

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2025, Том 12, № 4 / 2025, Vol. 12, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2025.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/02SATS425.pdf>

DOI: 10.15862/02SATS425 (<https://doi.org/10.15862/02SATS425>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ермошин, Н. А. Полнофакторный анализ влияния режимов движения на давление в шинах и величину динамического воздействия на дорожные одежды / Н. А. Ермошин, А. Е. Симчук // Транспортные сооружения. — 2025. — Т. 12. — № 4. — URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS425.pdf>. DOI: 10.15862/02SATS425.

For citation:

Ermoshin N.A., Simchuk A.E. Full factorial analysis of operating modes affecting tire pressure and the magnitude of dynamic impact on pavement structures. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2025;12(4): 02SATS425. Available at: <https://t-s.today/PDF/02SATS425.pdf>. DOI: 10.15862/02SATS425. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 625.73

Ермошин Николай Алексеевич

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Доктор военных наук, профессор
E-mail: ermonata@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0367-5375>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=735873

Симчук Алексей Евгеньевич

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Аспирант
E-mail: alexsimchuk@bk.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1197060

Полнофакторный анализ влияния режимов движения на давление в шинах и величину динамического воздействия на дорожные одежды

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования, направленного на количественную оценку влияния эксплуатационных факторов на изменение давления в шинах грузового автомобиля. Рассмотрены четыре основных фактора: скорость движения, температура воздуха, масса перевозимого груза и время рейса. В качестве отклика принято приращение давления относительно исходного «холодного» значения, что позволяет выявить реальные закономерности повышения давления при движении и отделить их от фоновых значений. Исследование проведено на основе ретроспективного анализа телеметрических данных, что обеспечивает достоверность результатов и позволяет проследить поведение шины в реальных условиях эксплуатации без лабораторных и стендовых ограничений. Для планирования использован полный факторный эксперимент типа 2^5 , позволяющий оценить как индивидуальные, так и совокупные эффекты факторов. Построена аддитивная регрессионная модель первого порядка, благодаря которой определены наиболее значимые параметры, влияющие на рост давления в шинах. Проведён анализ вклада каждого фактора в общий прирост давления, что подтвердило наибольшее влияние массы груза и скорости движения. Полученные результаты имеют прикладное значение при уточнении расчётных нагрузок в проектировании дорожных одежд и повышении точности моделирования взаимодействия «шина — покрытие».

Ключевые слова: давление в шинах; грузовой транспорт; эксплуатационные факторы; регрессионная модель; прирост давления; полный факторный эксперимент; телеметрия; проектирование дорожных одежд

Введение

Действующим нормативно-техническим документом¹, регламентирующим проектирование дорожных одежд в РФ, предусмотрено использование данных, которые не соответствуют реальным фактическим параметрам расчетных нагрузок. Это обусловлено тем, что повышается грузоподъемность транспортных средств, увеличивается количество осей, а также изменяется конструкция шин колесных транспортных средств [1]. Поэтому такой важный параметр как геометрический размер пятна контакта, зависящий от давления в шинах и их жесткости, а также осевой нагрузки, температуры и времени движения, не обеспечивает точности и достоверности результатов расчета конструкций дорожных одежд по существующим методикам [2]. В настоящее время при расчетах напряженно-деформированного состояния дорожных одежд принято считать давление внутри шины неизменным, что не соответствует реальной действительности [3]. В реальных условиях эксплуатации давление в шинах изменяется при движении под действием нагрузки, температуры и времени [4]. Эти эффекты практически не изучены в динамике, что может являться одной из причин преждевременного разрушения дорожных конструкций. В простейшем приближении воздух в шине можно рассматривать как идеальный газ. При прочих равных условиях, справедливо соотношение $p/T = const$, то есть рост температуры сопровождается ростом внутреннего давления [5]. Это подтверждается натурными данными, так увеличение температуры воздуха внутри шины на 35°C (с 15°C до 50°C), зафиксированное в ходе реального рейса [6], сопровождалось повышением давления на 16 %.

Таким образом, эксплуатационные факторы — нагрузка, скорость и продолжительность движения — оказывают влияние на давление опосредованно, за счёт нагрева воздуха внутри шины в процессе движения. Поэтому весьма актуально уточнение расчетной нагрузки на дорожные одежды с учетом изменения давления в шинах при эксплуатации [7].

Цель эксперимента заключается в количественной оценке влияния нагрузки на ось, температуры, скорости и длительности движения транспортных средств на изменение давления в шинах для учета фактического воздействия грузового транспорта на дорожную одежду и научного обоснования параметров дорожных конструкций. Результатом достижения этой цели является решение задачи построения регрессионной математической модели зависимости давления в шинах от указанных факторов.

