

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Оренбургский государственный университет»

Кафедра автомобильного транспорта

А.А. Архирейский

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ АВТОМОБИЛЯ МЕТОДОМ ВЫБЕГА

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программе высшего образования по направлению подготовки 23.03.01 Технология транспортных процессов

Оренбург
2016

УДК 629.33(076.5)
ББК 39.33я7

А87

Рецензент – доцент, кандидат технических наук А.Н. Мельников

Архирейский А.А.

А87

Определение параметров сопротивления движению автомобиля методом выбега: методические указания /А.А. Архирейский. – Оренбургский гос. ун-т. - Оренбург: ОГУ, 2016. – 35 с.

Методические указания к выполнению лабораторных работ предназначены для студентов, обучающихся по программе высшего образования по направлению подготовки 23.03.01 Технология транспортных процессов при изучении дисциплины «Техника транспорта, обслуживание и ремонт»

УДК 629.33(076.5)
ББК 39.33я7
© Архирейский А.А., 2016
© ОГУ 2016

Содержание

Введение	4
1 Способы определения сопротивления движению автомобиля.....	5
1.1 Основные экспериментальные способы определения параметров сопротивления движению автомобиля	5
1.2 Выбор метода определения параметров сопротивления движению для проведения лабораторной работы	9
2 Анализ метода выбега	15
2.1 Общие сведения.....	15
2.2 Метод однократного выбега.....	15
2.3 Метод двукратного выбега	19
2.4 Определение параметров сопротивления по изменению скорости выбега	21
3 Проведение лабораторно-дорожных испытаний	22
3.1 Цель проведения лабораторно-дорожных испытаний	22
3.2 Приборы и оборудование	22
3.3 Условия проведения эксперимента	24
3.4 Обработка результатов экспериментов.....	25
3.5 Определение параметров сопротивления движению методом однократного выбега	26
3.6 Определение параметров сопротивления движению методом двукратного выбега	29
3.7 Определение параметров сопротивления движению по изменению скорости выбега	31
4 Контрольные вопросы	33
Список использованных источников	34

Введение

Лабораторные работы, выполняемые студентами направления 23.03.01 – «Технология транспортных процессов» обеспечивают связь теории движения автомобилей с практикой их использования в конкретных условиях эксплуатации. При этом развиваются навыки самостоятельной работы, способность к постановке и проведению экспериментов, интерпретации и пониманию фактов, к анализу и синтезу явлений и процессов, оценке полученной информации, применению знаний на практике.

На уровне изучения дисциплины лабораторные работы обеспечивают знакомство с оборудованием, приборами, средствами измерения, с методикой исследования, дополняя теоретические знания фактами, они позволяют определять и проверять теоретические зависимости.

В первом разделе проведен анализ способов определения сопротивления движению автомобилей, произведен выбор метода определения параметров сопротивления движению для проведения лабораторных работ. Во втором разделе произведен анализ метода выбега, рассмотрены три его модификации. В третьем разделе приведены цель и условия проведения лабораторно-дорожных испытаний, дано описание прибора G-Tech Fanatic, используемого для проведения испытаний. Обработку результатов дорожных испытаний студенты проводят на персональных компьютерах в учебном классе кафедры автомобильного транспорта.

Настоящая работа не претендует на полноту и законченность изложения всех вопросов, имеющих отношение к определению параметров сопротивления движению автомобиля. О замеченных недостатках в методических указаниях просьба сообщать на кафедру автомобильного транспорта транспортного факультета ОГУ. Автор с благодарностью примет и рассмотрит любые предложения, касающиеся повышения научно-технического, учебно-методического, эргономического и содержательного уровня данных методических указаний.

1 Способы определения сопротивления движению автомобиля

1.1 Основные экспериментальные способы определения параметров сопротивления движению автомобиля

1.1.1 Дорожные испытания

Наибольшее распространение на практике получили дорожные испытания. Их можно классифицировать по способу сообщения движения автомобилю [10].

1.1.1.1 Буксирование

Используют испытания буксированием двух видов:

- 1) с применением динамо- или тензометрических звеньев в сцепном устройстве;
- 2) с применением плавающего кузова или осей.

Первый вид позволяет определять суммарную силу сопротивления движению, без разделения на сопротивления качению колес и воздуха. Недостатком этого способа являются помехи и погрешности от колебаний в сцепном устройстве, а также затенение набегающего воздуха тягачом даже при длинном буксире.

Второй способ позволяет отдельно измерять параметры сопротивления качения и воздуха непосредственно при проведении испытаний. Однако эти измерения связаны со сложностями подготовки автомобиля к испытаниям, кроме того этот способ обладает теми же недостатками что и первый способ.

1.1.1.2 Транспортирование

Сообщение движения испытываемому автомобилю при его транспортировании выполняют путем его установки на железнодорожной платформе, толкаемой локомотивом, либо на крыше автомобиля. Данный способ позволяет непосредственно измерять сопротивление воздуха как функцию скорости. Характерными недостатками этого способа являются помехи и погрешности от колебаний платформы на рельсах, а так же искажение взаимодействия кузова

автомобиля с воздушным потоком, обусловленное подвижностью платформы относительно воздушной среды.

1.1.1.3 Скатывание с уклона

Скатывание осуществляется с уклона постоянной величины, при этом определяется суммарная сила сопротивления движению. Основным достоинством данного способа является простота подготовки и проведения испытаний в условиях реального взаимодействия автомобиля с воздухом и дорогой, а также простота измерений. При перечисленных достоинствах способ обладает низкой воспроизводимостью результатов опытов.

1.1.1.4 Выбег

Одним из наиболее перспективных способов сообщения движения в условиях проведения лабораторных работ является выбег автомобиля на ровном, прямолинейном участке дороги. Выделяют три основных вариации данного способа:

- 1) без учета сопротивления трансмиссии;
- 2) с демонтированной трансмиссией;
- 3) с предварительным определением сопротивления трансмиссии.

