

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Механіко – технологічний факультет

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**Завідувач кафедри
Тракторів і автомобілів**

(назва кафедри)

Калінін Є.І.

(підпис)

(ПІБ)

«_____» _____ 2026 р.

ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ БАКАЛАВРА

**на тему «Підвищення довговічності ходової системи нормалізацією тиску
повітря в шинах»**

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Калінін Є.І.

(ПІБ)

Керівник дипломного проєкту бакалавра

к.т.н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Калінін Є.І.

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Матвєєнко М.О.

(ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

тракторів і автомобілів та

д.т.н., проф. _____ **Калінін Є.І.**
(наук. ступ., вч. звання) (підпис) (ПІБ)

« _____ » _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання дипломного проєкту бакалавра студенту

Матвеєнко Максим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність _____ 274 «Автомобільний транспорт»

(код і назва)

Тема дипломного проєкту бакалавра на тему «Підвищення довговічності ходової системи нормалізацією тиску повітря в шинах»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «06» лютого 2026р. №397 «С»

Термін подання завершеної роботи (проєкту) на кафедру: _____ 01.05.2026

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до дипломного проєкту бакалавра: характеристики та конструктивні особливості шин, що використовуються на легкових та вантажних автомобілях

Перелік питань які потрібно розробити _____

Вступ

1. Аналіз стану питання

2. Аналітичні дослідження

3. Результати розрахунків

4. Практичне використання результатів досліджень та їх ефективність

5. Економічний ефект від використання результатів досліджень

Висновки

Перелік графічного матеріалу: Вступ. Стан питання та аналіз існуючих досліджень. Теоретичні дослідження. Запропоноване технічне рішення. Висновки

Дата видачі завдання «23» лютого 2026 р.

Керівник дипломного проєкту бакалавра _____

(підпис)

Калінін Є.І.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Матвеєнко М.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Основна частина дипломного проекту викладена на 54 сторінках пояснювальної записки і 10 слайдів презентації, ілюстрована 12 рисунками.

Пояснювальна записка складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури.

Тема дипломного проекту: «Підвищення довговічності ходової системи нормалізацією тиску повітря в шинах».

Розв'язано проблему зниження собівартості автомобільних перевезень за рахунок підвищення довговічності шин і зменшення витрати палива шляхом забезпечення експлуатації шин із тиском, що відповідає нормативному.

Встановлено закономірності розподілу тиску повітря в шинах під час експлуатації автомобілів. Усі закономірності поділено на три групи за величиною коефіцієнта варіації та формою емпіричної кривої розподілу. До першої групи належать розподіли з яскраво вираженою додатною асиметрією та коефіцієнтом варіації в межах 0,20...0,35.

Ключові слова: автомобільні перевезення; автомобільні шини; тиск повітря в шинах; довговічність шин; витрата палива; паливна економічність; експлуатація автомобілів; коефіцієнт варіації; розподіл тиску; собівартість перевезень.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ.....	7
1.1. Навантаження шини внутрішнім тиском.....	7
1.2. Вплив тиску в шинах на їх довговічність	10
1.3 Вплив тиску в шинах на витрату палива автомобілем.....	12
1.4 Фактори, що впливають на тиск повітря в шині.....	15
1.4.1 Перелік факторів	15
1.4.2 Дифузійний витік	16
1.4.3. Температура	18
1.4.4 Система контролю тиску в шинах	20
1.4.5 Засоби для вимірювання тиску	21
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	24
2.1 Постановка проблеми	24
2.2. Загальна методика досліджень	26
2.3 Закономірності розподілу тиску повітря в шинах під час експлуатації автомобілів.....	27
2.3.1 Гіпотези щодо форми розподілу тиску повітря в шинах	27
2.4 Процеси прогрівання та охолодження шин.....	30
2.5 Процес зміни тиску повітря в шині при зміні температури	34
2.6 Моделювання закономірності зміни тиску в шині при прогріванні з урахуванням нерегулярного режиму.....	36
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ	37
3.1 Вплив температури повітря на ймовірність безвідмовної роботи золотників	37
3.2 Вплив основних факторів на зміну тиску в шинах.....	38
3.3 Інтенсивність дифузійного витоку повітря	39
3.4 Зміна об'єму шин при зміні тиску	40
3.5 Зміна тиску в шині при прогріванні	41

РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ.....	42
4.1 Методика практичного використання результатів досліджень.....	42
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	44
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТКИ.....	53

ВСТУП

Ефективність багатьох галузей економіки залежить від транспортних витрат. У собівартості автомобільних перевезень значну частку становлять витрати на шини. Ефективність використання шин визначається їх вартістю та довговічністю.

Довговічність шин суттєво залежить від багатьох факторів. Одним із найважливіших є тиск повітря в шині. Для шини даної моделі, що використовується на автомобілі даної марки та моделі, встановлюється нормативний тиск повітря, за якого вона має максимальний термін служби. При збільшенні тиску або його зниженні відносно оптимального значення термін служби шини зменшується. Від тиску в шинах суттєво залежить безвідмовність шин і безпека руху.

Крім того, від тиску повітря залежить опір коченню автомобіля та його паливна економічність.

Водночас відомо, що у 60...90 % шин під час експлуатації тиск не відповідає нормі, через недотримання норм тиску повітря в шинах втрачається 6...15% ресурсу шин і 1,5...3,0% пального. При цьому особливо великі відхилення тиску в шинах від норми спостерігаються в зимовий період.

Таким чином, існує проблема забезпечення експлуатації шин з нормативним тиском. Її вирішення ускладнюється тим, що зміна тиску визначається великою кількістю різноманітних факторів. Причому вплив деяких із них вивчено недостатньо. Отже, дослідження процесу зміни тиску повітря в шинах і розробка заходів, що забезпечують зменшення його відхилень від норми та зниження на цій основі витрат на експлуатацію автомобілів, – актуальна проблема.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1. Навантаження шини внутрішнім тиском

Відповідно до [9] тиском називається фізична величина p , що дорівнює границі відношення числового значення нормальної сили ΔF_n , яка діє на ділянку поверхні тіла площею ΔS , до величини ΔS при ΔS , що прямує до нуля:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta S} = \frac{dF_n}{dS}. \quad (1.1)$$

У [4] наводиться таке визначення: «Тиск – це величина, що характеризує інтенсивність сил, які діють на будь-яку частину поверхні тіла в напрямках, перпендикулярних до цієї поверхні. Тиск дорівнює відношенню сили, рівномірно розподіленої по нормалі до поверхні, до площі цієї поверхні».

Одиниця тиску в системі SI – паскаль (Па). Згідно з чинним державним стандартом з 1 січня 1980 року позасистемні одиниці (ат, атм, дин/см², мм рт. ст. та ін.) не підлягають застосуванню [3]. Для позначення тиску використовується латинська літера « p » [9].

Автомобільна шина – тонкостінна оболонка, наповнена стисненим повітрям. Якщо жорсткість у всіх точках оболонки однакова, то під дією внутрішнього тиску еластична оболонка прагне набутися форми кільця-тора. Автомобільна покришка має різну жорсткість у різних точках поперечного перерізу. У зоні брекера та протектора вона більша, ніж на боковинах.

Тому при накачуванні автомобільної шини повітрям її каркас набуває певної рівноважної форми, дещо відмінної від тора [4]. Як зазначає автор роботи [10], «... під дією внутрішнього тиску форма шини та її розміри змінюються, а в її матеріалах – кордних нитках, гумі, бортовому дроті – виникають значні зусилля».

При накачуванні шини стисненим повітрям зміна її розмірів залежить від співвідношення жорсткостей у різних точках профілю, а також від початкової форми.

Якщо ширина профілю покритишки B значно більша за висоту профілю H , то під дією тиску повітря діаметр шини D буде збільшуватися. Якщо ж H більше за B , то при накачуванні шини повітрям її діаметр буде зменшуватися. За певного співвідношення між B і H зі зміною тиску повітря розміри профілю шини змінюються незначно [7].

Каркас шини повною мірою починає сприймати навантаження від внутрішнього тиску в шині лише після набуття профілем рівноважної форми. Тому покритишку зазвичай конструюють таким чином, щоб її профіль за вулканізаційною формою був близьким до рівноважного.

У такому випадку елементи покритишки внаслідок внутрішнього тиску отримують лише розтягувальні напруження [5, 10, 14].

Основне навантаження від внутрішнього тиску несе каркас покритишки, оскільки його жорсткість значно вища за жорсткість гуми. Крім того, навантаження сприймається бортовими кільцями, у яких виникають розтягувальні зусилля.

У шин з радіальним розташуванням ниток корду жорсткий в окружному напрямку брекерний пояс, сприймаючи тиск повітря в зоні корони, частково розвантажує нитки корду каркаса, а отже, і бортові кільця. Запас міцності бортових кілець діагональних шин становить 6...8.

Зусилля збільшується зі зменшенням кута нахилу нитки корду. Шини з меридіональним розташуванням ниток корду повинні мати тому більш міцні бортові кільця [5, 7, 9].

Сила притискання борта шини до закраїни обода під дією тиску повітря дорівнює осьовій складовій зусилля, що діє по колу спряженого діаметра шини, плюс осьовий тиск повітря на її бортову частину від точки обода до носка. Величина моменту сили тертя між бортами покритишки та ободом, який утримує шини від провертання, залежить від розміру шини, тиску повітря, коефіцієнта тертя, конструкції обода тощо.

