

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ОСЕВЫХ НАГРУЗОК АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВУЮЩИХ СИЛ ПРИ ДВИЖЕНИИ

КУБЕРИН Игорь Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: igorkuv@mail.ru

ХИЛЮК Юрий Алексеевич, аспирант; e-mail: hilyuk@ya.ru

ГУСЕВ Сергей Александрович, д-р экон. наук, профессор, заведующий кафедрой;
e-mail: o051nm@yandex.ru

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., кафедра «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей», Саратов

Статья посвящена актуальной проблеме повышения точности автоматизированных систем динамического контроля осевых нагрузок автотранспортных средств. Авторы исследуют влияние внешних сил, возникающих при движении, на достоверность измерений весогабаритных параметров, включая продольную составляющую силы тяжести от уклона дороги, аэродинамическое сопротивление, инерционные нагрузки и сопротивление качению. Разработана математическая модель, позволяющая корректировать результаты динамических измерений с учетом указанных факторов, что обеспечивает их соответствие результатам статических измерений. Особое внимание уделено методике устранения погрешностей, вызванных переменными параметрами окружающей среды (скорость ветра, влажность, температура) и техническими характеристиками транспортных средств (коэффициент обтекаемости, распределение масс). В рамках исследования предложена интеграция дополнительных датчиков в инфраструктуру пунктов весогабаритного контроля. Разработанное программное обеспечение на базе аналитических зависимостей позволяет рассчитывать эквивалентные статические нагрузки на оси, минимизируя риск ошибочных штрафных санкций. Результаты работы имеют практическую значимость для совершенствования нормативной базы, повышения безопасности дорожной инфраструктуры и оптимизации логистических процессов. Внедрение предложенных решений способствует снижению эксплуатационных затрат и продлению срока службы дорожного полотна за счет своевременного выявления перегрузов.

Ключевые слова: автоматизированная система; динамический контроль; осевые нагрузки; весогабаритные параметры; математическая модель; безопасность дорожного движения; пункт весогабаритного контроля.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-144-163

▼ Введение

Разработка и внедрение интеллектуальных транспортных систем направлены на повышение эффективности организации перевозочного процесса. При организации перевозочного процесса важное значение имеет состояние дорожного покрытия. Данный фактор оказывает влияние на технико-эксплуатационные и экономические показатели транспортного процесса. Наибольшее влияние на разрушение дорожного полотна могут оказывать автотранспортные средства, перевозящие грузы с превышением установленных нормативов. Кроме того, перегруз автотранспортного средства может оказывать влияние на безопасность дорожного движения [1, 2]. Также контроль весовых параметров важен для обеспечения безопасности проезда и сохранности мостовых

переходов [3]. В связи с этим одним из направлений государственной политики в области организации дорожного движения является контроль весовых и габаритных параметров автотранспортных средств в целях предотвращения несанкционированного превышения нормативных значений осевых нагрузок и габаритных параметров автомобиля. Ранее для целей контроля применялись стационарные посты, которые в статических условиях определяли данные параметры. Однако такой подход позволяет проводить измерения только для отдельных автотранспортных средств без контроля всего автотранспортного потока. В связи с этим как в нашей стране, так и за рубежом все большее применение находят пункты весогабаритного контроля, позволяющие в динамике проводить измерения этих параметров

[4, 5]. При этом предполагается, что результаты таких измерений идентичны статическим испытаниям. Однако на автомобиль в движении действует целый ряд дополнительных сил, которые могут воздействовать на результаты измерения. К таким силам можно отнести продольную составляющую силы тяжести от уклона дороги, силу сопротивления воздуха, силу инерции и силу сопротивления качению. Для устранения влияния некоторых из указанных сил вводятся определенные условия измерения: ограниченная скорость движения автомобиля, ровный участок дороги для устранения влияния уклона дороги, а также равномерное движение для снижения влияния возможного разгона или замедления автомобиля. Дорожное покрытие должно поддерживаться в нормативном состоянии вне зависимости от погодных условий. Однако, несмотря на принимаемые меры, полностью устранить влияние данных факторов не удастся. При этом возникает вероятность неправильной оценки параметров загрузки осей транспортного средства, что может привести к применению штрафных санкций без фактического нарушения нормативов по загрузке автотранспортных средств. В связи с этим является актуальной задача повышения достоверности определения весогабаритных параметров автотранспортных средств. Для решения данной задачи предлагается в пункты весогабаритного контроля автотранспортных средств ввести измерения ряда дополнительных параметров и устранение влияния указанных выше сил расчетным путем.

Целью работы является повышение показателей достоверности определения весогабаритных параметров автотранспортных средств.

Задачи исследования: разработка модели оценки весогабаритных параметров автотранспортных средств в движении с учетом действия продольной составляющей силы тяжести от уклона дороги, силы сопротивления воздуха, силы инерции и силы сопротивления качению; разработка программного обеспечения для оценки весогабаритных параметров автотранспортных средств в движении с учетом действия продольной составляющей силы тяжести от уклона дороги, силы сопротивления

воздуха, силы инерции и силы сопротивления качению; предложение путей практической реализации разработанной модели.

1. Необходимость совершенствования систем динамического контроля осевых нагрузок автотранспортных средств с учетом действующих сил при движении

Измерение осевых нагрузок и полной массы автотранспортных средств (АТС) в условиях непрерывного транспортного потока, осуществляемое без остановки движения, направлено на реализацию задач весового контроля. Данная процедура регламентируется деятельностью государственных контролирующих органов, включая Ространснадзор и МВД РФ, а также организаций, ответственных за эксплуатацию дорожной инфраструктуры. Основная цель таких измерений заключается в минимизации разрушающего воздействия на дорожное полотно со стороны перегруженных грузовых АТС [6, 7].

Ключевой задачей динамического контроля является сопоставление фактических значений осевых нагрузок и полной массы АТС с нормативными пределами, установленными законодательством. Так, в соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 29 ноября 2022 г. № 3657-р «О подписании Соглашения о допустимых массах, осевых нагрузках и габаритах транспортных средств при движении по автомобильным дорогам государств — членов Евразийского экономического союза, включенным в евразийские транспортные коридоры», превышение регламентированных параметров квалифицируется как нарушение, влекущее административную ответственность. Измерения выполняются в широком диапазоне скоростей движения (5–140 км/ч), что позволяет фиксировать параметры АТС в реальных условиях эксплуатации без нарушения естественного транспортного потока.

Несмотря на соответствие измерительных участков требованиям к качеству дорожного покрытия, регламентированным Приказом Министерства транспорта РФ от 31 августа 2020 г. № 348 (с изменениями и дополнениями от 9 июня 2023 г.) «Об утверждении Порядка осуществления весового и габаритного контроля

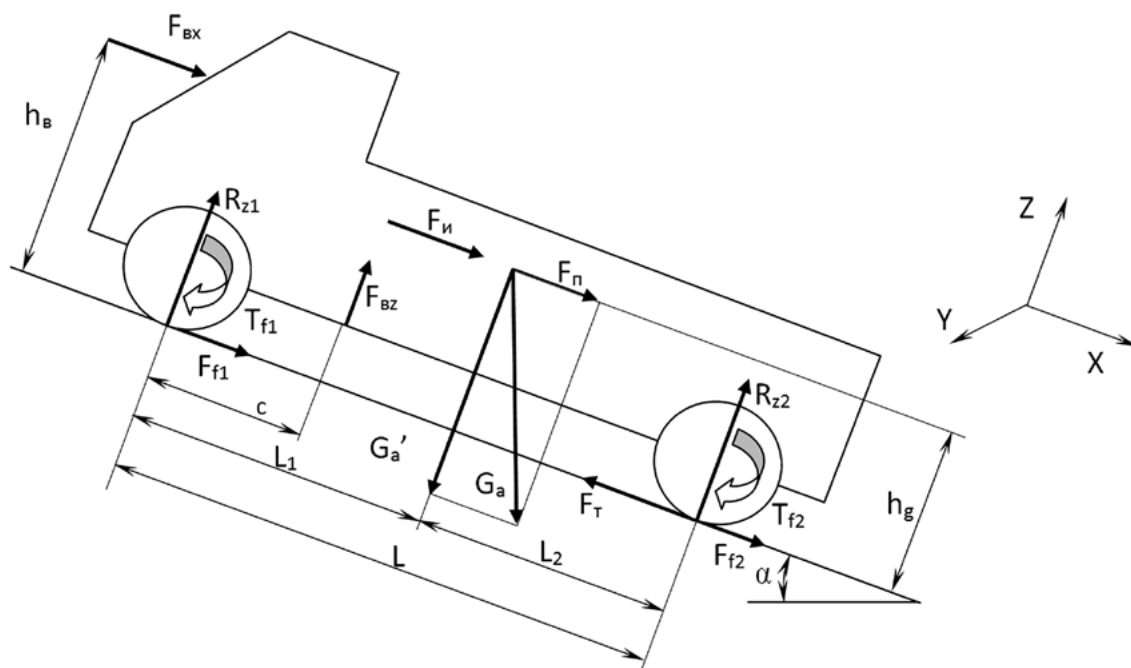


Рис. 1. Действие сил на транспортное средство при движении

транспортных средств», наблюдаются статистически значимые расхождения между динамическими и статическими измерениями. Эти отклонения обусловлены комплексом факторов, включая инерционные силы, аэродинамические воздействия и неоднородность распределения нагрузки при движении. Как показали исследования, погрешность динамических измерений может превышать допустимые значения, установленные государственными стандартами, что актуализирует необходимость совершенствования методик коррекции данных с учетом влияния внешних сил [8].

