

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 4. С. 247–268.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (4): 247–268.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.8

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-247-268

EDN: YQOBTA

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСЧЕТНОЙ НАГРУЗКИ НА ДОРОЖНЫЕ ОДЕЖДЫ

Алексей Евгеньевич Симчук

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Вопросы точности расчета параметров воздействия колес грузового транспорта на покрытие автомобильной дороги остаются актуальными в связи с увеличением интенсивности движения и нагрузок. Современные методики проектирования дорожных одежд, основанные на нормативных документах (ГОСТ Р 71404–2024), не всегда учитывают фактические условия эксплуатации шин и их влияние на покрытия. Это приводит к несоответствию расчетных данных реальному воздействию транспортных средств, что может приводить к ускоренному износу дорожного покрытия и снижению эксплуатационной надежности дорожной конструкции.

Цель исследования заключается в анализе и экспериментальной оценке параметров воздействия колес грузового транспорта на дорожные покрытия для уточнения расчетных значений давления, размера пятна контакта и температурных зависимостей.

Методы исследования включали анализ современных систем мониторинга изменения температуры воздуха, давления в шинах и осевых нагрузок, а также проведение натурных экспериментов в различных скоростных и климатических условиях. Был выполнен мониторинг указанных параметров при движении грузового автомобиля по автомобильным дорогам.

Результаты исследования. Выявлены закономерности изменения температуры и давления в шинах в зависимости от условий эксплуатации. Проведено сопоставление фактических значений внутреннего давления в шинах с расчетными. Показано, что традиционный подход, предполагающий неизменное внутреннее давление в шинах, не соответствует реальным условиям движения. Установлено, что фактические значения внутреннего давления в шинах значительно превышают расчетные значения, применяемые при проектировании дорожных одежд.

В завершение работы предложены направления дальнейших исследований для совершенствования методики расчета дорожных одежд с учетом фактических параметров воздействия транспортных средств.

Ключевые слова: транспортные нагрузки, нормативная нагрузка, расчет дорожной одежды, асфальтобетон, контактное давление, пятно контакта, диаметр отпечатка колеса, натурные исследования

Для цитирования: Симчук А.Е. Экспериментальные исследования параметров воздействия расчетной нагрузки на дорожные одежды // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 247–268. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-247-268. EDN: YQOBTA

ORIGINAL ARTICLE

**IMPACT OF DESIGN LOAD PARAMETERS
ON ROAD PAVEMENTS****Aleksei E. Simchuk***Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University,
Saint-Petersburg, Russia*

Abstract. The article is devoted to theoretical and experimental studies of the impact parameters of truck wheels on road pavements. Modern systems of air temperature, tire pressure, and axle load monitoring are analyzed and selected. Monitoring of these parameters is carried out during the truck motion on roads at various speed and in different climatic conditions. Changes in the tire temperature and pressure are identified depending on operating conditions. A comparison is made between the actual and calculated internal tire pressure. It is found that the experimentally obtained internal tire pressure significantly exceeds that used in the pavement design. Further research aims at improving the pavement design methodology.

Purpose: The aim is to analyze and experimentally evaluate the impact load of truck wheels on the road surface to clarify the calculated pressure, contact patch size and temperature dependencies.

Methodology: The analysis of modern systems for monitoring changes in air temperature, tire pressure and axle loads, full-scale experiments at various speed and in different climatic conditions. The above parameters are monitored while a truck moves on roads.

Research findings: Temperature and tire pressure changes are identified depending on operating conditions. The internal tire pressure is compared to calculated ones. It is shown that the traditional approach, which assumes constant internal tire pressure, does not correspond to real driving conditions. It is found that actual values of internal tire pressure significantly exceed the calculated values used in the road pavement design.

Value: Research fields are proposed to improve the methodology for calculating road pavements, taking into account actual parameters of the live load.

Keywords: asphalt concrete, pavement analysis, contact pressure, contact patch, wheel impression diameter, normative load, field studies, transportation load

For citation: Simchuk A.E. Impact of Design Load Parameters on Road Pavements. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 247–268. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-247-268. EDN: YQOBTA

Введение

В настоящее время в РФ действующим документом, определяющим проектирование нежестких дорожных одежд, является ГОСТ Р 71404–2024 [1]. Расчет дорожных одежд на прочность выполняется с учетом нормативной нагрузки. Для автомобильных дорог с капитальным типом дорожной одежды она составляет 115 кН, а облегченных и переходных типов – 100 кН. В применяемой методике [1], как и в перспективных направлениях расчета многослойных дорожных одежд [2], основными расчетными параметрами взаимодействия колеса автомобиля с покрытием являются контактное давление и размер пятна контакта. Указанные параметры, наряду с температурными зависимостями модуля упругости асфальтобетона, также являются определяющими при инструментальной оценке прочности дорожных одежд [3]. Давление колеса на покрытие от нормативной нагрузки считают равномерно распределенным по площади отпечатка колеса. В соответствии с ГОСТ 32960 [4] для капитальных

типов дорожной одежды оно составляет 0,8 МПа, а для облегченных и переходных типов – 0,6 МПа. Необходимо отметить, что традиционно в отечественной практике принимался постулат о неизменности внутреннего давления воздуха в колесе в процессе движения, которое приравнивается к давлению колеса на покрытие. Также важным параметром является диаметр отпечатка колеса, который рассчитывается в зависимости от скорости движения и величины нагрузки. Данный параметр находится в пределах от 30,3 до 37,1 см. При этом наибольшему диаметру соответствует наименьшее расчетное давление, принимаемое для облегченных дорожных одежд. Это в свою очередь нивелирует отличие в расчетных нагрузках и часто приводит к неадекватным результатам расчетов конструкций. Подходы к расчету диаметра отпечатка колеса в зависимости от давления были заложены в отечественной нормативной базе в 1960–80-х гг. и остаются действующими по настоящее время. Однако они не учитывают фактические размеры отпечатков современных грузовых шин, что неадекватно отражает воздействие транспорта на дорожную одежду. В связи с этим необходимо выполнить актуализацию расчетных значений проведением натурных исследований шин в полевых и лабораторных условиях.

Взаимодействие автомобильной шины с дорожным покрытием

При движении автомобиля по дороге в зоне контакта шины колеса с покрытием возникают динамические вертикальные, продольные и поперечные касательные силы, реальная величина которых меняется в зависимости от состояния покрытия, скорости движения, характеристик автомобиля и типоразмера шин.

Колесо автомобиля может находиться в состоянии покоя или в движении. В состоянии покоя на колесо действует только одна сила – нормальная нагрузка P_z (G) [5]. Однако особенностью автомобильного колеса является его эластичность: под воздействием вертикальной силы колесо деформируется (преодолевающая силы упругости каркаса и сопротивления внутреннего давления воздуха, а также силы трения в резине), формируется площадь его контакта с твердой поверхностью (рис. 1). В этой зоне статический радиус колеса (r_{st}) становится меньше, чем в других частях колеса (r_s), не соприкасающихся с покрытием.

В динамике параметры в зоне контакта шины и покрытия изменяются под влиянием крутящего или тормозного момента. Схема взаимодействия колеса с дорожным покрытием представлена на рис. 2.