Відношення моменту тертя між бортами покритишки та ободом до моменту зчеплення колеса з дорогою становить 2...3 [5, 6, 7, 9]. Шини зазвичай

конструюються з урахуванням теорії подібності профілів. У подібних профілів відношення розмірів шини до ширини її профілю залишається сталим, а тиск повітря та напруження в нитках корду – однаковими [15].

Внутрішній тиск у шині вибирається залежно від радіального прогину та навантаження на шину [1, 5, 7, 8]. Для розрахунку норм внутрішнього тиску використовуються кілька формул.

Наближена формула Хелла пов'язує навантаження на шину Q (у кгс), ширину профілю, приведену до оптимального обода B_1 (у см), посадковий діаметр шини D (у см) і внутрішній тиск у шині p (у кгс/см²) [5, 7]:

$$Q = 0,23AKp^{0,585}(D + B_1)B_1^{1,39},$$

де K – коефіцієнт, що дорівнює 0,425 для вантажних шин, 0,465 для легкових шин, 0,392 для шин сільськогосподарських машин, 0,255 для тракторних шин; A – коефіцієнт, що дорівнює 1 для шин, які працюють на хороших дорогах при високих швидкостях, 1,2...1,25 для шин, які працюють при швидкості не більше 40 км/год, 1,45...1,35 для шин, які працюють при швидкості не більше 16 км/год, 2 – для шин, що перебувають під навантаженням у нерухомому стані.

Формула, запропонована спеціалістами для розрахунку внутрішнього тиску (кгс/см²), має вигляд [5, 7]:

$$p = \frac{c_2 Q f}{f^2 - c_1 Q}, \quad (1.2)$$

де Q – навантаження на шину, кгс; f – радіальний прогин шини, см; c_1 – коефіцієнт, що дорівнює 0,001...0,002 см²/кгс для вантажних шин дорожнього типу, 0,003...0,0035 см²/кгс для шин підвищеної прохідності, 0,002...0,004 см²/кгс для легкових шин; c_2 – коефіцієнт, що розраховується за формулою

$$c_2 = \frac{1...1,4}{\pi\sqrt{2RD}}. \quad (1.3)$$

Для певного типу шин відносний прогин (f/B або f/H) є сталою величиною. Наприклад, відносний прогин для вантажних шин дорівнює 0,10...0,12, для легкових – 0,12...0,16.

Таким чином, внутрішній тиск повітря – один із основних параметрів роботи автомобільної шини.

Від його величини залежать несуча здатність, деформація шини, напруження в нитках корду, сила притискання борта шини до закраїни обода. Норми тиску в шині розраховується залежно від навантаження, що діє на шину, допустимого радіального прогину та її розмірних параметрів (висоти і ширини профілю, зовнішнього діаметра).

1.2. Вплив тиску в шинах на їх довговічність

Внутрішній тиск повітря p є одним з основних параметрів роботи автомобільної шини. Від величини p залежить деформація шини, питомий тиск у контакті з дорогою та рівномірність його розподілу.

Тиск повітря значно впливає на термін служби шини. Для шини даної моделі, що використовується на автомобілі даної марки та моделі, встановлюється нормативний тиск повітря, за якого вона має максимальний термін служби.

При підвищенні тиску або його зниженні відносно оптимального значення термін служби шини зменшується (рис. 1.1).

Підвищення тиску призводить до збільшення напружень у нитках корду та напружень від зсувних деформацій у міжкордовій гумі. Шина стає жорсткішою, площа плями її контакту з дорогою зменшується.

Це призводить до збільшення напружень у контакті та підвищення інтенсивності зношування протектора. При експлуатації шин з підвищеним тиском на дорогах з нерівним покриттям зростають динамічні навантаження, що сприймаються колесом, і збільшується ймовірність розриву каркаса.

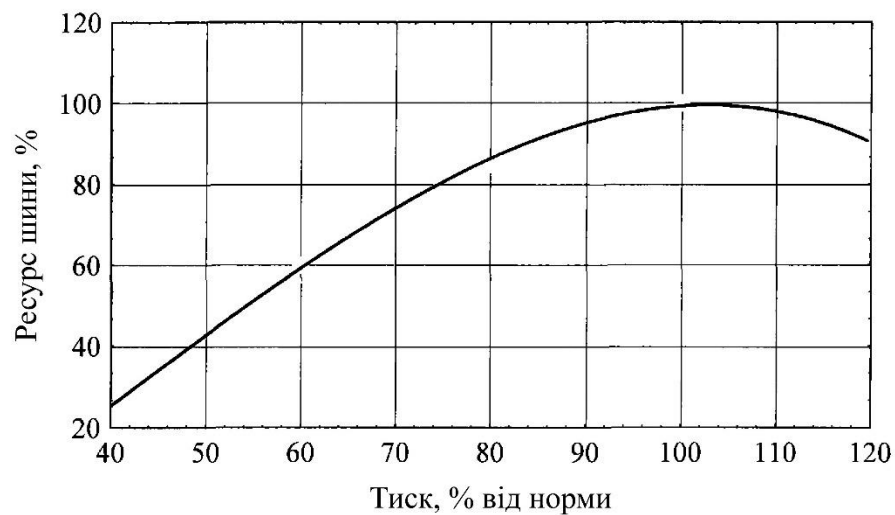


Рисунок 1.1 – Вплив тиску повітря в шині на її ресурс

Експлуатація шини зі зниженим тиском призводить до збільшення її деформації.

Великі деформації викликають підвищення температури шини, що спричиняє зростання інтенсивності зношування протектора, а також підвищення ймовірності втомних руйнувань.

За даними, які наводить R. Reiner, зниження тиску в шинах на 30% відносно норми зменшує пробіг шин на 26% [14].

В роботі [6] автори встановили, що «... зі збільшенням внутрішнього тиску повітря в шинах 165/80R13 і 175/80R16 на 25 і 50% від встановленого ДСТУ економічного навантаження інтенсивність зношування протектора знижується на 13 і 22% відповідно.

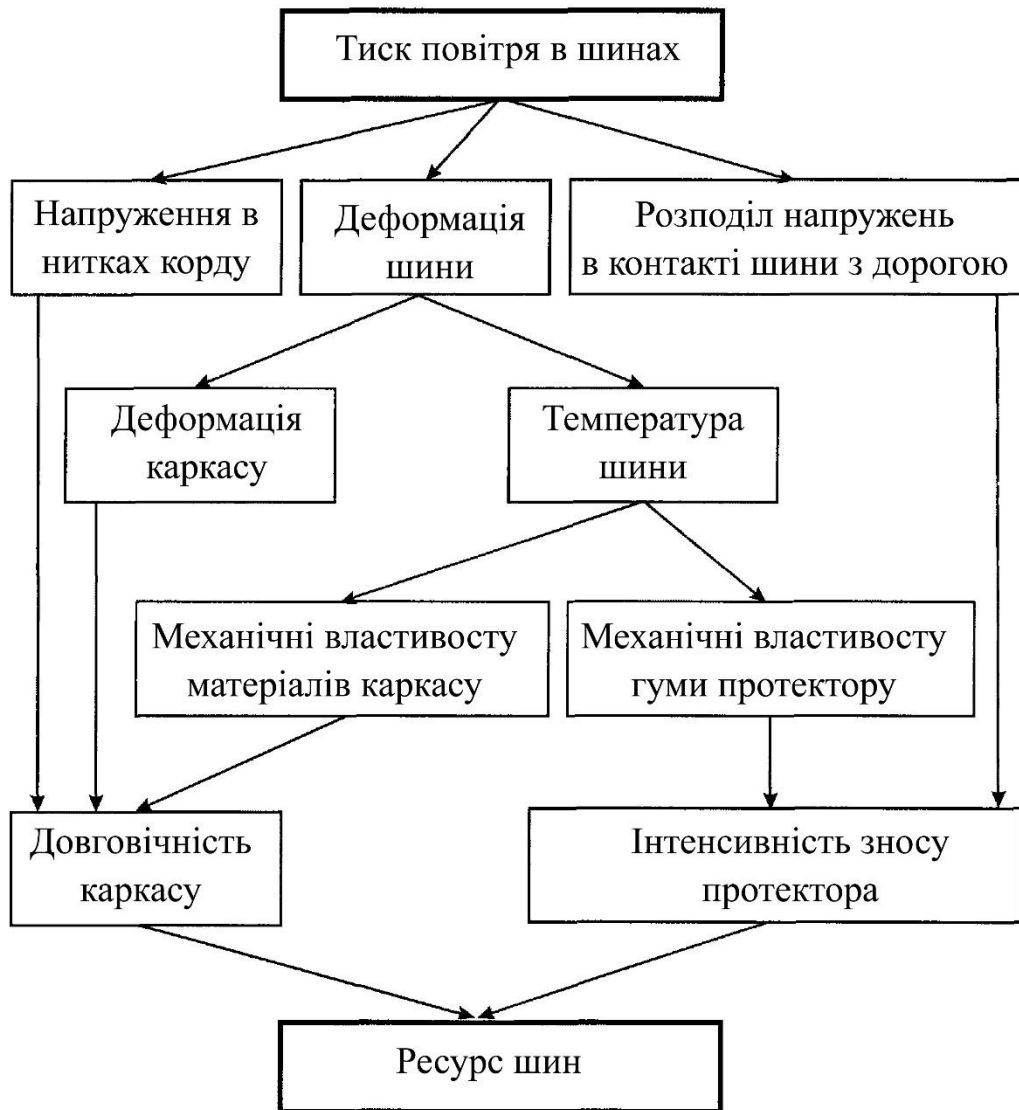


Рисунок 1.2 – Схема причинно-наслідкових зв'язків внутрішнього тиску повітря та ресурсу шин

При цьому спостерігається збільшення зношування середини бігової доріжки відносно її країв. Зворотна картина має місце при зменшенні внутрішнього тиску повітря.