В качестве экспериментальной базы использованы телеметрические данные, полученные в рамках мониторинга эксплуатации грузового транспортного средства [6]. Проведён ретроспективный отбор фрагментов движения, соответствующих условиям полного факторного эксперимента типа 2⁵. Это позволило рассмотреть все крайние и комбинированные режимы эксплуатации без проведения натурных испытаний в специально заданных условиях.

Экспериментальные данные исследованы методами корреляционно-регрессионного анализа с целью построения модели зависимости давления в шине от различных факторов. В качестве отклика в эксперименте рассматривается максимальное значение внутреннего давления в шине. Особенностью подхода является представление отклика в виде прироста

¹ ГОСТ Р 71404-2024. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд. — Введ. 2024-01-01. — М.: Стандартинформ, 2024. — 45 с.

давления относительно базового «холодного» значения, что позволяет более наглядно и физически обоснованно интерпретировать вклад каждого фактора.

Таким образом, содержание эксперимента включает:

1. Выявление значимости факторов, влияющих на изменение давления в шине.
2. Сбор и фильтрацию телеметрических данных.
3. Построение и анализ регрессионной математической модели для расчета давления в шинах с учетом области определения выявленных факторов.

Основная часть

Анализ и кодировка факторов

Нагрузка от транспортных средств через пятно контакта шины оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние дорожных одежд и, как следствие, на долговечность автомобильных дорог. В связи с этим, необходимо точно определить фактические размеры пятна контакта. При этом необходимо учитывать, что его размеры зависят от давления в шине. Для определения факторов, влияющих на изменение значений давления в шине была использована математическая теория планирования эксперимента.² Принятый подход соответствует современным методическим принципам ускоренных испытаний дорожных одежд, в которых рекомендуется варьирование эксплуатационных факторов для оценки их влияния на формирование НДС покрытия и долговечность конструкций [8].

В качестве входных факторов выбраны пять параметров, которые в соответствии с основными законами термодинамики [9], существенно влияют на давление в шинах, а именно, скорость движения, температура воздуха, длительность рейса и масса груза. Выбор обусловлен тем, что именно эти параметры определяют режим эксплуатации шины, её нагрев и деформационные процессы. Жёсткость шины также влияет на поведение транспортного средства, например, на устойчивость, управляемость и сопротивление качению, однако:

во-первых, она является конструктивной характеристикой, не изменяющейся в процессе эксплуатации;

во-вторых, она зависит от множества внешних факторов, таких как модель, производитель, тип каркаса и её влияние проявляется через температуру и давление, которые уже учтены в модели;

в-третьих, в рамках данной работы жёсткость шины не поддаётся прямому измерению в полевых условиях, в отличие от выбранных параметров.

Перечень факторов и их обозначения приведены ниже:

x_1 — скорость движения автомобиля (км/ч). Высокая скорость приводит к более частым циклам деформации шин и повышенному трению, что способствует росту температуры воздуха внутри шин и, как следствие, давлению внутри нее [10].

x_2 — температура окружающего воздуха (°C). При высокой внешней температуре шины изначально нагреваются сильнее и охлаждаются медленнее, что приводит к более высокому давлению внутри шины.

² Радоцкий В.Ю., Шульженко В.Н., Носатова Е.А. Основы научных исследований. — Белгород: БГТУ, 2008. — 133 с.

x_3 — время в движении (ч). Длительность непрерывного движения определяет, насколько воздух внутри шины прогреется: за короткий рейс воздух в шине может не достичь максимальной температуры, тогда как при длительном движении температура и давление могут достигать максимальных значений.

x_4 — масса груза (т). Более тяжёлый груз увеличивает нагрузку на шины, усиливая их деформацию и внутреннее трение в боковинах, что приводит к дополнительному нагреву и росту давления в шинах.

x_5 — резервный фактор (фиктивный, безразмерный). Этот фактор не связан с реальными условиями эксплуатации, он введён в план эксперимента для оценки погрешности и проверки статистической значимости эффектов.

Влияние резервного фактора заведомо отсутствует, поэтому его коэффициент в модели может получиться близким к нулю. Наличие такого «пустого» фактора позволяет при отсутствии повторных испытаний оценить фоновый уровень разброса результатов.

Для каждого указанного фактора определены два уровня варьирования — нижний (-1) и верхний (+1). Они выбраны исходя из реальных диапазонов изменений за период наблюдений. Кодирование уровней факторов выполнено по стандартной методике [11]: натуральные значения переводятся в безразмерные кодированные значения -1 и +1 по формуле линейного преобразования,

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X},$$

где:

x_i — кодированное значение фактора (от -1 до +1);

X_i — натуральное значение (температура, скорость и т. д.);

X_0 — середина интервала (среднее значение между минимумом и максимумом);

ΔX — половина интервала.

Это позволяет сравнивать различные факторы в одной системе измерения и обеспечивает удобство расчёта коэффициентов модели. В таблице 1 приведены диапазоны изменения факторов, принятые в эксперименте, и их кодированные уровни.

