и подвешенной моделью закатывается на находящийся в полу рабочей части поворотный круг, вращением которого вокруг вертикальной оси изменяется угол β натекания воздушного потока на исследуемую модель.

Для исследование полей скоростей и давлений в различных точках рабочей части труба оборудована координатником, представляющим собой устройство для перемещения насадков и установления точного их положения относительно осей. Если начало координат трубных осей OX, OY, OZ поместить в центре выходного сечения сопла и принять правую систему координат, то вдоль осей насадок может перемещаться по оси OX на 0,3-2,9 м, по оси OY-в пределах границ потока, по оси OZ-на расстояние от +1,05 до –1,05 м.

Скорость потока в трубе А-6 замерялась весовым способом. Для этого в форкамере сопла установлен приемник давления, присоединенный к весовому элементу, измеряющему разность давлений в форкамере и атмосфере. При такой схеме скорость потока в рабочей части определяется по формуле:

$$V_д = \sqrt{2\Delta p K_v / p} \qquad (4.1)$$

где: Δp – перепад давления между форкамерой и рабочей частью трубы; K_v–коэффициент измерителя скорости, значение которого определяется сравнением показаний измерителя перепада давления и трубки Пито-Прандтля, устанавливаемой в контрольном сечении рабочей части трубы с координатами X=1500 мм, Y=0, Z=0.

Для измерения давлений при испытаниях модели в трубе А-6 используется батарейный, а также стандартные бочковые микроманометры типа ММН. Большой батарейный манометр трубы имеет 60 трубок высотой по 2 м каждая и систему подсветки, позволяющую получать четкие фотографии уровней жидкости в трубках. Кроме того, в опытах по распределению давления используются наклонный батарейный и пятиколенный манометр, обычно применяемый при определении поля скоростей трубы.

При весовых испытаниях в аэродинамической трубе с неподвижным экраном, выполняющим роль дороги, сказывается отрицательное влияние двух факторов: погружения подднищевой зоны модели или автомобиля в пограничный слой на экране или полу трубы и отсутствие вращения колес. Это занижает действительное значение коэффициента C_x на 10÷15% в зависимости от конструкции трубы и типа автомобиля.

Для устранения этого недостатка в рабочей части модельной аэродинамической трубы А-6 был установлен разработанный в НИИ Механики МГУ подвижный экран в виде «бегущей ленты». Движение дороги относительно модели автомобиля при этом имитируется посредством изготовленной из полотна бесконечной бегущей ленты, опоясывающий штатный деревянный экран трубы. Длина рабочей части ленты составляла 4260 мм, а ширина 500 мм. Лента была установлена на направляющих, которыми служили конусные барабаны диаметром 180 мм. Лента приводилась в движение от электродвигателя постоянного тока мощностью 50 кВТ с максимальным числом оборотов 2800 мин$^{-1}$. Вращение ленты от двигателя осуществлялось посредством клиноременной передачи. Электродвигатель устанавливался сбоку на деревянном экране - вне рабочей зоны подвижной ленты. Для предотвращения вертикального биения ленты при ее движении и исключения касания днища модели по всей длине ленты были установлены профилированные направляющие. Пульт управления электродвигателем обеспечивал плавное изменение его числа оборотов и скорости движения ленты. Определение и измерение скорости движения ленты при проведении

экспериментов осуществлялось на основании тарировки: по числу оборотов ведущего барабана и напряжению тока, подаваемого на электродвигатель (рис. 4.2).

Измерение аэродинамических характеристик модели легкового автопоезда с подвижным экраном осуществлялось шестикомпонентными аэродинамическими весами, показания которых передавались на компьютер и после соответствующей математической обработки выдавались в виде распечаток с численными значениями всех шести аэродинамических коэффициентов. Полученные табличные данные анализировались и по ним строились графические зависимости, связывающие аэродинамические коэффициенты с параметрами легкового автопоезда с высоким прицепом.

Подготовка модели легкового автопоезда к весовым испытаниям в аэродинамической трубе. Для проведения весовых испытаний модель легкового автопоезда должна быть установлена на аэродинамических весах в рабочей части трубы. При выборе способа установки модели на весовом устройстве трубы следует исходить из особенностей его конструкции и задач, решаемых в ходе испытаний в аэродинамической трубе. При проведении весовых испытаний модели легкового автопоезда применяют способ ее установки на аэродинамических весах с использованием ленточного подвеса.

На ленточных 6-компонентных аэродинамических весах с гибкой подвеской установка модели легкового автопоезда осуществлялась в трех точках посредством закрепленных на ней державок - поперечной и продольной. Данный способ обычно применяют при круговой обдувке модели (по углу натекания потока β) или при испытаниях ее в большом диапазоне углов атаки a.

При такой установке две точки крепления расположены по бокам модели на одной линии, проходящей через метацентр модели. Третья точка находится позади модели в ее продольной плоскости симметрии.

В качестве державок использовались цилиндрические штанги диаметром 25 мм. Штанги были изготовлены из специальной стали 30ХГСА с последую-

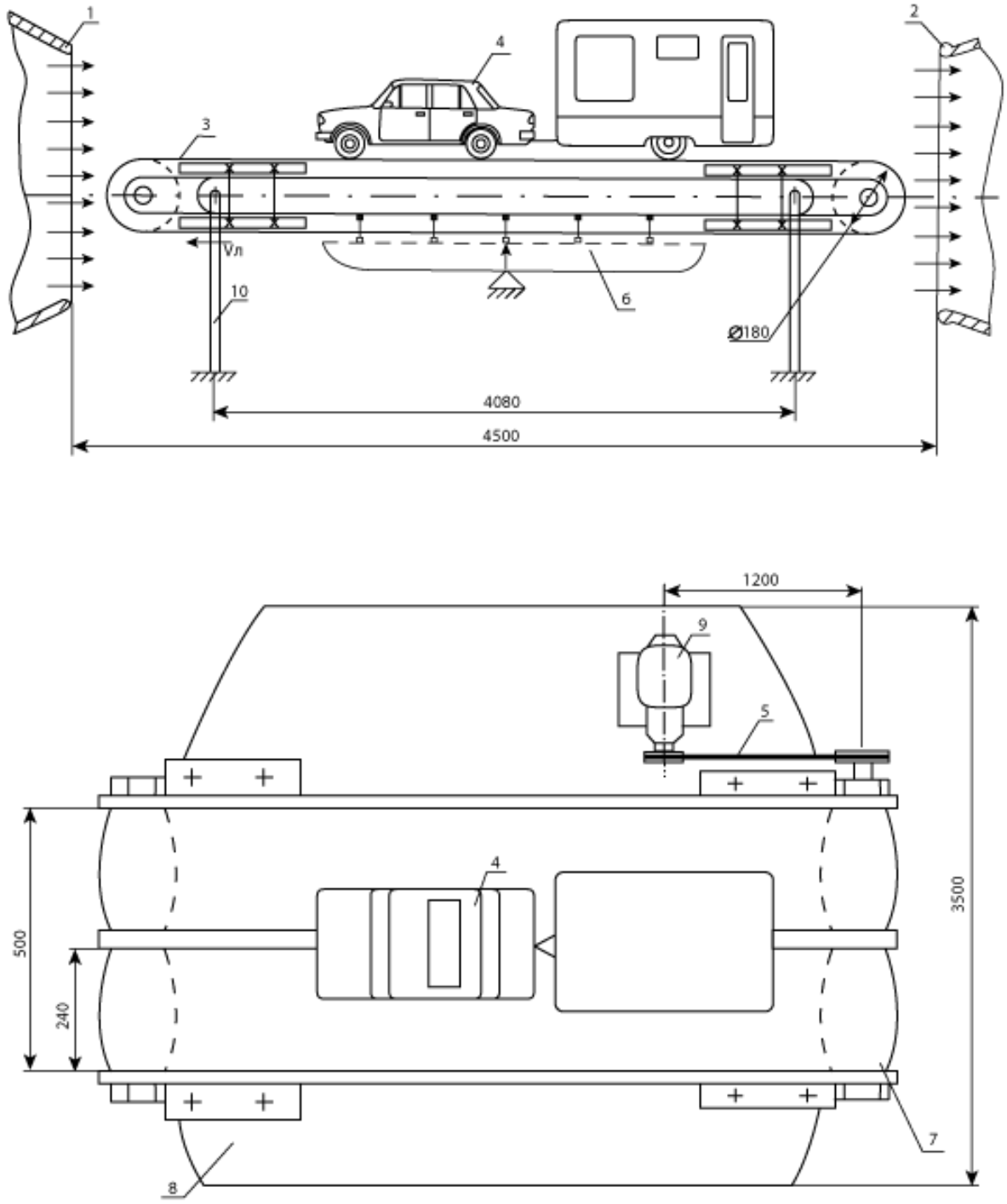


Рис. 4.2. Схема установки подвижного экрана в рабочей части аэродинамической трубы; 1 – сопло; 2 – диффузор; 3 – «бегущая» лента подвижного экрана; 4 – масштабная модель автомобиля; 5 – привод «бегущей ленты»; 6 – успокоительная система подвижного экрана; 7 – опорные валки «бегущей ленты»; 8 – штатный экран; 9 – электродвигатель привода «бегущей ленты»; 10 – опорные стойки экрана

щей термообработкой. Обработка их была выполнена по VI классу шероховатости. Концы штанг имели коническую форму с переходом на цилиндрические валики с резьбой на конце, служащие для соединения штанги с передними узлами подвески аэродинамических весов. На рис.4.3 показано крепление поперечной державки в корпусе модели.

На рис. 4.4 показана установка модели легкового автопоезда с высоким прицепом на весах в рабочей части аэродинамической трубы А-6.

Достоверность результатов модельных исследований в аэродинамических трубах во многом определяется правильным моделированием, выбором масштаба и качеством изготовления модели. При выборе масштаба и проектировании моделей, предназначенных для испытаний в аэродинамической трубе, необходимо учитывать влияние целого ряда факторов, и в первую очередь таких, как масштабный эффект, влияние загромождения рабочей части аэродинамической трубы на результаты испытаний, влияние качества поверхности (волнистости, шероховатости) на сопротивление формы при малой начальной турбулентности потока, технику и методику исследований в данной аэродинамической трубе, достигаемую в ней точность измерений.

Выбор масштаба модели. Для получения достоверных данных желательно, чтобы подготовленная к испытаниям модель была возможно больших размеров, однако при этом необходимо исключить нежелательное влияние границ рабочей части аэродинамической трубы. Для получения достоверных результатов при проведении модельных испытаний следует использовать модели с высоким уровнем подобия возможно больших (насколько позволяют размеры рабочей части трубы) размеров с реальным днищем и имитацией перетекания внутренних потоков.

В табл. 4.1 приведено ранжирование объектов испытаний в ходе аэродинамического проектирования автомобиля. Видно, что выбор масштаба зависит от вида и назначения испытаний.

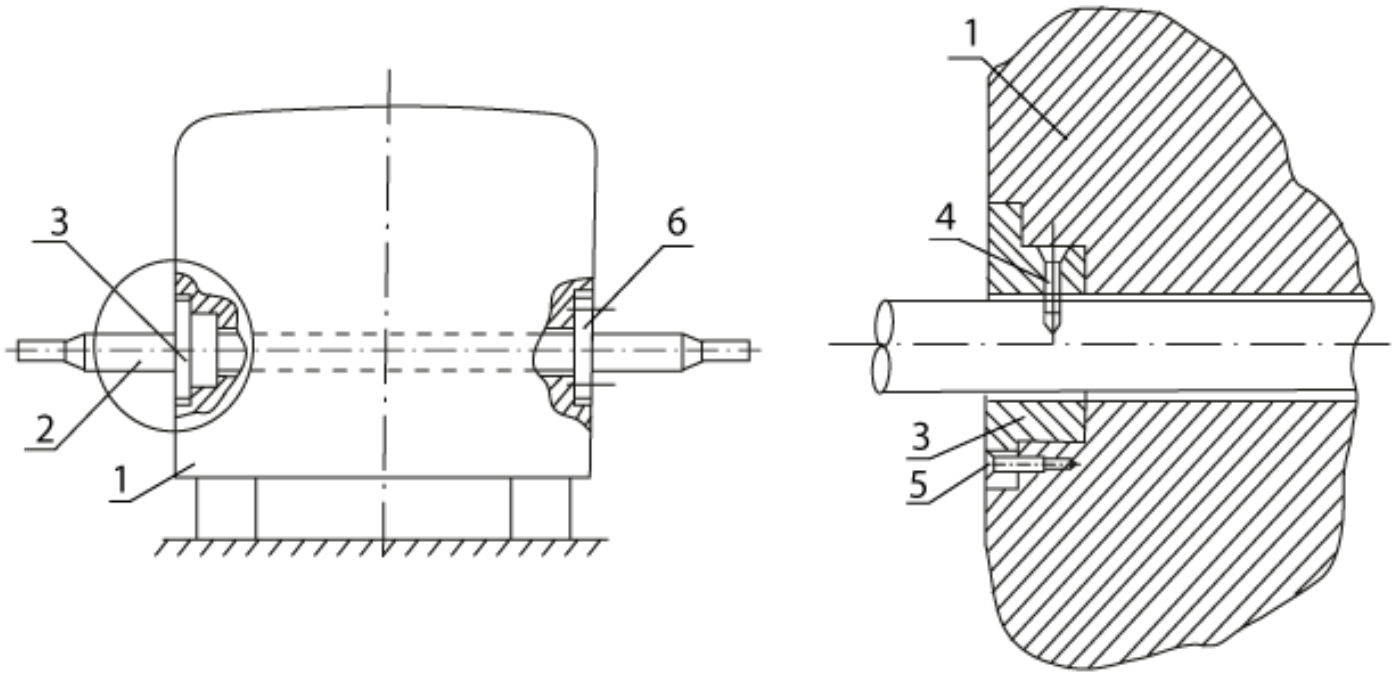


Рис. 4.3. Крепление державки в корпусе модели: 1 – корпус модели;
2 – цилиндрическая державка; 3 – втулка; 4 – штифт; 5 – винт;
6 – опорная шайба