Зменшення тиску на 25 і 50% підвищує інтенсивність зношування протектора на 20 і 50%. У цьому випадку зношування протектора по середині бігової доріжки зменшується відносно її країв» [3].

1.3 Вплив тиску в шинах на витрату палива автомобілем

Паливна економічність автомобіля значною мірою визначається опором коченню. Сила опору коченню залежить від тиску повітря в шинах автомобіля.

За даними [6] при зменшенні опору коченню шин на 10 % витрата палива автомобілем знижується на 2 %. Там же наведено схему розподілу енергії палива (рис. 1.3), у якій на частку гістерезису припадає 6,6 %.

Автори роботи [8] встановили такий напівемпіричний вираз впливу тиску повітря в шині p_m на коефіцієнт опору коченню f_0 :

$$f_0 = \frac{\alpha + \beta G_{\kappa}^2}{1 + p_{\omega}}, \quad (1.4)$$

де α , β – константи для шин даних розмірів і конструкції; G_{κ} – навантаження на колесо.

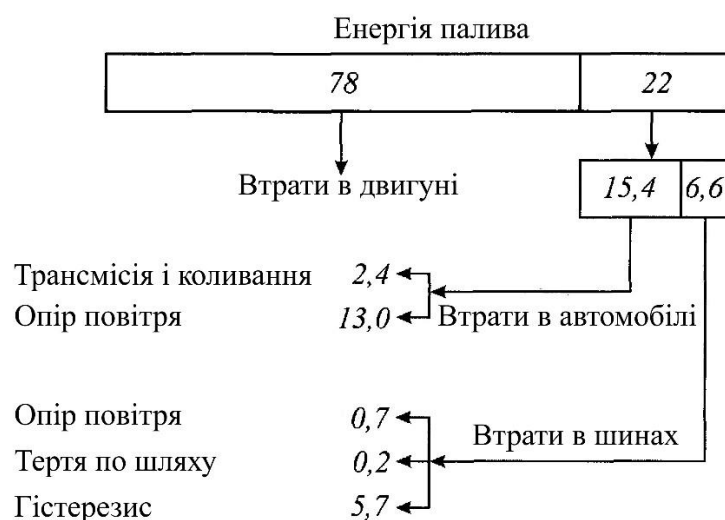


Рисунок 1.3 – Приблизний паливний баланс легкового автомобіля при русі зі швидкістю 80 км/год по горизонтальному шляху

Із формули випливає, що при підвищенні p_m величина f_0 знижується, причому інтенсивність її зміни зменшується в міру зростання внутрішнього тиску повітря.

Автори роботи [12] встановили, що шина 6,15-13 I-151, розігріта в процесі руху, має коефіцієнт опору коченню 0,0139, тоді як нерозігріта – 0,0156.

За даними [13], «у найбільш часто зустрічаючихся (середніх) умовах експлуатації автомобілів з колісною формулою 4×2 зниження опору коченню шин на 1 % зменшує витрату палива на 0,25–0,35 %».

Автори [14] зазначають, що на різних дорогах коефіцієнт опору коченню по-різному залежить від тиску повітря в шині. На дорогах із твердим покриттям

він зменшується зі збільшенням тиску, досягаючи мінімального значення при тиску, близькому до рекомендованого для даної шини.

При надмірному тиску зростають динамічні навантаження, що виникають унаслідок взаємодії колеса з нерівностями дороги, що може призвести до деякого збільшення коефіцієнта опору коченню. Якщо рух відбувається по деформівних дорогах, то при зменшенні тиску збільшуються втрати, пов'язані з деформацією шини, але зменшуються втрати, пов'язані з деформацією дороги.

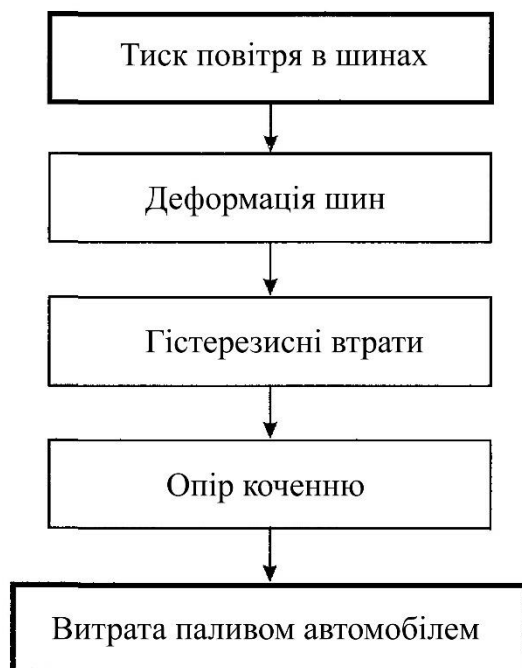


Рисунок 1.4 – Схема причинно-наслідкових зв'язків внутрішнього тиску повітря та витрати палива автомобілем

Автори роботи [10] наводять такі дані: «Зменшення тиску повітря в шинах порівняно з оптимальним на 10...15 % викликає зростання витрати палива на 3,5...4,0 %.

Частота появи цього дефекту в експлуатаційних умовах досягає 25...35 %. Зменшення тиску в шинах на 20...25 % збільшує витрату палива на 8...9 %. Частота цього дефекту в експлуатаційних умовах досягає 10–15 %».

За даними [15], при зниженні тиску повітря в шинах 7,50-20 автомобіля ГАЗ-51 на 0,5 кгс/см² витрата палива збільшується на 4,5 %, а при зниженні на 1,0 кгс/см² – на 10...12 %.

Зазначається, що при зниженні тиску повітря в шинах 220-508 (автомобіль ГАЗ-52) на 10 % витрата палива збільшується на 5 %, а при зниженні на 20 % – на 10...12 %.

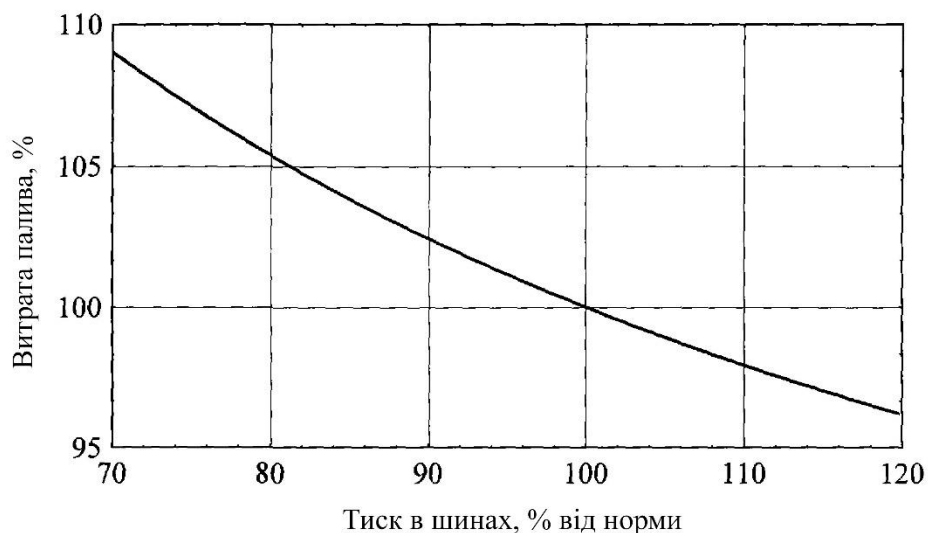


Рисунок 1.5 – Вплив тиску повітря в шинах на витрату палива автомобілем

1.4 Фактори, що впливають на тиск повітря в шині

1.4.1 Перелік факторів

Результати досліджень [3, 9] показують, що в експлуатації у 60...90 % шин тиск не відповідає нормативному. Автор зазначає, що розподіл тиску добре узгоджується з нормальним законом. За даними, середній тиск у шинах під час експлуатації може становити 72...122 % від норми при коефіцієнті варіації 0,07...0,35.

У результаті 380 спостережень за шинами на пробігу до 95 тис. км встановлені характеристики надійності збереження в них тиску повітря [5]. Розподіл пробігу автомобільних шин, у яких тиск залишається постійним, побудований за даними [5, 7], наведений на рис. 1.6.

Отриманий емпіричний розподіл добре узгоджується з гамма-законом. На основі цих даних зазначеними авторами запропоновано прогнозувати зниження тиску за межі норми та періодичність контролю.