Таким образом, повышение точности динамического контроля требует интеграции в измерительный комплекс компенсационных алгоритмов, учитывающих физические параметры движения АТС, а также стандартизации измерительных процедур в рамках обновления нормативной базы.

Учитывая высокие размеры штрафов за превышение нормативных значений на оси автотранспортных средств, являющиеся сегодня самыми высокими в мире, а также большую социальную ответственность за результаты автоматических измерений, считаем необходимым разработать методику приведения результатов динамических измерений к статическим.

2. Распределение и перераспределение вертикальных реакций R_z на осях

Для упрощения вывода необходимых формул первоначально в качестве объекта исследования рассмотрим двухосный бортовой грузовик (рис. 1).

Распределение по осям веса (развесовка) неподвижного автомобиля на горизонтальной площадке определяется по зависимостям:

$$R_{z1} = G_a \frac{L_2}{L}, \quad (1)$$

$$R_{z2} = G_a \frac{L_1}{L}, \quad (2)$$

где R_{z1} , R_{z2} — вертикальные реакции (равнодействующие эпюры элементарных вертикальных сил в контактной площадке) соответственно для передней и задней осей, Н;
 G_a — полный вес автомобиля с грузом, Н;
 L_1 — горизонтальная проекция от центра масс до передней оси, м;
 L_2 — горизонтальная проекция от центра масс до задней оси, м;
 L — база автомобиля (расстояние между осями), м.

При разгоне автомобиля в гору (см. рис. 1) развесовка изменяется.

Необходимо также отметить, что момент $T_{f1,2}$ появляется при переносе $R_{z1,2}$ в центре пятна контакта колеса с дорогой.

Сумма моментов относительно ведущих (задних) колес = 0:

$$R_{z1}L + G_a \sin \alpha h_g + m a h_g + 0,5c_x \rho A V^2 h - G_a \cos \alpha L_2 + T_{f1} + T_{f2} = 0, \quad (3)$$

где α — угол продольного уклона дороги, градусы;
 h_g — высота центра тяжести автомобиля, м;
 m_a — масса автомобиля, кг;
 a — поступательное (линейное) ускорение относительно оси автомобиля, м/с²;
 c_x — безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления;
 ρ — плотность воздуха, кг/м³;
 A — площадь миделева сечения (площадь фронтальной проекции) автомобиля, м²;
 V — скорость потока воздуха относительно автомобиля с учетом скорости ветра, м/с;
 T_{f1}, T_{f2} — моменты сопротивления качению соответственно на передней и задней осях.

$$T_{f1} = R_{x1}r_d = fR_{z1}, \quad (4)$$

где R_{x1} — продольная реакция на передней оси.

$$T_{f2} = R_{x2}r_d = fR_{z2}r_d, \quad (5)$$

где R_{x2} — продольная реакция на задней оси.

$$T_{f1} + T_{f2} = fR_{z1}r_d + fR_{z2}r_d = (R_{z1} + R_{z2})fr_d = G_a \cos \alpha fr_d, \quad (6)$$

где r_d — динамический радиус колеса, м.

Из суммы моментов выразим R_{z1} :

$$R_{z1} = \frac{G_a L_2}{L} \times \left(\underbrace{\cos \alpha}_{k_{a1}} - \underbrace{\frac{h_g}{L_2} \sin \alpha}_{k_{b1}} - \underbrace{\frac{0,5c_x \rho A V^2}{G_a L_2} h_b}_{k_{u1}} - \underbrace{\frac{a}{g} \frac{h_g}{L_2}}_{k_{f1}} - f \frac{r_d}{L_2} \right), \quad (7)$$

где $k_{a1}, k_{b1}, k_{u1}, k_{f1}$ — коэффициенты влияния соответственно подъема, сопротивления воздуха, ускорения и сопротивления качению.

Сравнивая последнее уравнение (7) с выражением для R_{z1} на горизонтальной площадке (1) в статистике, заменим сумму коэффициентов на обозначение m_g :

$$m_{g1} = k_{a1} + k_{b1} + k_{u1} + k_{f1}. \quad (8)$$

Тогда

$$R_{z1} = \frac{m_{g1} G_a L_2}{L}. \quad (9)$$

Аналогично для задних колес:

$$R_{z2}L - G_a \sin \alpha \cdot h_g - m_a a h_g - 0,5c_x \rho A V^2 h_b - G_a \cos \alpha \cdot L_1 - T_{f1} - T_{f2} = 0. \quad (10)$$

$$m_{g2} = k_{a2} + k_{b2} + k_{u2} + k_{f2}. \quad (11)$$

$$R_{z2} = \frac{G_a L_1}{L} \times \left(\underbrace{\cos \alpha}_{k_{a2}} + \underbrace{\frac{h_g}{L_1} \sin \alpha}_{k_{b2}} + \underbrace{\frac{0,5c_x \rho A V^2}{G_a \cdot L_1} h_b}_{k_{u2}} + \underbrace{\frac{a}{g} \frac{h_g}{L_1}}_{k_{f2}} + f \frac{r_d}{L_1} \right). \quad (12)$$

$$R_{z2} = \frac{m_{g2} G_a L_1}{L}. \quad (13)$$

Таким образом, с учетом полученных формул, зная составляющие уравнений (7) и (12), поделив результаты измерения осевых нагрузок R_{z1} и R_{z2} на m_{g1} и m_{g2} соответственно, можно найти статические нагрузки, соответствующие результатам динамических измерений.

Рассмотрим более подробно составляющие формул (7) и (12).

3. Коэффициент влияния подъема k_a

При формировании ровной площадки для измерения весовых параметров автомобиля действие уклона может не учитываться, так как $\sin(0) = 0$, $\cos(0) = 1$, однако в практике

измерений измерительная площадка может иметь незначительный уклон в ту или иную сторону, который может образоваться как при строительстве поста весогабаритного контроля, так и в ходе эксплуатации, что может быть учтено при измерениях соответствующей корректировкой с помощью коэффициента k_a . Для определения фактического уклона могут использоваться лазерные приборы определения плоскостности и уровня поверхностей [9]. Также появляется возможность устранить влияние упругого прогиба дороги, определив его в соответствии с ГОСТ 32729—2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Метод измерения упругого прогиба нежестких дорожных одежд для определения прочности».

4. Коэффициент влияния сопротивления воздуха k_v

В настоящее время имеются публикации, в которых предлагается учитывать сопротивление воздуха при учете загрузки колес крупногабаритных автомобилей [10], что свидетельствует о значительном вкладе данного параметра в перераспределении нагрузок на оси большегрузных автомобилей. При этом, на наш взгляд, в формулу коэффициента влияния сопротивления воздуха при весогабаритном контроле целесообразно ввести не только скорость автомобиля, но для более точных значений и скорость ветра. Для контроля скорости и направления ветра в состав станции весогабаритного контроля необходимо ввести анемометр. Для этого могут быть использованы приборы классического механического типа. Однако предпочтительным является использование приборов на основе использования ультразвука, так как у них отсутствует инерционность и может быть учтена не просто средняя скорость ветра, а также и его порывы [11] в момент измерения.

Составляющая скорости потока воздуха вдоль оси движения автомобиля с учетом ветра может быть найдена по правилу сложения векторов:

$$V = V_a + V_v \cos \theta, \quad (14)$$

где V_a — скорость автомобиля, м/с;

V_v — скорость ветра, м/с;

θ — угол между направлением ветра и направлением движения автомобиля.

При этом принимаем: если ветер дует точно против направления движения автомобиля $\theta = 0^\circ$, если ветер дует точно в направлении движения автомобиля $\theta = 180^\circ$.

В формулах (7) и (12) присутствует плотность воздуха ρ .

Под плотностью воздуха понимают массу атмосферного газа в единице его объема при определенных условиях. В большинстве расчетов достаточно оперировать величиной, равной 1,2249747411202923, или округленно 1,225 кг/м³. Эта величина, называемая стандартной, определена для сухого воздуха при температуре 15 °С на уровне моря (атмосферное давление равно 760 мм рт. ст.). Именно эти значения задают по умолчанию для расчетов.

Однако в данном случае целесообразно получать более точные значения плотности воздуха, учитывая его влажность и температуру, а также величину атмосферного давления. Чем больше температура воздуха, тем меньше его плотность, и наоборот, при повышении атмосферного давления повышается и плотность воздуха.

Влажность воздуха обуславливается присутствием в нем молекул воды в парообразном состоянии. Рассматривая влажный воздух как смесь идеальных газов (сухого воздуха с молярной массой $M_{с.в} = 29$ г/моль и водяного пара с $M_{в.п} = 18$ г/моль, можно заключить, в силу закона Авогадро, что его плотность будет ниже плотности сухого.

Зависимость плотности воздуха от его влажности, атмосферного давления и температуры описывается следующим выражением:

$$\rho = \frac{\left(\frac{P_v}{287,058} + \frac{P_p}{461,495} \right)}{T}, \quad (15)$$

где ρ — плотность влажного воздуха, кг/м³;

P_v — парциальное давление сухого воздуха, Па;

P_p — давление водяного пара, Па;

T — температура, К.

Константы 287,058 и 461,495 в формуле (15) представляют собой, соответственно, газовые постоянные для сухого воздуха и водяного пара, измеряемые в Дж/(кг · К).

Величина давления водяного пара P_p равна произведению относительной влажности ϕ

и парциального давления насыщенного пара $P_{\text{нас}}$, значение которого в Па можно получить из выражения:

$$P_{\text{нас}} = 6,1078 \cdot 10^{(7,5T - 2048,625)/(T - 35,85) + 3}. \quad (16)$$

Парциальное давление сухого воздуха определяется как разность:

$$P_B = B - P_{\text{п}}, \quad (17)$$

где B — барометрическое (атмосферное) давление, выраженное в Па.