Таблица 1

Факторы эксперимента и принятые уровни варьирования

Фактор (обозначение)	Нижний уровень (-1)	Верхний уровень (+1)
Скорость движения, км/ч (x_1)	~50 (городская скорость)	~80 (высокая скорость на шоссе)
Температура воздуха, °C (x_2)	~15 (умеренная/низкая температура)	~30 (повышенная температура)
Время в движении, ч (x_3)	~3 (короткий рейс)	~8 (длительный рейс)
Масса груза, т (x_4)	~0 (порожний автомобиль)	~36 (полная загрузка цистерны)
Резервный фактор (x_5)	Условно «низкий» (фиктивно -1)	Условно «высокий» (фиктивно +1)

Разработано авторами

Каждый фактор представлен на двух уровнях, а совместно они образуют план типа 2^5 — полный факторный эксперимент с пятью факторами. Полный факторный эксперимент (ПФЭ) предполагает проведение испытаний во всех возможных сочетаниях факторов. Для случая пяти факторов и двух уровней это даёт $2^5 = 32$ комбинации условий опытов. Такой план эксперимента позволяет изучить взаимное влияние факторов. Иными словами, варьируются все факторы одновременно, но по специально подобранной системе, обеспечивающей ортогональность плана. Ортогональность означает, что каждый фактор принимает значение независимо от другого и сумма попарных произведений кодированных значений равна нулю.

Благодаря этому достигается независимая оценка значимости влияния каждого фактора на отклик и наилучшая точность определения коэффициентов для регрессионной модели.

Важно отметить применимость выбранной методики в условиях натурального эксперимента. В лабораторных условиях факторные планы реализуются путём активного варьирования факторов, тогда как в полевых условиях не всегда возможно строго задавать уровни факторов по заранее запланированной программе. Данное исследование благодаря принятому способу регистрации экспериментальных данных носит характер пассивного эксперимента, при котором параметры режимов движения регистрировались без вмешательства исследователя. Накопленные за большой период данные мониторинга использовались как основа для факторного анализа.

Были ретроспективно отобраны из массива натуральных наблюдений такие опыты (испытания, рейсы), которые соответствуют необходимым сочетаниям факторов плана 2^5 . Таким образом, удалось реализовать условия полного факторного эксперимента на основе полевых наблюдений. Использование ПФЭ 2^5 оправдано, так как число факторов невелико, а план охватывает крайние режимы эксплуатации, что даёт возможность выявить наиболее значимые факторы и оценить их влияние на отклик.

Матрица планирования ПФЭ 2^5

Матрица планирования эксперимента представляет собой таблицу, строки которой соответствуют отдельным опытам, а столбцы — значения факторов в кодированном виде.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента 2^5 (кодированные значения факторов)

№ опыта	x_1 (скорость)	x_2 (температура)	x_3 (время)	x_4 (масса груза)	x_5 (резервный)
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1	-1	-1
9	-1	-1	-1	+1	-1
10	+1	-1	-1	+1	-1
11	-1	+1	-1	+1	-1
12	+1	+1	-1	+1	-1
13	-1	-1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	-1
17	-1	-1	-1	-1	+1
18	+1	-1	-1	-1	+1
19	-1	+1	-1	-1	+1
20	+1	+1	-1	-1	+1
21	-1	-1	+1	-1	+1
22	+1	-1	+1	-1	+1
23	-1	+1	+1	-1	+1
24	+1	+1	+1	-1	+1
25	-1	-1	-1	+1	+1
26	+1	-1	-1	+1	+1
27	-1	+1	-1	+1	+1
28	+1	+1	-1	+1	+1
29	-1	-1	+1	+1	+1
30	+1	-1	+1	+1	+1
31	-1	+1	+1	+1	+1
32	+1	+1	+1	+1	+1

Разработано авторами

В последнем столбце приводится значение отклика (результат опыта). Общий вид матрицы ПФЭ 2^5 , реализованной в данном исследовании, приведён в таблице 2. В ней показаны все 32 комбинации для пяти факторов x_1 – x_5 . Кодированные значения -1 и +1 используются согласно принятому плану в таблице 1. Колонка x_0 традиционно отведена под единицы (интерцепт) и здесь опущена для компактности.

Интерцепт — это свободный член в уравнении, который показывает, чему равно значение отклика (y), когда все факторы равны нулю или же значение максимального давления в колесе при средних условиях.

Каждая строка таблицы соответствует одному дню испытаний с уникальным сочетанием условий. Порядок опытов пронумерован условно, а не хронологически. Таблица 2 иллюстрирует, что в матрице представлены все возможные сочетания низких и высоких уровней факторов — от минимального набора условий (-1 -1 -1 -1 -1) до максимального (+1 +1 +1 +1 +1). Матрица обладает свойством симметричности: сумма элементов каждого столбца факторов равна нулю, что подтверждает ортогональность данного плана.