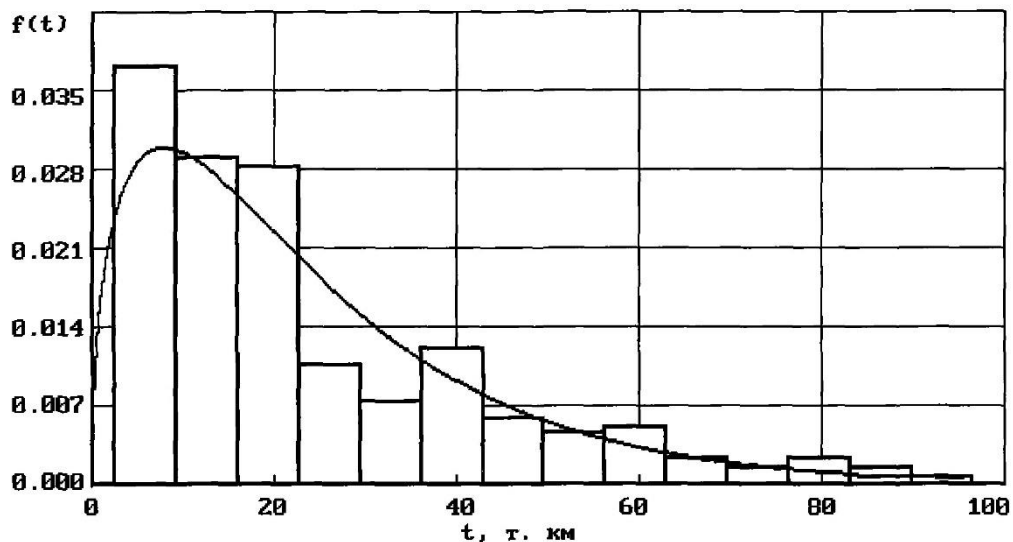


Рисунок 1.6 – Гістограма та щільність розподілу пробігу автомобільних шин, у яких тиск залишається постійним

В роботі [6] автори зазначають: «... матеріали, з яких виготовлена шина, не є абсолютно герметичними, тому повітря поступово просочується через стінки камер, особливо в літній період, і тиск повітря знижується.

Крім того, причиною недостатнього тиску повітря можуть бути пошкодження камери або шини (безкамерної), негерметичність золотника вентиля та деталей його кріплення до обода (для безкамерних шин), несвоєчасна перевірка тиску повітря».

1.4.2. Дифузійний витік

У 1831 році Mitchel J.V. уперше показав, що гази проникають через суцільні плівки [7]. Завдяки дифузії матеріали, з яких виготовляються шини та камери, не є абсолютно герметичними. Дифузія – це процес, у результаті якого відбувається перерозподіл речовини між різними частинами системи внаслідок хаотичного теплового руху молекул [6].

Під дією тиску повітря з внутрішньої порожнини шини витісняється назовні. Властивість твердих перегородок (мембран) пропускати газ під дією перепаду тисків називається газопроникністю [1].

Об'ємна газопроникність визначається як відношення добутку об'ємної витрати газу на товщину плівки до добутку площі її поверхні, різниці тисків газу та одиниці часу [2]. Одиниці вимірювання в системі SI:

$$\frac{m^3 \cdot m}{m^2 \cdot c \cdot Pa} = \frac{m^2}{c \cdot Pa} . \quad (1.5)$$

Якщо кількість газу вимірюється в одиницях маси, то газопроникність називають масовою.

Як одиницю масової газопроникності Stem S.A. запропонував 1 Барер (на честь англійського дослідника дифузії в полімерах Р.М. Баррера).

У системі SI масова газопроникність вимірюється в:

$$\frac{kg \cdot m}{m^2 \cdot c \cdot Pa} = \frac{kg}{m \cdot c \cdot Pa} . \quad (1.6)$$

У 1866 році Gracham Т. уперше відзначив швидке зростання газопроникності плівок зі збільшенням температури [7].

Газопроникність залежить від ступеня деформації гум. Дані, наведені різними авторами, свідчать про неоднозначність цієї залежності. Так, за даними [8], «при розтягненні менше ніж на 200 % коефіцієнти проникності та дифузії пропану і бутану в гумі на основі НК не змінюються, а подальше підвищення ступеня деформації призводить до їх зниження ...».

У результаті досліджень, виконаних Faachon A.J., встановлено, що при деформації на 25 % проникність збільшується у чотири рази, при деформації 50...65 % зразок стає повністю газонепроникним, а при деформації 70...80 % газопроникність повертається до початкового значення.

Як зазначається в [1], бутилкаучук – один із найкращих матеріалів для виготовлення автомобільних камер, оскільки він має високу газонепроникність.

За даними [12], у шин легкових автомобілів зменшення внутрішнього тиску повітря становить приблизно до 0,1 кгс/см² на тиждень [4].

Співавтори роботи [10] зазначають: «... особливістю безкамерних шин є те, що їх каркас постійно перебуває під дією стисненого повітря, яке під час експлуатації просочується через герметизувальний шар шини в каркас». Там же

вказується, що безкамерні шини характеризуються більшою стабільністю внутрішнього тиску повітря, що пояснюється тим, що повітря легше просочується через розтягнуті стінки камери, ніж через нерозтягнутий повітронепроникний шар безкамерної шини.

За даними [18], автор якої проводив експерименти з шинами 1070×390-480Р М1А літака Ту-204, «... за 7...8 днів тиск в окремих шинах знижується нижче норми і становить 12,5 кгс/см², що нижче заданого за технічним завданням на 1,5 кгс/см²» [2, 6].

Як зазначають співавтори роботи [16], у сучасних вітчизняних і зарубіжних шинах «... висока газонепроникність гум гермошару забезпечується використанням галобутилкаучуку або його комбінацією з поліізопреном».

Там же зазначається, що використання поліізопрену або його комбінації з полібутадієном знижує герметичність внутрішнього шару у 5...6 разів. Говорячи про нестабільність рецептури гум гермошару, в [8] наводяться такі дані: «... вміст оксиду цинку в гумі шин БШК «Белшина» коливається від 1,8 мас. ч. до 15,0 мас. ч.»

Порівнюючи дані [5] та [7] щодо надійності збереження тиску повітря, можна зробити висновок про суттєву варіацію рівня газопроникності окремих шин.

Таким чином, швидкість дифузійного витоку повітря з внутрішньої порожнини шини залежить від матеріалу та товщини камери (якщо вона є) або герметизувального шару (для безкамерної шини), а також ступеня їх деформації, величини внутрішнього тиску, площі поверхні, через яку відбувається дифузія, і температури.

1.4.3 Температура

Підвищення тиску в шині знижує теплоутворення за рахунок зменшення деформації. Для врахування цього явища в рекомендаціях [7] щодо експлуатації великогабаритних шин вказується, що необхідно «... збільшувати внутрішній тиск (значення за нормою наведено для температури навколишнього повітря не

більше 20 °C) на 0,15...0,20 кгс/см² при підвищенні температури навколишнього повітря на кожні 10 °C; збільшувати тиск у шині на 10...12 % від норми при інтенсивній експлуатації автомобілів (понад одну зміну); стежити, щоб тиск у гарячій шині під час експлуатації не перевищував з урахуванням усіх поправок рекомендоване нормою для холодного стану більш ніж на 1,2 кгс/см²».

Співавтори [16] зазначають: «... у міру нагрівання тиск у шині підвищується».

Запропоновано використовувати таку формулу для розрахунку величини, на яку підвищується тиск при нагріванні шини від безперервних деформацій у процесі роботи:

$$\Delta P = (P + 1)(t_1 - t_2) / 273, \quad (1.7)$$

де ΔP – величина зміни внутрішнього тиску; P – початковий тиск; t_1 – кінцева температура; t_2 – початкова температура.

У пізнішій публікації [18] наводиться така сама формула, але зазначається, що P – абсолютний тиск, який дорівнює сумі атмосферного та надлишкового.

Автор [12] зазначає: «Зі збільшенням температури навколишнього повітря відбувається зниження герметичності шини внаслідок збільшення дифузії повітря через стінки камери».

Уперше коригувати тиск залежно від різниці температур навколишнього середовища в місцях його перевірки та експлуатації автомобіля запропонував автор [12]: «Коригування внутрішнього тиску в шинах повинно проводитись з урахуванням кліматичних умов, щоб врахувати різницю в нагріванні шини при різному співвідношенні температур у шині перед виїздом автомобіля (температура гаража) та під час роботи (температура повітря «на вулиці»).

Разом з тим необхідно мати на увазі, що будь-яка, навіть незначна зміна норми внутрішнього тиску може бути проведена лише після отримання результатів відповідних випробувань ...».

У пізнішій публікації висвітлюючи питання впливу температури на тиск у шині, пишуть таке: «Не з'ясовано питання щодо коригування норм тиску при

значному перепаді температур у місцях накачування шин та експлуатації автомобілів. Можна припустити, що початковий тиск у шинах має відрізнятися, наприклад, при накачуванні за $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ та експлуатації автомобілів за температури навколишнього повітря $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ймовірно, у першому випадку він має бути меншим, ніж у другому».

Автор роботи [10] пише: «... дуже важливо перевіряти та доводити до норми тиск повітря у великогабаритних шинах, якщо автомобіль здійснює рейс із району з помірними температурами (мінус $20\ldots 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) у район з нижчими температурами (мінус $45\ldots 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)».

Уперше закономірності зміни тиску в шині при зміні температури експериментально досліджені [4].