Первая вариация позволяет определять суммарную силу сопротивления движению, однако не учитывает погрешности, вызываемые гидравлическими и механическими потерями в трансмиссии. Кроме этого велико влияние погодных условий при проведении испытаний. Однако простота подготовки испытаний в условиях реального взаимодействия автомобиля с дорогой и воздухом и простота средств измерений делают эту вариацию наиболее удобной для проведения лабораторной работы.

Вторая вариация позволяет исключать влияние потерь трансмиссии, однако обладает такими недостатками как усложнение режима разгона испытуемого автомобиля, а так же влияние погодных условий.

Достоинством третьей вариации данного способа сообщения движения является возможность снижения погрешностей, вызываемых потерями в трансмиссии, а так же разделение сопротивлений качению и воздуха. К недостаткам этого способа следует отнести невозможность имитации ведущего режима работы колес, а так же зависимость от погодных-климатических условий.

1.1.1.5 Привод автономной тягой и двигателем испытуемого автомобиля

Данный способ позволяет измерять суммарный крутящий момент, подводимый к ведущим колесам движителя. Способ имеет три основных вариации:

- 1) динамо- или тензометрирование приводных сил или моментов с применением прицепного затормаживаемого средства;
- 2) режимометрирование двигателя по разряжению за дроссельной заслонкой;
- 3) режимометрирование двигателя по расходу топлива.

К достоинству первой вариации данного способа можно отнести широкие возможности изучения динамических режимов нагружения и потоков мощности в сложных трансмиссиях. Недостатком данной вариации является сложность подготовки эксперимента и обработки данных, влияние на стабильность при больших пробегах, сложность разделения сопротивления движения.

Достоинством второй вариации является простота определения мощности двигателя в реальных условиях установившегося движения. К недостатку следует отнести ограниченность сферы применения. Эту вариацию можно использовать только на карбюраторных двигателях, при установившихся режимах движения.

Достоинством третьей вариации является простота и надежность при использовании в пробегах большой протяженности с удалением от исследовательской базы. Недостатком данной вариации является усложнение работы карбюраторных двигателей с включенным экономайзером.

1.1.2 Стендовые испытания

При стендовых испытаниях для сообщения движения автомобиля используют привод автономной тягой и двигателем стенда. Данный способ имеет следующие

вариации:

- 1) на стенде с беговыми барабанами;
- 2) в аэродинамической со встроенным стендом с беговыми барабанами;
- 3) в аэродинамической трубе;
- 4) с применением неподвижной аэродинамической установки.

1.1.2.1 Испытания на стенде с беговыми барабанами

Данные испытания позволяют проводить измерения суммарной тяговой силы на колесах и суммарной силы сопротивления качению. Достоинством данных испытаний является широкий диапазон режимов испытаний, не зависящих от погодных-климатических и дорожных условий, а также возможность автоматизации программ испытаний. Важным недостатком данных испытаний является несоответствие сопротивлений качений при испытаниях на барабанах и плоской дороге.

1.1.2.2 Испытания в аэродинамической трубе со встроенными беговыми барабанами

Данный вид испытаний позволяет определить как суммарную силу сопротивления движению, так и силу сопротивления воздуху. Достоинством этих испытаний является широкий диапазон режимов испытаний, включая имитацию погодных-климатических условий, а также разделение сопротивлений движению путем непосредственных измерений. Явным недостатком данных испытаний являются высокая стоимость сооружений для проведения испытаний, а так же несоответствие сопротивлений качению по барабану и по плоской дороге.

1.1.2.3 Испытания в аэродинамической трубе

При испытаниях в аэродинамической трубе определяют силу сопротивления воздуху. Достоинством этих испытаний является полнота определяемых аэродинамических характеристик, возможность непосредственного измерения силы сопротивления воздуха. К недостаткам можно отнести высокую стоимость

сооружений. Кроме этого недостатком является искажения воздушного потока под автомобилем ввиду неподвижности дороги относительно автомобиля и невращающихся колес.

1.1.2.4 Испытания с применением неподвижной аэродинамической установки

В условиях применения неподвижной аэродинамической установки производят измерения силы сопротивления воздуха. Достоинством данных испытаний является меньшая первоначальная стоимость установки по сравнению с аэродинамической трубой при достаточной полноте определяемых аэродинамических характеристик. Недостатком данных испытаний является некоторое снижение точности за счет большего, чем в аэродинамической трубе, турбулизации потока воздуха и отклонений от реальных условий движения потока воздуха под автомобилем.

1.1.3 Комбинированные испытания

Комбинированные испытания подразумевают использование различных средств и методов испытаний для определения как суммарной силы сопротивления движению, так и отдельных ее составляющих – сопротивления качению и сопротивления воздуху. Достоинством данного метода испытаний является возможность компенсации ряда недостатков способов за счет их сочетания и взаимных проверок. К недостаткам данного метода можно отнести увеличение времени испытаний, а также возможность наложения ошибок сочетаемых способов.

1.2 Выбор метода определения параметров сопротивления движению для проведения лабораторной работы

Приведенные способы дорожных испытаний автомобилей неравноценны по своим особенностям и достигаемым результатам, однако их общей характерной особенностью является направленность на сохранение в условиях эксперимента параметров взаимодействия реального полномасштабного автомобиля с реальной

дорогой и воздушной средой, имеющей естественные показатели турбулентности. Все приведенные способы дорожных испытаний автомобилей в настоящее время в той или иной степени применяются на практике, кроме способа транспортирования на железнодорожной платформе. Наибольшее распространение получили для исследования параметров движения автомобилей по деформируемым грунтам путем привода автономной тягой и двигателем испытуемого автомобиля способом динамометрирования приводных сил или моментов с применением прицепа или затормаживаемого средства и режимометрированием двигателя по расходу топлива, а для оценки параметров движения по твердым дорожным покрытиям – способом выбега без учета сопротивления трансмиссии, а так же с предварительным определением сопротивления трансмиссии [10].