Относительная погрешность описанного метода определения плотности воздуха ρ составляет менее 0,2 %.

Также в уравнение коэффициента влияния сопротивления воздуха входит площадь миделя, которая обозначена буквой A . Для проведения корректировочных расчетов может быть определена путем анализа фронтальных снимков автомобиля при прохождении весового контроля.

Коэффициент обтекаемости c_x для грузовых автомобилей при расчетах может быть принят по усредненным значениям табл. 1 либо определен заранее расчетным путем [12] или экспериментально для конкретной модели автомобиля.

Таблица 1. Показатели коэффициента обтекаемости для грузовых автомобилей

Вид автомобиля	Коэффициент обтекаемости, k_v
С колесной формулой 4 × 2	
– с открытой бортовой платформой	0,0619
– с бортовой платформой и двухосным бортовым прицепом	0,0793
С колесной формулой 4 × 4	
– с открытой бортовой платформой	0,0674
Седельный тягач с двухосным полуприцепом-фургоном с колесной формулой	
4 × 2	0,0412
6 × 4	0,051

5. Коэффициент влияния ускорения k_u

В состав данного коэффициента входит ускорение a . Оно может быть измерено непосредственно в момент измерения весовых параметров. На практике измерение данной

величины может производиться несколькими способами.

Первый способ состоит в фиксации времени прохождения колесами автомобиля участка пути, на котором установлены специализированные датчики [13].

Второй способ заключается в установке прибора для измерения ускорения непосредственно на борт транспортного средства и передаче его показаний путем телеметрии на стенд (например, по радиосигналу). Однако данный подход требует переоборудования каждого контролируемого транспортного средства. Кроме того, открываются возможности несанкционированного вмешательства в показания прибора перевозчиками. Поэтому, на наш взгляд, данный подход малоперспективен.

Третий подход заключается в установке на стенд лидарных [14], или лазерных, систем измерения расстояний [15], которые первоначально измеряют текущее положение транспортного средства относительно стенда, а затем по полученным данным производят вычисление текущей скорости и ускорения. Однако данные системы обладают относительно высокой стоимостью, и в последнее время в сфере беспилотных транспортных средств, где они находят широкое применение, вытесняются другими системами.

Четвертый подход основан на использовании видеокамер и обработки видеозаписи с помощью специализированного программного обеспечения. В практике контроля дорожного движения и при проектировании беспилотных транспортных средств данный подход находит все большее применение [16].

6. Коэффициент влияния сопротивления качению k_u

При скорости движения автомобиля до 10–15 м/с коэффициент сопротивления качению можно считать постоянным. В случае же движения с большей скоростью коэффициент сопротивления качению увеличивается, так как деформированная в результате восприятия вертикальной нагрузки шина из-за высокой скорости вращения не успевает полностью распрямиться в пределах пятна контакта шины с дорогой, вследствие чего колесу возвращается не вся запасенная

Таблица 2. Значения коэффициентов сопротивления качению

Вид и состояние дорожного покрытия	f_{R0} при $V_a < 15$ м/с	f_{Rcp}
Асфальтобетонное или цементобетонное шоссе в состоянии: отличном	0,014	0,014
удовлетворительном	0,018	0,018–0,020
Булыжная мостовая	0,025	0,023–0,025
С гравийным покрытием	0,020	0,020–0,025
Грунтовая дорога: сухая укатанная после дождя	0,020–0,035 —	0,050–0,150 0,020–0,035
Песок	—	0,050–0,150
Укатанный снег	—	0,070–0,100

в результате упругой деформации энергия [17]. Кроме того, при повышении скорости деформации возрастает внутреннее трение в слоях шины, также вызывающее увеличение коэффициента f . Для определения коэффициента сопротивления качению в зависимости от скорости автомобиля V_a пользуются следующими эмпирическими формулами. Для дорог с удовлетворительным качеством покрытия:

$$f = f_{R0} \left(1 + \frac{V_a^2}{1500} \right). \quad (18)$$

где f_{R0} — коэффициент сопротивления качению при движении автомобиля с малой скоростью (табл. 2);

V_a — скорость автомобиля.

При движении автомобиля по дороге с асфальтобетонным или цементобетонным покрытием отличного качества применяют формулу:

$$f = \frac{32 + V_a}{2800}. \quad (19)$$

Также в составе формул присутствуют координаты центра масс h_g и L_2 .

7. Координаты центра масс

Координаты центра масс могут быть рассчитаны для каждого конкретного автомобиля по результатам измерения нагрузки по осям при его движении с уклоном, для чего возможна

организация дополнительного поста весогабаритного контроля.

Таким образом, с помощью полученных уравнений для R_{z1} , R_{z2} , зная массу автомобиля, распределение масс по осям автомобиля R_{z1} , R_{z2} , координаты центра масс (h_g , L_1), значение ускорения автомобиля в момент измерения, можно в соответствии с приведенными формулами привести результаты измерений распределения масс по осям автомобиля к статическим испытаниям.

Для нахождения координат центра масс можно провести измерение весовых параметров при наличии продольного уклона автомобиля (угла α).

Математически задачу можно поставить следующим образом: необходимо решить систему из шести уравнений:

$$R_{zp1} = \frac{G_a L_2}{L} \times \left(\cos \alpha_1 - \frac{h_g}{L_2} \sin \alpha_1 - \frac{c_x \rho A V^2}{2 G_a L_2} h_v - \frac{a}{g} \frac{h_g}{L_2} - f \frac{r_k}{L_2} \right), \quad (20)$$

$$R_{zz1} = \frac{G_a L_1}{L} \times \left(\cos \alpha_1 + \frac{h_g}{L_1} \sin \alpha_1 + \frac{c_x \rho A V^2}{2 G_a L_1} h_v + \frac{a}{g} \frac{h_g}{L_1} + f \frac{r_k}{L_1} \right), \quad (21)$$

$$R_{zp2} = \frac{G_a L_2}{L} \times \left(\cos \alpha_2 - \frac{h_g}{L_2} \sin \alpha_2 - \frac{c_x \rho A V^2}{2 G_a L_2} h_v - \frac{a}{g} \frac{h_g}{L_2} - f \frac{r_k}{L_2} \right), \quad (22)$$

$$R_{zz2} = \frac{G_a L_1}{L} \times \left(\cos \alpha_2 + \frac{h_g}{L_1} \sin \alpha_2 + \frac{c_x \rho A V^2}{2 G_a L_1} h_v + \frac{a}{g} \frac{h_g}{L_1} + f \frac{r_k}{L_1} \right), \quad (23)$$

$$L = L_1 + L_2, \quad (24)$$

$$G_a = \frac{R_{zz1} - R_{zz2} + R_{zp1} - R_{zp2}}{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_1} \quad (25)$$

и найти аналитические зависимости для нахождения неизвестных переменных h_g , L_1 , L_2 , G_a , при условии, что все остальные переменные известны.

Для этого необходимо решить систему представленных уравнений (20)–(25) и найти аналитическую зависимость для неизвестной переменной G_a , а затем найти зависимости для других неизвестных переменных h_g , L_1 , L_2 . Все остальные переменные известны. В ходе решения будем использовать только аналитические методы. В конечном уравнении для нахождения G_a должны отсутствовать все неизвестные переменные: h_g , L_1 , L_2 .

Шаг 1: упростим уравнения (20)–(25) исключением h_g .

Заметим, что h_g входит в уравнения линейно. Давайте сложим уравнения (20) и (21), а также (22) и (23):

$$R_{zp1} + R_{zz1} = \frac{G_a}{L} \times \left((L_2 \cos \alpha_1 - h_g \sin \alpha_1 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{2G_a} - \frac{a}{g} h_g - f r_k + \right. \\ \left. + L_1 \cos \alpha_1 + h_g \sin \alpha_1 + \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{2G_a} + \frac{a}{g} h_g + f r_k \right), \quad (26)$$

$$R_{zp1} + R_{zz1} = \frac{G_a}{L} (L_1 + L_2) \cos \alpha_1 = G_a \cos \alpha_1, \quad (27)$$

$$R_{zp2} + R_{zz2} = \frac{G_a}{L} \times \left(L_2 \cos \alpha_2 - h_g \sin \alpha_2 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{2G_a} - \frac{a}{g} h_g - f r_k + \right. \\ \left. + L_1 \cos \alpha_2 + h_g \sin \alpha_2 + \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{2G_a} + \frac{a}{g} h_g + f r_k \right), \quad (28)$$

$$R_{zp2} + R_{zz2} = \frac{G_a}{L} (L_1 + L_2) \cos \alpha_2 = G_a \cos \alpha_2. \quad (29)$$

Обратите внимание, что h_g исключилась из уравнений.

Шаг 2: исключение L_1 и L_2 .

Теперь у нас есть два уравнения (27) и (29) с одной неизвестной G_a . Из уравнения (27) получаем:

$$G_a = \frac{R_{zp1} + R_{zz1}}{\cos \alpha_1}. \quad (30)$$

Из уравнения (29) получаем:

$$G_a = \frac{R_{zp2} + R_{zz2}}{\cos \alpha_2}. \quad (31)$$

Так как оба выражения должны быть равны G_a , мы можем записать:

$$\frac{R_{zp1} + R_{zz1}}{\cos \alpha_1} = \frac{R_{zp2} + R_{zz2}}{\cos \alpha_2}. \quad (32)$$

Это соотношение связывает известные величины и может быть использовано для проверки корректности данных.