Каждая строка этой матрицы соответствует определённому сочетанию эксплуатационных условий, которое было реализовано хотя бы раз за период натуральных наблюдений. Например, опыт № 1 — это случай низкой скорости, низкой температуры, короткого времени движения, порожнего автомобиля и условного уровня резервного фактора -1. Напротив, опыт № 32 — движение с высокой скоростью в жаркую погоду, длительный рейс при полной загрузке и резервный фактор +1.

Таким образом, матрица планирования покрывает весь интересующий диапазон условий эксплуатации от наименее до наиболее тяжёлых. Реализация такого объёмного плана в полевых условиях стала возможна благодаря длительному периоду испытаний и широкому разбросу фактических режимов движения, а именно география маршрутов охватывала разные климатические зоны и сценарии эксплуатации. На практике, конечно, порядок выполнения этих комбинаций не был случайным — он определялся графиком реальных рейсов. Тем не менее, за время испытаний влияния систематических внешних факторов, таких как износ шин или сезонные изменения удалось минимизировать.

Эксперимент и обработка данных

После обоснования плана и уровней факторов был выполнен анализ реальных наблюдений, соответствующих сценариям по таблице 2. Иными словами, из массива данных, накопленных бортовой системой мониторинга [6], отобраны 32 характерных дневных цикла движения автомобиля, каждый из которых удовлетворяет одному из сочетаний плана. Для каждого такого экспериментального дня рассчитаны показатели, характеризующие факторы и отклик:

- Скорость (x_1): определялась как средняя скорость движения за день, а именно, среднее значение по всем интервалам движения, исключая стоянки. Для дней с кодовым уровнем -1 средняя скорость составляла порядка 40–50 км/ч это движение преимущественно в стеснённых условиях, городской цикл. Для уровня +1 средняя скорость близилась к 70–80 км/ч обычное движение по шоссе. Такой подход сглаживает кратковременные колебания скорости, фокусируясь на общем темпе движения автомобиля.

- Температура окружающего воздуха (x_2): определялась как усреднённая внешняя температура воздуха в период рейса. Поскольку прямая телеметрия наружной температуры не везде была доступна, её оценивали по совокупности данных: начальной температуре воздуха в шине перед выездом и сведениям о погоде в регионе маршрута, при необходимости

использовались данные архива метеонаблюдений сайта Gismeteo.³ Уровню -1 соответствовали умеренные и прохладные условия (около +10 до +18°C), уровню +1 — жаркая погода (около +25 до +35°C). Разница в ~15°C между уровнями достаточно велика, чтобы отразить влияние климатического фактора [12].

- Время в движении (x_3): вычислялось как суммарная продолжительность движения автомобиля в течение дня. Для низкого уровня характерны непродолжительные рейсы длительностью около 2–4 часов, например, небольшие перевозки или перегон без груза. Высокий уровень — это продолжительные рейсы 8–10 часов и более, они близки к максимально допустимому времени управления в сутки. При таком длительном движении воздух в шине успевает прогреться до максимального состояния.

- Масса груза (x_4): оценивалась по данным системы измерения осевых нагрузок. Система мониторинга ежедневно фиксировала полную массу автопоезда и массу груза. Для выделения уровней использовался максимальный зарегистрированный вес груза за день. Если автомобиль двигался порожним, то день относился к уровню -1. Полностью гружёные рейсы, относились к уровню +1.

- Отклик или же результат эксперимента (y): в качестве выходного параметра выбрана максимальная за сутки величина внутреннего давления воздуха в шинах. Этот показатель напрямую связан с нагревом шин и отражает наихудшее сочетание нагрузок и условий за рейс. Поскольку в течение дня давление постепенно растёт по мере нагрева воздуха в шине, максимум, как правило, достигался к концу длительного участка движения. В порожних рейсах давление в шинах оставалось близким к исходному, холодному значению, а в тяжёлых длительных рейсах оно значительно превышало исходное. Таким образом, максимальное дневное давление — информативный показатель, зависящий от всех рассматриваемых факторов.

После обработки данных для каждого из 32 выбранных рейсов получена фактическая матрица эксперимента с заполненным столбцом отклика. Эта матрица продемонстрирована в таблице 3, включает кодированные значения факторов x_1 – x_5 и соответствующие значения максимального давления в шинах (y) за рейс. Базовое холодное давление в шинах перед выездом составляло ~0,85–0,90 МПа (в соответствии с техническими рекомендациями для использованных шин). Соответственно, значения (y) выше этих величин указывают на рост давления.