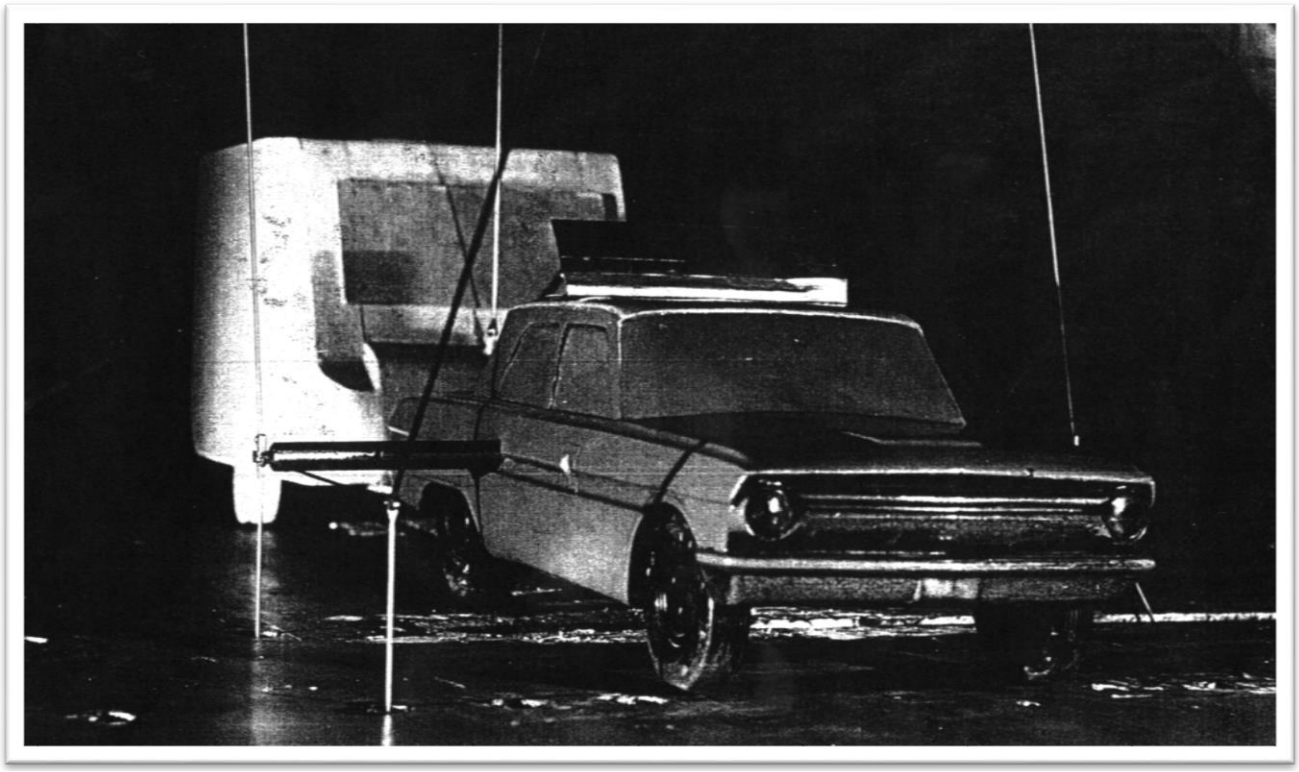


Рис. 4.4. Установка модели легкового автопоезда с высоким прицепом и обтекателем на автомобиле-тягаче в аэродинамической трубе А-6

Таблица 4.1.

Ранжирование моделей и макетов при аэродинамическом проектировании автотранспортных средств

Объект испытаний	Масштаб	Краткая характеристика объекта	Вид и назначение аэродинамических испытаний объекта
Среднемасштабная модель: легкового автомобиля; автобуса, грузовика, автопоезда	1:4 1:7	Детализированная модель с реальным днищем без перетекания внутренних потоков	Предварительные модельные, оптимизационно-параметрические весовые испытания в малой трубе для отработки формы и аэродинамических характеристик модели
Крупномасштабная модель: легкового автомобиля; автобуса, грузовика, автопоезда	1:2 (1:2,5) 1:5	Детализированная модель с реальным днищем и перетеканием в подкапотном пространстве	Доводочные модельные испытания в малой трубе для отработки формы и аэродинамических характеристик модели: весовые, визуализационные, дренажные
Натурный (масштабный) макет: легкового автомобиля; автобуса, грузовика, автопоезда	1:1 1:2 (1:2,5)	Натурный или масштабный макет с реальным днищем и перетеканием в подкапотном пространстве	Доводочные натурные (модельные) испытания в большой трубе для отработки формы и аэродинамических характеристик автомобиля: весовые, визуализационные, дренажные

Поскольку испытания масштабных моделей автомобилей ведутся, как правило, в аэродинамических трубах дозвуковых скоростей, где в основу положено подобие по числу Рейнольдса, учитывающего силы вязкости, модель должна изготавливаться с максимально возможной точностью. При изготовлении модели выдерживается строгое геометрическое подобие по основным частям натурного автотранспортного средства. Мелкие детали (дверные ручки, замки, антенны, метки и т.д.) можно не воспроизводить. Крепление съемных элементов должно производится стандартными винтами, болтами и гайками. Фиксация отклоняемых элементов должна быть жесткой, без люфтов. Конструкции имитируемых мелких деталей, например, зеркал, спойлеров, обтекателей, должны обеспечивать их жесткость, отсутствие вибраций и отрывов, возможность их фиксированной установки.

Степень обработки поверхности модели оказывает заметное влияние на устойчивость пограничного слоя. Поэтому необходимо устранить выступы и волнистость поверхности модели, особенно при проведении опытов, где требуется ламинарный пограничный слой. Следует отмстить, что у моделей с острыми кромками влияние шероховатости на сопротивление формы сказывается в меньшей степени, чем у моделей без острых кромок, сопротивление которых заметно зависит от степени шероховатости поверхности.

Допустимую величину шероховатости поверхности, при которой не происходит увеличения аэродинамического сопротивления модели, можно определить, используя следующую зависимость:

$$h_{\text{ш}} \leq (\frac{L_{\text{м}}}{Re}) \cdot 100, \qquad (4.2)$$

где: $h_{\text{ш}}$ – допустимая высота элементов шероховатости, мм;

$L_{\text{м}}$ – длина модели, мм;

Re – число Рейнольдса, зависящее от условий испытаний модели в аэродинамической трубе.

На рис. 4.5 показана степень влияния относительной шероховатости поверхности на аэродинамические характеристики модели при различных числах Рейнольдса. В зоне А влияние относительной шероховатости поверхности модели не сказывается на величине ее аэродинамического сопротивления. Линия 1 определяет границу зоны А, после которой начинается зона Б, где происходит увеличение аэродинамического сопротивления модели с ростом ее шероховатости. Линия 2 характеризует предельные величины шероховатости модели, необходимые для сохранения на ее поверхности ламинарного пограничного слоя. В зоне В наблюдается заметное влияние относительной шероховатости поверхности на аэродинамическое сопротивление модели.

Относительно влияния шероховатости на сопротивление формы можно отметить, что тела с острыми кромками менее чувствительны к шероховатости поверхности. Сопротивление плохообтекаемых тел без острых кромок (например, цилиндр) заметно зависит от степени шероховатости поверхности.

При изготовлении поверхность моделей автомобилей должна быть аэродинамически гладкой. Величину шероховатости поверхности при этом можно принимать $h_ш \leq 0{,}01$ мм.

При изготовлении моделей из дерева, поры на поверхности сначала заделываются несколькими слоями белил с эфиром; после каждого покрытия поверхность натирается ветошью, смоченной веретенным маслом. После этого модель несколько раз покрывается лаком.

Другой метод окончательной отделки поверхности заключается в нанесении на нее пульверизатором целлюлозно-ацетонового лака, придающего поверхности не только необходимую гладкость. Зеркальная отделка поверхности модели в большинстве случаев не обязательна.

В табл. 4.2 приведены допустимые показатели шероховатости при обработке поверхности моделей в зависимости от числа Рейнольдса.

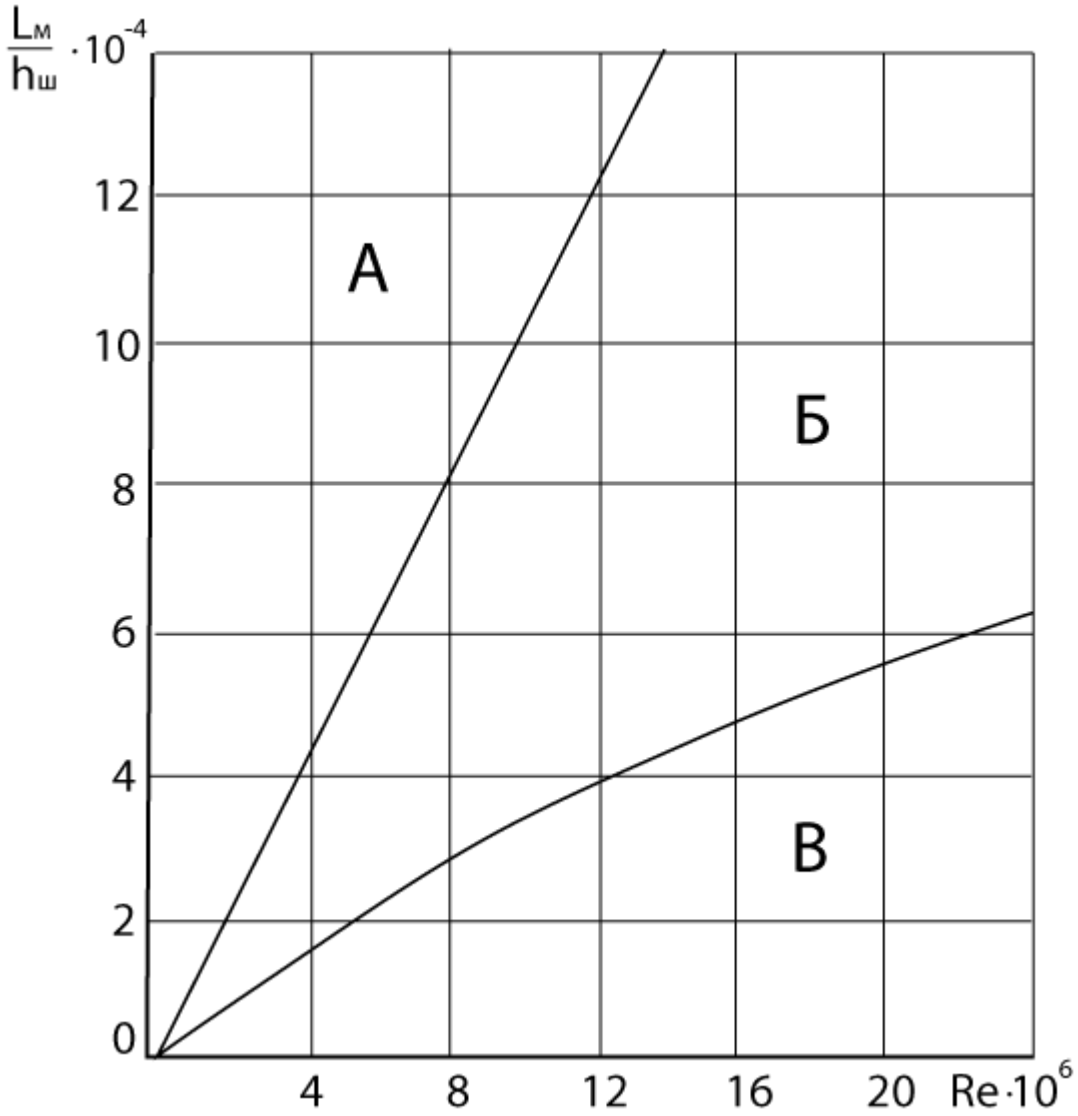


Рис.4.5. Предельные величины шероховатости поверхности модели, при которых не происходит увеличения ее аэродинамического сопротивления: $L_м$ – длина модели, мм; $h_ш$ - высота элементов шероховатости, мм: А– зона отсутствия проявления влияния шероховатости на сопротивление потока (ламинарный пограничный слой); Б – зона частичного проявления влияния шероховатости на сопротивление потока (турбулентный пограничный слой); В – зона полного проявления влияния шероховатости на сопротивление (автомодельный режим, на стенке наличие только ламинарного подслоя)

Таблица 4.2.