Для проектирования автомобильных дорог в первую очередь важны параметры взаимодействия системы «пневматическая шина – дорожное покрытие», включая площадь контакта по выступам рисунка протектора (F_v) или в контурной площади (F_k) их контакта (п. 14–15 ГОСТ 17697 [5]). Эти параметры используются в формулах ГОСТ Р 71404–2024 [1] при расчете дорожной одежды: напряжение в дорожной одежде вычисляется по формуле

$$\sigma_z = \frac{P}{A}, \quad (1)$$

где σ_z – напряжение в дорожной одежде, Н/м²; P – нагрузка, передаваемая колесом, Н; A – площадь пятна контакта, м². В первую очередь это важно для шин наиболее нагруженных осей грузовых автомобилей, оказывающих наибольшее

воздействие на конструктивные слои дорожных одежд. Хотя статические параметры такого воздействия могут быть измерены с помощью различных стендов и измерительного оборудования, проведение подобных испытаний в реальных условиях прямолинейного качения грузового колеса при движении под нагрузкой является затруднительным даже при небольших скоростях.

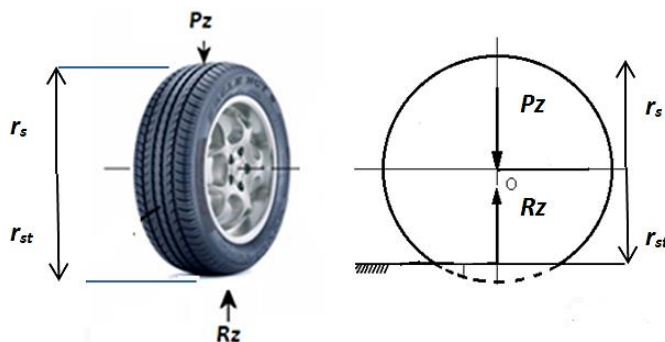


Рис. 1. Основные параметры воздействия нормальной нагрузки в системе «пневматическая шина – дорожное покрытие»:

P_z – нормальная нагрузка, Н; R_z – нормальная реакция опорной поверхности, Н; r_s – свободный радиус колеса, м; r_{st} – статический радиус колеса, м (составлено на основе ГОСТ 17697–72)

Fig. 1. Main parameters of normal load impact in pneumatic tire–road surface system:

P_z – normal load, N; R_z – normal reaction of the supporting surface, N; r_s – free radius of the wheel, m; r_{st} – static radius of the wheel, m

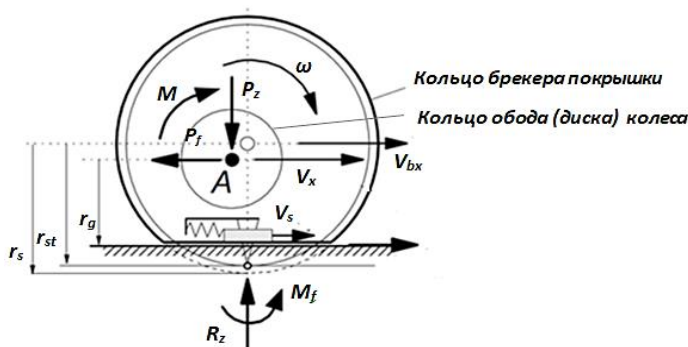


Рис. 2. Схема взаимодействия пневматической шины с твердой поверхностью в режиме свободного качения под нагрузкой:

r_s – свободный радиус колеса, м; r_{st} – статический радиус колеса, м; r_g – кинематический радиус (радиус качения) колеса, м; A – ось колеса; ω – угловая скорость, рад/с; M – крутящий момент колеса, Н·м; P_f – сила сопротивления качению колеса, Н; M_f – момент сопротивления качению, Н·м; V_s – скорость продольного скольжения, м/с; V_x – поступательная скорость оси колеса, м/с; V_{bx} – поступательная скорость центра колеса, м/с (по [6])

Fig. 2. Interaction between pneumatic tire and hard surface in free rolling mode under load:

r_s – wheel free radius, m; r_{st} – wheel static radius, m; r_g – wheel kinematic radius (rolling radius), m; A – wheel axis; ω – angular velocity, rad/s; M – wheel torque, N·m; P_f – wheel rolling resistance force, N; M_f – rolling resistance, N·m; V_s – longitudinal slip velocity, m/s; V_x – translational velocity of the wheel axis, m/s; V_{bx} – translational velocity of the wheel center, m/s, according to H. Pacejka, 2012 [6]

Тем не менее исследованиями отечественных специалистов в 1970-х гг. [7] были установлены следующие закономерности:

1. По краям пятна контакта давление на поверхность выше, чем в центре шины. При увеличении нагрузки боковины начинают «выгибаться», особенно у диагональных шин, которые широко использовались в те годы. Современные радиальные шины с жестким металлическим каркасом (металлокорд) такой особенностью не обладают. На рис. 3 показано воздействие неподвижной шины на поверхность.

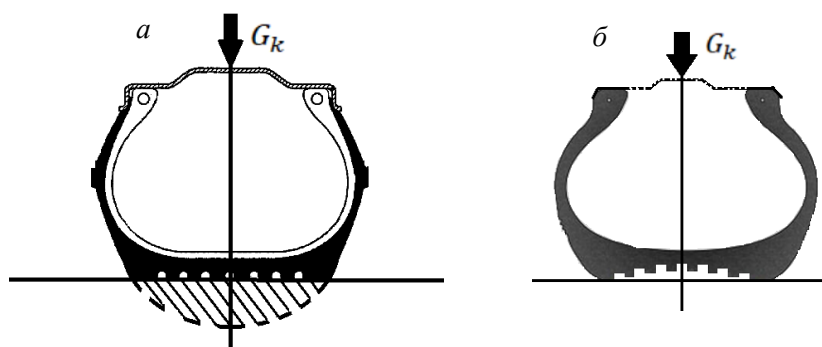


Рис. 3. Распределение давлений по площади пятна контакта неподвижного колеса, опирающегося на жесткую поверхность:

a – профиль шины при нормальной нагрузке на колесо; *б* – профиль шины при сверхнормативной нагрузке (по [7])

Fig. 3. Pressure distribution over the contact patch area of stationary wheel resting on a rigid surface: *a* – under normal load; *b* – under excess load [7]

2. Давление распределяется по-разному в зависимости от скорости движения. Однако для скоростей до 80–100 км/ч распределение остается как у неподвижного колеса. Диаграмма распределения давления от скорости показана на рис. 4.

Графики демонстрируют распределение удельного давления q в контакте шины с дорожным покрытием: рис. 4, *a* иллюстрирует продольное распределение давления вдоль направления движения, рис. 4, *б* – поперечное распределение давления относительно средней плоскости колеса. Кривые 1–5 соответствуют скоростям движения 25, 50, 100, 150 и 180 км/ч. Анализ графиков показывает, что с увеличением скорости происходит перераспределение давления: оно возрастает в передней части пятна контакта и снижается по краям. На графике (рис. 4, *б*) также заметна тенденция к снижению давления по краям при возрастании скорости. Это подтверждает предположение о перераспределении нагрузки в центральную зону контакта. Таким образом, с увеличением скорости движения автомобиля удельное давление в контакте шины с покрытием изменяется: наблюдается его перераспределение в сторону центра пятна контакта и увеличение максимальных значений давления, особенно в передней части (по направлению движения).