Основным характерным недостатком дорожных видов рассматриваемых испытаний является недостаточно высокая точность определения малых значений коэффициентов сопротивления качению при испытаниях неполноприводных автомобилей на хороших дорожных покрытиях. Такой уровень точности связан не столько с недостатками используемых приборов и аппаратуры, сколько с методами разделения сил сопротивления воздуха P_v и сопротивления качению всех колес автомобиля P_{fa} . В этих методах еще кроются дополнительные возможности их совершенствования. Если дорожные испытания ведутся не на полигоне, то другой их недостаток — ограниченная длительность установившихся режимов исследуемых процессов и величин, зависящая от протяженности участков дорог с постоянными параметрами (уклон, микропрофиль и др.).

Главной целью всех видов дорожных испытаний, направленных на определение параметров движения, является исследование компонентов суммы сил:

$$G_a/f_{av}^0 + P_{тр}^0 + P_v = P_{\Sigma}, \quad (1.1)$$

где G_a – вес автомобиля, Н;

f_{av}^0 – обобщенный коэффициент сопротивления качению движителя в ведомом режиме;

$P_{тр}^0$ – суммарные потери в трансмиссии на холостом ходу.

При различных методах испытаний P_{Σ} соответствует разным силам:

- буксирования по горизонтальному участку пути – силе на буксирном крюке (устройстве) $P_{кр}$,

$$P_{\Sigma} = P_{кр}; \quad (1.2)$$

- постоянных уклонов – скатывающей силе на уклоне с углом α ,

$$P_{\Sigma} = G_a \sin \alpha; \quad (1.3)$$

- методом выбега на горизонтальном участке пути:

$$P_{\Sigma} = (\delta_B/g) \times G_a (dv_a/dt), \quad (1.4)$$

где δ_B - коэффициент вращающихся масс при выбеге;

g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

v_a – скорость автомобиля, m/c .

Для определения P_{Σ} при испытаниях методами автономной тяги на горизонтальных участках пути без прицепа с применением режимометрирования равномерного установившегося движения, можно записать [10]

$$P_{\Sigma} = M_a / r_a^0 + P_{тр}^0, \quad (1.5)$$

где M_a – крутящий момент на колесах автомобиля, $H \cdot m$;

r_a^0 – радиус качения колеса в ведомом режиме, m .

Если режимометрирование осуществляется тензометрированием крутящего момента на полуосях ведущих мостов, то M_a в последней формуле является непосредственно измеряемой величиной. Если режимометрирование осуществляется иными способами, то M_a рассчитывают по соответствующим предварительно полученным нагрузочным характеристикам. Например — по характеристикам цикловой подачи топлива в функции крутящего момента двигателя.

При испытаниях автомобиля способом выбега ввиду разобщения двигателя с трансмиссией структура безразмерного коэффициента силовых потерь автомобиля несколько упрощается.

Основной положительной особенностью стендовых испытаний автомобилей, особенно испытания в аэродинамической трубе со встроенными беговыми барабанами, является широкая возможность управления сочетаниями тяговых нагрузок, скоростных режимов и условий внешнего воздействия, причем испытания на установившемся режиме могут продолжаться неограниченно долго для замера всех необходимых параметров, визуализации, фотографирования и других видов фиксирования явлений, так как длительность таких режимов, в отличие от дорожных испытаний, не ограничивается протяженностью участков дорог с постоянными значениями уклона, микропрофиля и др.

Другая общая положительная особенность стендовых испытаний - их независимость от сезонно-климатических и прочих ограничений, свойственных испытаниям на дорогах.

Одной из разновидностей современных стендовых испытаний на стенде с беговыми барабанами являются испытания многоприводных автомобилей на стендах, в которых число барабанов равно числу мостов (колес) автомобиля.

Основной, полностью еще не преодоленный до настоящего времени, недостаток стендовых испытаний полномасштабных автомобилей — несоответствие процесса качения и коэффициента сопротивления качению автомобильных шин по металлическому барабану и по реальной поверхности дороги, что объясняется практической невозможностью имитировать на поверхности цилиндрического барабана реальные дорожные покрытия. Можно предполагать, что когда проблема стендовой имитации качения по плоской опорной поверхности будет решена, стендовые испытания в аэродинамической трубе со встроенными беговыми барабанами превратятся в предпочтительный по эффективности метод.

Частичная компенсация недостатков, кратко охарактеризованных методов стендовых и дорожных испытаний, может быть осуществлена их комбинированием — последовательным проведением испытаний двумя и более способами.

К числу первых подробно разработанных в отечественной литературе методов относится метод, предложенный академиком Е. А. Чудаковым [10], построенный на последовательном проведении испытаний на стенде с беговыми барабанами для определения сопротивлений качению, а затем на дороге — для определения общего сопротивления движению.

В настоящее время широко применяются комбинированные способы испытаний. В их числе, прежде всего, следует упомянуть сочетание испытаний способом выбега со способом автономной тяги, сопровождаемым режимометрированием, а также сочетание стационарных аэродинамических испытаний в аэродинамической трубе и с применением неподвижной аэродинамической установки с дорожными испытаниями способами выбега и другими.

Стремление уменьшить указанные выше недостатки стендовых испытаний автомобилей в части определения сопротивлений качению еще на ранних стадиях развития методов испытаний автомобилей привело к попыткам решить эту задачу хотя бы в масштабе стендовых испытаний шины одиночного автомобильного колеса.

Испытания трансмиссии при определении параметров движения автомобиля имеют целью определение ее КПД на различных передачах в функции скорости и нагрузки для использования в тяговых расчётах автомобиля, расчётах расходов топлива и при оценке степени конструктивного совершенства агрегатов трансмиссии. Измерение потерь на режиме холостого хода необходимо для разделения потерь при использовании метода выбега при определении сопротивлений движению автомобиля в целом.

Испытания первого вида проводятся на стендах, имеющих устройства для силового нагружения трансмиссии в целом или ее агрегатов; испытания второго вида проводятся или на тех же стендах, или, что наиболее просто, способом выбега на автомобиле с вывешенными колесами.