Зависимость показателей шероховатости моделей от числа Рейнольдса

Re	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9
$h_ш/L_м$	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}

Хорошие результаты по качеству поверхности, после соответствующей ее обработки, обеспечивают корковые модели, изготовленные методом быстрого прототипирования путем послойного наложения композитного материала с использованием специальных компьютерных программ.

Для получения достоверных данных при проведении модельных испытаний следует соблюдать два закона аэродинамического подобия. Первый – это геометрическое подобие модели и натурного автомобиля, второй – кинематическое подобие обтекающих их воздушных потоков по числу Рейнольдса.

Равенства чисел Рейнольдса модели и натуры теоретически можно достичь путем значительного увеличения скорости, обтекающего модель воздушного потока или использованием при испытаниях воздушной среды с уменьшенной вязкостью. Однако в первом случае заметно нарушается механизм обтекания модели, а реализация второго направления технически затруднена. В дополнении к различным числам Рейнольдса у модели и натуры при испытаниях масштабных моделей в трубах не имитируется ряд факторов, типичных для автомобилей, двигающихся по дороге. Для нивелирования влияния числа Рейнольдса на результаты исследований параметрические испытания масштабных моделей должны проводиться в зоне, где их аэродинамические характеристики практически от него не зависят.

Как показывают экспериментальные исследования плохо обтекаемых тел, к числу которых относятся модели автомобилей, графические зависимости их аэродинамического сопротивления от числа Рейнольдса имеют три зоны, зависящие от его величины: докритическую, критическую и закритическую. В докритической зоне наблюдается повышенное аэродинамическое со-

противление модели. В критической зоне происходит резкое снижение сопротивления, а в закритической оно становится практически постоянным.

Такой характер протекания зависимостей $C_x=f(Re)$ в значительной мере зависит от структуры пограничного слоя на поверхности моделей. Характер распределения давлений по поверхности кузова автомобиля тесно связан со структурой пограничного слоя, зависящей от числа Рейнольдса. При малых числах Рейнольдса ($Re \leq 2 \cdot 10^5$) течение в пограничным слое является ламинарным, т.е. струйным без перемешивания. Поскольку ламинарный пограничный слой обладает малым запасом энергии, то происходит его ранний отрыв от поверхности плохообтекаемого тела и образование вихревой спутной струи. При увеличении числа Рейнольдса за счет роста скорости воздушного потока ($Re \geq 2 \cdot 10^6$) происходит переход ламинарного пограничного слоя в турбулентной. Это связано с ростом энергии воздушного потока в пограничном слое и невозможностью удерживать поток от перемешивания за счет сил вязкости. Число Рейнольдса, при котором происходит переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный называется критическим числом $Re_{кр}$ для данного тела. При дальнейшим увеличении числа R_e существующий турбулентный пограничный слой получает большую энергию, поэтому отрыв его, например, от передних кромок, несколько задерживается, а точка отрыва смещается назад по длине тела. При это вихревая спутная струя несколько уменьшается. Важным является то обстоятельство что, в закритической зоне числа R_e аэродинамические коэффициенты остаются постоянными и не зависят от числа Рейнольдса. Поэтому перед испытаниями масштабной модели автомобиля в аэродинамической трубе следует определить так называемую зону «автомодельности» для неё, в которой аэродинамические коэффициенты практически не зависят от числа Re. После этого можно вести параметрические испытания модели при этих значениях чисел Re и соответствующей им скорости воздушного потока.

Для нахождения зоны «автомодельности» перед началом параметрических исследований проводится цикл испытаний модели и определяются значения её коэффициента C_x при возрастающей скорости воздушного потока, т.е. при увеличивающихся числах Рейнольдса.

По результатам испытаний строится графическая зависимость коэффициента C_x модели от числа Re и определяется зона, где коэффициент C_x практически не зависит от него. Зона, где C_x практически не зависит от числа Рейнольдса, называется зоной «автомодельности».

На рис. 4.6 представлены зависимости коэффициента C_x от числа Re для шара диаметром 100 мм и масштабных моделей легкового автомобиля и легкового автопоезда с высоким прицепом. Видно, что зона «автомодельности» для модели легкового автопоезда начинается при $Re \geq 3{,}4 \cdot 10^6$.

На рис. 4.7 показана зависимость коэффициента C_x от числа Re для модели легкового автопоезда, испытания которой проводились в аэродинамической трубе для определения её зоны «автомодельности». Для этой модели легкового автопоезда зона «автомодельности» наступает при $Re=3{,}4 \cdot 10^6$, что соответствует скорости воздушного потока $V_\infty=25$ м/с.

В дальнейшем все параметрические исследования модели легкового автопоезда в аэродинамической трубе проводились именно при этой скорости воздушного потока.

При дорожных испытаниях для определения параметров атмосферы использовали специальную метеостойку. Определение расхода топлива легкового автопоезда производилось по стандартной методике НИЦИАМТ. Для замера расхода топлива использовался топливомер плунжерного типа Т4П-3 конструкции ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Исследование топливной экономичности включали сравнительные заезды, при скорости ветра ≤ 1 м/с, легкового автопоезда в различной комплектации на мерном, длинной 1 км, участке динамометрической дороге при движении с постоянной скоростью: 20, 40, 60, 70, 80 км/ч и замером расхода топлива для каждой из них. На рис. 4.8. показана установка топливомера Т4П-3 и информационного блока в автомобиле-тягаче. Оценка влияния лобового обтекателя на автомобиле-тягаче на динамические и скоростные свойства легкового автопоезда проводилась путём сравнительных заездов на динамометрической дороге с использованием, разработанного в НИЦИАМТ прибора «путь-время-скорость» (ПВС).

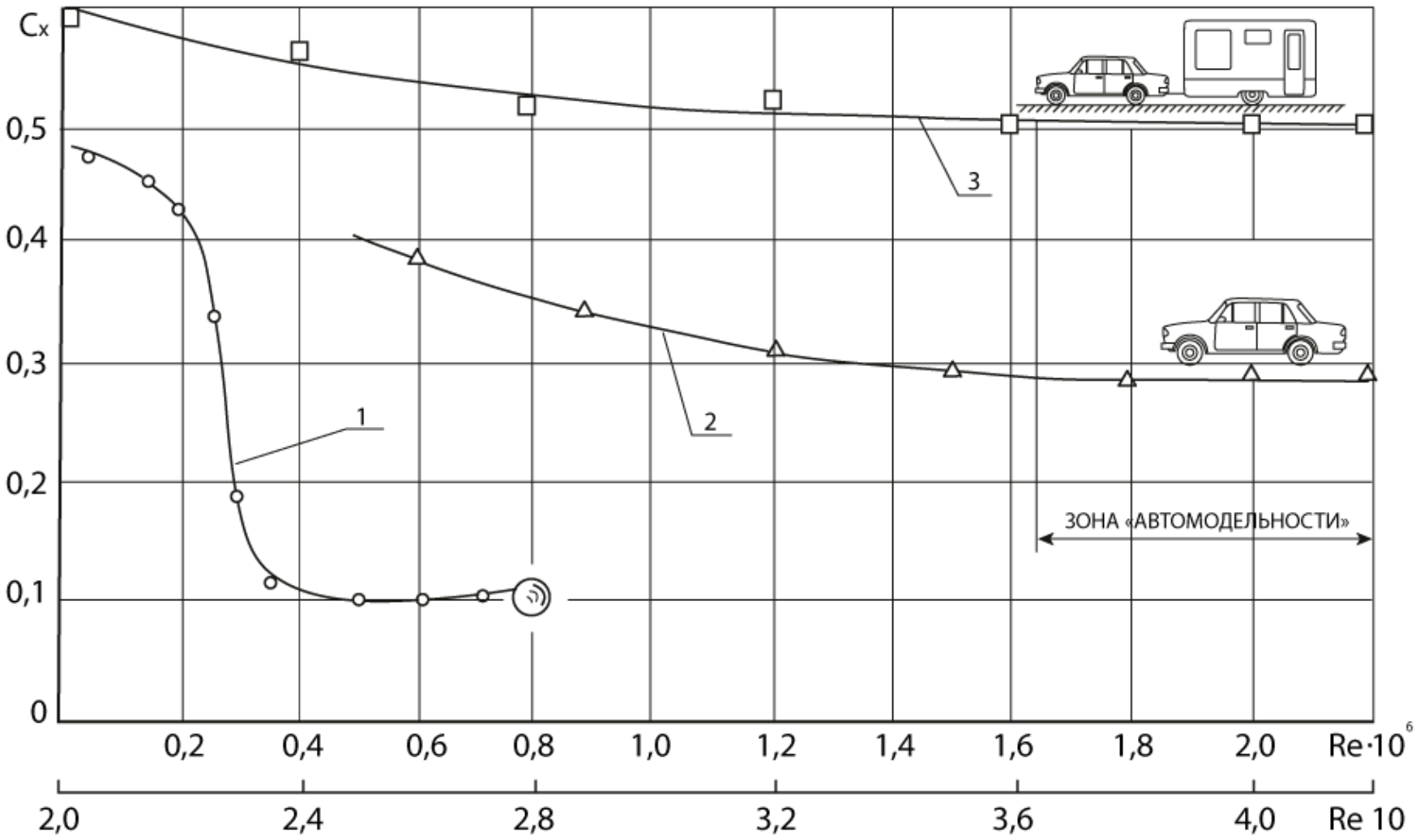


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента C_x от числа Рейнольдса для шара ∅100 мм (1); моделей легкового автомобиля (2) и легкового автопоезда (3)

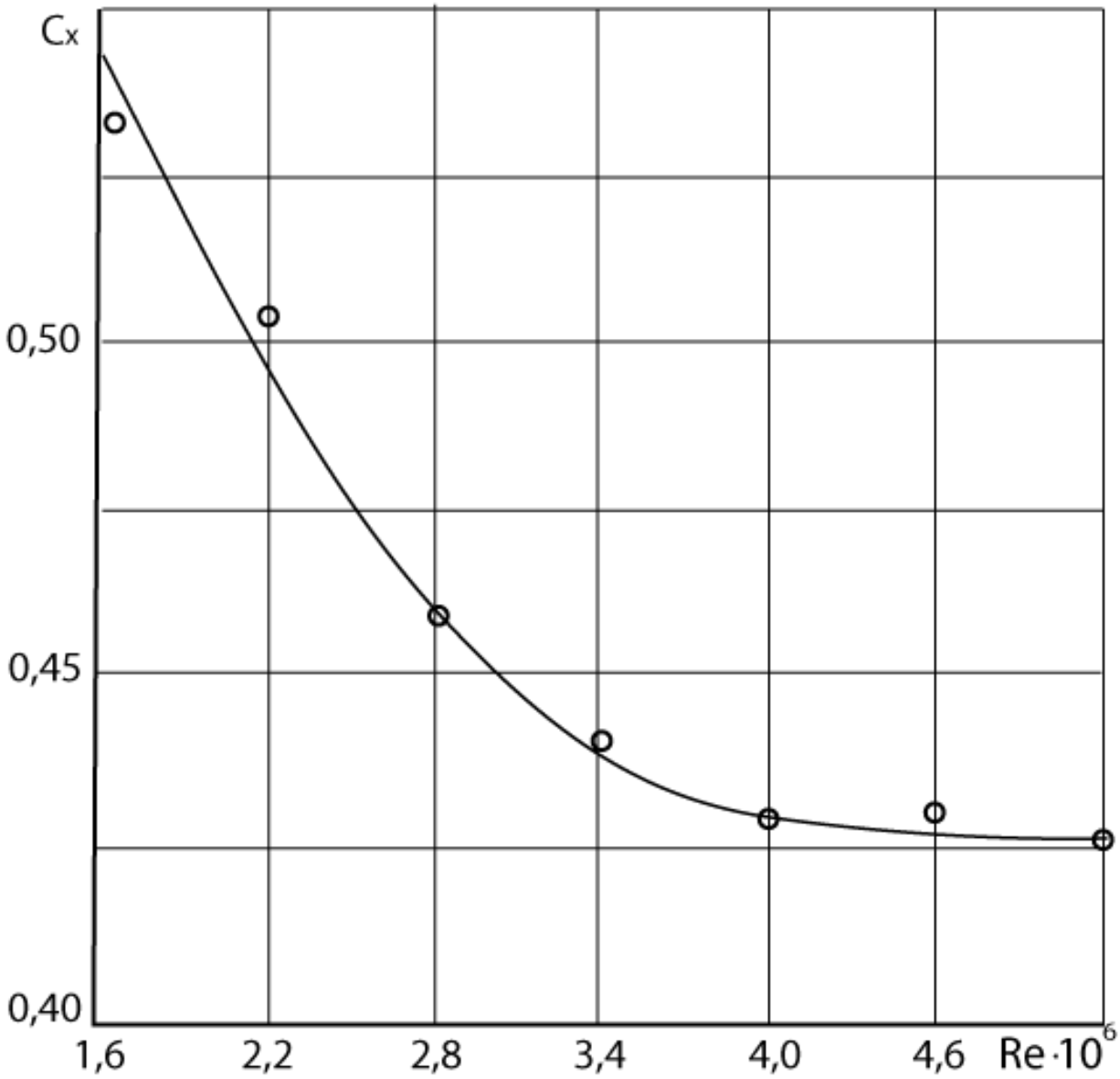


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента C_x масштабной модели легкового автопоезда с высоким прицепом от числа Рейнольдса