Однако мы ищем G_a . Поскольку оба выражения (30) и (31) дают G_a , мы можем выбрать любое из них. Выберем (30):

$$G_a = \frac{R_{zp1} + R_{zz1}}{\cos \alpha_1}.$$

Шаг 3: окончательное решение.

Итак, мы получили аналитическое выражение для G_a , которое не содержит неизвестных h_g , L_1 и L_2 :

$$G_a = \frac{R_{zp1} + R_{zz1}}{\cos \alpha_1}$$

или

$$G_a = \frac{R_{zp2} + R_{zz2}}{\cos \alpha_2}.$$

Таким образом, мы нашли аналитическую зависимость для неизвестной переменной G_a .

Теперь найдем аналитические зависимости для h_g , L_1 и L_2 .

Шаг 1: выражение для h_g .

Вернемся к исходным уравнениям (20) и (21). Вычтем уравнение (20) из (21):

$$R_{zz1} - R_{zp1} = \frac{G_a}{L} \left(L_1 \cos \alpha_1 + h_g \sin \alpha_1 + \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{2 G_a} + \frac{a}{g} h_g + f r_k - \left(L_2 \cos \alpha_1 - h_g \sin \alpha_1 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{2 G_a} - \frac{a}{g} h_g - f r_k \right) \right), \quad (33)$$

$$R_{zz1} - R_{zp1} = \frac{G_a}{L} \left((L_1 - L_2) \cos \alpha_1 + 2 h_g \sin \alpha_1 + \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} + 2 \frac{a}{g} h_g + 2 f r_k \right). \quad (34)$$

Умножим обе части на L/G_a :

$$\frac{(R_{zz1} - R_{zp1}) L}{G_a} = (L_1 - L_2) \cos \alpha_1 + 2 h_g \sin \alpha_1 + \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} + 2 \frac{a}{g} h_g + 2 f r_k. \quad (35)$$

Перегруппируем члены, чтобы выделить h_g :

$$2 h_g \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) = \frac{(R_{zz1} - R_{zp1}) L}{G_a} - (L_1 - L_2) \cos \alpha_1 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} - 2 f r_k. \quad (36)$$

Теперь выразим h_g :

$$h_g = \frac{\left[(R_{zz1} - R_{zp1}) L / G_a - (L_1 - L_2) \cos \alpha_1 - (c_x \rho A V^2 h_v) / G_a - 2 f r_k \right]}{2 (\sin \alpha_1 + a / g)}. \quad (37)$$

Аналогично, вычитая (22) из (23), получим:

$$h_g = \frac{\left[(R_{zz2} - R_{zp2}) L / G_a - (L_1 - L_2) \cos \alpha_2 - (c_x \rho A V^2 h_v) / G_a - 2 f r_k \right]}{2 (\sin \alpha_2 + a / g)}. \quad (38)$$

Мы получили два выражения для h_g . Однако они содержат L_1 и L_2 , которые нам также нужно определить.

Шаг 2: выражения для L_1 и L_2 .

Вычтем (37) из (38):

$$0 = \frac{(R_{zz2} - R_{zp2}) L / G_a - (L_1 - L_2) \cos \alpha_2 - (c_x \rho A V^2 h_v) / G_a - 2 f r_k}{2 (\sin \alpha_2 + a / g)} - \frac{(R_{zz1} - R_{zp1}) L / G_a - (L_1 - L_2) \cos \alpha_1 - (c_x \rho A V^2 h_v) / G_a - 2 f r_k}{2 (\sin \alpha_1 + a / g)}. \quad (39)$$

Упростим это выражение, для чего умножим обе части на $2 (\sin \alpha_1 + a / g) (\sin \alpha_2 + a / g)$, чтобы избавиться от знаменателей:

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{(R_{zz2} - R_{zp2})L}{G_a} - (L_1 - L_2) \cos \alpha_2 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} - \right. \\
& \left. - \frac{2 f r_k (R_{zz2} - R_{zp2})L}{G_a} - (L_1 - L_2) \cos \alpha_2 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} - 2 f r_k \right] \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) - \\
& - \left[\frac{(R_{zz1} - R_{zp1})L}{G_a} - (L_1 - L_2) \cos \alpha_1 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} - \right. \\
& \left. - \frac{2 f r_k (R_{zz1} - R_{zp1})L}{G_a} - (L_1 - L_2) \cos \alpha_1 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} - 2 f r_k \right] \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) = 0.
\end{aligned} \quad (40)$$

Раскроем скобки:

$$\begin{aligned}
& \frac{(R_{zz2} - R_{zp2})L}{G_a} \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) - (L_1 - L_2) \cos \alpha_2 \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) - 2 f r_k \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) - \\
& - \frac{(R_{zz1} - R_{zp1})L}{G_a} \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) + (L_1 - L_2) \cos \alpha_1 \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) + \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) + 2 f r_k \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) = 0.
\end{aligned} \quad (41)$$

Сгруппируем члены с $(L_1 - L_2)$ и без:

$$\begin{aligned}
& (L_1 - L_2) \left[\cos \alpha_1 \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - \cos \alpha_2 \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) \right] = (R_{zz1} - R_{zp1}) \frac{L}{G_a} \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - \\
& - (R_{zz2} - R_{zp2}) \frac{L}{G_a} \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) + \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) + 2 f r_k (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2).
\end{aligned} \quad (42)$$

Упростим выражение в квадратных скобках после $(L_1 - L_2)$:

$$\cos \alpha_1 \sin \alpha_2 + \cos \alpha_1 \frac{a}{g} - \cos \alpha_2 \sin \alpha_1 - \cos \alpha_2 \frac{a}{g}. \quad (43)$$

Сгруппируем члены с $\frac{a}{g}$:

$$\cos \alpha_1 \sin \alpha_2 - \cos \alpha_2 \sin \alpha_1 + (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \frac{a}{g}. \quad (44)$$

Запишем формулу синуса разности:

$$\sin(\alpha_2 - \alpha_1) = \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 \sin \alpha_1. \quad (45)$$

Заметим, что первая часть выражения (45): $(\cos \alpha_1 \sin \alpha_2 - \cos \alpha_2 \sin \alpha_1)$ совпадает с правой частью формулы синуса разности:

$$\sin(\alpha_2 - \alpha_1) = \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 \sin \alpha_1. \quad (46)$$

Подставим:

$$\sin(\alpha_2 - \alpha_1) + (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \frac{a}{g}. \quad (47)$$

Таким образом, получим:

$$\cos \alpha_1 \sin \alpha_2 - \cos \alpha_2 \sin \alpha_1 + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = \sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (48)$$

Подставим получившееся выражение в формулу (42):

$$\begin{aligned} (L_1 - L_2) \left[\sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \right] &= \frac{L}{G_a} \left[(R_{zz1} - R_{zp1}) \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - (R_{zz2} - R_{zp2}) \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) \right] + \\ &+ \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) + 2 f r_k (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2). \end{aligned} \quad (49)$$

Теперь мы можем выразить $(L_1 - L_2)$:

$$L_1 - L_2 = \frac{\left\{ \frac{L}{G_a} \left[(R_{zz1} - R_{zp1}) \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - (R_{zz2} - R_{zp2}) \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) \right] + \right.}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)} \left. + \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) + 2 f r_k (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \right\}. \quad (50)$$

Шаг 3: окончательные выражения для L_1 и L_2 .

Обозначим левую часть уравнения (50) как ΔL и упростим:

$$\Delta L = \frac{\left\{ \frac{L}{G_a} \left[(R_{zz1} - R_{zp1}) \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - (R_{zz2} - R_{zp2}) \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) \right] + \left(\frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} + 2 f r_k \right) (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \right\}}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}. \quad (51)$$

Теперь у нас есть система уравнений:

$$L_1 + L_2 = L, \quad (52)$$

$$L_1 - L_2 = \Delta L. \quad (53)$$

Складывая эти уравнения, получаем:

$$2L_1 = L + \Delta L. \quad (54)$$

$$L_1 = (L + \Delta L) / 2. \quad (55)$$

Вычитая второе уравнение из первого, получаем:

$$2L_2 = L - \Delta L. \quad (56)$$

$$L_2 = (L - \Delta L) / 2. \quad (57)$$

Теперь подставим в уравнение (55) выражение (51) для ΔL :

$$L_1 = \frac{L + \frac{\left\{ \frac{L}{G_a} \left[(R_{zz1} - R_{zp1}) \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - (R_{zz2} - R_{zp2}) \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) \right] + \left(\frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} + 2 f r_k \right) (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \right\}}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}}{2}. \quad (58)$$

Аналогично подставляя в уравнение (57) выражение (51) для ΔL , получим:

$$L_2 = \frac{L - \frac{\left\{ \frac{L}{G_a} \left[(R_{zz1} - R_{zp1}) \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - (R_{zz2} - R_{zp2}) \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) \right] + \left(\frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} + 2 f r_k \right) (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \right\}}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}}{2}. \quad (59)$$

Шаг 4: окончательное выражение для h_g .