Приведенные экспериментальные результаты получены при использовании разработанных несложных достаточно надежных и весьма эффективных по

достигаемым результатам методов дорожных испытаний методом выбега с предварительным определением сопротивления трансмиссии и путем режимометрирования двигателя по расходу топлива.

Исходя из достоинств и недостатков перечисленных методов, можно сделать вывод, что наиболее удобным способом сообщения движения автомобилю для использования в лабораторной работе является выбега. При этом в рамках лабораторной работы допустимо не учитывать сопротивления в трансмиссии. Для проведения испытаний путем выбега необходимо наличие только испытуемого автомобиля, ровного отрезка дороги и приборов, фиксирующих время выбега, а также пройденный путь.

Основным требованием к результатам измерений при проведении эксперимента является воспроизводимость значений измеряемых показателей.

2 Анализ метода выбега

2.1 Общие сведения

Метод выбега заключается в следующем - автомобиль разгоняют до определенной скорости и затем после выключения передачи в нейтральное положение она движется по инерции до полной остановки.

Метод выбега позволяет определить сопротивление качению без применения каких-либо вспомогательных тяговых средств и специального измерительного оборудования.

Однако он дает приближенные значения сопротивления качению, так как:

- 1) предполагается, что на всем пути сила сопротивления качению остается постоянной; в действительности же она значительно изменяется и на высоких скоростях в несколько раз больше, чем на малых;
- 2) в определяемую силу сопротивления качению входит сила сопротивления от прокручивания трансмиссии, которое по величине сопоставимо с истинным сопротивлением качению.

Вследствие этого метод выбега используют ограниченно, однако для проведения лабораторной работы он подходит, в следствии свой простоты.

При выполнении лабораторной работы можно использовать следующие основные модификации метода выбега:

- 1) метод однократного выбега [3, 9];
- 2) метод двукратного выбега [4];
- 3) определение параметров сопротивления по пройденному пути [5].

2.2 Метод однократного выбега

Наиболее простым методом определения параметров аэродинамического сопротивления и сопротивления качению является метод однократного выбега [3, 9]. Для проведения испытаний необходимо подобрать участок ровной дороги длиной не менее 2000 м. Разогнав автомобиль до скорости 70-80 км/ч, включают

нейтральную передачу и фиксируют ускорения на высокой и малой скорости. Малая скорость соответствует скорости 10-15 км/ч. Большая скорость соответствует скорости 55-60 км/ч.

Рассмотрим пример определения ускорения на большой скорости. При движении на нейтральной передаче определяем, сколько времени потребуется для падения скорости от $v_n = 60$ км/ч до $v_k = 55$ км/ч. К примеру, это время составит $\Delta t = 6,5$ секунд. Тогда среднее замедление j_1 на первом отрезке измерения скорости составит:

$$j_1 = (v_n - v_k) / (3,6 \Delta t). \quad (2.1)$$

$$j_1 = (60 - 55) / (6,5 \cdot 3,6) = 0,214 \text{ м/с}^2.$$

Средняя скорость на этом участке составит:

$$v_1 = (v_n + v_k) / 2. \quad (2.2)$$

$$v_1 = (60 + 55) / 2 = 57,5 \text{ км/ч.}$$

Рассмотрим пример определения ускорения на малой скорости. При движении на нейтральной передаче определяем, сколько времени потребуется для падения скорости от $v_n = 15$ км/ч до $v_k = 10$ км/ч. К примеру, это время составит $\Delta t = 10,5$ секунд. Тогда среднее замедление j_2 на втором отрезке измерения скорости составит:

$$j_2 = (15 - 10) / (10,5 \cdot 3,6) = 0,132 \text{ м/с}^2.$$

Средняя скорость на втором отрезке измерения скорости составит:

$$v_2 = (15 + 10) / 2 = 12,5 \text{ км/ч.}$$

Представим уравнение силового баланса [5, 6] в следующем виде:

$$m \cdot g \cdot \psi + k \cdot F \cdot v^2 = m \cdot j, \quad (2.3)$$

где ψ – коэффициент сопротивления дороги;

k – коэффициент обтекаемости;

F – лобовая площадь автомобиля (площадь среднего сечения, площадь по миделю, площадь фронтальной проекции и т.п.), m^2 .

Коэффициент сопротивления дороги ψ , определяют по выражению:

$$\psi = f + i, \quad (2.4)$$

где f – суммарный коэффициент сопротивления качению;

i – уклон дороги, для ровной дороги $i = 0$.

Коэффициент обтекаемости k определяется выражением:

$$k = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_v, \quad (2.5)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления вдоль оси X ;

ρ_v – плотность воздуха, принимаемая $1,22 \text{ кг/м}^3$ при нормальных атмосферных условиях (температура воздуха $15 \text{ }^\circ\text{C}$, давление 760 мм рт.ст. , относительная влажность 50%).

Запишем уравнение силового баланса в виде (2.3) для большой и малой скоростей в виде системы:

$$\begin{cases} m \cdot g \cdot \psi + k \cdot F \cdot v_1^2 = m \cdot j_1; \\ m \cdot g \cdot \psi + k \cdot F \cdot v_2^2 = m \cdot j_2. \end{cases} \quad (2.6)$$

Принимая постоянными вес автомобиля ($m \cdot g$) и лобовую площадь (F), можно найти параметры сопротивления движению - коэффициент аэродинамического сопротивления вдоль оси X (C_x) и коэффициент сопротивления дороги (ψ).