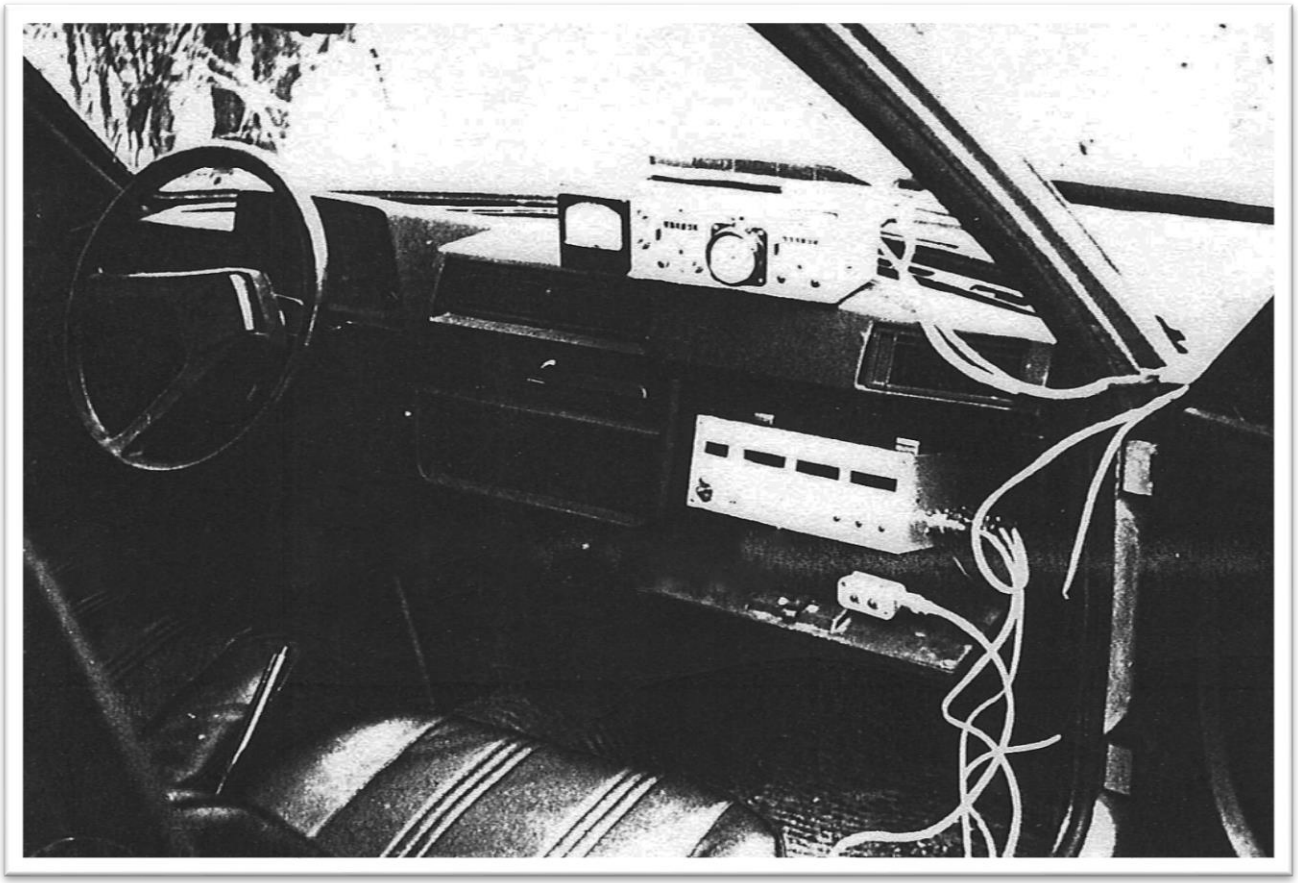


Рис. 4.8. Установка топливомера Т4П-3 конструкции ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» в салоне автомобиля-тягача легкового автопоезда

4.2. Оценка погрешности измерений в аэродинамической трубе

Испытания масштабной модели легкового автопоезда с высоким прицепом проводились в аэродинамической трубе А-6 Института Механики МГУ.

Значение коэффициента аэродинамического сопротивления $C_x^{\text{М}}$ масштабной модели автопоезда определялось по результатам ее экспериментальных исследований в аэродинамической трубе. Вначале на установленных в рабочей части трубы аэродинамической весах измерялась сила аэродинамического сопротивления модели $P_w^{\text{М}}$, составляющая:

$$P_w^{\text{М}} = 0{,}5 C_x^{\text{М}} \rho_B V_\infty^2 F_{\text{М}} \tag{4.6}$$

Затем посредством компьютера определялась величина коэффициента $C_x^{\text{М}}$ по формуле:

$$C_x^{\text{М}} = P_w^{\text{М}} / 0{,}5 \rho_B V_\infty^2 F_{\text{М}} \tag{4.7}$$

Здесь: $P_w^{\text{М}}$, $C_x^{\text{М}}$ – сила и коэффициент аэродинамического сопротивления модели;

V_∞ – скорость невозмущенного воздушного потока;

F_M – лобовая площадь (площадь «миделя») модели;

ρ_B – плотность воздуха, определяемая по формуле:

$$\rho_B = \gamma_B / q \tag{4.8}$$

где: γ_B – удельный вес воздуха; q - скоростной напор.

Относительная инструментальная погрешность определения коэффициента аэродинамического сопротивления модели автомобиля складывается из погрешности измерения силы аэродинамического сопротивления $\Delta P_w^{\text{М}}$, погрешности измерения скорости невозмущенного потока ΔV_∞, погрешности измерения давления воздуха Δp_B , погрешности измерения температуры воздуха ΔT_B, погрешности измерения лобовой площади модели ΔF_M.

Таким образом, суммарная относительная инструментальная погрешность равна:

$$\sum \delta P_w^{\text{М}} + \delta V_\infty + \delta p_B + \delta T_B + \delta F_{\text{М}}. \quad (4.9)$$

Сила аэродинамического сопротивления модели легкового автопоезда $\Delta P_w^{\text{М}}$ измерялась на аэродинамических весах рейтерного типа. Точность рейтерного устройства, замерявшего $\Delta P_w^{\text{М}}$, составляет ±0,5 Н, а диапазон его измерений при испытаниях легковых автомобилей равен 0÷30 Н.

Таким образом, относительная погрешность измерения действующей на модель автомобиля силы аэродинамического сопротивления рейтерными весами составит:

$$\delta P_w^{\text{М}} = \frac{0{,}5}{30} = 0{,}017 = 1{,}7\%. \quad (4.10)$$

Скорость натекающего на модель невозмущенного потока V_∞ определялось путем использования трубки Пито-Прандтля и спиртового микроманометра. Относительная погрешность определения скорости невозмущенного потока трубкой Пито-Прандтля составляла $\delta V_\infty^{\text{П}-\text{П}} = \pm 0{,}8\%$.

Относительная погрешность вторичного прибора – спиртового микроманометра определялась по формуле:

$$\delta \Delta p_{\text{М}-\text{М}} = \frac{\Delta P_{\text{М}-\text{М}} \cdot K}{H_{\text{М}-\text{М}} \cdot K}, \quad (4.11)$$

где: $\Delta p_{\text{М}-\text{М}}$=0,5мм – погрешность спиртового микроманометра;

$H_{\text{М–М}}$=50мм – измеряющаяся высота спиртового столба в микроманометре;

К=0,4 – коэффициент измерения.

Относительная погрешность вторичного прибора составила:

$$\delta \Delta p_{\text{М}-\text{М}} = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}4}{50 \cdot 0{,}4} = 0{,}008 = 1\%.$$

Тогда относительная погрешность измерения скоростного напора составит:

$$\delta \left(\frac{\rho_B V_\infty^2}{2g} \right) = \delta V_\infty^{\text{П}-\text{П}} + \Delta P_{\text{М}-\text{М}} = 0{,}8\% + 1\% = 1{,}8\%. \quad (4.12)$$

Давление воздуха в рабочей части аэродинамической трубы определялось спиртовым микроманометром, погрешность которого составляла: $\Delta p_{С-М}$ = 0,5мм, а высота спиртового столба: $H_{С-М}$ = 40мм. Относительная погрешность измерения давления определялась по формуле:

$$\delta p = \frac{\Delta p_{см} \cdot K}{H_{см} \cdot K}, \quad (4.13)$$

где: $\Delta p_{см}$ и $H_{см}$ – погрешность микроманометра и высота спиртового столба при испытаниях; К=0,4 – коэффициент измерения.

Относительная погрешность измерения давления воздуха спиртовым микроманометром составила:

$$\delta p = \frac{0,5 \cdot 0,4}{40 \cdot 0,4} = 0,012 = 1,2\%,$$

Температура воздуха определялась ртутным термометром, погрешность измерения которого составляла $\Delta T_В = \pm 1°$. Относительная погрешность измерения температуры воздуха $\delta T_В$ вычислялась по формуле:

$$\delta T_B = \delta T_B / (273 + T_{изм}), \quad (4.14)$$

где $T_{изм}$ = 20° – температура воздуха при испытаниях. Относительная погрешность измерения температуры воздуха составила:

$$\delta T_B = \frac{1}{273+20} = 0,003 = 0,3\%,$$

Погрешность определения лобовой площади модели $F_М$ зависит от точности измерения ее высоты $F_М$ и ширины $B_М$. Эти величины измерялись нониусной линейкой с точностью ±1мм.

Относительная погрешность определения лобовой площади модели вычислялась по формуле:

$$\delta F_М = \delta H_М + \delta \Delta B_М = 2\delta(\delta H_М + \delta \Delta B_М). \quad (4.15)$$

Здесь: $\delta H_М = \frac{1}{270} = 0,004$; $\delta \Delta B_М = \frac{1}{250} = 0,004$.

Величина $\Delta F_М$ составила:

$$\Delta F_М = 0,004 + 0,004 = 0,008.$$

Таким образом, суммарная относительная инструментальная погрешность при определении коэффициента C_x модели в аэродинамической трубе составила:

$$\sum \delta_{\text{ин}} = 1{,}7\% + 1{,}8\% + 1{,}2\% + 0{,}3\% + 0{,}8\% = 5{,}8\%$$

4.3. Объекты экспериментальных исследований

Объектом расчетных и экспериментальных исследований в аэродинамической трубе являлась масштабная (1:5) модель легкового автопоезда в составе: легкового автомобиля-тягача ГАЗ-24-10 и высокого прицепа различных конфигураций.

На рис. 2.4 была представлена схема модели легкового автопоезда с основными размерами, а также геометрическими и конструктивными параметрами, изменявшимися в процессе расчетных и экспериментальных исследований.

Масштабная модель легкового автомобиля ГАЗ-24-10 была изготовлена из дерева, модели прицепов - из пенопласта, модели лобовых обтекателей на автомобиле-тягаче были металлические. На рис. 4.9-4.11 показаны установленные в аэродинамической трубе автопоезда с высокими прицепами различной конфигурации.

В процессе испытаний в аэродинамической трубе модели легкового автопоезда последовательно менялась конфигурация ее и высокого прицепа. Это были: высокий прямоугольный прицеп (рис. 4.9); с наклоненной передней стенкой (4.10); прямоугольный прицеп с лобовым обтекателем на его передней стенке (рис. 4.11); высокий прицеп с закругленными фронтальными кромками и с лобовым обтекателем на крыше автомобиля-тягача (рис. 4.12).

Площадь миделя модели легкового автопоезда в составе автомобиля-тягача ГАЗ-24-10 и высокого прицепа в процессе всех экспериментальных исследований была равна: $F_{\text{МОД}}$=0,18м^2.