На основі цих залежностей розроблені таблиці для коригування тиску залежно від температур у приміщенні, де тиск перевіряється та доводиться до норми, і на вулиці.

Автор [10], розглядаючи тепловий баланс шини, що обертається, виділяє чотири шляхи віддачі тепла в навколишнє середовище: через пряму контакту з опорною поверхнею; конвективним теплообміном через бігову доріжку, боковини та обід. При цьому на конвективну тепловіддачу від бігової доріжки припадає $63\ldots 77\%$ тепла, на випромінювання – $2\ldots 4\%$, на теплопровідність через пряму контакту – $6\ldots 10\%$. Загалом різними видами теплообміну від бігової доріжки шин відводиться $80\ldots 82\%$ тепла, боковинами – $13\ldots 15\%$, ободом – $4\ldots 6\%$.

1.4.4 Система контролю тиску в шинах

Забезпечення експлуатації шин із тиском, що відповідає нормативному, покладено на низку конкретних виконавців, що відображено в посадових інструкціях і нормативних документах.

У нормативних документах [7, 11] та низці публікацій [5, 11] рекомендується перевіряти тиск на холодних шинах до початку руху. Спускати

тиск у розігрітій шині не можна, оскільки норми внутрішнього тиску враховують його підвищення під час руху.

За результатами опитування 64 японських фірм, що експлуатують вантажні автомобілі та автобуси, встановлено, що 73,8 % із них встановлюють норми внутрішнього тиску відповідно до вимог виробників шин, 9,9 % – виробників рухомого складу, 1,6 % мають власні норми [5]. У більшості фірм щоденна перевірка тиску здійснюється водіями за допомогою контрольного молотка. Технічні служби перевіряють тиск один або два рази на місяць із використанням манометрів.

1.4.5 Засоби для вимірювання тиску

Нормативними документами [7, 11] рекомендується вимірювати тиск за допомогою ручних манометрів.

Автор [12] зазначає, що «... внутрішній тиск потрібно перевіряти манометром раз на 3...4 дні, оскільки частіша перевірка може призвести до зношування золотника вентиля».

Недоліки методу вимірювання тиску за допомогою манометра:

- висока трудомісткість;
- зношування золотника при частих вимірюваннях;
- неможливість вимірювання тиску в шинах задніх внутрішніх коліс у двоскатних автомобілів.

Для усунення цих недоліків були здійснені спроби розробки методів і приладового забезпечення для оцінювання тиску в шинах за непрямыми параметрами без відкривання вентиля. Як в Україні, так і в інших країнах низка організацій створили такі стенди. Найбільш відомі роботи в цьому напрямі – [5, 7, 10, 12].

У 1989 році відбувся семінар із систем контролю дотримання норм внутрішнього тиску в шинах [7]. Основне його завдання – обґрунтування можливості використання на автотранспортних підприємствах стендів для вимірювання тиску повітря в шинах без відкривання вентиля.

Зазначається, що «... внутрішній тиск необхідно перевіряти манометром раз на 3...4 дні, Щоденний контроль внутрішнього тиску проводиться візуально – за деформацією шини, а також за звуком — за допомогою легких ударів по шині».

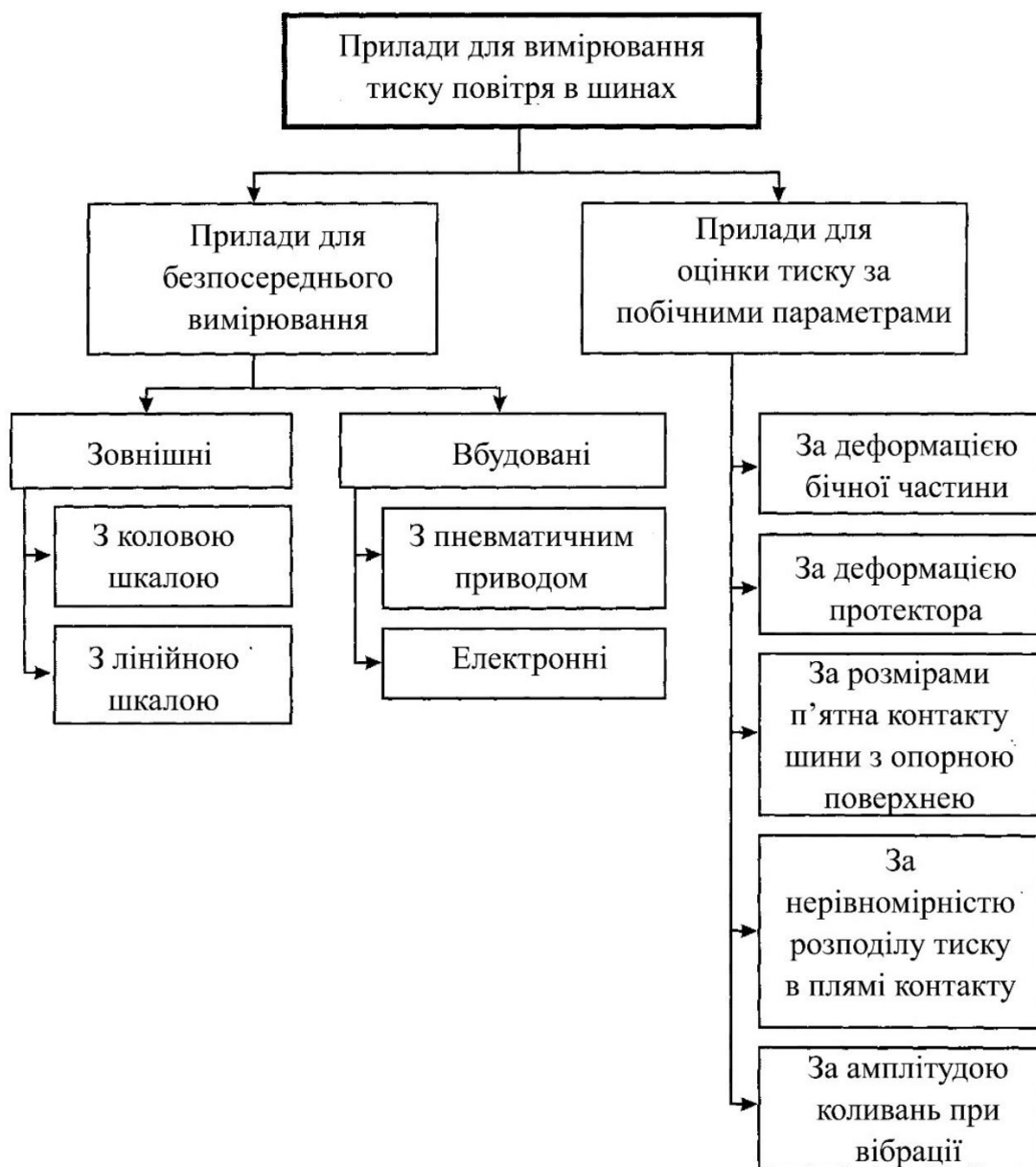


Рисунок 1.7 – Класифікація приладів для вимірювання тиску повітря в шинах

За результатами опитування 64 японських фірм, що експлуатують вантажні автомобілі та автобуси, встановлено, що в більшості фірм щоденна перевірка тиску здійснюється водіями за допомогою контрольного молотка. Технічні служби перевіряють тиск один або два рази на місяць із використанням манометрів.

Шинні манометри мають відносно високу похибку вимірювань. Так, за даними [1], відхилення показань вітчизняних манометрів МД-209 і МД-214 від еталонного можуть досягати 0,4 атм.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Постановка проблеми

Метою даної роботи є зниження собівартості автомобільних перевезень за рахунок підвищення довговічності шин і зменшення витрати палива шляхом забезпечення експлуатації шин із тиском, що відповідає нормативному. Постановка проблеми полягає в наступному. У теперішній час тиск не в усіх шинах відповідає нормативному рівню.

Фактичний тиск у шині – випадкова величина з певним математичним очікуванням і коефіцієнтом варіації V_{p1} , розподілена за законом, що описується функцією розподілу $f_1(p)$. Через експлуатацію шин із тиском, що не відповідає нормі, ресурс шин L_1 реалізується не повністю, тобто існують втрати dL_1 . Крім того, з цієї ж причини збільшується реалізована питома шляхова витрата палива автомобілем q_1 , тобто існують втрати dq_1 . Витрати на паливо та шини становлять:

$$Z_u = \frac{L_p n A_c}{L_1} C_u, \quad Z_m = \frac{L_p A_c q_1}{100} C_m, \quad (2.1)$$

де L_p – середній пробіг одного автомобіля за розрахунковий період; n – кількість ходових коліс на одному автомобілі, шт.; A_c – середньооблікова кількість автомобілів, шт.; q_1 – питома шляхова витрата палива, л на 100 км; C_u , C_m – вартість однієї шини та одного літра палива відповідно.

У загальному вигляді цільова функція має вигляд:

$$Z_u + Z_m \rightarrow \min$$

Потенційний ресурс шин, який може бути реалізований у даних умовах за умови експлуатації шин із нормативним тиском, становить $L = L_1 + \Delta L_1$.