Взяв второе уравнение системы с отрицательным знаком, прибавим его к первому, получим:

$$k \cdot F \cdot (v_1^2 - v_2^2) = m \cdot (j_1 - j_2). \quad (2.7)$$

Из выражения (2.7) и получим:

$$k = m \cdot (j_1 - j_2) / (F \cdot (v_1^2 - v_2^2)). \quad (2.8)$$

Заменив k выражением (2.5) и выполнив преобразования, получим:

$$C_x = m \cdot (j_1 - j_2) / (2 \cdot \rho_v \cdot F \cdot (v_1^2 - v_2^2)).$$

Для определения коэффициента сопротивления дороги сложив первое и второе уравнение системы (2.6) получим:

$$2m \cdot g \cdot \psi + k \cdot F \cdot (v_1^2 + v_2^2) = m(j_1 + j_2). \quad (2.9)$$

Подставив выражение для коэффициента обтекаемости (2.8) в выражение (2.9) получим:

$$\psi = [(j_1 + j_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) - [(j_1 - j_2) / (v_1^2 + v_2^2)] \cdot [2g \cdot (v_1^2 - v_2^2)]]^{-1} = [(j_1 \cdot v_1^2 - j_1 \cdot v_2^2 + j_2 \cdot v_1^2 - j_2 \cdot v_2^2 - j_1 \cdot v_1^2 - j_1 \cdot v_2^2 - j_2 \cdot v_1^2 - j_2 \cdot v_2^2) \cdot [2g \cdot (v_1^2 - v_2^2)]]^{-1} = (j_2 \cdot v_1^2 - j_1 \cdot v_2^2) / [g(v_1^2 - v_2^2)].$$

Таким образом, окончательно получаем решение системы (2.6):

$$C_x = m \cdot (j_1 - j_2) / (2 \cdot \rho_v \cdot F \cdot (v_1^2 - v_2^2)).$$

$$\psi = (j_2 \cdot v_1^2 - j_1 \cdot v_2^2) / [g \cdot (v_1^2 - v_2^2)].$$

Эти выражения будем использовать для проведения испытаний методом однократного выбега.

2.3 Метод двукратного выбега

Удобным методом определения параметров аэродинамического сопротивления и сопротивления качению является метод двукратного выбега [4]. Для проведения испытаний необходимо выполнить два заезда – с максимальной загрузкой и минимальной. Так же как и методе однократного выбега разгоняют автомобиль до скорости 70-80 км/ч, включают нейтральную передачу и фиксируют время падения скорости от одной оцифрованной точки на спидометре до другой. Диапазон падения скоростей должен быть одинаков для обоих заездов.

Запишем уравнение силового баланса в виде (2.10) в виде системы:

$$\begin{cases} m_1 \cdot g \cdot \psi + k \cdot F \cdot v^2 = m_1 \cdot j_1; \\ m_2 \cdot g \cdot \psi + k \cdot F \cdot v^2 = m_2 \cdot j_2. \end{cases} \quad (2.10)$$

Принимая постоянными лобовую площадь (F) и среднюю скорость (v) на исследуемом отрезке, можно найти параметры сопротивления движению - коэффициент аэродинамического сопротивления вдоль оси X (C_x) и коэффициент сопротивления дороги (ψ).

Отняв второе уравнение системы (2.10) от первого получим:

$$g \cdot \psi \cdot (m_1 - m_2) = m_1 \cdot j_1 - m_2 \cdot j_2. \quad (2.11)$$

Из выражения (2.11) определим коэффициент сопротивления дороги (ψ):

$$\psi = [m_1 \cdot j_1 - m_2 \cdot j_2] / (g \cdot (m_1 - m_2)). \quad (2.12)$$

Для определения коэффициента аэродинамического сопротивления вдоль оси X (C_x) сложим первое и второе уравнение системы (2.10) и выразим коэффициент обтекаемости:

$$k = [(m_1 \cdot j_1 + m_2 \cdot j_2) \cdot (m_1 - m_2) - (m_1 \cdot j_1 - m_2 \cdot j_2) \cdot (m_1 + m_2)] / [2F \cdot v^2 \cdot (m_1 - m_2)] = [(m_1^2 \cdot j_1 - m_1 \cdot m_2 \cdot j_1 + m_1 \cdot m_2 \cdot j_2 - m_2^2 \cdot j_2 - m_1^2 \cdot j_1 - m_1 \cdot m_2 \cdot j_1 + m_1 \cdot m_2 \cdot j_2 + m_2^2 \cdot j_2)] / [2F \cdot v^2 \cdot (m_1 - m_2)] = [m_1 \cdot m_2 (j_1 - j_2)] / [F \cdot v^2 \cdot (m_2 - m_1)].$$

Окончательно принимаем:

$$k = [m_1 \cdot m_2 (j_1 - j_2)] / [F \cdot v^2 \cdot (m_2 - m_1)]. \quad (2.13)$$

Подставив выражение (2.5) в выражение (2.12) определим коэффициент аэродинамического сопротивления вдоль оси X (C_x):

$$C_x = [2 \cdot m_1 \cdot m_2 (j_1 - j_2)] / [\rho \cdot F \cdot v^2 \cdot (m_2 - m_1)]. \quad (2.14)$$

Таким образом, решением системы уравнений (2.10) будут следующие выражения:

$$\psi = [m_1 \cdot j_1 - m_2 \cdot j_2] / (g \cdot (m_1 - m_2)).$$

$$C_x = [2 \cdot m_1 \cdot m_2 (j_1 - j_2)] / [\rho \cdot F \cdot v^2 \cdot (m_2 - m_1)].$$

Эти выражения будем использовать для проведения испытаний методом двукратного выбега.

2.4 Определение параметров сопротивления по изменению скорости выбега

Описанные выше методы определения параметров сопротивления движению автомобиля обладают одним существенным недостатком – для определения значений коэффициента аэродинамического сопротивления вдоль оси X (C_x) и коэффициента сопротивления дороги (ψ) используются предварительные расчёты скоростей и ускорений. Точность расчётов заметно ниже точности измерения скорости и времени. Учитывая вышесказанное можно утверждать, что метод, использующий измерение времени и скорости заведомо точнее.

Для измерения зависимости скорости выбега от времени удобно использовать современные приборы, использующие глобальные системы позиционирования. Для использования данного метода определения параметров сопротивления [12] необходимо так же воспользоваться уравнением силового баланса в виде (2.3) выразив из него ускорение:

$$j = - [m \cdot g \cdot \psi + 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_v \cdot F \cdot v^2] / m, \quad (2.15)$$

где знак «-» указывает, что ускорение направлено против движения автомобиля.