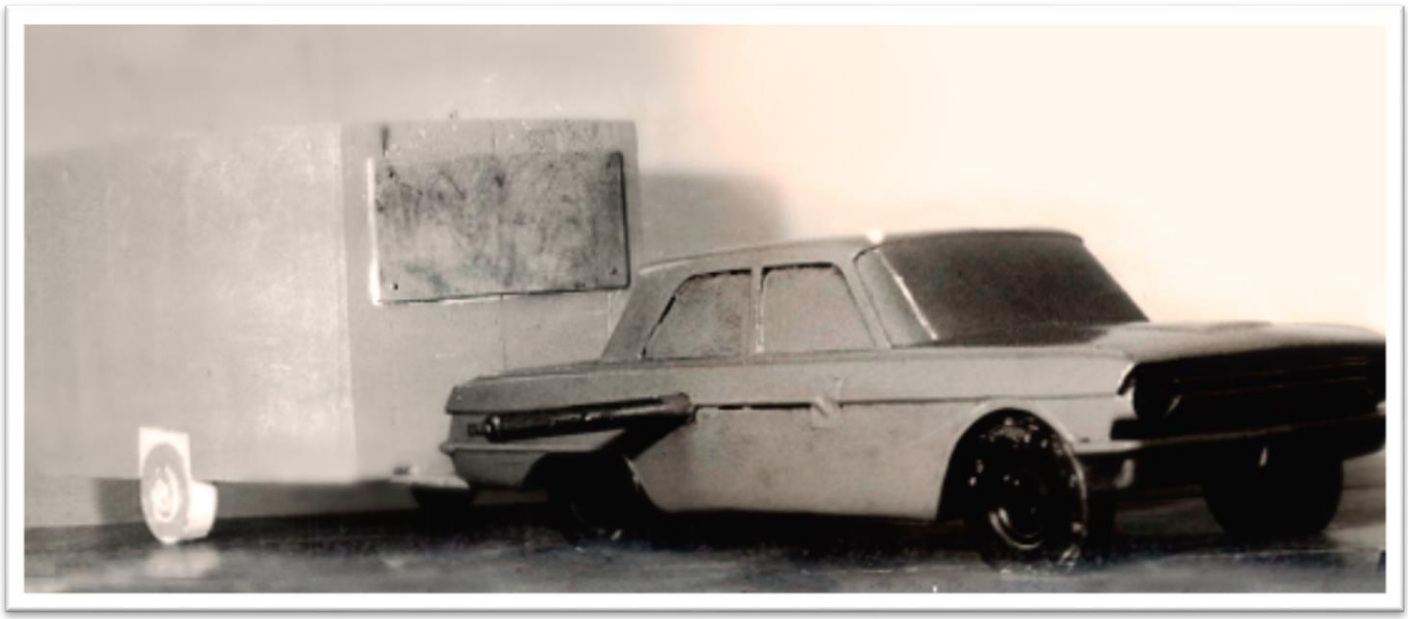


Рис. 4.9. Модель легкового автопоезда с высоким прямоугольным прицепом

Рис. 4.10. Модель легкового автопоезда с высоким прицепом с наклоненной передней стенкой и обтекателем на крыше автомобиля-тягача

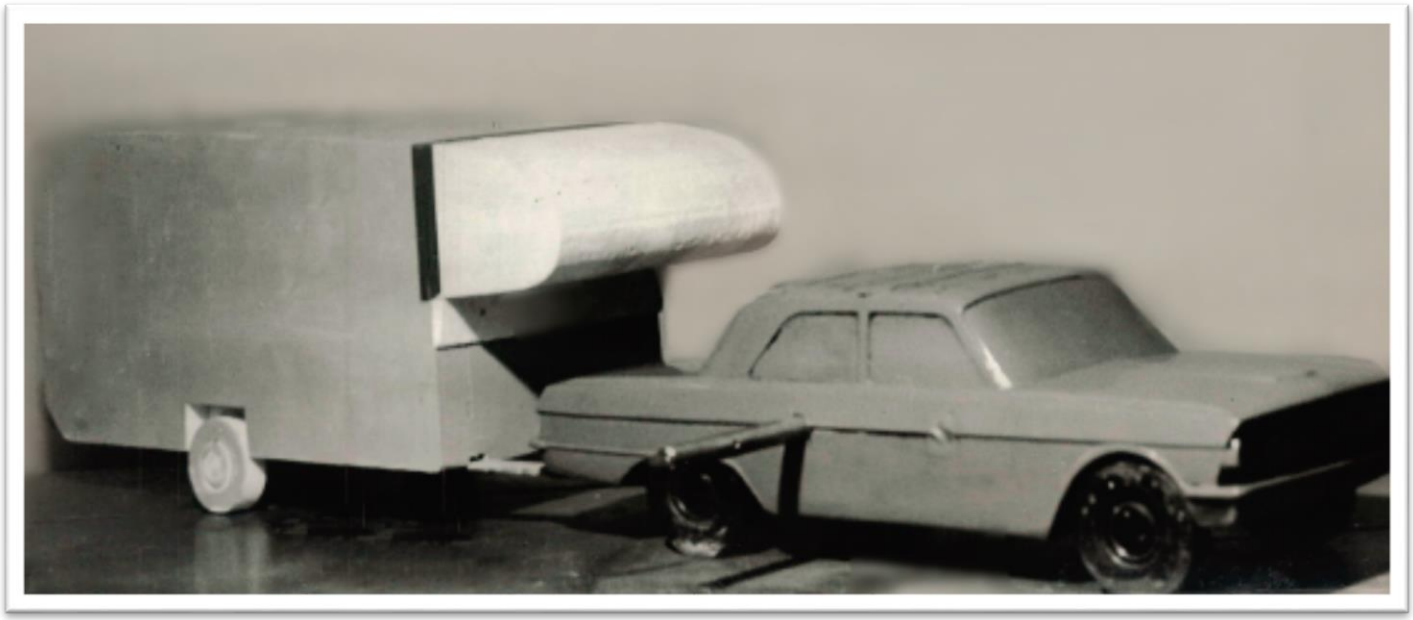


Рис. 4.11. Модель легкового автопоезда с прямоугольным высоким прицепом, оборудованным лобовым обтекателем на его передней стенке

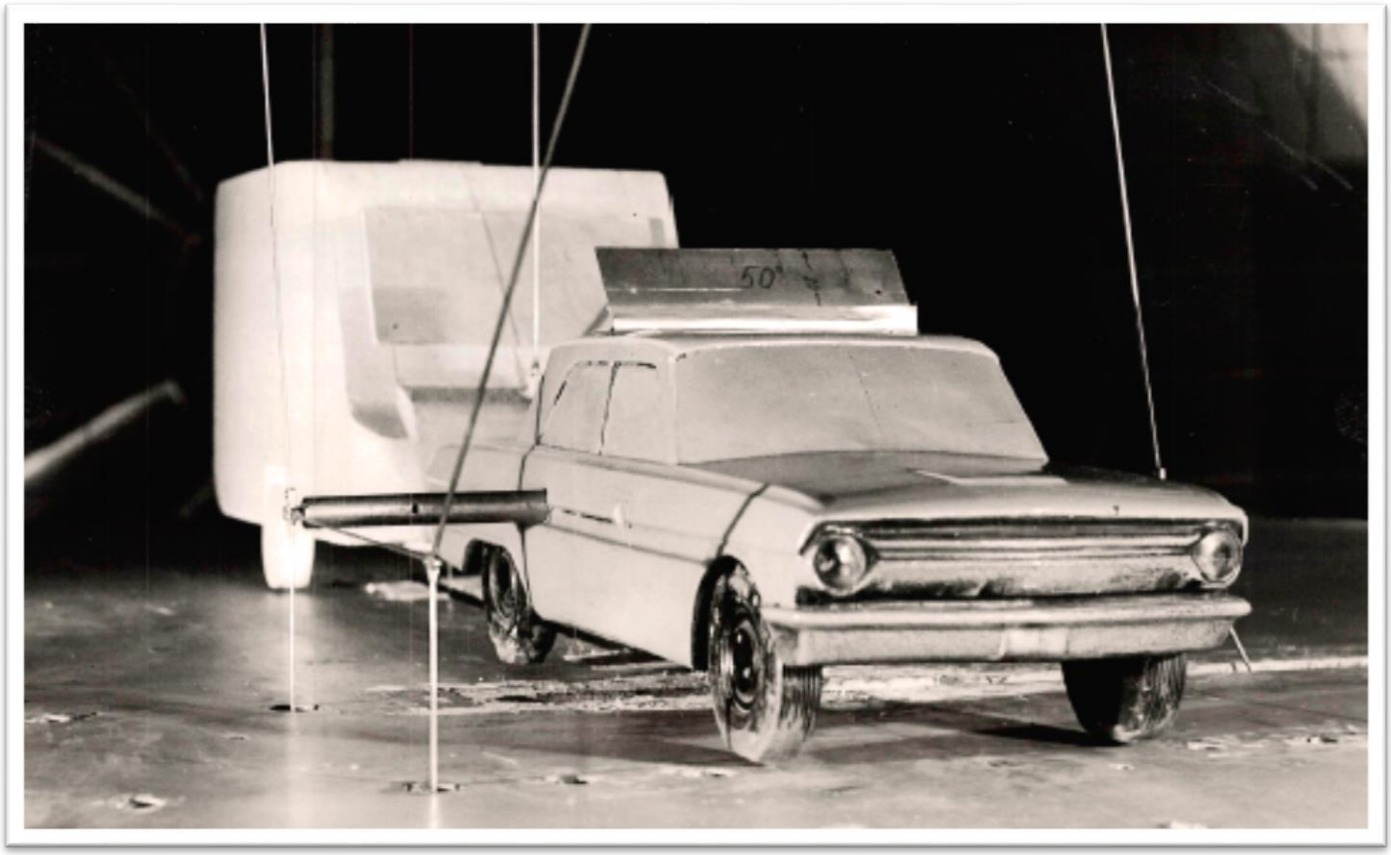


Рис. 4.12. Модель легкового автопоезда с высоким прицепом с закругленными фронтальными кромками и лобовым обтекателем на автомобиле-тягаче

В процессе испытаний в аэродинамической трубе модели легкового автопоезда последовательно менялась конфигурация ее и высокого прицепа. Это были: высокий прямоугольный прицеп (рис. 4.9); с наклоненной передней стенкой (рис. 4.10); прямоугольный прицеп с лобовым обтекателем на его передней стенке (рис. 4.11); высокий прицеп с закругленными фронтальными кромками и с лобовым обтекателем на крыше автомобиля-тягача (рис. 4.12).

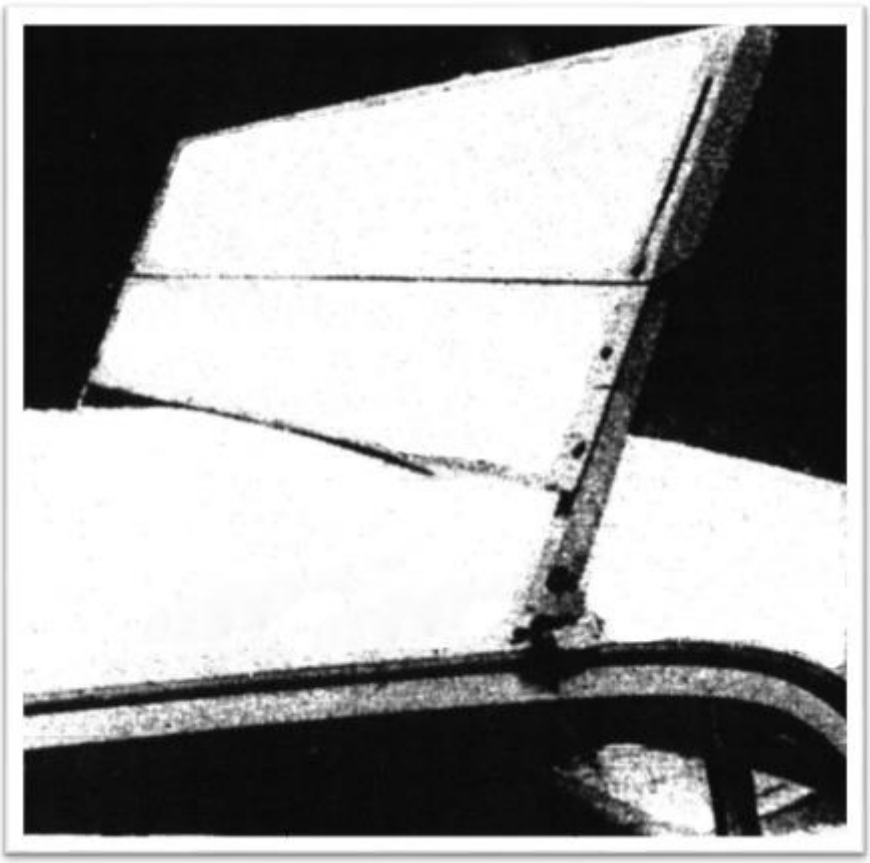
Площадь миделя модели легкового автопоезда в составе автомобиля-тягача ГАЗ-24-10 и высокого прицепа в процессе всех экспериментальных исследований была равна: $F_{МОД} = 0{,}18 м^2$.