3. Во время качения шины внутри нее возникают трение и деформации, вызывающие ее нагрев. Принято считать, что оптимальная температура нормальной работы шины составляет 70–75 °С при температуре окружающего воздуха 20 °С.

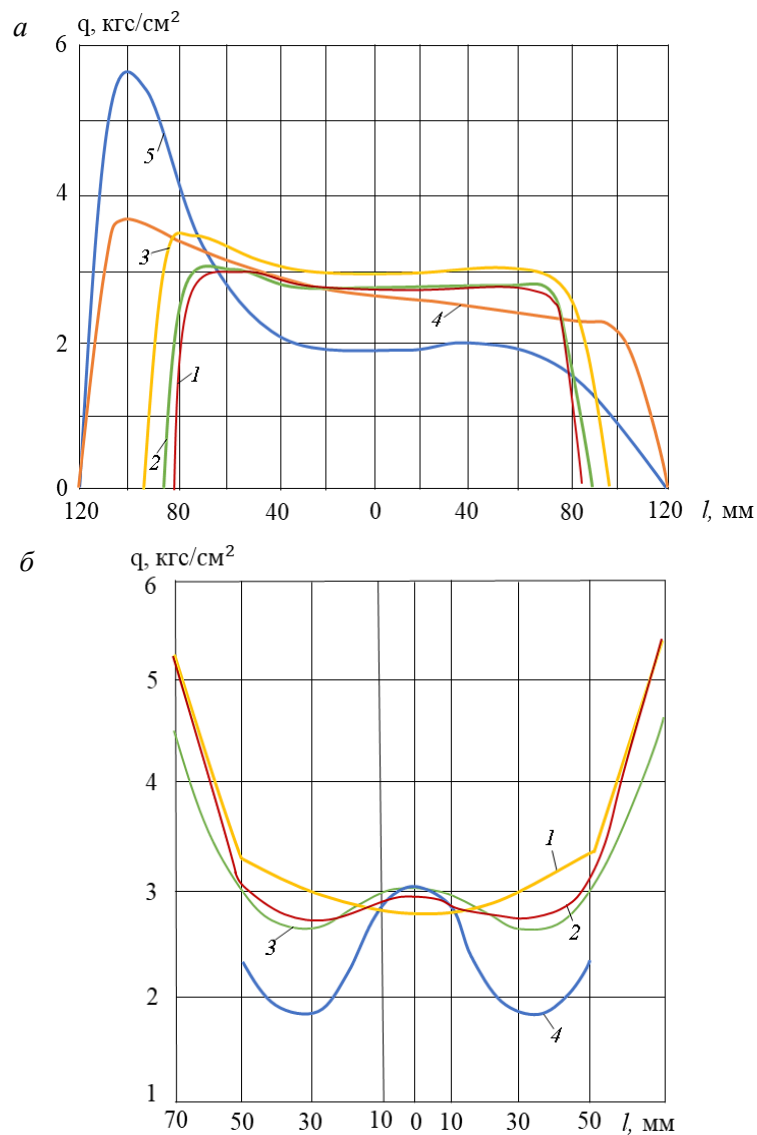


Рис. 4. Распределение удельных давлений q в контакте шины: кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответствуют давлениям в продольной плоскости симметрии контакта (а) и средней поперечной плоскости (б) соответственно при скоростях движения 25, 50, 100, 150 и 180 км/ч (по [7])

Fig. 4. Distribution of specific pressure q in the tire contact: curves 1, 2, 3, 4, and 5 correspond to the pressure in the longitudinal plane of contact symmetry (a) and the average transverse plane (b) at 25, 50, 100, 150, and 180 km/h, respectively

По требованиям Правил ЕЭК ООН, на бортах каждой пневматической шины указано значение внутреннего давления воздуха (в PSI), которое измеряется в условиях «холодной шины». Несложно определить, что при температуре воздуха 20 °С в процессе эксплуатации шины (т. е. при качении под нагрузкой) температура воздуха в ней поднимется на 50–55 °С, что в силу газового закона

Шарля (в закрытой среде соотношение давления газа и его температуры – величина постоянная) приведет к росту внутреннего давления воздуха в шине примерно на 15,8 %. Этот факт необходимо учитывать при определении и нормировании расчетного давления колеса на покрытие, т. к. исторически, согласно документам, посвященным проектированию нежестких дорожных одежд, давление на покрытие принимается равным давлению внутри шины.

Пятно контакта шины оказывает влияние на напряжено-деформированное состояние дорожных одежд и, как следствие, на долговечность автомобильных дорог. Это свидетельствует о необходимости определения фактических размеров пятна контакта с учетом давления и температуры в шине. В связи с отсутствием теоретических подходов к решению данной задачи необходимо провести натурные (полевые) и лабораторные испытания с различными типами колес грузовых автомобилей. Полученные данные позволят построить математическую модель для определения геометрических параметров пятна контакта и подготовить предложения по внесению изменений в действующие методики расчета дорожной одежды.

Экспериментальные исследования параметров грузовых шин при движении по автомобильным дорогам

Выбор и характеристики грузового автомобиля. На основе информации о составе транспортных потоков на федеральных автомобильных дорогах общего пользования, полученной с пунктов учета интенсивности движения (ПУИД) и автоматических пунктов весового и габаритного контроля (АПВГК), наиболее распространенным является пятиосный автопоезд в составе двухосного седельного тягача с полуприцепом, классифицируемый как группа 9 по табл. А.1 ГОСТ 32965 [8]. Схема расположения колес представлена на рис. 5.



Рис. 5. Варианты транспортных средств для проведения натурных (полевых) испытаний: а – стандартный трейлер для перевозки грузов общей массой до 25 т; б – стандартный битумовоз с цистерной объемом 26 м³ (по материалам открытых интернет-источников)

Fig. 5. Vehicle options for field testing: а – standard trailer for transporting cargo with a total weight of 25 t; б – standard bitumen tanker with a 26 m³ tank (from open-source materials)

Грузовые транспортные средства данной категории обычно комплектуются шинами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Спецификация грузовых пневматических шин для установки на грузовые транспортные средства группы 9 по ГОСТ 32965 [8]

Table 1

Specification of pneumatic truck tires for installation on group 9 trucks according to GOST 32965 [8]

Вариант комплектации	Ось транспортного средства	Конфигурация колеса оси	Типоразмер шин	Максимальный вес нормальной статической нагрузки на шину, кгс	Рекомендуемое давление воздуха в холодной шине, МПа
1	Рулевая	Одинарное	295/80R2	3350	0,85
	Ведущая	Сдвоенное	2.5 152/148	3150	
2	Рулевая	Одинарное	315/80R2	3750	0,90
	Ведущая	Сдвоенное	2.5 154/150	3350	
3	Прицепная	Одинарное	385/65R2 2.5 160	4500	0,90

Для проведения натурных исследований был выбран автомобиль на базе тягача IVECO Stralis ES, предоставленный ООО «Газпромнефть-Битумные материалы» (рис. 6).