В полученной таблице 3 просматриваются ожидаемые тенденции изменения отклика (y) в зависимости от факторов. Минимальные значения давления (~0,98–1,00 МПа) наблюдаются в опытах, соответствующих совокупности наименее благоприятных для нагрева условий: низкая скорость, короткое время движения, небольшой груз. Напротив, наиболее высокое давление (до 1,16–1,18 МПа) отмечается в опытах с тяжёлыми условиями. В опыте № 32, где все основные факторы имеют высокие уровни, зафиксировано максимальное значение ~1,18 МПа — это соответствует очень жаркому дню, длительному рейсу с полной загрузкой и высокой скоростью, что привело к существенному росту давления, ~0,28–0,30 МПа сверх холодного состояния, то есть увеличение составило ~25–30 %. Впрочем, и некоторые другие комбинации близки к этому: например, опыт № 30 показал ~1,16 МПа — при относительно невысокой внешней температуре, но за счёт большой длительности рейса, высокой скорости и нагрузки давление оказалось почти таким же высоким. Эти наблюдения указывают на сильное влияние массы груза и длительности движения и показывают, что даже при умеренной погоде, тяжёлый и долгий рейс разогревает воздух в шине не меньше, чем более короткий рейс в

³ Gismeteo.ru — Архив погодных данных. URL: <https://www.gismeteo.ru/weather/archive/> (дата обращения: 2025).

жаркую погоду. Повышенные значения давления в шине приводят к росту нагрузок, передаваемых на покрытие, что в эксплуатации способствует ускоренному накоплению остаточных деформаций и формированию колеи. Аналогичные выводы приводятся в работах по анализу причин колееобразования на нежёстких дорожных одеждах [13].

Таблица 3

Фактическая матрица эксперимента с результатами

№ опыта	x ₁ (скорость)	x ₂ (температура)	x ₃ (время)	x ₄ (масса груза)	x ₅ (резервный)	y
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,99
2	+1	-1	-1	-1	-1	1,02
3	-1	+1	-1	-1	-1	1,00
4	+1	+1	-1	-1	-1	1,01
5	-1	-1	+1	-1	-1	1,03
6	+1	-1	+1	-1	-1	1,06
7	-1	+1	+1	-1	-1	1,04
8	+1	+1	+1	-1	-1	1,07
9	-1	-1	-1	+1	-1	1,08
10	+1	-1	-1	+1	-1	1,10
11	-1	+1	-1	+1	-1	1,09
12	+1	+1	-1	+1	-1	1,11
13	-1	-1	+1	+1	-1	1,12
14	+1	-1	+1	+1	-1	1,14
15	-1	+1	+1	+1	-1	1,13
16	+1	+1	+1	+1	-1	1,15
17	-1	-1	-1	-1	+1	0,98
18	+1	-1	-1	-1	+1	1,01
19	-1	+1	-1	-1	+1	1,00
20	+1	+1	-1	-1	+1	1,02
21	-1	-1	+1	-1	+1	1,03
22	+1	-1	+1	-1	+1	1,07
23	-1	+1	+1	-1	+1	1,05
24	+1	+1	+1	-1	+1	1,08
25	-1	-1	-1	+1	+1	1,09
26	+1	-1	-1	+1	+1	1,11
27	-1	+1	-1	+1	+1	1,10
28	+1	+1	-1	+1	+1	1,12
29	-1	-1	+1	+1	+1	1,13
30	+1	-1	+1	+1	+1	1,16
31	-1	+1	+1	+1	+1	1,14
32	+1	+1	+1	+1	+1	1,18

Разработано авторами

Проведённый эксперимент подтвердил влияние факторов на изменение давления, как на качественном, так и на количественном уровне. Для обобщения результатов и учёта совместного воздействия факторов в инженерных расчётах необходимо построение математической модели. Это позволит использовать полученные зависимости для уточнения параметров расчётной нагрузки и повышения надёжности дорожных одежд.

Регрессионная модель и интерпретация результатов

На основании данных таблицы 3 проведён регрессионный анализ с целью получения эмпирического уравнения, описывающего зависимость максимального давления в шинах от рассматриваемых факторов. Предположена аддитивная линейная модель первого порядка:

$$y_{max} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + \varepsilon,$$

где:

b_0 — свободный член, значение (y) при средних условиях всех факторов;

b_i — коэффициенты при факторах;

ε — случайная ошибка.

Для определения коэффициентов b_i использован метод наименьших квадратов.

Благодаря ортогональности плана каждый коэффициент может быть оценен независимо. В частности, оценка b_i пропорциональна разности средних значений отклика при высоком и низком уровне соответствующего фактора. Расчёты показали следующую регрессионную зависимость:

$$y_{max} = 1,091 + 0,0116x_1 + 0,0016x_2 + 0,0077x_3 + 0,0266x_4 + 0,0028x_5 + \varepsilon,$$

где:

y_{max} выражено в МПа.