Аналогічно потенційна питома шляхова витрата палива $q = q_1 - \Delta q_1$, або

$$L = L_1 - \Delta L_1, \quad q = q_1 + \Delta q_1. \quad (2.2)$$

Тоді:

$$z_u = \frac{L_p n A_c}{L - L_1} C_u, \quad z_m = \frac{L_p A_c (q + q_1)}{100} C_m, \quad (2.3)$$

Цільова функція набуває вигляду:

$$L_p A_c \left(\frac{n C_u}{L - L_1} + \frac{(q + q_1) C_m}{100} \right) \rightarrow \min. \quad (2.4)$$

В останньому рівнянні змінними параметрами (або аргументами) є dL_1 і dq_1 . З його аналізу випливає, що цільову функцію можна переписати таким чином:

$$\Delta L_1 \rightarrow 0, \quad \Delta q_1 \rightarrow 0. \quad (2.5)$$

В умовах реальної експлуатації автомобілів умова $\Delta L_1 = 0$; $\Delta q_1 = 0$ є невиконуваною, оскільки на тиск повітря в шинах впливає велика кількість факторів, причому всі фактори одночасно вивести на оптимальний рівень неможливо.

Тому шляхом здійснення ряду заходів, спрямованих на підтримання тиску на нормативному рівні, реалізується фактичний тиск у шинах, що характеризується математичним очікуванням p_2 і коефіцієнтом варіації V_{p_2} , розподілений за законом, який описується функцією розподілу $f_2(p)$.

При цьому втрати становлять відповідно ΔL_2 і Δq_2 . Тобто можна досягти зменшення втрат ресурсу шин і палива відповідно:

$$\Delta L = \Delta L_1 - \Delta L_2; \quad \Delta q = \Delta q_1 - \Delta q_2. \quad (2.6)$$

Таким чином, для оцінки ефективності заходів із підтримання тиску в шинах на нормативному рівні необхідно знати закономірності розподілу тиску до впровадження та після впровадження заходів, а також залежності $L = f(p)$ і $q = f(p)$.

2.2. Загальна методика досліджень

Для реалізації поставленої мети розроблена загальна методика досліджень, яка передбачає послідовне виконання таких етапів.

Перший етап присвячений вивченню стану питання. На основі аналізу літературних джерел показано актуальність досліджень, спрямованих на зниження собівартості автомобільних перевезень за рахунок підвищення довговічності шин і зменшення витрати палива шляхом забезпечення експлуатації шин із тиском, що відповідає нормативному.

Відповідно до вимог системного підходу на цьому етапі встановлено фактори, що впливають на надійність збереження тиску повітря в шинах, а також виявлено недостатньо досліджені залежності тиску в шинах від зазначених факторів. Проведений аналіз дозволив уточнити мету та сформулювати завдання досліджень.

На другому етапі встановлено закономірності розподілу тиску повітря в шинах під час експлуатації автомобілів.

Спочатку теоретично досліджено фактори, що впливають на розподіл тиску, висунуто гіпотези щодо виду емпіричних розподілів і математичних моделей для їх опису.

На третьому етапі визначено досліджувану систему – «Тиск повітря в шині – фактори, що впливають на нього». Для її локалізації складено класифікацію факторів і проведено відбір найбільш значущих.

При класифікації використовувалася інформація з літературних джерел. Ранжування факторів за ступенем важливості виконувалося з використанням математичного апарату кореляційно-регресійного аналізу.

У результаті отримано математичну модель впливу основних факторів на математичне очікування та коефіцієнт варіації тиску в шинах групи автомобілів.

На четвертому етапі встановлено закономірності прогрівання та охолодження шин при зміні температури навколишнього середовища, а також закономірності зміни тиску в шині при прогріванні та охолодженні.

Спочатку виконано теоретичні дослідження, у результаті яких складено тепловий баланс шини, висунуто гіпотези щодо перебігу процесів прогрівання та охолодження шин, щодо виду математичних моделей зміни температури повітря в шині при прогріванні та охолодженні.

Далі було теоретично досліджено процес зміни тиску в шині при прогріванні та охолодженні, що включав аналіз отриманих результатів під час дослідження прогрівання та охолодження, а також розробку гіпотез щодо виду закономірностей досліджуваних процесів і математичних моделей для їх опису.

П'ятий етап досліджень передбачав розробку методів практичного використання отриманих результатів та оцінку їх ефективності.

Розроблено методику контролю та доведення до норми тиску повітря в шинах при технічному обслуговуванні в зимовий період, розраховано числові значення надбавок до тиску в шині. При оцінці ефективності результатів досліджень розраховано втрати ресурсу шин і палива до та після впровадження результатів досліджень.

Об'єкт досліджень – процес зміни тиску повітря в шинах у процесі експлуатації, обслуговування та зберігання автомобілів.

Предмет досліджень – закономірність зміни тиску повітря в шинах розмірів 205/70R14, 195/70R14, 240-508, 9R20, 10R20, 12R20 залежно від різниці температур на вулиці та в приміщенні, де тиск перевіряється й доводиться до норми.

2.3 Закономірності розподілу тиску повітря в шинах під час експлуатації автомобілів

2.3.1 Гіпотези щодо форми розподілу тиску повітря в шинах

Для висунення гіпотези щодо форми кривої розподілу проведемо аналіз її асимптотики та факторів, що впливають на неї.

Межі варіювання:

- теоретичний інтервал варіювання – $(0; p_n + \Delta p_n + \Delta p_t)$, де p_n – нормативний тиск; Δp_n – похибка при доведенні тиску до норми; Δp_t – граничне підвищення тиску через збільшення температури повітря;
- реалізований інтервал варіювання істотно менший за рахунок нижньої межі, тобто фактично не допускається експлуатація шин із тиском ($p = 0$);
- мінімальне значення можливого тиску збігається з межею візуального прояву зниження тиску (МВПЗТ);
- досліді показують, що візуально визначити зниження тиску для різних шин і різних автомобілів можна при $p = (0,4 \dots 0,6) p_n$;
- коефіцієнт варіації становить $(0 \dots 0,35)$ [3, 9].

Пояснимо поняття «МВПЗТ» – межа візуального прояву зниження тиску – це величина внутрішнього тиску повітря в шині, при якій її деформація збільшується настільки, що дозволяє з високою ймовірністю діагностувати зниження тиску відносно норми.

Як показав аналіз стану питання, на тиск у шині впливає ряд факторів. Експлуатація шин із тиском на нормативному рівні повинна забезпечуватися системою контролю, передбаченою Правилами експлуатації шин.

Відповідно до неї водій щоденно оцінює тиск візуально, а за допомогою манометра – водій один раз на тиждень, механік КТП – один раз на місяць. Залежно від того, наскільки точно виконуються вимоги Правил щодо контролю за тиском у шинах, можливі різні форми кривих розподілу.

Розглянемо екстремальні випадки.

1. Контроль тиску здійснюється виключно візуальним методом. При цьому спорадично, при досягненні МВПЗТ, тиск доводиться до нормативного рівня. Потім під дією сукупності факторів, що впливають на тиск, він поступово знижується. Необхідно зазначити, що інтенсивність падіння тиску залежить від величини тиску.

При високому тиску інтенсивність його падіння (внаслідок дифузії, через дефекти камери або герметизувального шару, а також негерметичність вентиля) вища, ніж при низькому тиску.

Отже, ймовірність переходу шини зі стану з високим тиском у стан із нижчим тиском тим вища, чим вищий тиск. Із цього твердження можна зробити висновок, що щільність імовірності рівності тиску значенню p_i тим вища, чим ближче p_i до МВПЗТ.

При цьому більша частина значень тиску локалізується поблизу МВПЗТ, тобто реалізується форма кривої розподілу, представлена на рис. 2.1 під номером 1.

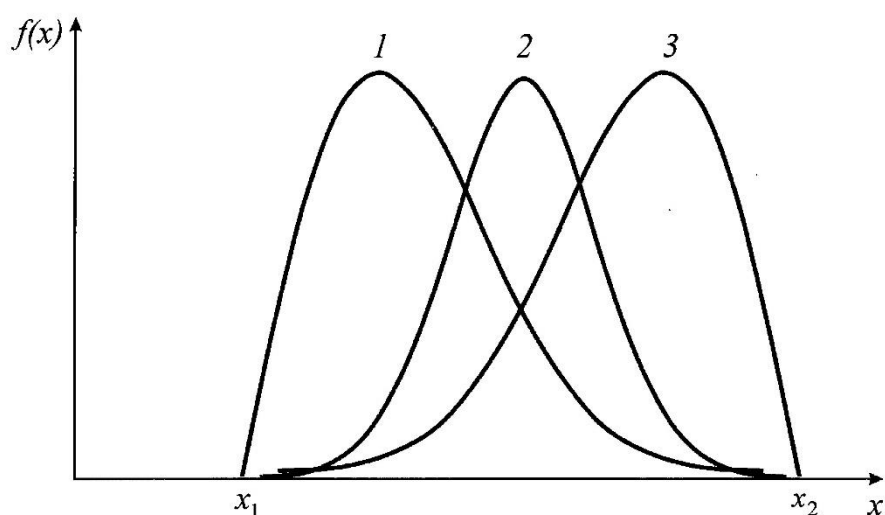


Рисунок 2.1 – Можливі форми законів розподілу тиску повітря в шинах під час експлуатації автомобілів

2. Контроль тиску здійснюється точно відповідно до вимог регламентуючого документа. У період між двома послідовними перевірками тиск через дифузійний витік не встигає знизитися на значну величину.