Рис. 6. Общий вид седельного тягача с полуприцепом (битумовоза) ООО «Газпромнефть-Битумные материалы». Фото автора

Fig. 6. General view of tractor with a semi-trailer (bitumen tanker) from ООО "Gazpromneft-Bitumen Materials"

Масса порожней автоцистерны составляет 3650 кг, а максимально допустимая масса автоцистерны с битумом – 36 200 кг. Общая масса с грузом достигает 49 000 кг. Расположение колес автомобиля представлено на рис. 7.

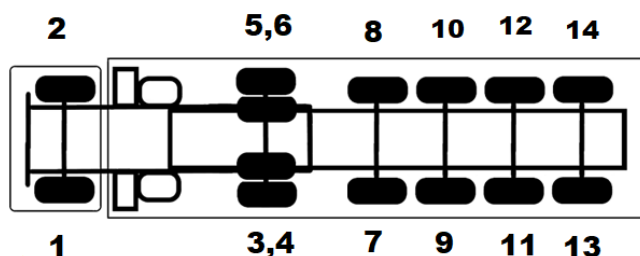


Рис. 7. Расположение колес автомобиля (составлено автором)

Fig. 7. Location of car wheels

На используемом грузовом автомобиле установлены следующие типы колес:

- колеса 1 и 2: Bridgestone (Польша), типоразмер 315/80 R22.5, индекс нагрузки 156/150 L, рекомендуемое давление 850 кПа;
- колеса 3, 4, 5 и 6: Yokohama 705R (Тайланд), типоразмер 315/80 R22.5, индекс нагрузки 154/150 M, рекомендуемое давление 850 кПа;
- колеса 7 и 8: Roadgo Orium (Румыния), типоразмер 385/65 R22.5, индекс нагрузки 160K, рекомендуемое давление 900 кПа;
- колеса 9–12: Cordiant Proffessional TR-1, типоразмер 385/65 R22.5, индекс нагрузки 160K, 158L, рекомендуемое давление 900 кПа.

Системы мониторинга. Для проведения исследований на испытательную модель была установлена бортовая система мониторинга температуры и внутреннего давления воздуха в шинах. Датчики были вмонтированы во все колеса транспортного средства за исключением колес 13 и 14, расположенных на значительном удалении от принимающего устройства, что делало невозможным получение устойчивого сигнала.

Применяемая система производства компании VESA systems включает два программных модуля мониторинга:

- система мониторинга параметров шин (температура, давление);
- система мониторинга осевых нагрузок.

Система мониторинга параметров шин состоит из нескольких элементов: дисплея, репитера, ресивера, внутреннего датчика. Дисплей принимает информацию с датчиков и репитера и передает ее на экран или другие внешние устройства. Репитер – усилитель сигнала, который принимает информацию с удаленных датчиков, например прицепа, и передает ее на дисплей или ресивер. Ресивер – преобразователь сигнала, принимает информацию с датчиков и репитера и передает на внешние устройства. Внутренний датчик – беспроводной датчик со встроенным радиочастотным передатчиком, который устанавливается на колесный диск с помощью стального червячного хомута. Общая схема системы мониторинга показана на рис. 8. Пример установки внутреннего датчика на колесо испытательной модели приведен на рис. 9.



Рис. 8. Общая схема системы мониторинга (составлено автором на основе технической документации)

Fig. 8. Schematic of the monitoring system



Рис. 9. Внутренний датчик с креплением на диск колеса. Фото автора

Fig. 9. Internal sensor with wheel rim mount

Система мониторинга осевых нагрузок предназначена для измерения осевых нагрузок, полной массы автомобиля и груза. Она включает в себя следующие элементы: индикатор загрузки, который устанавливается в панель кабины и отображает осевые нагрузки, полную массу и вес груза; весовой контроллер – центральная часть системы, которая преобразует сигналы с датчиков

в весовые показатели и передает информацию на дисплей, а также в систему мониторинга; датчик давления Wabco (Вабко) – высокоточный датчик, который устанавливается непосредственно в подушки или в трубки подвески транспортного средства через быстросъемные крепления.

Элементы системы взвешивания и контроля осевых нагрузок для пневмоподвески представлены на рис. 10.



Рис. 10. Элементы системы взвешивания и контроля осевых нагрузок для пневмоподвески (по материалам Wabco)

Fig. 10. Elements of the weighing and axle load control system for air suspension (from Wabco documents)

После установки и калибровки обеих систем они были подключены к базе мониторинга Wialon, которая позволяет вести удаленный непрерывный контроль за параметрами транспортных средств и анализировать объем перевозок за определенный период. Система позволяет проводить измерения в реальном времени и анализировать объем собранных данных. Wialon – программная платформа с web-интерфейсом для спутникового мониторинга транспорта. Сбор данных производится с помощью спутникового модуля, трекера в автомобиле, который определяет местоположение транспортного средства и собирает информацию от штатного оборудования и дополнительных датчиков. Затем данные передаются через каналы GSM или спутниковой связи на сервер Wialon. В web-интерфейсе Wialon пользователь получает обработанную информацию о координатах объекта, времени, скорости, параметрах внешних и внутренних датчиков бортового оборудования и т. п. Общая схема работы системы Wialon представлена на рис. 11.



Рис. 11. Общая схема работы Wialon¹
Fig. 11. General scheme of Wialon operation

Результаты мониторинга. После завершения установки и калибровки всех систем испытательный автомобиль был запущен в регулярные рейсы. Его маршруты охватывали всю европейскую часть РФ, что позволило исследовать различные регионы и климатические зоны. Данные мониторинга поступали ежедневно на протяжении года, что обеспечило учет таких факторов, как температура окружающего воздуха, изменяющаяся в зависимости от времени года, а также меняющиеся осевые нагрузки. Полный маршрут движения автомобиля за все время испытания показан на рис. 12.

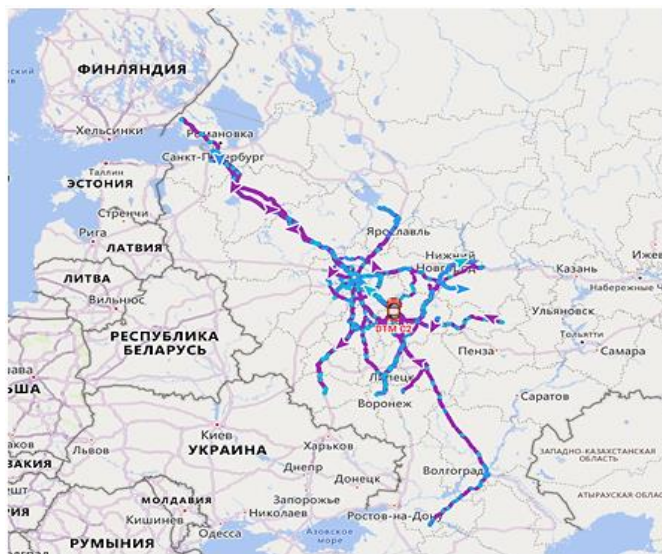


Рис. 12. Маршрут передвижения автомобиля в процессе проведения исследований из сервиса Wialon (на основе данных платформы Wialon²)
Fig. 12. Vehicle route during research from the Wialon service

¹ URL: <https://wialon.com>

² Там же.