Таким образом, при средних условиях, когда все $x_i = 0$, значение $y_{max} \approx 1,091$ МПа, что соответствует типичному наблюдаемому максимальному давлению в шине при умеренных условиях.

Необходимо отметить, что средние условия, это когда все $x_i = 0$, являются средними значениями каждого фактора по всей выборке, к примеру, если для высокого уровня фактора (+1) была принята скорость 80 км/ч, а для низкого уровня фактора (-1) выбрана скорость 50 км/ч, то средним условием для этого фактора будет являться скорость в 65 км/ч.

Для анализа модель была пересчитана в виде прироста давления ΔP относительно исходного давления в шине (0,90 МПа). Это позволяет оценить долю вклада каждого фактора именно в ту часть давления, которая возникает в результате движения и нагрева шины, что отражает реальную физическую картину.

Результаты расчёта показали, что:

- Масса груза (x_4) оказывает наибольшее влияние: при переходе от порожнего состояния к полной загрузке давление в шинах увеличивается примерно на 0,053 МПа, что составляет около 28 % от общего прироста.
- Скорость движения (x_1) также существенно влияет: разница между низкой и высокой скоростью приводит к увеличению давления примерно на 0,023 МПа, вклад около 12 %.
- Время в пути (x_3) вносит прирост давления примерно 0,015 МПа, или около 8 %, так как при длительном движении воздух в шине нагревается сильнее.
- Температура воздуха (x_2) показала наименьшее влияние — увеличение давления при переходе от умеренной к жаркой погоде составляет всего около 0,003 МПа, то есть менее 2 %.
- Резервный (фиктивный) фактор (x_5) дал небольшой вклад ~ 3 % и служит индикатором фоновой погрешности.

Эти данные наглядно иллюстрируются на рисунке 1, построенного на основе модельных приростов давления, нормированных на общий эффект.

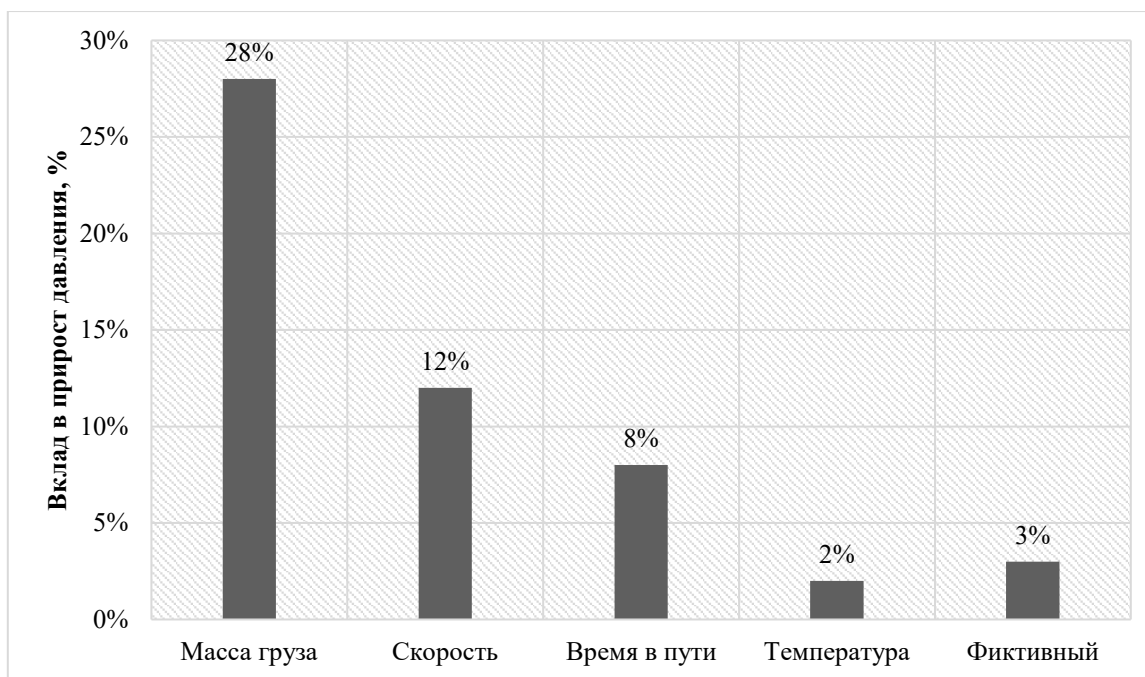


Рисунок 1. Влияние факторов на прирост давления в шинах (по результатам модели, нормировка на $\Delta P \approx 0,19$ МПа) (разработано авторами)

Как видно из рисунка 1, наибольшее влияние на прирост давления оказывают масса груза, скорость и продолжительность движения. Проценты, представленные на диаграмме, отражают вклад каждого фактора в общий прирост давления ($\Delta P \approx 0,19$ МПа), рассчитанный по результатам модели. При этом важно понимать, что на диаграмму выведены только те факторы, вклад которых был рассчитан отдельно — без учёта взаимодействий между ними и других косвенных влияний. Суммарный прирост давления, объяснённый именно этими пятью факторами, составляет около 0,10 МПа. Чтобы наглядно сравнить их относительное влияние, все значения были нормированы так, чтобы в сумме давали 100 %. Это подтверждает адекватность модели и её пригодность для анализа условий эксплуатации [14; 15].