Так же как и в предыдущих методах разгоняют автомобиль до скорости 70-80 км/ч, включают нейтральную передачу и фиксируют значение скорости каждые 10 секунд. Заезды необходимо повторять несколько раз в разные стороны для снижения влияния уклона дороги.

3 Проведение лабораторно-дорожных испытаний

3.1 Цель проведения лабораторно-дорожных испытаний

Проведение лабораторно-дорожных испытаний по определению параметров сопротивления движению предлагается выполнять методом выбега. Для проведения лабораторной работы необходимо определять воспроизводимость результатов опытов [8]. Для этого используется специальная процедура обработки полученных данных.

Целью лабораторно-дорожных испытаний является определение значений коэффициента аэродинамического сопротивления вдоль оси X (C_x) и коэффициента сопротивления дороги (ψ).

3.2 Приборы и оборудование

Для определения времени прохождения заданного пути и времени изменения скорости используем прибор G-Tech Fanatic.

Прибор G-Tech Fanatic является специализированным устройством для измерения показателей эксплуатационных свойств автомобилей. Для вычисления координат автомобиля он использует сигнал со спутников GPS. Прибор G-Tech Fanatic (рисунок 3.1) имеет две комплектации SS и RR. Прибор G-Tech Fanatic SS предназначен для всех стандартных измерений производительности в том числе: мощности, крутящего момента, разгона 0-100 км/ч, прохождения первых 60 футов, 1/8 мили, 1/4 мили, тормозного пути и многого другого. Прибор может воспроизвести заезд, и предназначен для использования во всех транспортных средствах, включая автомобили, мотоциклы, катера и т.д.



Рисунок 3.1 – Прибор G-Tech Fanatic

Прибор G-Tech Fanatic создан для суровых условий, поэтому все компоненты являются "плавающими" внутри резинового корпуса. У нового прибора, нет жесткого крепления компонентов к корпусу. G-Tech Fanatic имеет встроенный, высокочастотный GPS, датчик (квадратный выступ на задней панели прибора), который должен быть направлен вверх. При включении устройства, можно увидеть количество доступных спутников, в настоящее время в правом верхнем углу дисплея. Чем больше спутников зафиксирует прибор, тем выше будет точность измерения. После включения прибору G-Tech Fanatic нужно несколько минут, чтобы найти спутники GPS. Небольшой знак плюса, между значком спутника и количеством спутников - это указание на то, что система SBAS (Спутниковые системы усиления сигнала) зафиксирована. Это позволяет улучшить точность измерений. Для лучшей производительности рекомендуется, держать G-Tech Fanatic на верхней части приборной панели в нижней части лобового стекла

Существует множество приложений для смартфонов, которые определяют скорость, пройденный путь и ускорения автомобилей используя координаты, передаваемые спутниками GPS. Частота обновлений на мобильных устройствах равна одному обновлению в секунду. У прибора G-Tech Fanatic частота обновления координат равна десяти обновлений в секунду.

3.3 Условия проведения эксперимента

Определение значений коэффициента аэродинамического сопротивления вдоль оси X (C_x) и коэффициента сопротивления дороги (ψ) подвижного состава требует тщательной подготовки автомобилей и строгого соблюдения условий испытаний, чтобы обеспечить стабильность измерений и сопоставить результаты различных испытаний.

Испытания проводят в сухую погоду при скорости ветра, не превышающей 3 м/с, атмосферном давлении от 0,098 до 0,1 МПа (от 730 до 765 мм рт. ст.) и температуре окружающего воздуха от 5 °С до 30 °С. Предпочтительнее испытания проводить на специальной динамометрической дороге.

При испытаниях автомобиля на дорогах общего пользования выбирают измерительный участок, отвечающий следующим требованиям:

- прямой (без поворотов);
- горизонтальный (с короткими уклонами, не более 5 %);
- с твердым покрытием (асфальт, бетон), без выбоин, с температурными швами шириной не более 20 мм;
- длиной не менее 1 км с подъездными участками с обеих сторон протяженностью около 3 км.

Перед проведением испытаний автомобиль должен быть подготовлен. Особое внимание уделяют проверке систем питания топливом и электрооборудования, неисправности в которых могут привести к снижению мощности двигателя и ухудшению динамических свойств автомобиля. Проверяют также трансмиссию и движители автомобиля и прицепа.

Чтобы убедиться в исправности автомобиля и довести температурный режим агрегатов до нормального состояния, совершают пробег по дорогам с твердым покрытием на расстояние 100 км в двух противоположных направлениях. При этом измеряют расход топлива и масла и сравнивают со значениями, указанными в технических условиях. Испытания продолжают, если отсутствуют расхождения

нормативных и опытных значений расхода топлива и масла. При наличии отклонений выясняют причину и устраняют дефект [6].

3.4 Обработка результатов экспериментов

Экспериментом называется система операций, воздействий и (или) наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях. Опытном называется воспроизведение исследуемого явления в определенных условиях проведения эксперимента при возможности регистрации его результатов.

Проверка воспроизводимости результатов опытов [8] осуществляется в следующем порядке.

Определяем среднее значение измерений показателя, по каждой серии опытов:

$$T_{\text{исп}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k t_{ji}, (j = 1, 2, \dots, N), \quad (3.1)$$

где k – число параллельных опытов в серии;

N – число серий опытов.

Определяем выборочную дисперсию по каждой серии опытов:

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (t_{ji} - T_{\text{исп}})^2. \quad (3.2)$$

Определяем расчётное значение критерия Кохрена G_p [8].

$$G_p = \frac{S_{j \max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}. \quad (3.3)$$

Критическое значение критерия Кохрена G , соответствующее доверительной вероятности $P = 0,95$, с которой принимается гипотеза о воспроизводимости опытов, приведены в ГОСТ Р ИСО 5725-2002 [7].