Наиболее информативными оказались результаты мониторинга за период с мая по август, когда были зарегистрированы пики температуры как окружающего воздуха, так и внутри шин. Эти данные позволили установить наиболее вероятное давление в шинах. Результаты мониторинга за период приведены на рис. 13–20 и в табл. 2–5.

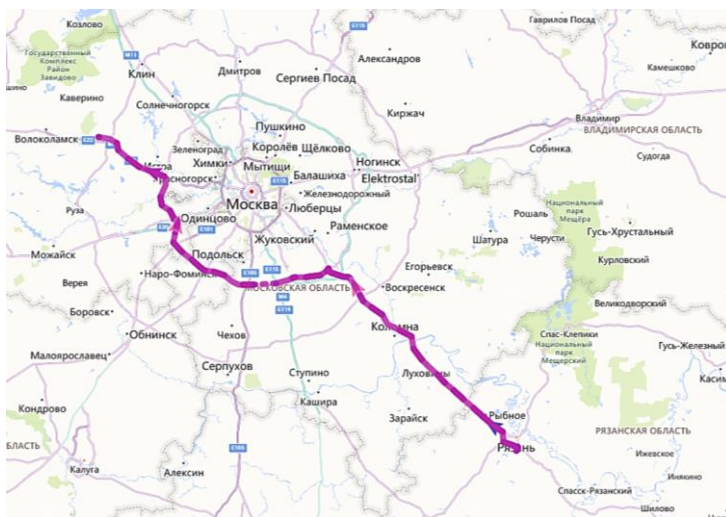


Рис. 13. Маршрут автомобиля 22.05 (на основе данных Wialon и картографического сервиса Яндекс.Карты)

Fig. 13. Car route on 22.05

Графики температур и давления в шинах за 22.05 показаны на рис. 14.

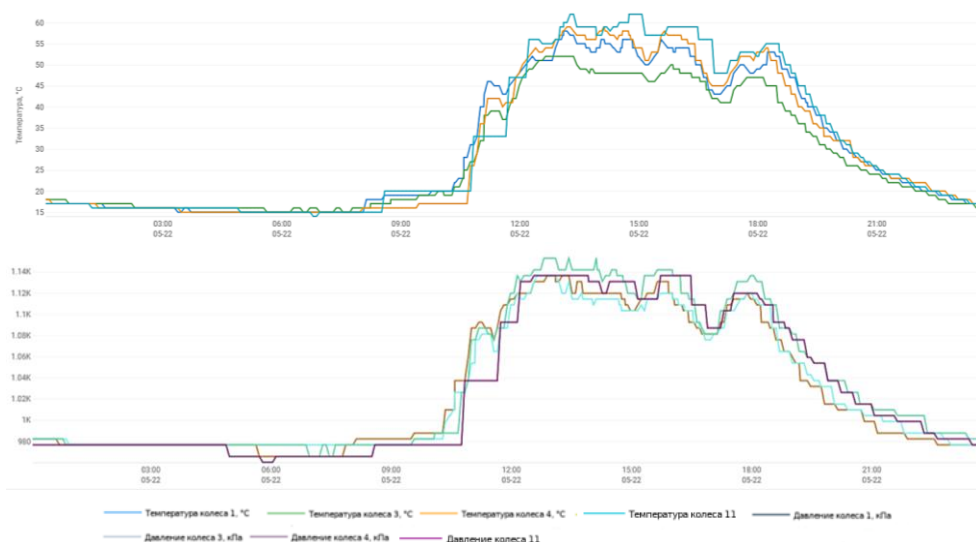


Рис. 14. Графики температур и давления в шинах за 22.05 (построено автором по данным мониторинга на платформе Wialon)

Fig. 14. Tire temperature and pressure on 22.05

Сводные данные по изменению параметров 22.05

Таблица 2

Table 2

Parameter measurement on 22.05

Колесо (ось)	Средняя нагрузка на ось, т	$t_{cp \min}$	$P_{cp \min}$	$t_{cp \max}$	$P_{cp \max}$
1 (рулевая)	6,9	19	0,982	54	1,116
3 (ведущая)	10,5	17	0,977	48	1,113
4 (ведущая)		16	0,977	56	1,134
11 (прицепная)	7,6	18	0,972	59	1,131

На рис. 15 показан маршрут движения автомобиля в течение дня 26.06.

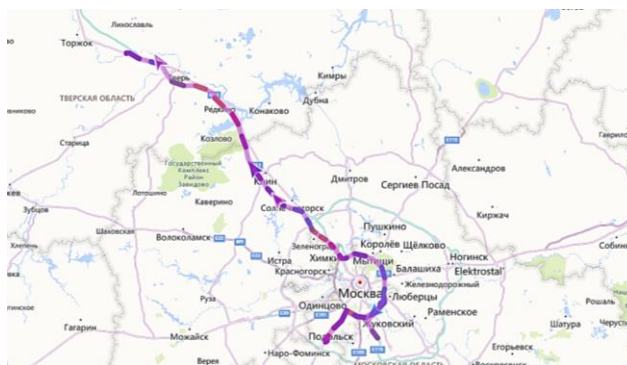


Рис. 15. Маршрут автомобиля 26.06 (на основе данных Wialon и картографического сервиса Яндекс.Карты)

Fig. 15. Car route on 26.06

Графики температур и давления в шинах за 26 июня показан на рис. 16.



Рис. 16. Графики температур и давления в шинах 26.06 (построено автором по данным мониторинга на платформе Wialon)

Fig. 16. Tire temperature and pressure on 26.06

Сводные данные по изменению параметров 26.06 указаны в табл. 3.

Таблица 3

Сводные данные по изменению параметров 26.06

Table 3

Parameter measurement on 26.06

Колесо (ось)	Средняя нагрузка на ось, т	$t_{\text{ср min}}$	$P_{\text{ср min}}$	$t_{\text{ср max}}$	$P_{\text{ср max}}$
1 (рулевая)	7,0	17	0,960	53	1,110
3 (ведущая)	11,0	17	0,966	49	1,109
4 (ведущая)		18	0,970	55	1,125
11 (прицепная)	8,0	17	0,960	57	1,117

На рис. 17 показан маршрут движения автомобиля в течение дня 24.07.

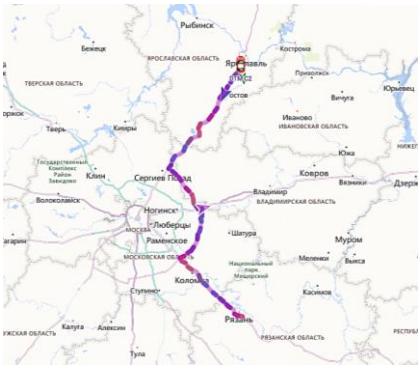


Рис. 17. Маршрут автомобиля 24.07 (на основе данных Wialon и картографического сервиса Яндекс.Карты)

Fig. 17. Car route on 24.07

Графики температур и давления в шинах за 24 июля показан на рис. 18.