Випадки його суттєвого зниження спостерігаються лише при дефектах камери або герметизувального шару, а також несправності вентиля. Тобто ймовірність суттєвого зниження тиску відносно невелика, причому ймовірність великих відхилень нижча, ніж малих. Таким чином:

- більша частина значень тиску локалізується поблизу нормативного значення;
- максимальне значення обмежується величиною $p_n + \Delta p_n + \Delta p_t$;
- мінімальне значення обмежується величиною $0,4...0,6 p_n$;
- ймовірність потрапляння в ліву частину інтервалу варіювання істотно нижча, ніж у праву, тобто розподіл має від'ємну асиметрію.

Тобто реалізується форма кривої розподілу, представлена на рис. 2.1 під номером 3.

3. Очевидно, що ймовірний і проміжний варіант, коли не є переважаючими ні візуальний контроль, ні контроль за допомогою манометра. При цьому форма кривої розподілу може змінюватися від кривої 1 рис. 2.1 до кривої 3. Проміжним варіантом є крива 2, близька до нормального закону.

2.4 Процеси прогрівання та охолодження шин

Після заповнення автомобільної шини стисненим повітрям із температурою t_n і поміщення шини в середовище з температурою t_e ($t_n > t_e$) починається процес охолодження повітря всередині шини та самої шини (включаючи колісний диск).

При цьому одночасно зі зниженням температури повітря всередині шини знижується і тиск; причому, залежно від температури навколишнього середовища (t_e), тиск може знизитися до меншого значення, ніж необхідно для нормальної експлуатації шини.

У цьому випадку необхідно при накачуванні шини створити в ній певний запас тиску Δp , щоб після охолодження тиск не зменшився нижче $p_{ном}$, тобто номінального тиску для нормальної експлуатації.

Очевидно, що основні труднощі при обчисленні Δp будуть зумовлені розрахунком температурного режиму охолодження повітря всередині шини, оскільки цей процес залежить від початкової температури повітря всередині заповненої шини t_n , температури навколишнього зовнішнього повітря t_e ,

наявності або відсутності вітру та його сили, а також від геометричних розмірів шини.

Процес охолодження можна описати за допомогою рівняння теплового балансу:

$$\delta Q_1 = \delta Q_2 + \delta Q_3 + \delta Q_4, \quad (2.7)$$

де δQ_1 – теплота, відведена в навколишнє середовище; δQ_2 – теплота, віддана шиною в навколишнє середовище; δQ_3 – теплота, віддана колісним диском; δQ_4 – теплота, віддана повітрям усередині шини.

Наявність камери в шині не враховуємо через малу товщину стінки камери.

Розглянемо кожний член рівняння.

Зовнішня поверхня шини віддає теплоту в навколишнє середовище двома способами: теплопровідністю в місці контакту «шина – ґрунт» (під терміном «ґрунт» розуміється будь-яка поверхня, з якою контактує шина, наприклад сніг, бетон, асфальт тощо) і конвекцією в навколишнє повітря.

Причому обидва способи передачі теплоти є нестационарними, тобто температурне поле залежить від часу. Тоді δQ_1 можна представити як суму двох теплових потоків: δQ_{1m} – тепловий потік теплопровідністю і δQ_{1k} – тепловий потік конвективний. Тоді:

$$\delta Q_{1m} = -\lambda \frac{dt}{d\tau} dH_1 d\tau, \quad (2.8)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності ґрунту; $dt/d\tau$ – градієнт температур у радіальному напрямку (тобто по нормалі до ґрунту); dH_1 – площа контакту «ґрунт – шина»; $d\tau$ – час охолодження.

$$\delta Q_{1k} = \alpha dt dH_2 d\tau, \quad (2.9)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шини в навколишнє повітря; d_{t1} – перепад температур між шиною та навколишнім середовищем. У початковий момент часу $dt = t_n - t_e$, де t_n – температура зовнішньої поверхні шини; t_e – температура зовнішнього повітря; dH_2 – площа зовнішньої поверхні шини за винятком dH_1 .

$$\delta Q_2 = M_{ш} C_{pш} dt_2 d\tau, \quad (2.10)$$

де $M_{ш}$ – маса шини; $C_{pш}$ – теплоємність матеріалу шини; dt_2 – перепад температур матеріалу шини в процесі охолодження від початкової температури $t_{ш}$ до температури t_e .

$$\delta Q_3 = M_l C_{pl} dt_3 d\tau, \quad (2.11)$$

де M_l – маса колісного диска; C_{pl} – теплоємність матеріалу колісного диска.

При розрахунку δQ_3 вважаємо, що початкові температури колісного диска і шини рівні, тобто $dt_2 = dt_3$.

$$\delta Q_4 = M_g C_{pg} dt_4 d\tau, \quad (2.12)$$

де M_g – маса повітря в шині; C_{pg} – теплоємність повітря; dt_4 – перепад температур на початку та в кінці охолодження. У початковий момент $dt_4 = t_n - t_e$

У процесі охолодження, тобто зі збільшенням $d\tau$, усі перепади температур будуть прагнути до нуля, тобто досягнення стану теплової рівноваги з навколишнім середовищем. Увесь процес охолодження можна розбити на три стадії: стадія нерегулярного режиму, стадія регулярного режиму і стадія стаціонарного режиму.

Як показано [4], перша стадія є короткочасною і протягом цієї стадії відбувається перерозподіл температур від первинно встановлених у момент часу ($\tau = 0$) до певного впорядкованого температурного поля, причому розподіл температур усередині тіла і швидкість зміни в часі температури в окремих точках тіла залежать від особливостей початкового розподілу температур.

У нашому випадку наявність такого режиму вказує той факт, що перепади dt , dt_2 , dt_3 і dt_4 у момент часу 0 неоднакові. У подібних задачах перепади температур dt прийнято називати надлишковими температурами і знаходити в будь-який заданий момент часу як суму членів нескінченного ряду виду:

$$dt = \sum_{n=1}^{\infty} A_n U_n e^{-m_n \tau}, \quad (2.13)$$

де A_n – постійний коефіцієнт, власний для кожного члена ряду, що визначається з початкових умов; U_n – функція координати лінійного розміру тіла, яка визначається залежно від форми тіла та умов охолодження [4]; m – темп охолодження (відносна швидкість зміни температури тіла); τ – час процесу.

Для розглядуваного процесу охолодження шини нерегулярним (невпорядкованим) режимом охолодження шини можна знехтувати, оскільки він за визначенням є короткочасним, а між моментом закінчення закачування повітря в шину і початком процесу охолодження в середовищі з температурою зовнішнього повітря t_e у реальному випадку проходить кілька хвилин (і більше), що приводить до впорядкування температурного поля в шині (включаючи колісний диск і повітря всередині шини).

При цьому передбачається, що накачування шини відбувається в закритому приміщенні, де температура зовнішнього повітря вища, ніж t_e .

Тоді, враховуючи, що всі компоненти розглядуваної системи (шина, диск, повітря всередині шини) приймуть температуру повітря в приміщенні t_0 і лише після цього будуть поміщені в середовище з температурою t_e , можна розглядати процес охолодження як регулярний, що значно спростить рівняння, оскільки всі перепади температур можна прийняти рівними один одному і характеризувати їх як надлишкову температуру.

Отже, введемо такі умови.

1. Розглядається об'єкт масою M , що складається із шини масою $M_{ш}$, колісного диска масою M_d і повітря в шині масою M_g . Об'єкт назовемо «колесо».
2. Колесо охолоджується від початкової температури t_0 до кінцевої температури t_e за деякий час τ у регулярному тепловому режимі.
3. Питома теплоємність колеса розраховується як середньозважена теплоємність окремих компонентів об'єкта з урахуванням мас елементів, що входять до його складу.
4. Перепади температур у рівнянні теплового балансу замінюються надлишковою температурою ϑ .

5. Тепловіддача від колеса в навколишнє середовище відбувається тільки конвекцією внаслідок малості величини dH_1 при деякому постійному значенні зовнішнього коефіцієнта тепловіддачі α .

6. Повітря всередині шини підпорядковується законам конвективного теплообміну в обмеженому просторі, що дає можливість описувати цей процес, замінюючи коефіцієнт тепловіддачі від повітря всередині шини до внутрішньої поверхні шини еквівалентним коефіцієнтом теплопровідності, тобто розглядати це повітря як тверде тіло [9].

2.5 Процес зміни тиску повітря в шині при зміні температури

Процес зміни тиску газу при зміні температури в замкненому просторі описується законом Шарля.

Обмеження, що накладаються на використання закону Шарля:

- об'єм газу не повинен змінюватися при зміні температури;
- властивості газу повинні відповідати властивостям ідеального газу.

Формулювання робочої гіпотези.

- об'єм шини при зміні тиску змінюється несуттєво, і цією зміною можна знехтувати;
- відмінність властивостей повітря від властивостей ідеального газу є несуттєвою;
- зміна тиску в шині при зміні температури описується законом Шарля з достатньою точністю.