3.5 Определение параметров сопротивления движению методом однократного выбега

Для проведения замеров необходимых параметров методом однократного выбега используем следующий протокол (см. таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Форма протокола испытаний методом однократного выбега

Наименование параметра	Обозначение, размерность	Направление движения	
		Туда	Обратно
Время снижения скорости от 60 до 55 км/ч	$\Delta t_{60-55}, \text{ с}$		
Замедление автомобиля при снижении скорости от 60 до 55 км/ч	$J_{60-55}, \text{ м/с}^2$		
Средняя скорость на участке	$v_{\text{ср}}, \text{ км/ч}$		
Время снижения скорости от 15 до 10 км/ч	$\Delta t_{15-10}, \text{ с}$		
Замедление автомобиля при снижении скорости от 15 до 10 км/ч	$j_{15-10}, \text{ м/с}^2$		
Средняя скорость на участке	$v_{\text{ср}}, \text{ км/ч}$		
Коэффициент аэродинамического сопротивления вдоль оси X	C_x		
Коэффициент сопротивления дороги	ψ		

Замеры выполняют в обоих направлениях движения, многократно, непосредственно один за другим.

Перед началом испытаний необходимо удостовериться, что прибор установлен должным образом, питание включено, прибор находится в режиме SS, датчик GPS нашел не менее пяти - восьми спутников.

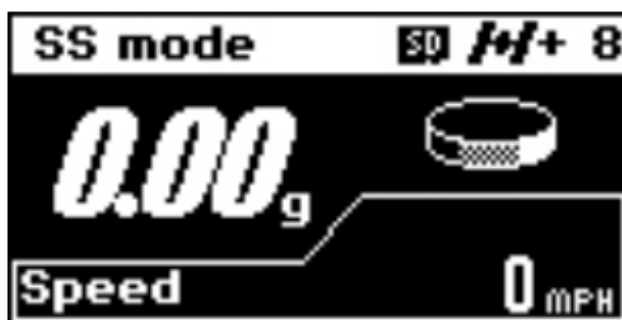


Рисунок 3.1 – Экран прибора при подготовке к испытаниям

Однократное нажатие на кнопку «PUSH» активирует режим записи.

При начале движения автомобиля прибор начнет запись автоматически. При этом на экране прибора, внутренний счетчик (E.T.) начнет отсчитывать время проведения испытания.

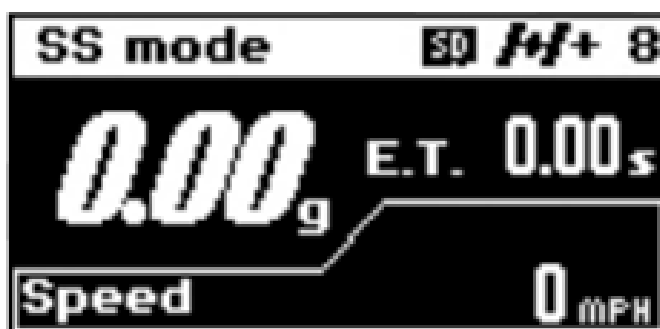


Рисунок 3.2 – Экран прибора при активации режима записи

Во время движения автомобиля, прибор показывает изменение измеряемых показателей автомобиля.



Рисунок 3.3 – Экран прибора в режиме движения автомобиля

Показания автоматически сохраняются на внешний носитель (флеш-карту).

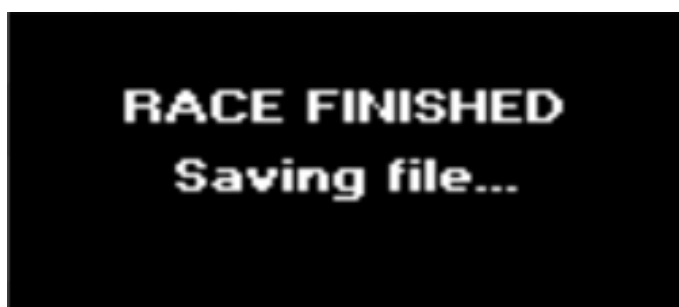


Рисунок 3.4 – Экран прибора в режиме сохранения результатов

После сохранения показаний G-TECH откроет их для просмотра.



Рисунок 3.5 – Экран прибора в режиме вывода результатов испытаний

Результаты испытаний анализируем в программе Fanatic Pass – Performance Analysis System Software 3.0. По графику зависимости скорости от времени определим время падения скорости от 60 до 55 км/ч, а так же время падения скорости от 15 до 10 км/ч. Полученные результаты измерений и расчётов сводим в протоколы испытаний (см. таблица 3.1). Результаты расчётов по определению воспроизводимости сводим в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Проверка воспроизводимости опытов

Номер опыта	Показатель			
	Коэффициент аэродинамического сопротивления		Коэффициент сопротивления дороги	
	Среднее значение	Дисперсия	Среднее значение	Дисперсия
№1				
№2				
№3				
№4				
№5				
№6				
№7				
№8				
Максимальная дисперсия				
Сумма дисперсий				
Значение критерия Кохрена				
Табличное значение критерия Кохрена				

3.6 Определение параметров сопротивления движению методом двукратного выбега

Для проведения замеров необходимых параметров методом двукратного выбега используем следующий протокол (см. таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Форма протокола испытаний методом двукратного выбега

Наименование параметра	Обозначение, размерность	Направление движения	
		Туда	Обратно
Выбег автомобиля без дополнительной нагрузки			
Масса снаряженного автомобиля (включая массу водителя, в соответствии с ГОСТ Р 52389-2005)	m_1 , кг		
Время снижения скорости от 60 до 50 км/ч	Δt_1 , с		
Замедление автомобиля при снижении скорости от 60 до 50 км/ч	j_1 , м/с ²		
Выбег автомобиля с нагрузкой 300 кг			
Масса снаряженного автомобиля (включая дополнительную нагрузки 300 кг)	m_2 , кг		
Время снижения скорости от 60 до 50 км/ч	Δt_2 , с		
Замедление автомобиля при снижении скорости от 60 до 50 км/ч	j_2 , м/с ²		
Средняя скорость на участке	v_{cp} , км/ч		
Коэффициент аэродинамического сопротивления вдоль оси X	C_x		
Коэффициент сопротивления дороги	ψ		

По графику зависимости скорости от времени определим время падения скорости от 60 до 50 км/ч при выбеге автомобиля без дополнительной нагрузки, а так же время падения скорости от 60 до 50 км/ч при выбеге автомобиля с дополнительной нагрузкой. Полученные результаты измерений и расчётов сводим в протоколы испытаний (см. таблица 3.3). Результаты расчётов по определению

воспроизводимости сводим в таблицу 3.2.