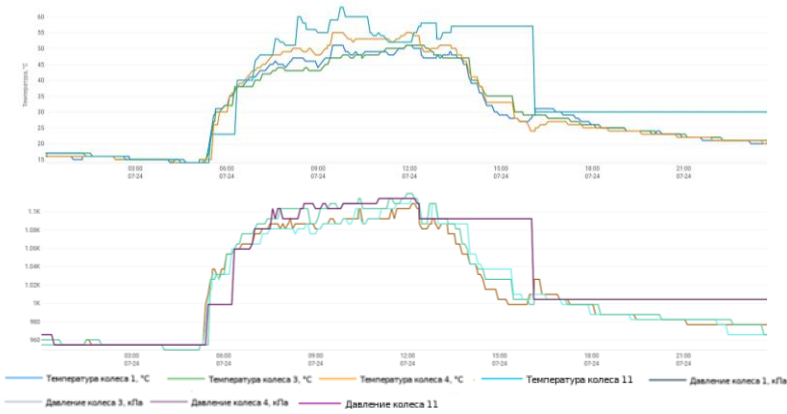


Рис. 18. Графики температур и давления в шинах за 24.07 (построено автором по данным мониторинга на платформе Wialon)

Fig. 18. Tire temperature and pressure on 24.07

Сводные данные по изменению параметров 24.07 указаны в табл. 4.

Таблица 4

Сводные данные по изменению параметров 24.07

Table 4

Parameter measurement on 24.07

Колесо (ось)	Средняя нагрузка на ось, т	$t_{\text{ср min}}$	$P_{\text{ср min}}$	$t_{\text{ср max}}$	$P_{\text{ср max}}$
1 (рулевая)	6,9	14	0,955	48	1,091
3 (ведущая)	10,4	14	0,955	46	1,091
4 (ведущая)		14	0,950	51	1,104
11 (прицепная)	7,4	14	0,955	55	1,104

На рис. 19 показан маршрут движения автомобиля в течение дня 21.08.

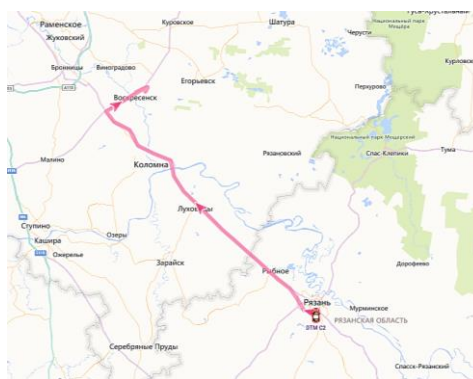


Рис. 19. Маршрут автомобиля 21.08 (на основе данных Wialon и картографического сервиса Яндекс.Карты)

Fig. 19. Car route on 21.08

Графики температур и давления в шинах за 21 августа показан на рис. 20.

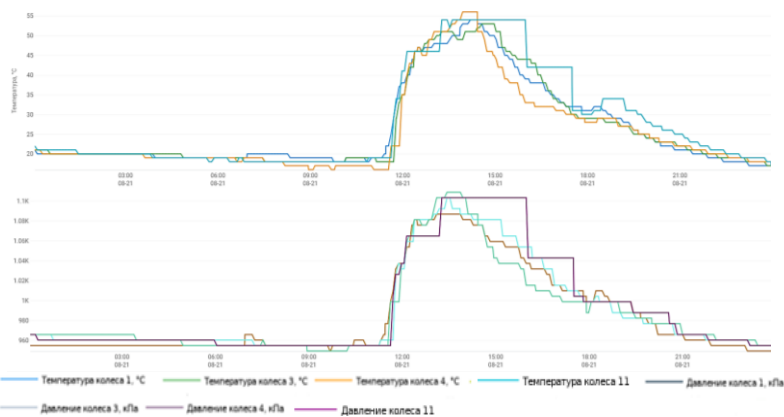


Рис. 20. Графики температур и давления в шинах за 21.08 (построено автором по данным мониторинга на платформе Wialon)

Fig. 20. Tire temperature and pressure on 21.08

Сводные данные по изменению параметров 21.08 указаны в табл. 5.

Таблица 5

Сводные данные по изменению параметров 21.08

Table 5

Parameter measurement on 21.08

Колесо (ось)	Средняя нагрузка на ось, т	$t_{cp \text{ min}}$	$P_{cp \text{ min}}$	$t_{cp \text{ max}}$	$P_{cp \text{ max}}$
1 (рулевая)	6,9	19	0,955	48	1,083
3 (ведущая)	10,5	19	0,955	48	1,087
4 (ведущая)		18	0,952	50	1,095
11 (прицепная)	7,7	18	0,955	50	1,085

Результаты

По результатам проведенного мониторинга установлено, что давление внутри колес непосредственно зависит от температуры внутри шин, которая увеличивается из-за силы трения, нагрузки и скорости движения автомобиля. Среднее увеличение температуры в колесе во время движения составило 31–37 °С, а максимальный зарегистрированный прирост за период измерений достигал 41 °С. Характерная зависимость давления в шинах от температуры внутри шины и ее скорости движения показана на рис. 21.

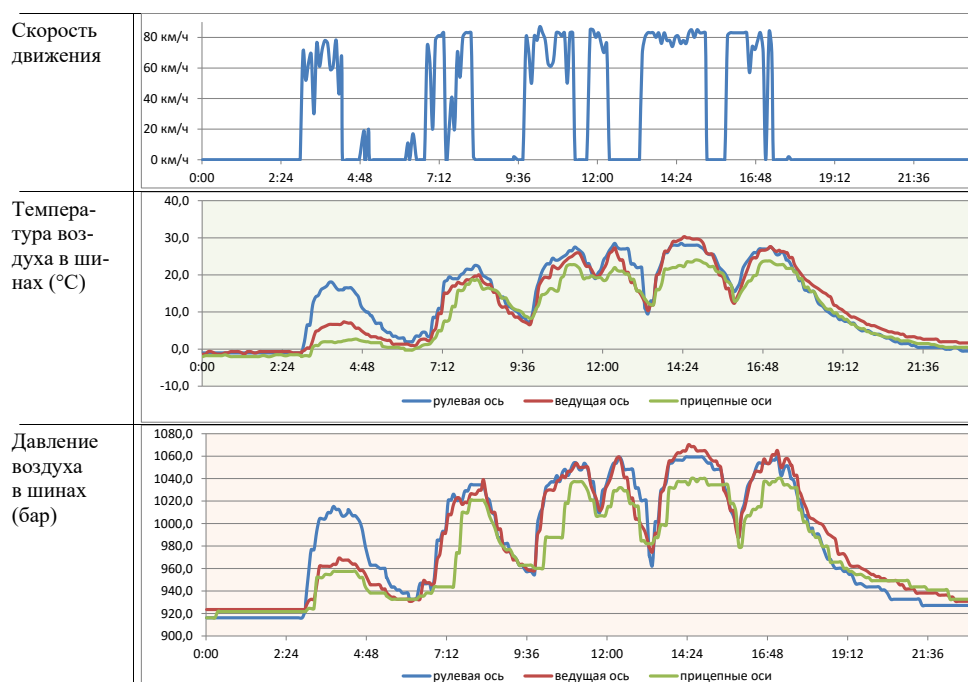


Рис. 21. Графики температур, давления и скорости шин за ноябрь (составлено автором по данным мониторинга Wialon)