Объектом дорожных испытаний был легковой автопоезд в составе легкового автомобиля ВАЗ и высокого прицепа «Туртранс». На рис. 4.13 показан общий вид такого легкового автопоезда с лобовым обтекателем на крыше автомобиля-тягача и конструкция обтекателя. Обтекатель был изготовлен из металла и дерева. На автомобиле-тягаче он крепился за водосточные желоба кузова, при этом имелась возможность регулирования угла наклона обтекателя и его расположения по длине крыши [150].

Следует отметить, что масштабная модель легкового автопоезда, которая испытывалась в аэродинамической трубе, была изготовлена с высоким уровнем подобия по отношению к натурному автопоезду. Чистота поверхности модели автомобиля-тягача, равно как и модели высокого прицепа, соответствовала требованиям аэродинамического эксперимента. Также тщательно были изготовлены устанавливавшиеся на модели автомобиля-тягача и высокого прицепа модели лобовых обтекателей.

Как отмечалось выше, испытания масштабной модели легкового автопоезда с высоким прицепом в аэродинамической трубе велись в зоне «автомодельности» и с малым загромождением ее рабочей части. Это обстоятельство, а также отмеченный выше высокий уровень подобия при изготовлении масштабной модели легкового автопоезда с высоким прицепом, позволяет говорить о возможности пересчета результатов модельных испытаний на натурный легковой автопоезд путем умножения их на соответствующий корреляционный коэффициент.

а)



б)

Рис. 4.13. Легковой автопоезд в составе легкового автомобиля ВАЗ, оборудованного лобовым обтекателем и высокого прицепа (а) и установка лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача(б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны мероприятия по улучшению обтекаемости легкового автопоезда путем совершенствования формы высокого прицепа и применения лобовых обтекателей, устанавливаемых на автомобиле-тягаче и прицепе.
2. Получены расчетные зависимости, связывающие коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с радиусом закругления фронтальных кромок прицепа, углом наклона его передней стенки и углом натекания воздушного потока, которые можно использовать при компьютерном проектировании обтекаемых высоких прицепов.
3. Разработан метод расчета оптимальных конструктивных и установочных параметров лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача легкового автопоезда с прицепом различной высоты.
4. По результатам исследований в аэродинамической трубе установлена возможность значительного снижения аэродинамического сопротивления легкового автопоезда путем: закругления фронтальных кромок высокого прицепа – на 35%; наклона его передней стенки и закругления верхней фронтальной кромки – на 32%; установки лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача и прицепе – на 30% и 36% соответственно; установки лобовых обтекателей на автомобиле-тягаче и прицепе – на 41%.
5. Для эффективного снижения аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с высоким прицепом рекомендуется закруглять его фронтальные кромки радиусом 200 мм, наклонять переднюю стенку на 40°.
6. Реализация указанных выше мероприятий по улучшению обтекаемости высокого прицепа позволяет снизить расход топлива легкового автопоезда при скорости 70 км/ч на 8%, 6%, 6%, 7%, 9% соответственно и увеличить его максимальную скорость на 8%.
7. Высокая эффективность применения лобовых обтекателей подтверждена результатами проведенных дорожных испытаний легкового автопоезда с обтекателем на автомобиле-тягаче: при скорости 80 км/ч расход топлива снизился на 9%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй М.: -Физматгиз. - 1960. - 290 с.
2. Агейкин Я.С., Парфенов В.Н. Влияние экрана, моделирующего дорожное полотно, на коэффициент лобового сопротивления модели автобуса. НИИ-Навтопром. - М.: 1984. -С. 29-34.
3. Агейкин Я.С., Парфенов В.Н. К вопросу численного анализа обтекания автобуса с кузовом вагонного типа воздушным потоком//Сб. «Труды ВКЭКИ автобуспрома», Львов.: 1984.-.С 78-85.
4. Атоян К.М., Возный М.Н., Гуменюк Г.Г. Аэродинамические исследования автобусов типа ЛАЗ// Научные труды ГСКБ. - Львов, 1969. - вып.1. - 57с.
5. Аэродинамика автомобиля. Пер. с англ. под ред. Э.И. Григолюка.-М: Машиностроение, 1984.-377с.
6. Аэродинамика автомобиля. Под ред. В.Г. Гухо. пер. с нем. под ред. СП. Загородникова -М.: Машиностроение, 1987.-422с.
7. Аэродинамические трубы Института Механики МГУ: Научные труды МГУ. - М.: МГУ, 1971, №14-53с.
8. Быстров Р.Р. Выбор конструктивных элементов легкового автомобиля особо малого класса по критерию комфортности воздушной среды в салоне. Диссертация канд. техн. наук. - М.: 2005.- -134с.
9. Бам-Зеликович Г.М. О критериях отрыва пограничного слоя. Известия АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа. М.: 1970, № 4.-С49-55.
10. Бартенев С.Л. Влияние аэродинамических характеристик на управляемость автомобиля. Диссертация канд. техн. наук. -М.: 1986.-194с.
11. Безверхий А.С Разработка и освоение технологии испытаний автомобилей в аэродинамической трубе Научно-исследовательского центра по испытаниям и доводке автомототехники (НИЦИАМТ). Диссертация канд. техн. наук. -М.: - 1997.-197с.

12. Белоцерковский СМ., Лифанов И.К., Ништ М.И. Исследование на ЭВМ аэродинамики автомобилей, поездов и других автотранспортных средств // Промышленная аэродинамика. -1991.-№4. -С.5-42.

13. Бернацкий В.В., Зверев И.Н., Смирнов В.А. Определение Сх автомобиляпри помощи экрана // Автомобильная промышленность. - 1991. - №6 - С.6-7.

14. Бессарабская И.Э., Перминов СМ. Применяемость уравнений Навье-Стокса в гидродинамическох задачах машиностроения// Доклады АН России. - 1995, №5 - С.618 – 622

15. Бирман Э.Т. Течения в близи плохообтекаемых тел, применительно к аэродинамике автомобиля / Труды общества инженеров-механиков США. Теоретические основы инженерных расчетов, 1980. -т. 102, №3. -С.85-87.

16. Биувейс Ф.Н., Тингер СС,Тернер Т.Р., Проблемы моделирования дороги аэродинамике автомобиля. Аэродинамика автомобиля. М.: Машиностроение, 1984.-С.88-106

17. Благоразумов В.Е. Исследование взаимосвязи формы кузова с параметрами легкового автомобиля. Диссертация канд. техн. наук. -М.: 1978. -210с.

18. Брянский Ю.А., Галустян Р.Г., Добрынин СИ. Направления развития численных методов в аэродинамических исследованиях автомобилей. // Сб. науч. тр. НАМИ. -М.: 1991. -С.69-80.

19. Буравцов А.И., Евграфов А.Н. Влияние нижнего обтекателя на аэродинамику подкопотного пространства и поддницевой зоны автомобиля // Автомобильная промышленность. -1995. -№9. -С. 19-20.

20. Виноградов Ю.С. Исследование влияния аэродинамических характеристик на эксплуатационные качества легковых автомобилей. Диссертация канд. техн. наук. -Горький. 1974. -210с.

21. Возный М.Н. Исследование аэродинамических характеристик автобусов., Диссертация канд. техн. наук, Львов: - 1974.-221с.

22. Галустян Р.Г., Кисин В.А. Аэродинамическая труба улучшает эксплуатационные показатели автомобилей // Автомобильная промышленность. -1994. -№8.-С. 15-16.

23. Галустян Р.Г., Кисин В.А., Кузьменко В.И., Кутенев В.Ф. Аэродинамические устройства легковых автомобилей // Автомобильная промышленность. -1987. -№7.-С.17-18.

24. Галустян Р.Г., Кисин В.А., Кузьменко В.И., Хорева Н.А. Снижение загряз-няемости городских автобусов//Автомобильная промышленность. - 1986. «2.С.21-22.

25. Гельфанд И.М., Глаголева Е.Г., Шноль Э.Э. Функции и графики. М.: Наука, 1971.-120с.

26. Гиневский О.Н. Теория струйных течений. М.: Наука, 1986. -265с.

27. Голубев В.В. О строении спутной зоны за плохообтекаемым телом. -Известия АН СССР, ОТН, 1954, №12.

28. Гор А.И., Михайловский Е.В., Тур Е.Я. Аэродинамические характеристики легковых автомобилей ГАЗ // Автомобильная промышленность. -1970. -№12.-С.11-14.

29. Гор А.И., Михайловский Е.В., Тур Е.Я. Определение аэродинамических характеристик масштабных моделей автомобилей в дорожных условиях // Автомобильная промышленность. -1970. -№6. -С. 11-12.

30. Горлин СМ., Слезингер И.И. Аэромеханические измерения. М.: Высшая школа.-1970.-187с.

31. Госмен А.Д. Численные методы исследования течений вязкой жидкости. М.:-Мир. 1972.-297с.

32. Гостев А.Д.. Евграфов А.Н., Высоцкий М.С. Определение коэффициента Сх по результатам модельных испытаний.//Известия НАН Беларуси, 1995, №2. - с. 46 - 47.

33. Грузинов А.Б., Иванов О.Е., Дылевская Л.В. Лобовая площадь определяется в аэродинамической трубе // Автомобильная промышленность. -1991. -№6. -С.16-17.

34. Гумелыциков Л.Н. Развитие формы кузова легкового автомобиля. - М.: НИИ-Навтопром, 1977.-31с.

35. Гутер Р.С., Овчинский В.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М.: Наука. -1970. -309с.

36. Гуммель Д.Г. Некоторые особенности механики обтекания. Аэродинамика автомобиля. М.: Машиностроение, 1987. -С. 55-91.

37. Гухо В.Г. Сопротивление воздуха при движении легкового автомобиля. Аэродинамика автомобиля. М.: Машиностроение, 1987. -С. 120-195.

38. Деркачев Д.Н., Евграфов А.Н, Романенко Г.А. Влияние спойлеров на аэродинамику автомобиля // Известия вузов. Машиностроение. -1996, №4 -6. -С. 56-59.

39. Евграфов А.Н., Медведев Е.Ф., Московкин В.В. Аэродинамическое сопротивление автомобилей и пути его снижения // Научные труды ВЗПИ. -М.: 1982. -С.74-86.

40. Евграфов А.Н., Московкин В.В., Медведев Е.Ф. Определение лобовой площади автомобиля. НИИНавтопром. -1982, №4. -С. 17-19.

41. Евграфов А.Н. Снижение аэродинамического сопротивления автотранспортных средств -резерв экономии топлива // Автомобильная промышленность. -1983, №4. -С. 18-19.

42. Евграфов А.Н., Мамедов В.А. Пути улучшения аэродинамики легковых автомобилей.// Автомобильная промышленность.- 1985, №3.- С.12-14.

43. Евграфов А.Н., Коровин И.А., Романенко Г.А.Снижение аэродинамического сопротивления мототранспортных средств М.: Известия вузов.Машиностроение. - 1985,№1. - С.87- 91.

44. Евграфов А.Н.,Буравцов А.И., Мамедов В.А. Снижение аэродинамических потерь в подкапотном пространстве и поддницевой зоне легкового автомобиля//Совершенствование технико-экономических показателей автомобильной техники. М: НАМИ. - 198. С.98-101

45. Евграфов А.Н., Хубаев Б.Г. Совершенствование аэродинамических качеств автомобилей и автопоездов. М.: НИИНАВТОПРОМ.- 1987 - 62 с.

46. Евграфов А.Н., Московский В.В., Романенко Г.А. и др. Взаимосвязь результатов модельных и натурных аэродинамических испытаний автомобилей и автопоездов // Межвузовский сборник. ЭВМ в исследованиях АТС. -М.: Труды МИП. - 1988. -С. 74-78.

47. Евграфов А.Н. Аэродинамическое сопротивление автомобильного колеса // Межвузовский сборник научных трудов. Повышение экологичности и экономичности автомобиля: Труды МАСИ. -М.: 1990. -С. 143-147.

48. Евграфов А.Н., Папашев О.Х., Гальчинский И.В. и др. Аэродинамическое проектирование АТС // Автомобильная промышленность. -1991, №6. - С. 14-16.

49. Евграфов А.Н., Буравцов А.И., Романенко Г.А. и др. Устройство для снижения аэродинамического сопротивления транспортного средства / Патент РФ № 1743971. - Б.И. № 24, 1992.

50. Евграфов А.Н., Буравцов А.И., Папашев О.Х. и др. Устройство для снижения аэродинамического сопротивления. / Патент РФ № 1759716. - Б.И. № 33, 1992.

51. Евграфов А.Н., Высоцкий М.С. Влияние факторов масштабного моделирования на коэффициент аэродинамического сопротивления // Известия НАН Беларуси. -Минск: 1993, №1. -С. 33-36.

52. Евграфов А.Н., Романенко Г.А., Оберемок В.З. и др. Способ определения аэродинамического сопротивления моделей и макетов транспортных средств / Патент РФ № 1789902. - Б.И. №3, 1993.