Теперь, когда у нас есть выражения для L_1 и L_2 , мы можем подставить их в любое из выражений для h_g (37) или (38). Используем (38):

$$h_g = \frac{\frac{(R_{zz1} - R_{zp1})L}{G_a} - (L_1 - L_2) \cos \alpha_1 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} - 2 f r_k}{2 \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right)}.$$

Заметим, что $L_1 - L_2 = \Delta L$, поэтому:

$$h_g = \frac{\frac{(R_{zz1} - R_{zp1})L}{G_a} - \Delta L \cos \alpha_1 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} - 2 f r_k}{2 \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right)}, \quad (60)$$

где согласно формуле (51):

$$\Delta L = \frac{\frac{L}{G_a} \left[(R_{zz1} - R_{zp1}) \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - (R_{zz2} - R_{zp2}) \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) \right] + \left(\frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} + 2 f r_k \right) (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}.$$

И G_a мы нашли ранее, формула (30): $G_a = \frac{R_{zp1} + R_{zz1}}{\cos \alpha_1}$

или формула (31): $G_a = \frac{R_{zp2} + R_{zz2}}{\cos \alpha_2}$.

Мы получили аналитические зависимости для всех неизвестных переменных:

G_a , формула (30): $G_a = \frac{R_{zp1} + R_{zz1}}{\cos \alpha_1}$

или формула (31): $G_a = \frac{R_{zp2} + R_{zz2}}{\cos \alpha_2}$.

L_1 , формула (58):

$$L_1 = \frac{L + \frac{\left\{ \frac{L}{G_a} \left[(R_{zz1} - R_{zp1}) \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - (R_{zz2} - R_{zp2}) \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) \right] + \left(\frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} + 2 f r_k \right) (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \right\}}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}}{2}.$$

L_2 , формула (59):

$$L_2 = \frac{L - \frac{\left\{ \frac{L}{G_a} \left[(R_{zz1} - R_{zp1}) \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - (R_{zz2} - R_{zp2}) \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) \right] + \left(\frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} + 2 f r_k \right) (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \right\}}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}}{2}.$$

$$h_g, \text{ формула (60): } h_g = \frac{\frac{(R_{zz1} - R_{zp1})L}{G_a} - \Delta L \cos \alpha_1 - \frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} - 2 f r_k}{2 \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right)},$$

где согласно формуле (51):

$$\Delta L = \frac{\frac{L}{G_a} \left[(R_{zz1} - R_{zp1}) \left(\sin \alpha_2 + \frac{a}{g} \right) - (R_{zz2} - R_{zp2}) \left(\sin \alpha_1 + \frac{a}{g} \right) \right] + \left(\frac{c_x \rho A V^2 h_v}{G_a} + 2 f r_k \right) (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{a}{g} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}.$$

Эти выражения позволяют найти значения G_a , L_1 , L_2 и h_g , используя только известные величины (R_{zp1} , R_{zz1} , R_{zp2} , R_{zz2} , α_1 , α_2 , c_x , ρ , A , V , h_v , a , g , f , r_k , L).

Используя полученные значения веса автомобиля и координат центра масс, можно найти нагрузку на оси автомобиля, эквивалентную статическим измерениям (формулы (1) и (2)):

$$R_{z1} = G_a \frac{L_2}{L}; \quad R_{z2} = G_a \frac{L_1}{L}.$$

Перед использованием этих формул важно убедиться, что исходные данные (R_{zp1} , R_{zz1} , R_{zp2} , R_{zz2} , α_1 , α_2) согласованы. Как мы видели ранее, согласно уравнениям (29) и (30) должно выполняться условие:

$$\frac{R_{zp1} + R_{zz1}}{\cos \alpha_1} = \frac{R_{zp2} + R_{zz2}}{\cos \alpha_2} = G_a. \quad (61)$$

Если это условие не выполняется, данные могут быть некорректными и результаты вычислений будут неверными.

Особые случаи: формулы для L_1 и L_2 содержат $\sin(\alpha_2 - \alpha_1)$ в знаменателе. Если $\alpha_1 = \alpha_2$, то $\sin(\alpha_1 - \alpha_2) = 0$, и формулы становятся неприменимыми. Это означает, что в случае, когда углы α_1 и α_2 равны, система уравнений не имеет единственного решения для L_1 и L_2 , и требуется другой подход для их определения. Фактически это означает, что для нахождения

всех переменных должно быть два измерения с двумя различными углами уклона.

Также полученные значения L_1 и L_2 должны быть положительными, а их сумма должна быть равна L . Если это не так, это может указывать на ошибки в данных или некорректность модели. Аналогично h_g должно иметь физически осмысленное значение.

Таким образом, мы успешно решили систему уравнений и получили аналитические зависимости для всех неизвестных переменных. Однако важно помнить о необходимости проверки данных, а также требуется учитывать особые случаи, чтобы гарантировать корректность результатов.

По полученным зависимостям составлена расчетная программа на языке Visual Basic for Application в среде MS Excel. В качестве примера расчета в табл. 3 приведены исходные значения переменных, а в табл. 4 — результаты расчета по разработанной программе.

Таблица 3. Исходные данные расчетной программы

Переменная	Значение
α_1 — угол уклона дороги при первом измерении, градусы	0
α_2 — угол уклона дороги при втором измерении, градусы	10
B — барометрическое (атмосферное) давление, Па	101 325
c_x — коэффициент обтекаемости	0,65
A_{mid} — площадь миделя (лобовая площадь автомобиля), m^2	6
a — ускорение автомобиля, m/c^2	0,2
V_a — скорость автомобиля, m/c	10
r_k — радиус колес, м	0,5
f — коэффициент сопротивления качению	0,015
R_{zp1} — нагрузка на переднюю ось при первом измерении, Н	2500
R_{zz1} — нагрузка на заднюю ось при первом измерении, Н	2500
R_{zp2} — нагрузка на переднюю ось при втором измерении, Н	2200
R_{zz2} — нагрузка на заднюю ось при втором измерении, Н	2800
g — ускорение свободного падения для данного географического места, m/c^2	9,81
L — база автомобиля, м	5
t — температура во время измерения, $^{\circ}C$	20
F_i — относительная влажность воздуха (0 — 1)	0,3
h_v — высота центра приложения силы сопротивления воздуха, м	2
V_v — скорость ветра, m/c	10
θ — угол между направлением ветра и направлением движения автомобиля, градусы	15

Таблица 4. Результаты расчета по программе

Переменная	Значение
G_a — сила тяжести автомобиля, Н	5000
T — температура в градусах Кельвина, К	293,15
$P_{\text{нас}}$ — парциальное давление насыщенного пара, Па	23381
P_n — давление водяного пара, Па	7014
P_v — парциальное давление сухого воздуха, Па	94 311
ρ — плотность воздуха, кг/м ³	1,1726
V — скорость потока воздуха относительно автомобиля с учетом скорости ветра, м/с	20,0000
L_1 — расстояние от передней оси до центра тяжести автомобиля, м	2,0922
L_2 — расстояние от задней оси до центра тяжести автомобиля, м	2,9078
$L_1 - L_2$, м	-0,8157
h_g — высота центра тяжести автомобиля, м	1,6919
R_{zp} — нагрузка на переднюю ось, эквивалентную статическим измерениям, Н	2907,8
R_{zz} — нагрузка на заднюю ось, эквивалентную статическим измерениям, Н	2092,1

8. Оценка влияния факторов на искажение результатов динамического измерения весовых параметров автомобиля без предлагаемых корректировок

Как видно из структуры формул (7) и (12), отклонение коэффициента влияния подъема k_a от единицы и отклонение других коэффициентов (коэффициента влияния сопротивления воздуха k_v , коэффициента влияния ускорения качению k_ρ , коэффициента влияния сопротивления качению k_f) формул (7) и (12) от нуля соответствует влиянию каждого соответствующего коэффициента на перераспределение массы автомобиля между осями в долях единицы. Для подтверждения практической значимости каждого коэффициента было проведено изменение значения каждого из перечисленных коэффициентов при изменении наиболее значимых факторов. Расчет каждого из рассматриваемых коэффициентов проводился по соответствующей составляющей формулы (7). При этом задавалось изменение одного из факторов, остальные оставались неизменными и соответствовали значениям, приведенным в табл. 3, 4.

Результаты проведенного расчетного исследования приведены на рис. 2–6.

Проведенное расчетное моделирование показало значительное влияние изменения каждого из рассмотренных факторов на перераспределение осевой нагрузки автомобиля

в движении и практическую целесообразность введения расчетной корректировки весовых параметров АТС при измерении в движении.

Заключение

В представленной работе исследована актуальная проблема повышения точности автоматизированных систем динамического контроля осевых нагрузок АТС. Установлено, что существующие системы, основанные на измерении весовых параметров в движении, не в полной мере учитывают влияние динамических сил, действующих на АТС, что может приводить к погрешностям в определении осевых нагрузок и, как следствие, к необоснованным штрафным санкциям.

Целью исследования являлось повышение достоверности определения весогабаритных параметров АТС. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель, учитывающая влияние продольной составляющей силы тяжести (при наличии уклона дорожного полотна), силы сопротивления воздуха, силы инерции и силы сопротивления качению на распределение осевых нагрузок АТС в процессе движения. Модель представлена в виде уравнений, описывающих вертикальные реакции на передней и задней осях двухосного грузового автомобиля. Введены коэффициенты, отражающие вклад каждой из перечисленных сил.