Fig. 21. Tire temperature and pressure in November

Для анализа зависимости давления от температуры в шинах для каждого дня мониторинга были вычислены коэффициенты пропорциональности при минимальных и максимальных параметрах по формулам:

$$k_1 = \frac{P_{\min}}{T_{\min}}; \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{P_{\max}}{T_{\max}}, \quad (3)$$

где k_1 – при минимальных значениях; k_2 – при максимальных значениях.

Для минимизации влияния различных случайных ошибок было взято среднее значение между k_1 и k_2 по формуле

$$k = \frac{k_1 + k_2}{2}. \quad (4)$$

В результате вычислений удалось установить значение $k \approx 0,00338$. Этот коэффициент может быть применен для прогноза давления в шинах при температуре от 5 до 75 °С внутри колеса с использованием следующей формулы:

$$P = k(t + 273,15), \quad (5)$$

где P – давление, МПа; t – температура окружающей среды, °С; k – коэффициент пропорциональности.

По результатам исследований установлены следующие закономерности:

- согласно техническим требованиям производителей, давление в «холодных» шинах (до начала движения) для большинства современных грузовых колес, используемых на наиболее широко распространенных грузовых автомобилях для магистральных перевозок, при нормативной загрузке составляет от 0,8 до 0,9 МПа;

- в рамках эксперимента давление в «холодных» шинах в большинстве случаев составляло 0,9 МПа, что соответствует рекомендациям, указанным на колесах;

- в процессе эксплуатации при движении автомобиля (в течение не менее 3 ч) воздух в шинах нагревается в среднем на 35 °С относительно начальной температуры, что приводит к увеличению внутреннего давления до 1,1 МПа;

- измеренное фактическое давление в шинах значительно превышает нормативные значения, принимаемые при расчете дорожных одежд. Согласно действующим нормативным документам, давление в шинах принимается равным давлению на покрытие и для облегченных дорожных одежд составляет 0,6 МПа, для капитальных – 0,8 МПа. Максимально зафиксированное фактическое давление превышает расчетное на 83 % для облегченных и на 37 % для капитальных дорожных одежд.

Полученные результаты опровергают принимаемые в настоящее время постулаты о неизменности давления в шинах при движении автомобиля и ставят под сомнение принимаемые расчетные параметры.

Как видно из рис. 22, температура окружающего воздуха в начале и по завершении пути (за период мониторинга) не оказывает значительного влияния на температуру и давление внутри колес. Однако температура внутри ко-

лес у пустого и загруженного автомобиля во время движения различается существенно.

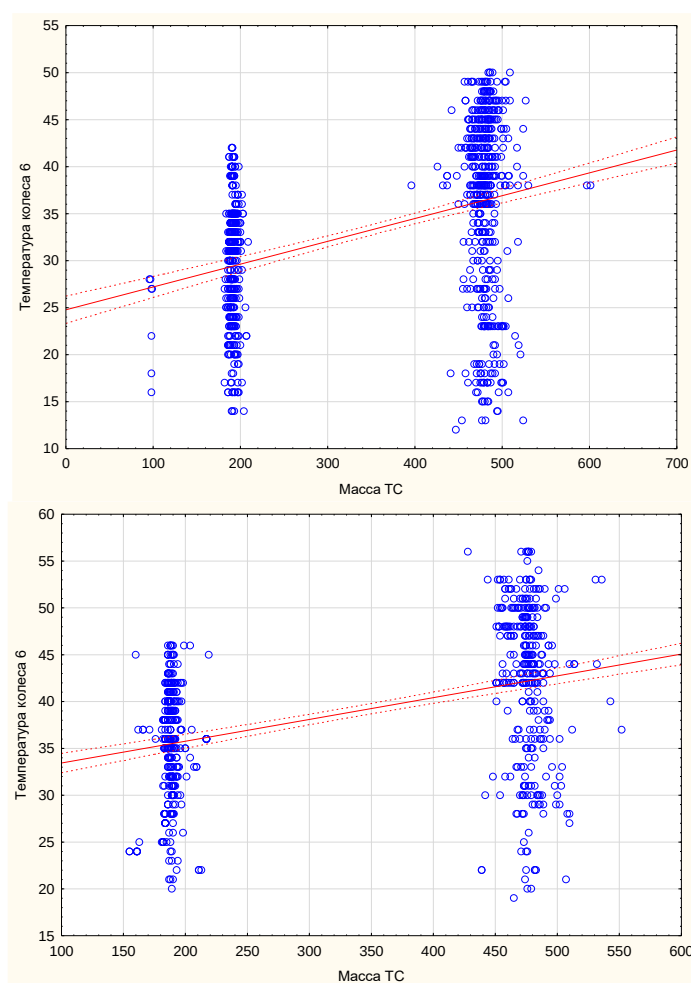


Рис. 22. Данные по температуре колес на оси у пустого и груженого автомобиля за май и август (составлено автором по результатам мониторинга)

Fig. 22. Wheel temperature of empty and axle loaded vehicle for May and August

В среднем давление в колесах при движении автомобиля с грузом увеличивалось на 15 %. Минимальный прирост давления за период наблюдений составил 9 %, максимальный – 18 %.

Отдельно необходимо выделить спаренные колеса ведущей (наиболее загруженной) оси. Было установлено, что они нагреваются и изменяют давление в процессе движения по-разному: внешнее колесо нагревается меньше, чем внутреннее. Можно сделать предположение, что это явление связано с различным охлаждением в процессе движения. Так, внешнее колесо подвержено более интенсивному охлаждению за счет воздействия внешних воздушных масс, тогда как внутреннее колесо экранировано внешним и имеет меньший контакт

с окружающим воздухом. Поэтому разница в температуре соседних колес, хоть и находящихся на одной оси, в период движения составляет 7–12 °С (рис. 23).