Заключение

В действующем национальном стандарте РФ ГОСТ Р 71404-2024⁴ расчет напряженно-деформированного состояния дорожных одежд осуществляется на основе давления в шине равным 0,8 МПа. В ходе эксперимента было установлено, что величина реального давления при движении современных транспортных средств выше расчетного на 47,5 % (1,18 МПа). Это может приводить к тому, что рассчитанные конструкции дорожных одежд будут обладать недостаточной долговечностью, что приведет к их преждевременному разрушению.

Также было выполнено планирование эксперимента и обработка результатов натуральных испытаний шин. Разработан план полного факторного эксперимента 2^5 , включающий пять факторов: скорость движения, внешнюю температуру, время в движении, массу груза и резервный фактор. Описаны принципы кодирования уровней факторов (-1 и +1) и обоснован выбор именно плана ПФЭ 2^5 для решения поставленной задачи.

Несмотря на полевые условия проведения опытов, удалось реализовать план эксперимента посредством отбора из данных мониторинга 32 характерных рейсов, покрывающих все

⁴ ГОСТ Р 71404-2024. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд. — Введ. 2024-01-01. — М.: Стандартинформ, 2024. — 45 с.

сочетания факторов. Составлена матрица эксперимента с указанием значений факторов и результирующего отклика — максимального давления в шинах. На основе этой матрицы построена регрессионная модель первого порядка.

Модель показала, что из рассмотренных факторов наибольшее влияние на рост давления в шинах оказывают масса груза и скорость движения, а в меньшей степени — длительность рейса, тогда как влияние температуры воздуха статистически незначимо в изученном диапазоне. Резервный фактор подтвердил уровень случайной погрешности и не внес систематического эффекта. По итогу получена эмпирическая формула, позволяющая прогнозировать максимальное давление в шинах в зависимости от условий эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радовский, Б.С. Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей / Б.С. Радовский, А.С. Супрун, И.И. Козаков. — М.: Транспорт, 1989. — 168 с. — URL: <https://dwg.ru/dnl/11496>. (дата обращения: 12.12.2025).
2. Ермошин, Н.А. Влияние конструкции автомобильных шин на нормирование воздействия расчетной нагрузки на дорожные одежды. Эволюция норм в России / Н.А. Ермошин, А.Е. Симчук // Транспортные сооружения. — 2025. — Т. 12, № 1. — URL: <https://t-s.today/08SATS125.html>. — DOI: [10.15862/08SATS125](https://doi.org/10.15862/08SATS125). (дата обращения: 12.12.2025).
3. Богомолов, В.А. Расчётное распределение давлений в пятне контакта шины с поверхностью дорожной одежды / В.А. Богомолов // Вестник ХНАДУ. — 2016. — Вып. 72. — С. 143–150. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27034083>. — EDN: [WTPGME](https://www.elibrary.ru/edn/WTPGME). (дата обращения: 12.12.2025).
4. Красавин, П.А. Факторы, влияющие на изменение давления в шинах автомобиля, и современные системы его контроля / П.А. Красавин, Г.В. Фисичев, А.О. Смирнов, Н. О. Касимов // Журнал автомобильных инженеров. — 2015. — № 3(92). — С. 16–21. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27034083>. — EDN: [UDDLRP](https://www.elibrary.ru/edn/UDDLRP). (дата обращения: 12.12.2025).
5. Савельев, И.В. Курс общей физики. Т. 1: Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И.В. Савельев. — 4-е изд. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1970. — 517 с. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31536199/>. (дата обращения: 12.12.2025).
6. Симчук, А.Е. Экспериментальные исследования параметров воздействия расчетной нагрузки на дорожные одежды / А.Е. Симчук // Вестник ТГАСУ. — 2025. — Т. 27, № 4. — С. 247–268. — URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/2170>. — DOI: [10.31675/1607-1859-2025-27-4-247-268](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2025-27-4-247-268). — EDN: [YQOBTA](https://www.elibrary.ru/edn/YQOBTA). (дата обращения: 12.12.2025).
7. Углова, Е.В. К вопросу учёта расчётного давления колеса автомобиля при проектировании конструкций нежёстких дорожных одежд / Е.В. Углова, О.А. Шило, В.В. Акулов // Дороги и мосты. — 2017. — № 38(2). — С. 60–70. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32542081>. (дата обращения: 12.12.2025).
8. Разработка методологических основ при ускоренных испытаниях дорожных одежд / А.С. Конорев, С.А. Мирончук, Е.А. Еременко, В.А. Думенко // Construction and Geotechnics. — 2025. — Т. 16, № 1. — С. 103–115. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80597234>. — DOI: [10.15593/2224-9826/2025.1.07](https://doi.org/10.15593/2224-9826/2025.1.07). — EDN: [HCYABS](https://www.elibrary.ru/edn/HCYABS). (дата обращения: 12.12.2025).