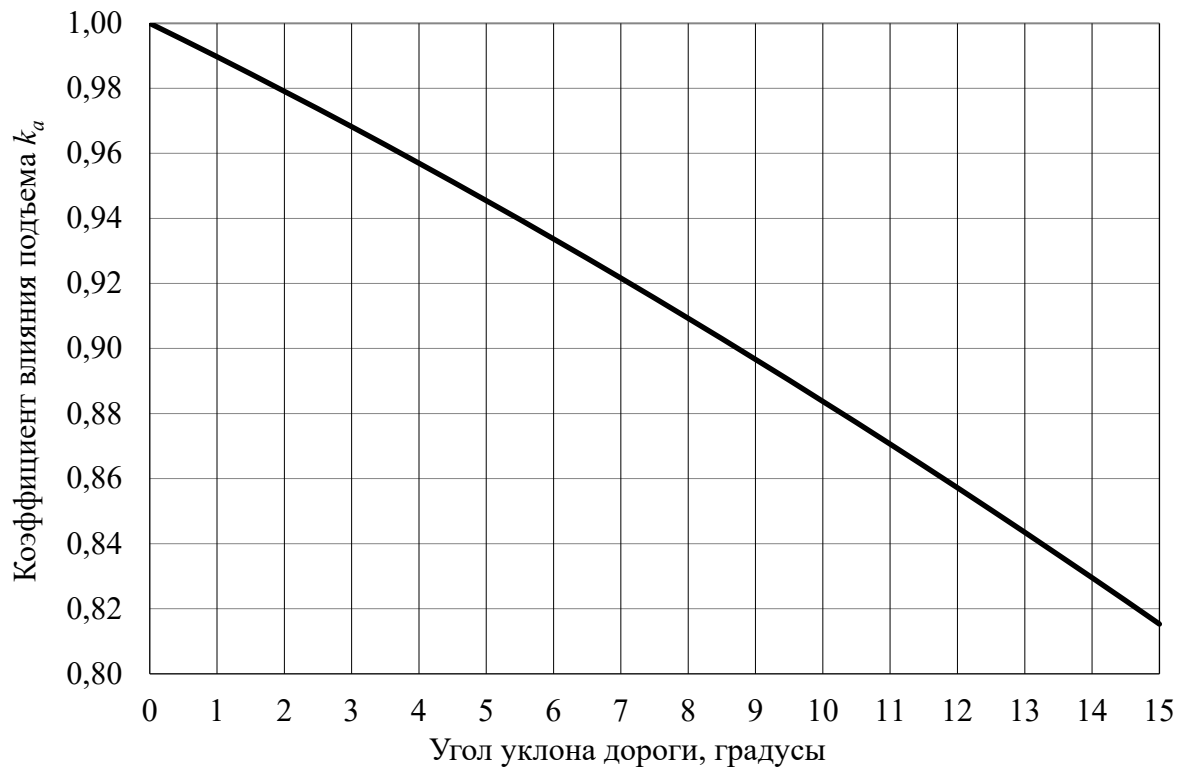


Рис. 2. Влияние угла уклона дороги на коэффициент влияния подъема k_a

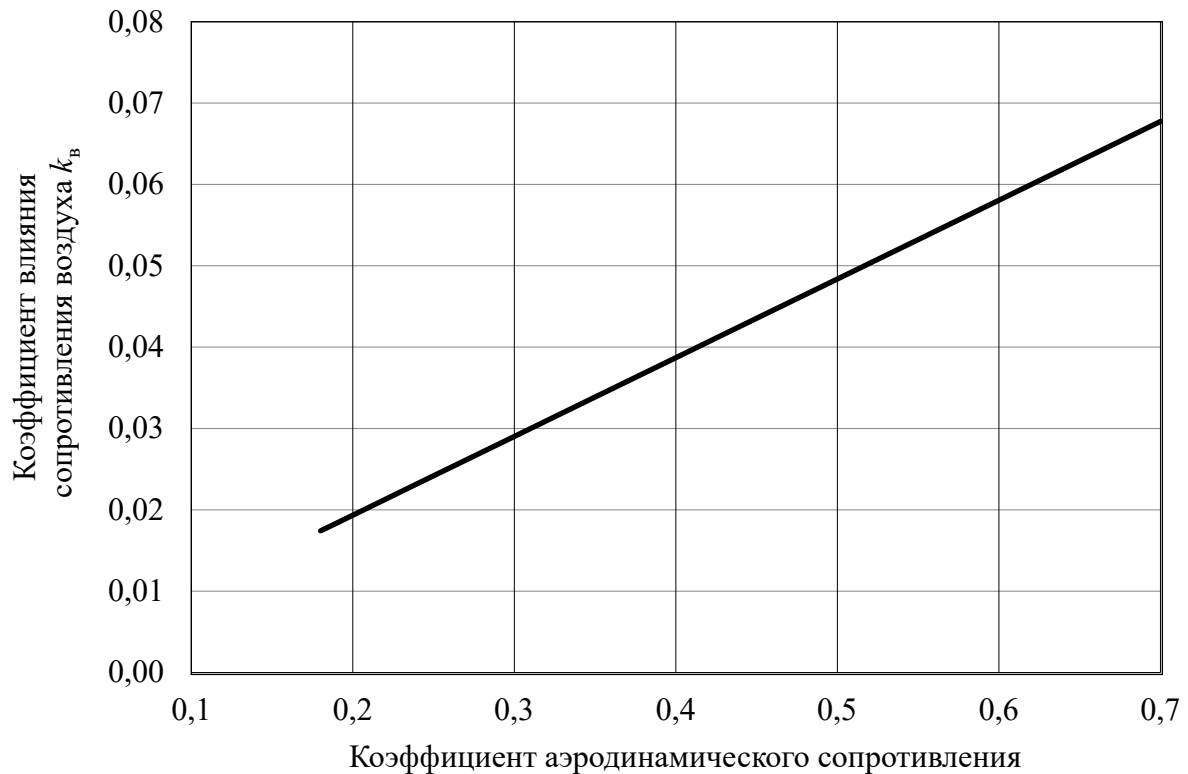


Рис. 3. Влияние коэффициента аэродинамического сопротивления на коэффициент влияния сопротивления воздуха k_b

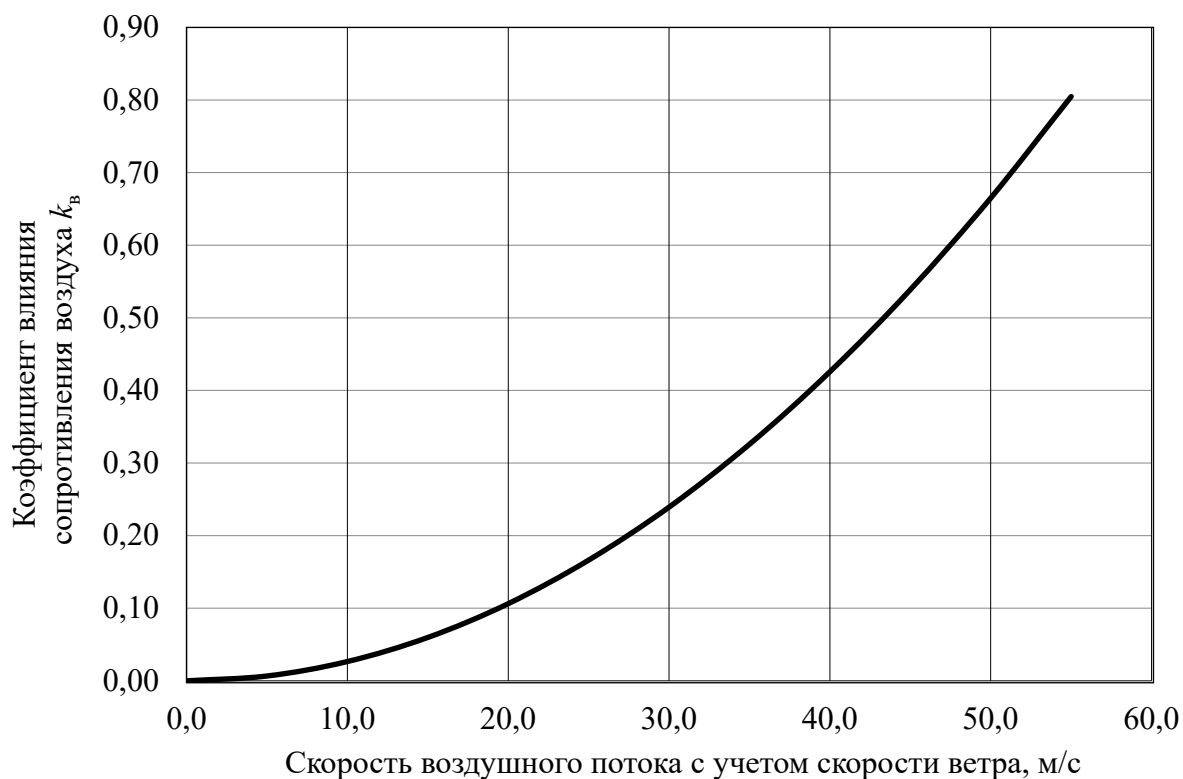


Рис. 4. Влияние скорости воздушного потока с учетом скорости ветра на коэффициент влияния сопротивления воздуха k_v