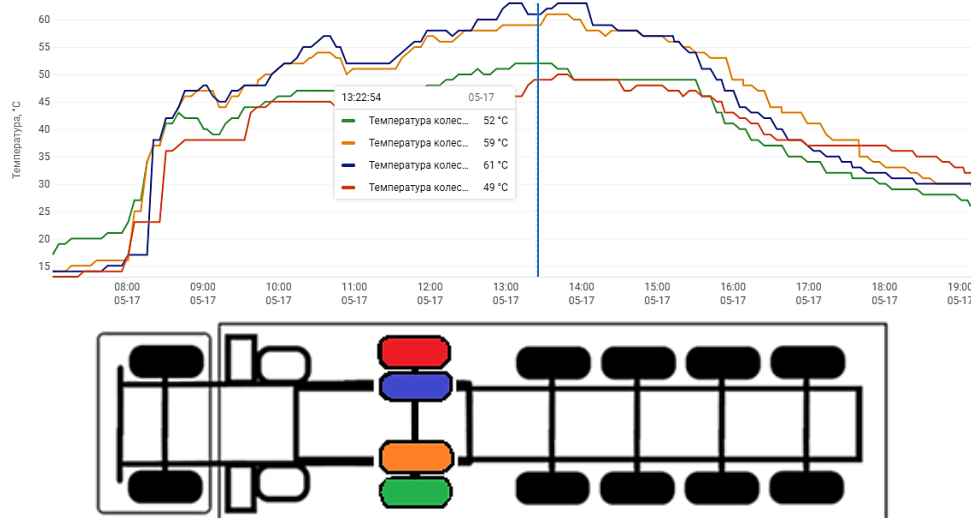


Рис. 23. Различие температуры внешних и внутренних колес (составлено автором)

Fig. 23. Difference in temperature between outer and inner wheels

Установить, что наибольшая нагрузка приходится на спаренные колеса ведущей оси, можно по данным рис. 24, где синяя и красная линии относятся к общей массе транспортного средства и массе груза соответственно, а следующая линия (красная) является ведущей осью и имеет существенное различие в нагрузке с другими осями данного транспортного средства. Это подтверждает значительное различие в показателях давления и температуры ведущей оси по сравнению с другими осями.

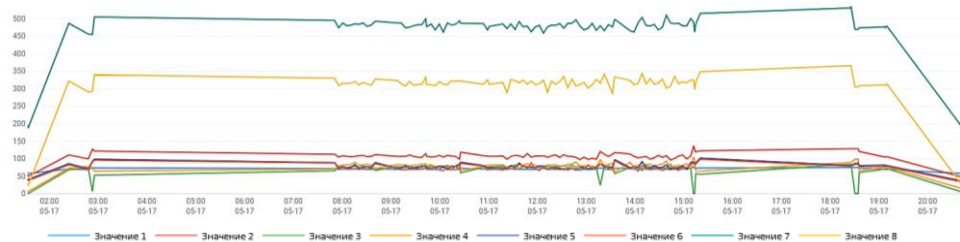


Рис. 24. График нагрузки на оси:

значение 1 – рулевая ось грузовика; значение 2 – ведущая ось грузовика; значение 3 – первая ось прицепа; значение 4 – вторая ось прицепа; значение 5 – третья ось прицепа; значение 6 – четвертая ось прицепа; значение 7 – общая масса транспортного средства; значение 8 – масса груза (составлено автором по данным весовой системы)

Fig. 24. Axle load:

1 – truck steering axle; 2 – truck drive axle; 3 – trailer first axle; 4 – trailer second axle; 5 – trailer third axle; 6 – trailer fourth axle; 7 – vehicle total weight; 8 – load weight

Выводы

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили выявить закономерности изменения температуры и давления в шинах в зависимости от условий эксплуатации.

Показано, что фактические значения внутреннего давления в шинах существенно превышают расчетные. В то же время расчетными параметрами при проектировании и оценке прочности дорожных одежд является контактное давление, принимаемое равным давлению в шине, и отпечаток колес автомобиля.

Полученные на данном этапе результаты могут быть использованы для постановки эксперимента для стендовых испытаний по определению фактических параметров площади пятна контакта и давления колеса на покрытие, а также для анализа закономерности их изменения в различных условиях эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 71404–2024. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд : введ. 2024-01-01. Москва : Стандартиформ, 2024. 45 с.
2. Горский М.Ю., Кадыров Г.Ф., Стрельцов А.В., Симчук Е.Н. Совершенствование методики расчета нежестких дорожных одежд с учетом применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства // Дороги и мосты. 2021. № 2 (46). С. 53–74. EDN: TPWVZF
3. Горский М.Ю., Симчук Е.Н., Кадыров Г.Ф., Симчук А.Е. Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба нежестких дорожных одежд на основе испытаний прочности установками динамического нагружения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 211–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. EDN: FKOHNU
4. ГОСТ 32960–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения. Москва : Стандартиформ, 2016. 8 с.
5. ГОСТ 17697–72. Автомобили. Качение колеса. Термины и определения. Москва : Изд-во стандартов, 1972. 26 с.
6. Pacejka H.B., Besselink I.J.M. Tire and Vehicle Dynamics, (3 ed.). Elsevier, 2012. 632 p. ISBN-978-0-08-09016-5.
7. Кнороз В.И., Кленников Е.В., Шелухин А.С., Юрьев Ю.М. Работа пневматической шины. Москва : Транспорт, 1976. 238 с. URL: <https://laz-legend.ru/library/knoroz-rabota-avtomobilnoj-shiny-1976.html>
8. ГОСТ 32965–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Методы учета интенсивности движения транспортного потока. Москва : Стандартиформ, 2019. 26 с.

REFERENCES

1. GOST R 71404–2024. Public roads. Design of flexible road pavements. Introduced. 2024-01-01. Moscow: Standartinform, 2024. 45 p. (In Russian)
2. Gorskiy M.Yu., Kadyrov G.F., Streletsov A.V., Simchuk E.N. Methodology Improvement of Flexible Road Pavement Analysis in Terms of the Elasticity Theory for Multilayer Half-Space. *Dorogi i mosty*. 2021; 2 (46): 53–74. (In Russian)
3. Gorskiy M.Yu., Simchuk E.N., Kadyrov G.F., Simchuk A.E. Temperature Effect on Flexural Bowl Determined by Falling Weight Deflectometer Testing. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (4): 211–225. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. EDN: FKOHNU
4. GOST 32960–2014. Public roads. Standard loads, design loading schemes, Moscow: Standartinform, 2016. (In Russian)
5. GOST 17697–72. Automobiles. Wheel rolling. Terms and definitions. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1972. (In Russian)

6. Pacejka H.B., Besselink I.J.M. Tire and Vehicle Dynamics, 3rd edn., 2012, 632 p. ISBN-978-0-08-09016-5.
7. Knoroz V.I., Klennikov E.V., Petrov I.P., Sheloukhin A.S., Yuryev Yu.M. Pneumatic Tire Operation, Moscow: Transport, 1976. Available: <https://laz-legend.ru/library/knoroz-rabota-avtomobilnoj-shiny-1976.html> (In Russian)
8. GOST 32965–2014. Public roads. Methods for measuring traffic intensity. (In Russian)

Сведения об авторе

Алексей Евгеньевич Симчук, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. alexsimchuk@bk.ru

Author Details

Aleksei E. Simchuk, Research Assistant, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikeskaya Str., 195251, Saint-Petersburg, Russia, alexsimchuk@bk.ru

Статья поступила в редакцию 23.04.2025
Одобрена после рецензирования 04.06.2025
Принята к публикации 26.06.2025

Submitted for publication 23.04.2025
Approved after review 04.06.2025
Accepted for publication 26.06.2025