53. Евграфов А.Н., Романенко Г.А., Оберемок В.З. Метод определения аэродинамического сопротивления моделей и макетов АТС// Известия вузов. Ма-шиностоение. -1996, №1-3.- С.60-62

54. Евграфов А.Н., Романенко Г.А., Шведов С.Н. Влияние формы кузова на аэродинамическое сопротивление автобуса // Известия вузов. Машиностроение. 1998, №1-3.-С.81-83

55. Евграфов А.Н., Аксенов А.М., Романенко Г.А. Совершенствование аэродинамики легкового поезда //Сб. науч. тр. ПЩ РФ НАМИ, М.: 1998. -С. 148-152.

56. Евграфов А.Н., Абдулкадыров М.В., Петренко СИ. Загрязняемость автотранспортных средств и ее влияние на безопасность и экологию // Сб. науч. трудов МГИУ. - М.: - МГИУ. -1998. -С.152-154.

57. Евграфов А.Н., Высоцкий М.С., Ильин Е.В. Улучшение обтекаемости под-днищевой зоны автомобиля. Мн.: Доклады Национальной Академии Наук Беларуси -1998, т.42, №5.-С. 112-116.

58. Евграфов А.Н., Ильин Е.В. Аэродинамика поддницевой зоны легкового автомобиля. //Сб. науч. трудов МЕИУ, М.: 1999. -С. 199-202.

59. Евграфов А.Н., Ильин Е.В., Поливода А.П. Выбор параметров нижнего обтекателя днища автомобиля // Сб. науч. трудов МГИУ, М.: 2000.-С. 194-197.

60. Евграфов А.Н., Высоцкий М.С. Аэродинамика колесного транспорта. Мн.: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2001-368С.

61. Евграфов А.Н., Переверзев СБ. Совершенствование аэродинамики пассажирских автомобилей. Мн.: Доклады Национальной Академии Наук Беларуси-2003, т. 55, №1,-С. 123-127.

62. Евграфов А.Н., Переверзев СБ. Улучшение обтекаемости автомобиля путем совершенствования параметров кузова // Сб.науч.трудов МАДИ (ГТУ), М.: 2005-С 39-46.

63. Евграфов А.Н., Переверзев СБ. Влияние аэродинамики колесного транспорта на экологию окружающей среды. // Тезисы докладов 2 го Международного автомобильного научного форума (МАНФ-2004), г.Москва, ГНЦ РФ «НАМИ», 2004г.

64. Евграфов А.Н., Кутяев А.В., Переверзев С.Б. Взаимосвязь коэффициента C_x с параметрами автомобильного кузова //Сб. науч.тр. МГИУ. -М.: 2004-С 93-98.

65. Евграфов А.Н., Кутяев А.В. Методика учета влияния загромождения рабочей части трубы на аэродинамическое сопротивление автомобиля. М.: Известия МГИУ. Машиностроение, 2006, №1. с. 70-73.
66. Евграфов А.Н. Методика переноса результатов модельных испытаний на натурный автомобиль. М: Известия МГИУ. Машиностроение, 2006,№3, -с.56-58.
67. Евграфов А.Н. Аэродинамика автомобиля. - М.: МГИУ / 2010. - 356 с.
68. Ежов А.Н., Евграфов А.Н. Типы кузовов легковых автомобилей // Межвуз. сб. науч. тр. М.: МГИУ, 2001. -С. 54-59.
69. Ерсак В.И., Евграфов А.Н., Гостев К.А. Форма капота и обтекаемость автомобиля // Автомобильная промышленность. -1996, №4. -С. 21-22.
70. Загородников С.П. Моделирование поверхности дороги // Известия вузов. Машиностроение. - 1980. №6. -С. 74-78.
71. Загородников СП. Исследование влияния некоторых геометрических параметров кузова на аэродинамику автомобиля. Диссертация канд. техн. наук. М.:-1981.-228 с.
72. Ильин Е.В., Евграфов А.Н. Влияние формы и шероховатости днища автомобиля на структуру пограничного слоя. М.: Сб. науч. трудов МГИУ, 2001. -С.90-93.
73. Ильин Е.В., Евграфов А.Н. Совершенствование обтекаемости поддницевой зоны автомобиля // ААИ России. М.: 2003.-№1 .-С.25-27.
74. Ильин Е.В. Влияние установочных параметров кузова на обтекаемость автомобиля. М.: Сб. науч. трудов МГИУ, 2002. - с. 196-198.
75. Ильин Е.В. Совершенствование аэродинамики поддницевой зоны легкового автомобиля. Диссертация канд. техн. наук. -М., 2003.-182с.
76. Капустин А.А. Оценка аэродинамических характеристик скоростных автомобилей. Диссертация канд. техн. наук. -М.: 1983. -210с.
77. Ковалевский Д.В., Евграфов А.Н., Лукасевич А.М. Влияние некоторых параметров кузова на Сх автомобиля // Сб. науч. тр. МГИУ. -М.: 1997. -С. 39-40.
78. Ковалевский Д.В., Евграфов А.Н. Алгоритм формообразования автомобильного кузова // Сб. науч. тр. МГИУ. -М.: 1997. -С. 54-55

79. Королев Е.В. Оценка и прогнозирование аэродинамических качеств легковых автомобилей на основе испытаний их масштабных моделей в аэродинамических трубах. Диссертация канд. техн. наук. -М.: 1989. -195 с.

80. Королев Е.В., Демидовцев М.В. Выбор геометрических параметров формы масштабных моделей легкового автомобиля. Г.: Труды ГСХИ. -1980. -Т.146.-С. 104-108.

81. Королев Е.В., Тур Е.Я. Форма автомобиля и аэродинамическое сопротивление. Им.: Международный сборник научных трудов. -1981. -С. 129-132

82. Королев Е.В., Тур Е.Я. Об аэродинамике легкового автомобиля // Автомобильная промышленность. -1981. №1-С.38-39

83. Королев Е.В., Михайловский Е.В., Тур Е.Я. Аэродинамические показатели некоторых отечественных автомобилей. Г.: Труды ГСХИ. -1976.-т.81-С.106-109.

84. Королев Е.В. Прогнозирование аэродинамических качеств автомобилей малого класса / Улучшение эксплуатационных качеств автомобилей. Г.:Сб. науч. трудов ГСХИ, 1986. -с.72-74.

85. Королев Е.В.,Жерехов В.В. К методике испытаний масштабных моделей автомобилей в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью. Г.: Сб. науч. трудов ГСХИ. 1986. С. 35-39.

86. Королев Е.В.,Тур Е.Я. Определение соотношений аэродинамического со-противлениления легковых автомобилей. Г.: Сб. науч. тродов ГСХИ, 1986.- с.72-74.

87. Костин И.М. Методы обеспечения конкурентоспособности грузовых автомобилей на этапе разработки. Диссертация канд. техн. наук. - Н.Ч 2002 -162с.

88. Котляревский В.А., Зинченко Ж.Ф., Олефир А.И., Тимохин В.И. Аэродинамические характеристики автомобилей // Автомобильная промышленность. -1980, №7.-С. 17-20.

89. Краснов Н.Ф. Прикладная аэродинамика М.: Высшая школа, 1974-731с.

90. Кузин А.С., Пироженко В.В. Чарыкков А.А. Оценка Места расположения воздухозаборника автомобильного двигателя. НИИНАВТОПРОМ. ЭИ Конструкции автомобилей. -1982, №8. _ С.29 - 34.

91. Кульмухамедов Д.Р. Исследование и оценка аэродинамических характеристик легковых автомобилей. Диссртация канд. техн. наук, - М.: 1979.- 248с.

92. Кульмухамедов Д.Р., Шухман СБ., Хикматов Р.С. Аэродинамические характеристики подкапотного пространства автомобилей в условиях жаркого климата // Известие вузов. Машиностроение. -1989, №5. - С.81-84.

93. Кулышна И.Э., Перминов СМ. Численное моделирование трехмерного обтекания автомобиля // Моделирование в механике. - 1993, №1.- С. 98-112

94. .Кульпина Н.Э., Перминов СМ., Писковский В.О., Соколов А.Г. Численное моделирование процесса обтекания автомобиля // Математическое моделирование. -1994, №1.- С.54-68.

95. Купцов С.С. О машинном проектировании формы автомобиля, отвечающей требованиям аэродинамики // Труды НАМИ. - М.: 1979, вып. 174. - С. 24-28.

96. Кутяев А.В., Влияние аэродинамики на формообразование кузова при проектировании автомобиля. Диссертация канд. техн. наук. -М 2009.-195

97. Лимонад СП., Бартенев С.Л., Петрушов В.А. Автомобиль в аэродинамической трубе и на дороге // Автомобильная промышленность. -1990, №7.-С 17-19.

98. Лойцанский Л.Г. Механика жидкости и газа: -М.: Наука, 1970.-280с.

99. Маркова Е.В., Адлер Ю.П., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных исследований. -М.: Наука, 1986.-280с.

100. Математические матоды планирования эксперимента / Под ред. Пепенко В.В.- Новосибирск: Наука. -1981. -240с.

101. Михайловский Е.В. Аэродинамика автомобиля. М.: Машиностроение, 1973.-223с.

102. Моделирование аэродинамических характеристик автомобиля // Автомобильная промышленность США. -1996. -№4-5. -С. 12-14.

103. Носаков И.В. Оценка свойств и особенностей конструкции легкового автомобиля на стадии проектирования с учетом его конкурентоспособности. Диссертация канд. техн. наук, М,1999. - 191с.

104. Олефир А.И. Влияние аэродинамических потерь, обусловленных внешними формами автопоезда, на его сопротивление движению. Диссертация канд. техн. наук, - К.: 1986, - 217 с.

105. Палутин Ю.И. Методические основы совершенствования параметров воздушной среды салонов автомобилей. Диссертация докт. техн. наук. -М., 1998.-375 с.

106. Парфенов В.Н. Разработка методов расчета аэродинамического сопротивления движению и воздухообмена в салоне автобуса с кузовом вагонного типа. Диссертация канд. техн. наук. - М., 1984, - 237 с.

107. Пенкхерст Р., Холдер Д. Техника эксперимента в аэродинамических трубах. М.:-ИЛ. - 1995.-300 с.

108. Переверзев СБ. Улучшение обтекаемоти легкового автомобиля путем совершенствования параметров кузова. Диссертация канд. техн. наук, М.: - 2005. -185с,

109. Петров Г.И., Штейнберг Р.Н. Исследование потока за плохообтекаемым телом // Труды ЦАГИ. -1940. -вып. 482. -С. 15-19.

110. Петрушов В.А. Новый метод определения сопротивления движению автомобиля. //Автомобильный транспорт. -1982, №11. - С.12-17.

111. Петрушов В.А. Решение задачи интегрирования затухающего движения автомобиля в переменных "путь - время" ее практическое приложение // Труды НАМИ. - М: 1986. - С. 15-25.

112. Петрушов В.А. О поправках к Сх при масштабном моделировании// автомобильная промышленность - 1990.№7 - с. 16 – 17

113. Петрушов В.А. Оценка аэродинамических качеств и сопротивлений качению автомобиля в дорожных условиях. // Автомобильная промышлен-ность. -1985, №11. -С. 14-19.

114. Petrushov V.A. Coast Down Method in Time - Distance Variables. SAE - №970408.-1997.

115. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. М. -Л.: Наука, 1965.-310с.

116. Постоловский С.Н., Ильичев К.П. О ламинарном отрыве потока мало вязкой жидкости // Известия вузов. Машиностроение. - 1992, №1-3. - С 50-54.

117. Прандтль Л. Гидроаэродинамика. М.: ЗИЛ, 1951. - 495с.

118. Прохоров Ю.В., Розанов Ю.А. Теория вероятностей. М.: Наука 1973-495с.

119. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.: Наука - 1966.-448с.

120. Скуда Д.В. Разрабока методов дизайн - проектирования легковыхавто-мобилей. Диссертация канд. техн. наук. Иж.: - 2005.-210с.

121. Смирнов В.А., Бартенев С.Л., Балашов В.В. и др. Исследование распределения давления воздуха по поверхности кузова движущегося автомобиля // Межвузовский сборник научных трудов. Безопасность и надежность автомобиля. - М.: МАМИ. Вып. 9. - 1981. - С.87-92.

122. Смирнов В.А. Метод определения аэродинамического сопротивления автомобиля в дорожных условиях. Диссертация канд. техн. наук М.: -1983 - 240с.

123. Токарев А.А. Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля: - М.: Машиностроение. -1982.- 224с.

124. Тур Е.Я. Аэродинамические испытания моделей автомобилей на стадии разработки формы кузова // Сб. научн. трудов Нижегородского сельскохозяйственного института. - Н. Новгород. -1993. - С. 37-42.

125. Тур Е.Я. Определение реакций от аэродинамических сил и моментов на передний и задний мосты автомобилей // Труды ГСХИ, т. 155. - Г: 1981. - С.44-48.

126. Тур Е.Я. Сравнительная оценка методов дорожных испытаний автомобилей по определению коэффициента сопротивления воздуха // Труды ГСХИ, т. 30. - Г: 1964. - С. 37-42.