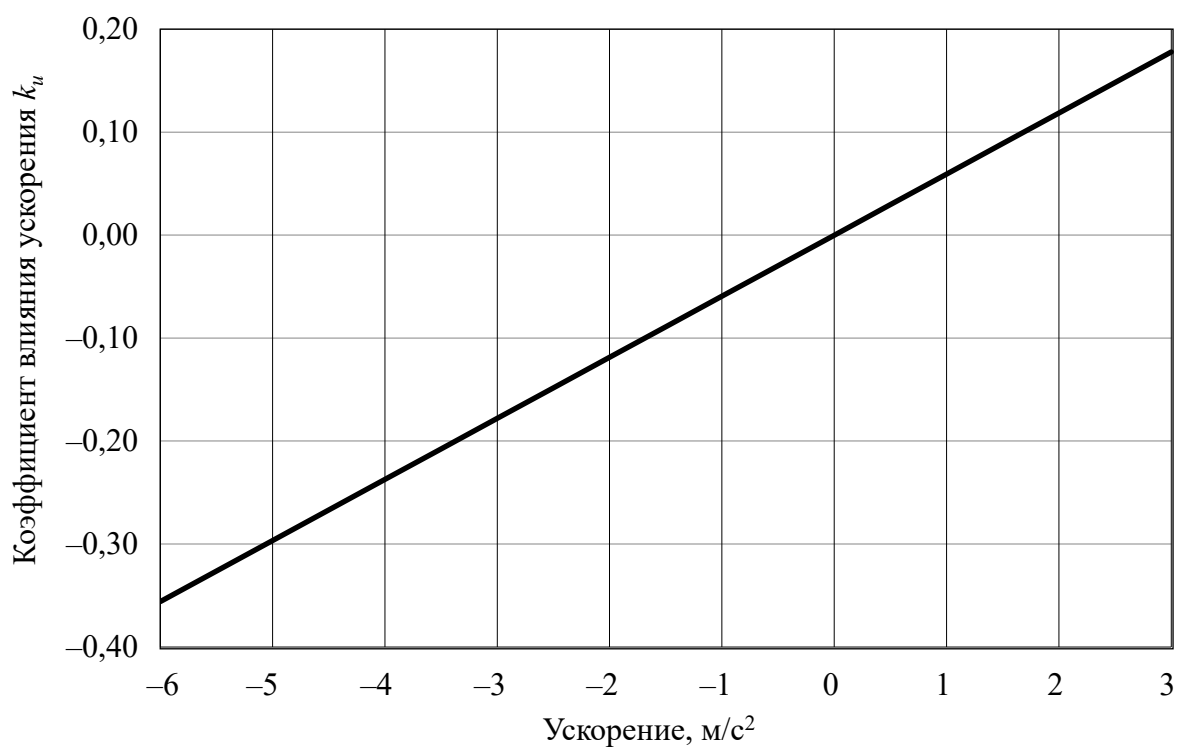


Рис. 5. Влияние ускорения на коэффициент влияния ускорения k_u

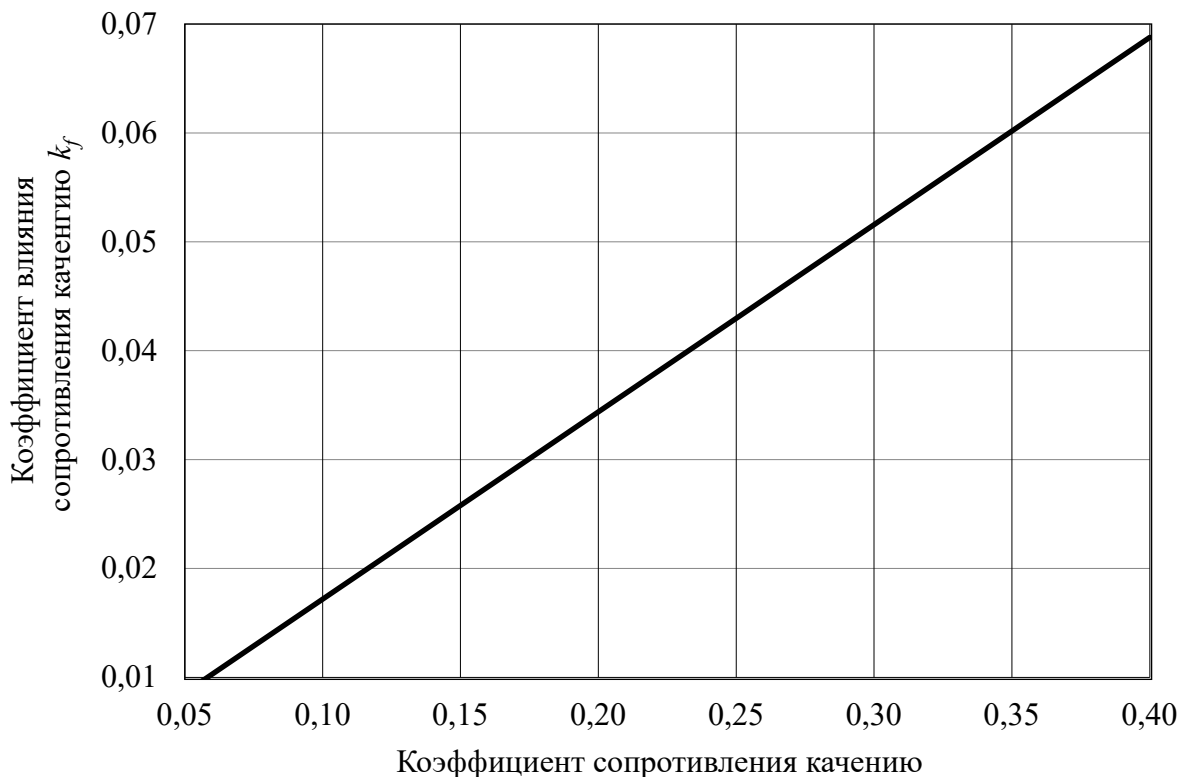


Рис. 6. Влияние коэффициента сопротивления качению на коэффициент влияния сопротивления качению k_f

2. На основе разработанной математической модели составлено программное обеспечение для оценки весогабаритных параметров авто-транспортных средств в движении.

3. Предложены пути практической реализации разработанной модели, включающие:

- измерение уклона дорожного полотна с помощью лазерных приборов;
- использование ультразвуковых анемометров для точного определения скорости и порывов ветра;
- расчет плотности воздуха с учетом его влажности, температуры и атмосферного давления по предложенной формуле;
- определение площади миделя АТС по фронтальным снимкам;
- использование реальных значений коэффициента обтекаемости для различных типов грузовых автомобилей.

Научная новизна работы заключается в разработке комплексной модели, учитывающей широкий спектр динамических факторов, влияющих на точность измерения осевых нагрузок АТС в движении. Предложенные усовершенствования позволяют перейти от упрощенных предположений к более точным

расчетам, основанным на реальных физических параметрах.

Практическая значимость результатов исследования состоит в возможности создания более совершенных систем весогабаритного контроля, обеспечивающих:

- повышение точности определения осевых нагрузок АТС;
- снижение вероятности ошибочного наложения штрафов за перегруз;
- улучшение контроля за состоянием дорожного покрытия и обеспечение безопасности дорожного движения;
- повышение эффективности перевозочного процесса за счет более точного учета весовых параметров.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку программного обеспечения для реализации предложенной модели, проведение экспериментальной проверки полученных результатов на реальных АТС и адаптацию модели для многоосных транспортных средств. Также перспективным является исследование влияния других факторов, таких как неравномерность распределения груза в кузове, на точность динамического взвешивания. ▲

Список источников

1. Mukhlisin I. Legal Study on the Oversight of Overloaded Motor Vehicles: Efforts to Protect Road Safety and Infrastructure / I. Mukhlisin, M. Hariri, Sainul // *ISTINBATH Jurnal Hukum*. — 2024. — Vol. 21. — Iss. 2. — Pp. 55–70. — DOI: 10.32332/istinbath.v21i02.9847.
2. Manik. Pengaruh Muatan Berlebih (Overloading) Terhadap Umur Rencana Jalan / Manik, Lolo Jumpa Ate, Siregar, Parlindungan // *Jurnal Dunia Pendidikan*. — 2024. — Vol. 4. — Iss. 3. — Pp. 1340–1351. — DOI: 10.55081/jurdip.v4i3.2158.
3. Nugraha W. Reliability Evaluation of Steel Truss Bridge Due to Traffic Load Based on Bridge Weigh-in-Motion Measurement / W. Nugraha, I. D. Sidi, E. Zulkifli // *Structural Monitoring and Maintenance*. — 2022. — Vol. 9. — Iss. 4. — Pp. 323–336. — DOI: 10.12989/smm.2022.9.4.323.
4. Belikova D. D. The Design and Evaluation of a Telematic Automated System of Weight Control for Heavy Vehicles / D. D. Belikova, R. N. Safiullin // *Infrastructures*. — 2022. — Vol. 7. — Art. 86. — DOI: 10.3390/infrastructures7070086.
5. Manik L. J. A. Pengaruh Muatan Berlebih (Overloading) Terhadap Umur Rencana Jalan / L. J. A. Manik, P. Siregar, J. A. Dan // *Jurnal Dunia Pendidikan*. — 2024. — Vol. 4. — Iss. 3. — Pp. 1340–1351. — DOI: 10.55081/jurdip.v4i3.2158.
6. Yessian S. Review on Automatic Over-Load Indication System / S. Yessian, A. R. Thangavel, S. Natraj, S. V. R. Madhusuthanan et al. // *Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Mathematics and Computational Sciences 2022 (ICAMCS-2022)*. — January 2024. — DOI: 10.1063/5.0195342.
7. Oyekanmi O. J. Load Damaging Effects of Overloaded Trucks on Federal Highway Pavement Structures in Nigeria / O. J. Oyekanmi, A. E. Ejem // *Book Publisher International*. — 2022. — DOI: 10.9734/bpi/rdst/v5/2186B.
8. Гавриленков С. И. Влияние режимов движения АТС и характеристик дорожного покрытия на результаты автоматического измерения их весогабаритных параметров / С. И. Гавриленков, С. С. Гаврюшин, С. Л. Жуков, М. В. Сенянский // *Приборы*. — 2020. — № 1(235). — С. 22–33.
9. Mikita T. Forest Road Wearing Course Damage Assessment Possibilities with Different Types of Laser Scanning Methods Including New iPhone LiDAR Scanning / T. Mikita, D. Krausková, P. Hruža, M. Cibulka et al. // *Forests*. — 2022. — Vol. 13. — Iss. 11. — Art. 1763. — DOI: 10.3390/f13111763.
10. Дадонов М. В. Перераспределение нагрузок на колеса карьерных самосвалов за счет воздействия аэродинамических нагрузок / М. В. Дадонов, А. Г. Кульпин // *Горное оборудование и электромеханика*. — 2022. — № 1(159). — С. 3–8. — DOI: 10.26730/1816-4528-2022-1-3-8.
11. Deng E. 3D ultrasonic anemometer array reveals jet flow structures at the entrance of high-speed railway tunnel / E. Deng, Xin-Yuan Liu, De-Hui Ouyang, Huan Yue // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. — 2025. — Vol. 257. — Iss. 5. — Art. no. 106004. — DOI: 10.1016/j.jweia.2024.106004.
12. Nunes L. Computational Simulation of an Aerodynamic Profile of a Vehicle SAE Formula Type Using OpenFOAM / L. Nunes, E. R. C. G. Freire, J. L. Ansoni // *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*. — 2022. — Vol. 43. — Iss. 1. — Pp. 3–10. — DOI: 10.5433/1679-0375.2022v43n1p3.
13. Cantero D. Vehicle Speed Estimation in BWIM Systems via Convolutional Reciprocity / D. Cantero, C.-W. Kim // *Proceedings of IABMAS 2024*. — Copenhagen, Denmark, June 2024. — DOI: 10.1201/9781003483755-158.
14. Alam P. LiDAR-OdomNet: LiDAR Odometry Network Using Feature Fusion Based on Attention / P. Alam, R. Pachamuthu // *IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC), Washington DC, January 2025*. — DOI: 10.1109/VTC2024-Fall63153.2024.10757604.
15. Chaudhary S. Coherent detection-based photonic radar for autonomous vehicles under diverse weather conditions / S. Chaudhary, L. Wuttisittikulij, M. Saadi et al. // *PLOS One*. — 2021. — Vol. 16. — Iss. 11. — Art. 0259438. — DOI: 10.1371/journal.pone.0259438.
16. Mouafo D. Uncalibrated camera approach for vehicle speed estimation using detection and tracking / D. Mouafo, U. Biaou // *Signal Image and Video Processing*. — 2024. — Vol. 18. — Iss. 12. — Pp. 8819–8827. — DOI: 10.1007/s11760-024-03509-2.
17. Priliepo N. Interactions of a Deformable Wheel with a Deformable Support Surface / N. Priliepo, V. Kovbasa // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. — 2024. — Vol. 13. — Iss. 9. — DOI: 10.35940/ijitee.I9944.13090824.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 2, pp. 144–163