3.7 Определение параметров сопротивления движению по изменению скорости выбега

Для проведения замеров необходимых параметров по значениям скорости выбега используем следующие протоколы (см. таблица 3.4 и таблицы 3.5).

Таблица 3.4 – Форма протокола измерений падения скорости

Время, с	Скорость, км/ч						
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V _{ср}
0							
10							
20							
30							
40							
50							
60							
70							

Расчёты коэффициента аэродинамического сопротивления вдоль оси X (C_x) и коэффициента сопротивления дороги (ψ) необходимо проводить с помощью редактора электронных таблиц MS Excel, оснащенного надстройкой «Поиск решения».

Для проведения расчётов необходимо внести форму протокола расчёта параметров сопротивления движению (таблица 3.5) в табличный редактор. Значения действительной скорости перенести из таблицы 3.4.

Таблица 3.5 – Форма протокола расчёта параметров сопротивления движению

Время	Действительная скорость	Расчётная скорость	Замедление	Квадрат отклонения расчётной скорости от действительной
t, с	$v_{\text{ср}}, \text{ м/с}$	$v_{\text{расчѐтн.}}, \text{ м/с}$	$j, \text{ м/с}^2$	$(v_{\text{ср}} - v_{\text{расчѐтн.}})^2$
0				
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				

Для расчёта замедлений должны быть известны параметры плотности воздуха, масса автомобиля, его лобовая площадь, ускорение свободного падения. Значения коэффициента аэродинамического сопротивления вдоль оси X, коэффициента сопротивления дороги и скорости принимаем как переменные значения.

Далее рассчитываем значения скорости с задержкой в пять секунд относительно действительных скоростей. Для этого от значения скорости отнимаем произведение полученного замедления на время равное пяти секундам.

Затем заполняем последнюю колонку как квадрат разности действительной скорости и рассчитанной скорости.

После построения таблицы запускаем надстройку «Поиск решения» табличного редактора MS Excel и производим подбор значения коэффициента аэродинамического сопротивления вдоль оси X и коэффициента сопротивления дороги так, чтобы минимизировать сумму квадратов разности действительных и расчётных скоростей.

4 Контрольные вопросы

- 1 Какие способы сообщения движения при дорожных испытаниях по определению параметров сопротивления движению автомобиля получили наибольшее распространение?
- 2 Какие достоинства метода выбега предопределили его использование в лабораторной работе?
- 3 Охарактеризуйте основные модификации метода выбега.
- 4 Для каких двух состояний составлены уравнения силового баланса в методе однократного выбега?
- 5 Для каких двух состояний составлены уравнения силового баланса в методе двукратного выбега?
- 6 Дайте краткую характеристику условиям проведения эксперимента.
- 7 В каком порядке осуществляется проверка воспроизводимости опытов?
- 8 Опишите порядок работы с измерительным прибором G-Tech Fanatic.

Список использованных источников

- 1 Тарасик В.П. Теория движения автомобиля: Учебник для вузов / В.П. Тарасик. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.: ил. – ISBN 5-94157-967-5.
- 2 Кузьмин Н.А. Теория эксплуатационных свойств автомобиля : учебное пособие / Н.А. Кузьмин, В.И. Песков. – М. : ФОРУМ; НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 256 с. – (Высшее образование. Бакалавриат). – ISBN 978-5-91134-687-4 (ФОРУМ); ISBN 978-5-16-006135-1 (ИНФРА-М).
- 3 Рабинович, Э. Х. Определение сопротивлений движению автомобиля методом однократного выбега / Э. Х. Рабинович, З. Э. Кемалов, А. В. Сосновый // Автомобильный транспорт : сб. научн. трудов. – Харьков : ХНАДУ. – 2008. – Вып. 22. – С. 46-48.
- 4 Рабинович, Э. Х. Определение сопротивлений движению автомобиля методом двукратного выбега / Э. Х. Рабинович, В. А. Зуев, Н. В. Воскобойников // Автомобильный транспорт : сб. научн. трудов. – Харьков : ХНАДУ. – 2008. – Вып. 22. – С. 49-52.
- 5 Рабинович, Э. Х. Расчёт коэффициентов сопротивлений движению автомобиля по пути выбега / Э. Х. Рабинович, В. П. Волков, Е.А. Белогуров // Вестник ХНАДУ : сб. научн. тр. – Харьков : ХНАДУ. – 2009. №44. – С. 30-34.
- 6 ГОСТ 22576-90. Автотранспортные средства. Скоростные свойства. Методы испытаний. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-22576-90>
- 7 ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 ТОЧНОСТЬ (ПРАВИЛЬНОСТЬ И ПРЕЦИЗИОННОСТЬ) МЕТОДОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ Часть 1 Основные положения и определения. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-5725-1-2002>
- 8 Автомобили: Испытания: Учеб. Пособие для вузов. / М.В. Беляев [и др.], Под ред. А.И. Гришкевича, М.С. Высоцкого. – Мн.: Выш шк , 1991. – 187 с ил. – ISBN 5 339-00363-9

9 Автомобильный справочник : [пер. с англ. / Фирма] "Bosch" ; К. Райф и др. - [3-е изд.]. - Москва : За рулем, 2012. - 1274 с. : ил. ; 18 см. - Алф. указ.: с. 1228-1258. - 8000 экз. - ISBN 978-5-9698-0406-7 (в пер.) : 690 р.

10 Мощностной баланс автомобиля / В. А. Петрушов, В. В. Московкин, А. Н. Евграфов; Под общ. ред. В. А. Петрушова. - М. : Машиностроение, 1984. - 160 с., ил.