127. Тур Е.Я. Исследование аэродинамических характеристик автомобилей. Диссертация канд. техн. наук, - Г., 1969.-215 с.

128. Узбеков Ф.М. Оптимизация геометрических параметров кузова автомобиля по аэродинамическим характеристикам. Диссертация канд. техн. наук., -М., 1984-225 с.

129. Федяевский К.К., Блимина Л.Х. Гидроаэродинамика отрывного обтекания тел. М.: Машиностроение. -1977. - 305 с.

130. Фиттерман Б.М., Литвинов А.С., Рубинштейн Э.А., Коровкин И.А. Исследование аэродинамической устойчивости легковых автомобилей // Труды МАДИ. - М.: 1975, вып. 101. -С. 46-51.

131. Чжен П. Отрывные течения. Т 1. -М.: -Мир. - 1972. -352с.

132. Чумаков О.И. Влияние конструкции нижней части автомобиля на его аэродинамические свойства: Труды ГСХИ, т.71. - Г: 1975. - С. 129-133.

133. Чумаков О.И. Исследование зависимости аэродинамических свойств легкового автомобиля от его конструкции. Диссертация канд. техн. наук, - Г., ГСХИ, 1975.-239с.

134. Хмельницкий Э.Е. проблемы подачи охлждающего двигательвоздуха и аэродинамика автомобиля// Автомобильная промышленность. 1984,№4.-С.17-19.

135. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука. -1969. - 517 с.

136. Шурыгин В.М. Аэродинамика тел, обтекаемых воздушными струями М.: Машиностроение. - 1997 - 323 с.

137. Яковлев К.П. Математическая обработка результатов измерений: Л.: Госиздат технико-теоретической литературы. -1950. -170 с.

138. Aerodinamic drag mechnisms of bluff bodiers and vehicles: Plenum press/ New York - London. -1978. - 357 p.p.

139. Aerodynamics of Road Vehicles // edited by Wolf-Heinrich Hucho.: Copy-rigth.-USA.-1998.-918 p.

140. Ahmed S.R. Hucho W.H. The calculation of the flow field past a van with aid of a panel method/- "SAE Prepr", 1977, №770390, 21 p.p.

141. Bocoman W.D. Generalizations on the aerodynamic characteristics of Sedan Type of automobile Bodies. -" Society of automotive engineers" 1966, June 6-10, №660389, 1-16 p.p.

142. Carr G.W. Wind Tunnel Blockage Correction for Road Vehicles. - MIRA Report №1271/4.

143. Dominy R.G. A technique for the investigation of the tramsient aerodynamic forces and vehicles in cross winds." Proc. Inst. Mech. Eng. D.", 1991; 205, №4, 245-250 p.p.

144. Duell E.G., George A.E. Unsteady wake flows of ground vehicle bodies. "10th AIAA Appl. Aerodyn. Conf., Palo Alto, Calif., June 22-24, 1992 : Collect. Techn. Pap. Pt.l. "Washington (D.C.), 1992, 384-390 p.p.

145. Eaker G.W. Wind Tunnel - to -Road Aerodynamic Drag Correlation. SAE. - №880250.-1988.

146. Gohring E. Basic comments of the aerodynamics of arodern commercial vehicles. Jng. Automob. -1991. - №663. - 70-76 p.p.

147. Hucho Wolf-Heinrich, Sovran Gino. Aerodynamics of road vehicles. "Annu. Rev. Fluid Mech. Vol.25.", Palo Alto (Calif.), 1992. 485-537 p.p.

148. Impact of Aerodynamics on vehicle Design.: Underscience Enterprises Ltd. - UK.. Copyright. -1983. -456p.

149. Katz J, Dukstra L. Effect of passenger car's rear back geometry on its aero dynamic coefficients. "Trans. ASME J. Fluids Eng.", 1992; 114, №2, p.p. 186-190.

150. Klingbeil K. Der Einflus von Luftleitemrichtungen auf den Luftwiderstand und den Kraftstoffverbrauch von Guterkraftwagen. "Kraftfahrzeugtecknik", 1983. №10, 302-303.

151. Kobayashi T., Kitoh K. Cross-wind effect and the dynamics of light cars: Impact of Aerodynamics on Vehicle Design. -1983. - pp. 142-157.

152. Korst H.H., White R.A. Coast down Tests: Determining Road Loads Versus Drag Component Evaluation. SAE. - №901767. -1990.

153. Kuhlmann A. Auto und Verkehz bis 2000. Springer Verlag - TUV Rheinland, Kohln, 1984.

154. Losito V., Nicola C, Albertoni S, Berta S. Numerical solutions of potential and viscous flows around road vehicles: Impact of Aerodynamics on Vehicle Design.-1983.-pp. 429-440.

155. Maeda Kazuhiro at al. Analysis of air flow behavior around a vehicle to improve vehicle aerodynamics. "JSAE Rev.", 1990; 11, №1,18-23 p.p.

156. Marcatos N.G. The theoretical prediction of external aerodynamics on Vehicle Design.-1983.-pp. 387-400.

157. Mets L.D. An improved Technique for theoretically determing the lift distribution on air automobile. - "Trans. ASME", 1973, B 95, №1, 275-279 p.p.

158. Moranne M.P. Systeme de vefroidissement et consommation des Vehicules automobiles. "Ingenieurs de Lautomobile", -1982. №7. - S. 37-39

159. Morreli L., Fieravanti F., Cogotti A. Sulle forme della carrozeria di minima resisten za aerodinamica. -"ATA", 1976, №2, p.p.468-476.

160. Aerodinamic drag mechnisms of bluff bodiers and vehicles: Plenum press/ New York - London. -1978. - 357 p.p.

161. Aerodynamics of Road Vehicles // edited by Wolf-Heinrich Hucho.: Copyrigth. -USA.-1998.-918 p.

162. Ahmed S.R. Hucho W.H. The calculation of the flow field past a van with aid of a panel method/- "SAE Prepr", 1977, №770390, 21 p.p.

163. Bocoman W.D. Generalizations on the aerodynamic characteristics of Sedan Type of automobile Bodies. - "Society of automotive engineers" 1966, June 6-10, №660389, 1-16 p.p.

164. Carr G.W. Wind Tunnel Blockage Correction for Road Vehicles. -MIRA Report №1271/4.

165. Dominy R.G. A technique for the investigation of the trainsient aerodynamic forces and vehicles in cross winds." Proc. Inst. Mech. Eng. D.", 1991; 205, №4, 245-250

166. Duell E.G., George A.E. Unsteady wake flows of ground vehicle bodies. "10th AIAA Appl. Aerodyn. Conf, Palo Alto, Calif, June 22-24, 1992 : Collect. Techn. Pap. Pt.1. "Washington (D.C.), 1992, 384-390 p.p.

167. Eaker G.W. Wind Tunnel - to -Road Aerodynamic Drag Correlation. SAE.-№880250.-1988.

168. Gohring E. Basic comments of the aerodynamics of arodern commercial vehicles. Jng. Automob. -1991. - №663. - 70-76 p.p.

169. Hucho Wolf-Heinrich, Sovran Gino. Aerodynamics of road vehicles. "Annu. Rev. Fluid Mech. Vol.25.", Palo Alto (Calif), 1992. 485-537 p.p.

170. Impact od Aerodynamics on vehicle Design.: Underscience Enterprises Ltd. - UK.. Copyright. -1983. -456p.

171. Katz J., Dukstra L. Effect of passenger car's rear back geometry on its aerodynamic coefficients. "Trans. ASME J. Fluids Eng.", 1992; 114, №2, p.p. 186-190.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛОБОВЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛОБОВЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ НА ЛЕГКОВОМ АВТОПОЕЗДЕ

Экономический эффект достигается за счет снижения расхода топлива легкового автопоезда путем уменьшения его аэродинамического сопротивления при установке лобовых обтекателей на тягаче и прицепе.

Исходные данные для проведения расчета следующие. Легковой автопоезд в составе автомобиля-тягача ВАЗ и серийного высокого прицепа «ТурТранс». Полная масса автопоезда равна 1250 кг. Расход топлива при движении со скоростью 70 км/ч по бетонному шоссе составляет 12л/100км.

При установке лобовых обтекателей на тягаче и прицепе расход топлива снижается на 9 %. Таким образом экономия топлива у легкового автопоезда ВАЗ + «ТурТранс» при V_a=70 км/ч от установки лобовых обтекателей составит:

$$\Delta Q_{\text{в}} = 18 * 0{,}09 = 1{,}62 \text{ л}/100\text{км}$$

Принимаем, что годовой пробег легкового автопоезда с лобовыми обтекателями на тягаче и прицепе со скоростью 70км/ч составит 10 тыс. км. Тогда за 1 год экономия топлива составит:

$$\Delta Q_s^{\text{год}} = 1{,}62 * (\frac{10000}{100}) = 162 \text{ л}$$

В рублевом эквиваленте при цене бензина 40 руб./л экономия топлива за 1 год составит:

$$\text{Э}^{\text{год}} = 40 * 162 \approx 6{,}5 \text{ тыс. руб.}$$

Поскольку стоимость лобовых обтекателей составляет около 30 тыс. руб., а годовой эффект в рублях от их применения составляет 6,5 тыс. рублей, то они окупятся через четыре с половиной года.

Для парка легковых автопоездов с лобовыми обтекателями в количестве 1000 шт. годовая экономия топлива составит: 162 000 л, что в рублевом эквиваленте при цене бензина 40 руб./л составит 6,5 млн. рублей.

Таким образом, как показали результаты технико-экономического расчета, можно рекомендовать применение легковых обтекателей как эффективное средство снижения расхода топлива легковых автопоездов с высокими прицепами.

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

Акт внедрения

Полученные в диссертации Шведова С.Б. «Совершенствование аэродинамики легкового автопоезда с высоким прицепом» результаты и разработанные рекомендации по улучшению его обтекаемости используются ООО «МАЗ-Купава» при проектировании перспективных прицепов.

Представляют практический интерес приведенные в диссертации математические зависимости, связывающие коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с радиусом закругления фронтальных кромок высокого прицепа, а также метод расчета оптимальных конструктивных и установочных параметров разработанного для улучшения обтекаемости высокого прицепа лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача легкового автопоезда.

Заместитель главного инженера-
начальник технического отдела П.Е. Сергеев
«09» июля 2010 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Диссертация Шведова С.Б. «Совершенствование аэродинамики легкового автопоезда с высоким прицепом» представляет научный и практический интерес. Полученные в работе математические зависимости могут использоваться при отработке формы перспективных высоких прицепов путем закругления их фронтальных кромок и наклона передних стенок.

Разработанные в диссертации лобовые обтекатели, устанавливаемые на автомобиле-тягаче и высоком прицепе, могут применяться при тюнинге высоких прицепов в направлении улучшения их обтекаемости и снижения аэродинамического сопротивления, а также расхода топлива легковых автопоездов.

Приведенные в диссертации С.Б. Шведова материалы и разработки используются в учебном процессе на кафедре «Автомобили» БНТУ.

Декан автотракторного факультета
Белорусского национального
технического университета,
доктор технических наук, доцент А.Г. Баханович

Заведующий кафедрой «Автомобили»
Белорусского национального
технического университета,
доктор технических наук, профессор О.С. Руктешель

«12» ноября 2014 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Приведенные в диссертации Шведова С.Б. «Совершенствование аэродинамики легкового автопоезда с высоким прицепом» результаты теоретических и экспериментальных исследований представляют научный и практический интерес. Полученные математические зависимости, связывающие коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автопоезда с радиусом закругления фронтальных кромок высокого прицепа и углом наклона его передней стенки, могут использоваться при проектировании обтекаемых высоких прицепов.

Разработанный метод расчета оптимальных конструктивных и установочных параметров лобового обтекателя на крыше автомобиля-тягача для улучшения обтекаемости высокого прицепа, а также рекомендации по его углу наклона могут быть использованы при тюнинге легковых автопоездов для снижения их аэродинамического сопротивления и расхода топлива.

Генеральный директор
ООО «ЛИНКС АВТО»,
кандидат технических наук **С.Б. Переверзев**
«21» ноября 2011 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

В диссертации Шведова С.Б. «Совершенствование аэродинамики легкового автопоезда с высоким прицепом» разработана теория обтекания легкового автопоезда, получены расчетные формулы для оптимизации формы прицепа. Проведены экспериментальные исследования масштабной модели легкового автопоезда в аэродинамической трубе и его натурного образца на дороге.

Предлагаемые в диссертационной работе конструктивные мероприятия для улучшения обтекаемости высокого прицепа и легкового автопоезда в целом могут использоваться дизайнерами при отработке формы перспективных обтекаемых высоких прицепов.

Рекомендуемые для улучшения обтекаемости высоких прицепов лобовые обтекатели могут применяться в процессе тюнинга легковых автопоездов, что позволит снизить их аэродинамическое сопротивление и расход топлива.

Генеральный директор
ООО «Дизайн АРТ АП»,
кандидат технических наук А.В. Кутяев
17.12.2014 г.