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-144-163

Improved Automatic Dynamic Control Systems for Axial Loads of Motor Vehicles in Respect of Forces Acting During Movement

Information about authors

Kuverin I. Yu., PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: igorkuv@mail.ru

Khilyuk Yu. A., Postgraduate Student. E-mail: hilyuk@ya.ru

Gusev S. A., Doctor in Economics, Professor, Head of the Department.

E-mail: o051nm@yandex.ru

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Department of "Organization of transportation, traffic safety and car service", Saratov

Abstract: This paper is devoted to the pressing issue of improving the accuracy of automatic dynamic control systems for vehicle axial loads. The authors investigate the influence of external forces acting during driving on the reliability of measurements of weight and dimensional parameters, including the longitudinal component of gravity on the road slope, aerodynamic drag, inertial loads and rolling resistance. A mathematical model is developed that allows the correction of the results of dynamic measurements, taking into account the above-mentioned factors, thus ensuring their conformity with

static conditions. Particular attention is paid to the methodology for eliminating errors caused by variable environmental parameters (wind speed, humidity, and temperature) and technical characteristics of the vehicles (streamlining coefficient, mass distribution). Within the framework of the research, the integration of additional sensors in the infrastructure of weight and dimension control stations is proposed. The software developed based on analytical dependencies allows the calculation of equivalent static axle loads, reducing the risk of erroneous penalties. The research results have practical implications for improving the regulatory framework, increasing the safety of road infrastructure and optimizing logistics processes. The implementation of the proposed solutions will help to reduce operating costs and extend the service life of the road surface due to the timely detection of overloads.

Keywords: automatic systems; dynamic control; axial loads; weight and dimension parameters; mathematical model; road safety; weight and dimension control stations.

References

1. Mukhlisin I., Harii M., Sainul. Legal Study on the Oversight of Overloaded Motor Vehicles: Efforts to Protect Road Safety and Infrastructure. *ISTINBATH Jurnal Hukum*, 2024, vol. 21, Iss. 2, pp. 55–70. DOI: 10.32332/istinbath.v21i02.9847.
2. Manik, Lolo Jumpa Ate, Siregar, Parlindungan. Pengaruh Muatan Berlebih (Overloading) Terhadap Umur Rencana Jalan. *Jurnal Dunia Pendidikan*, 2024, vol. 4, Iss. 3, pp. 1340–1351. DOI: 10.55081/jurdip.v4i3.2158.
3. Nugraha W., Sidi I. D., Zulkifli E. Reliability Evaluation of Steel Truss Bridge Due to Traffic Load Based on Bridge Weigh-in-Motion Measurement. *Structural Monitoring and Maintenance*, 2022, vol. 9, Iss. 4, pp. 323–336. DOI: 10.12989/smm.2022.9.4.323.
4. Belikova D. D., Safiullin R. N. The Design and Evaluation of a Telematic Automated System of Weight Control for Heavy Vehicles. *Infrastructures*, 2022, vol. 7, art. 86. DOI: 10.3390/infrastructures7070086.
5. Manik L. J. A., Siregar P., Dan J. A. Pengaruh Muatan Berlebih (Overloading) Terhadap Umur Rencana Jalan. *Jurnal Dunia Pendidikan*, 2024, vol. 4, Iss. 3, pp. 1340–1351. DOI: 10.55081/jurdip.v4i3.2158.
6. Yessian S., Thangavel A. R., Natraj S., Madhusuthanan S. V. R. et al. Review on Automatic Over-Load Indication System. *Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Mathematics and Computational Sciences 2022 (ICAMCS-2022)*, January 2024. DOI: 10.1063/5.0195342.
7. Oyekanmi O. J., Ejem A. E. Load Damaging Effects of Overloaded Trucks on Federal High-way Pavement Structures in Nigeria. *Book Publisher International*, 2022. DOI: 10.9734/bpi/rdst/v5/2186B.
8. Gavrilov S. I., Gavryushin S. S., Zhukov S. L., Senyanskiy M. V. Vliyaniye rezhimov dvizheniya ATS i kharakteristik dorozhnogo pokrytiya na rezul'taty avtomaticheskogo izmereniya ikh vesogabaritnykh parametrov [Influence of vehicle driving modes and road surface characteristics on the results of automatic measurement of their weight and size parameters]. *Pribory [Instruments]*. 2020, Iss. 1(235), pp. 22–33. (In Russian)
9. Mikita T., Krausková D., Hrůza P., Cibulka M. et al. Forest Road Wearing Course Damage Assessment Possibilities with Different Types of Laser Scanning Methods Including New iPhone LiDAR Scanning. *Forests*, 2022, vol. 13, Iss. 11, Art. 1763. DOI: 10.3390/f13111763.
10. Dadonov M. V., Kul'pin A. G. Pereraspredeleniye nagruzok na kolesa kar'ernykh samosvalov za schet vozdeystviya aerodinamicheskikh nagruzok [Redistribution of loads on the wheels of quarry dump trucks due to the impact of aerodynamic loads]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika [Mining equipment and electromechanics]*. 2022, Iss. 1(159), pp. 3–8. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-1-3-8. (In Russian)
11. Deng E., Liu Xin-Yuan, Ouyang De-Hui, Yue Huan. 3D ultrasonic anemometer array reveals jet flow structures at the entrance of high-speed railway tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2025, vol. 257, Iss. 5, art. no. 106004. DOI: 10.1016/j.jweia.2024.106004.
12. Nunes L., Freire E. R. C. G., Ansoni J. L. Computational Simulation of an Aerodynamic Profile of a Vehicle SAE Formula Type Using OpenFOAM. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, 2022, vol. 43, Iss. 1, pp. 3–10. DOI: 10.5433/1679-0375.2022v43n1p3.
13. Cantero D., Kim C.-W. Vehicle Speed Estimation in BWIM Systems via Convolved Reciprocity. *Proceedings of IABMAS 2024*, Copenhagen, Denmark, June 2024. DOI: 10.1201/9781003483755-158.
14. Alam P., Pachamuthu R. LiDAR-OdomNet: LiDAR Odometry Network Using Feature Fusion Based on Attention. *IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC)*, Washington DC, January 2025. DOI: 10.1109/VTC2024-Fall63153.2024.10757604.
15. Chaudhary S., Wuttisittikulkij L., Saadi M. et al. Coherent detection-based photonic radar for autonomous vehicles under diverse weather conditions. *PLOS One*, 2021, vol. 16, Iss. 11, art. 0259438. DOI: 10.1371/journal.pone.0259438.
16. Mouafo D., Biao U. Uncalibrated camera approach for vehicle speed estimation using detection and tracking. *Signal Image and Video Processing*, 2024, vol. 18, Iss. 12, pp. 8819–8827. DOI: 10.1007/s11760-024-03509-2.
17. Priliepo N., Kovbasa V. Interactions of a Deformable Wheel with a Deformable Support Surface. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2024, vol. 13, Iss. 9. DOI: 10.35940/ijitee.I9944.13090824.