9. Ben-Naim A. Farewell to Entropy: Statistical Thermodynamics Based on Information / A. Ben-Naim. — New Jersey: World Scientific, 2008. — URL: [https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/Arieh%20Ben-Naim%20-%20A%20Farewell%20To%20Entropy_%20Statistical%20Thermodynamics%20Based%20On%20Information-World%20Scientific%20Publishing%20Company%20\(2008\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/Arieh%20Ben-Naim%20-%20A%20Farewell%20To%20Entropy_%20Statistical%20Thermodynamics%20Based%20On%20Information-World%20Scientific%20Publishing%20Company%20(2008).pdf). — ISBN: 978-981-270-706-2. (дата обращения: 12.12.2025).
10. Кнороз, В.И. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз, Е.В. Кленников, И.П. Петров [и др.]. — М.: Транспорт, 1976. — 320 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006974626>. (дата обращения: 12.12.2025).
11. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments / D.C. Montgomery. — 8th ed. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012. — 730 p. — URL: https://books.google.ru/books?id=XQAcAAAAQBAJ&redir_esc=y. (дата обращения: 12.12.2025).
12. Горский, М.Ю. Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба нежёстких дорожных одежд на основе испытаний прочностью установками динамического нагружения / М.Ю. Горский, Е.Н. Симчук, Г.Ф. Кадыров, А.Е. Симчук // Вестник ТГАСУ. — 2023. — Т. 25, № 4. — С. 211–225. — URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/1563>. — DOI: [10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225). — EDN: [FKOHNU](https://www.edn.net/FKOHNU). (дата обращения: 12.12.2025).
13. Александров, А.С. Анализ причин колееобразования на покрытиях нежёстких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления / А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л. Калинин // Вестник СибАДИ. — 2019. — Т. 16, № 6. — С. 718–745. — URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/986>. — DOI: [10.26518/2071-7296-2019-6-718-745](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745). — EDN: [ETJYRA](https://www.edn.net/ETJYRA). (дата обращения: 12.12.2025).
14. Исследование контактных характеристик шины и дороги на основе технологии чувствительной к давлению плёнки / Чэнь Б., Дин П., Вэй Г. [и др.] // Materials. — 2023. — Т. 16, № 18. — Art. 6323. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/18/6323>. — DOI: [10.3390/ma16186323](https://doi.org/10.3390/ma16186323). (дата обращения: 12.12.2025).
15. Горский, М.Ю. Совершенствование методики расчёта нежёстких дорожных одежд с учётом решения задачи теории упругости для многослойного полупространства / М.Ю. Горский, Г.Ф. Кадыров, А.В. Стрельцов, Е.Н. Симчук // Дороги и мосты. — 2021. — № 2(46). — С. 53–74. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47340772>. — EDN: [TPWVZF](https://www.edn.net/TPWVZF). (дата обращения: 12.12.2025).

Ermoshin Nikolai Alekseevich

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: ermonata@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0367-5375>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=735873

Simchuk Aleksei Evgenievich

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: aleksimchuk@bk.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1197060

Full factorial analysis of operating modes affecting tire pressure and the magnitude of dynamic impact on pavement structures

Abstract. The article presents the results of an experimental study aimed at quantitatively assessing the influence of operational factors on the variation of tire pressure in a heavy truck. Four main factors were considered: vehicle speed, ambient air temperature, cargo mass, and travel time. The response variable was defined as the pressure increase relative to the initial «cold» value, which makes it possible to identify actual regularities of pressure growth during vehicle operation and to distinguish them from baseline values. The study was carried out on the basis of retrospective analysis of telemetry data, which ensures the reliability of the results and allows the behavior of the tire under real operating conditions to be traced without the limitations of laboratory or bench testing. The experimental design was based on a full factorial experiment of type 2^5 , which makes it possible to evaluate both individual and combined effects of the factors. An additive first-order regression model was constructed to determine the most significant parameters influencing tire pressure growth. The contribution of each factor to the overall pressure increase was analyzed, confirming the dominant role of cargo mass and vehicle speed. The results obtained have practical significance for refining design loads in pavement engineering and for improving the accuracy of tire-pavement interaction modeling.

Keywords: tire pressure; heavy vehicles; operational factors; regression model; pressure growth; full factorial experiment; telemetry; pavement design