Маючи часткові рішення для різних типів шин, можна задавати температури зовнішнього повітря при експлуатації шини та обчислювати температуру, а отже, і тиск, до якого необхідно накачувати шину в приміщенні. При цьому зв'язок температури і тиску в шині описується рівнянням:

$$PV = ZMRT, \quad (2.14)$$

де P – абсолютний тиск у шині, що дорівнює сумі надлишкового тиску за манометром і атмосферного тиску (Па); V – об'єм внутрішньої порожнини шини (м^3); Z – коефіцієнт стисливості повітря, що визначається залежно від тиску і

температури в шині за таблицями або номограмою; M – маса повітря в шині (кг); $R = 287$ – газова стала повітря; T – абсолютна температура повітря в шині при тиску p (градуси Кельвіна).

Виходячи з того, що охолодження повітря в шині – це ізохорний процес, можна записати:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (2.15)$$

або:

$$P_1 = \frac{P_2 T_1}{T_2}, \quad (2.16)$$

де T_1 – температура в шині після закачування повітря; T_2 – температура після охолодження до температури зовнішнього повітря; P_1 – тиск, до якого необхідно накачувати шину в приміщенні (абсолютний); P_2 – тиск, який повинен встановитися в шині після охолодження до температури зовнішнього повітря (абсолютний).

Якщо відомий ступінь стискання повітря в компресорі, яким накачується шина, і температура повітря в приміщенні, то

$$\frac{T_1}{T_0} = \varepsilon^{k-1}, \quad (2.17)$$

або:

$$T_1 = T_0 \varepsilon^{k-1}, \quad (2.18)$$

де T_0 – температура повітря в приміщенні; ε – ступінь стискання повітря в компресорі; k – показник адіабатичного процесу стискання (для повітря можна прийняти $k = 1,4$).

2.6 Моделювання закономірності зміни тиску в шині при прогріванні з урахуванням нерегулярного режиму

Процес охолодження можна розбити на три стадії: стадія нерегулярного режиму, стадія регулярного режиму та стадія стаціонарного режиму.

Перша стадія є короткочасною і протягом цієї стадії відбувається перерозподіл температур від початково встановлених у початковий момент часу до деякого впорядкованого температурного поля, причому розподіл температур усередині тіла і швидкість зміни в часі температури в окремих точках тіла залежать від особливостей початкового розподілу температур.

У нашому випадку наявність такого режиму вказується тим фактом, що перепади температур для різних частин колісного вузла в момент часу 0 є неоднаковими.

Якщо для розглядуваного процесу прогрівання шини нерегулярним (невпорядкованим) режимом охолодження шини не можна знехтувати, тобто він не є короткочасним, то в результаті реалізації нерегулярного процесу прогрівання в момент переходу до регулярного режиму тиск досягає величини p_{τ_n} (рис. 2.2).

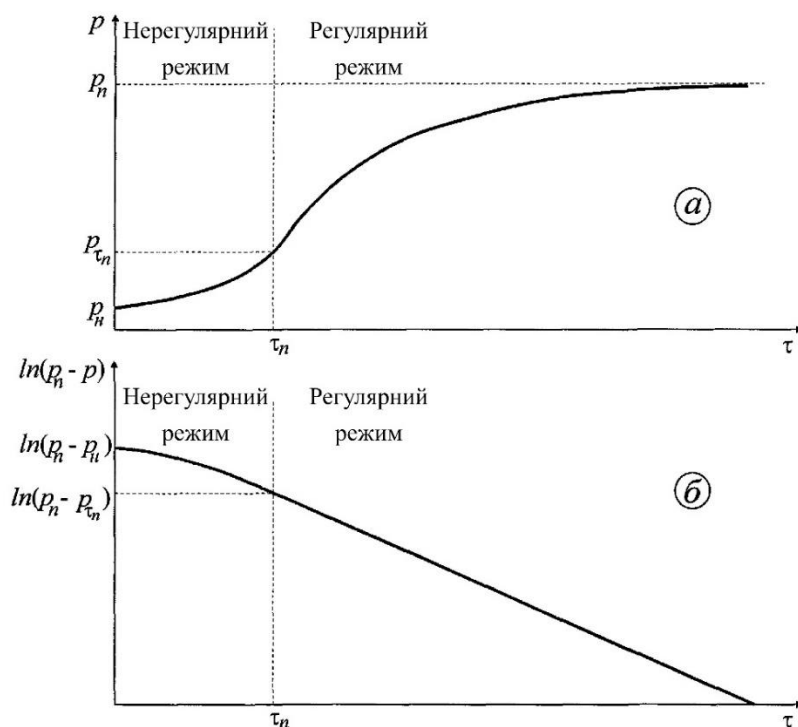


Рисунок 2.2 – Графічна інтерпретація зміни тиску в шині при прогріванні

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

3.1 Вплив температури повітря на ймовірність безвідмовної роботи золотників

У процесі розрахунків фактичного тиску повітря в шинах встановлено, що зі зниженням температури зростає ймовірність відмови клапанів золотників. Ймовірність відмови розраховувалась за формулою

$$F = \frac{m}{n} = 1 - \frac{n - m}{n}, \quad (3.1)$$

де m – число золотників, що відмовили; n – число шин, які брали участь в розрахунках.

Результати розрахунку та апроксимуюча крива представлені у графічному вигляді на рис. 3.1.

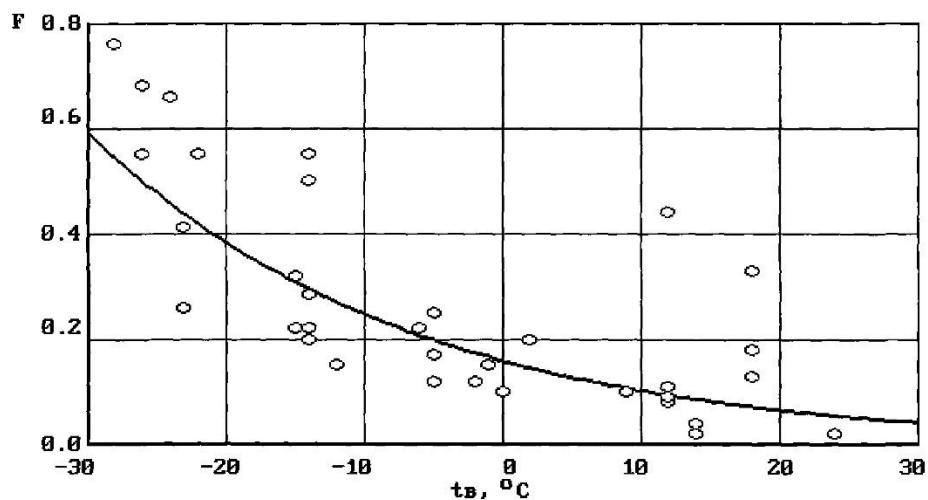


Рисунок 3.1 – Вплив температури повітря на ймовірність відмови золотників

Для апроксимації теоретичних даних використовувалась експоненціальна модель

$$F = 0,161e^{-0,044t_v}.$$

Коефіцієнт кореляції при лінеаризації останньої моделі склав -0,743, ймовірність його значущості становить 0,99.

Дисперсійне відношення становить 2,43, що при даному числі ступенів свободи відповідає ймовірності адекватності математичної моделі 0,99.

3.2 Вплив основних факторів на зміну тиску в шинах

На основі результатів аналітичних досліджень сформовано наступний перелік факторів, що впливають на тиск у шинах:

- середньооблікова кількість автомобілів в АТП, од.;
- середньозважений нормативний тиск, МПа;
- об'єм шини, м^3 ;
- середня класність водіїв;
- температура повітря в момент вимірювання тиску, $^{\circ}\text{C}$;
- частота перевірки тиску на КТП, од./100 автомобіле-днів роботи на лінії;
- кількість повітророздавальних колонок, од./100 автомобілів.

На основі кореляційно-регресійного аналізу результатів досліджень встановлено наступне.

За ступенем впливу на математичне очікування тиску в шинах фактори розташувалися таким чином:

- 1 – температура повітря в момент вимірювання тиску;
- 2 – питома кількість повітророздавальних колонок;
- 3 – середньооблікова кількість автомобілів в АТП;
- 4 – частота перевірки тиску на КТП.

Імовірність впливу цих факторів перевищує 0,9. Необхідно зазначити, що імовірність впливу температури повітря становить 0,99998. Це свідчить про необхідність урахування зазначеного фактора при контролі та коригуванні тиску.

Крім того, необхідно зазначити, що слабкий кореляційний зв'язок виявлено з величиною нормативного тиску та середньою класністю водіїв. Імовірність впливу цих факторів становить близько 0,5.

Імовірність впливу інших факторів не досягає 0,5.

За ступенем впливу на коефіцієнт варіації тиску фактори розташувалися таким чином:

- 1 – середньозважений нормативний тиск;
- 2 – середня класність водіїв;
- 3 – об'єм шини;

4 – частота перевірки тиску на КТП;

5 – питоме число повітророздавальних колонок, од./100 автомобілів.

Імовірність впливу цих факторів перевищує 0,7. Імовірність впливу інших факторів не досягає 0,5.

3.3 Інтенсивність дифузійного витоку повітря

Для оцінки швидкості дифузійного витоку повітря з внутрішньої порожнини шин проведено теоретичне дослідження.

Для цього вибрано три комплекти шин різних моделей, що встановлюються на автомобілі ГАЗ-31029. Розрахунковий початковий тиск – тиск при температурі +20 °С. Результати теоретичних досліджень наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Зміна тиску повітря в шинах протягом 150 діб (теоретичний розрахунок)

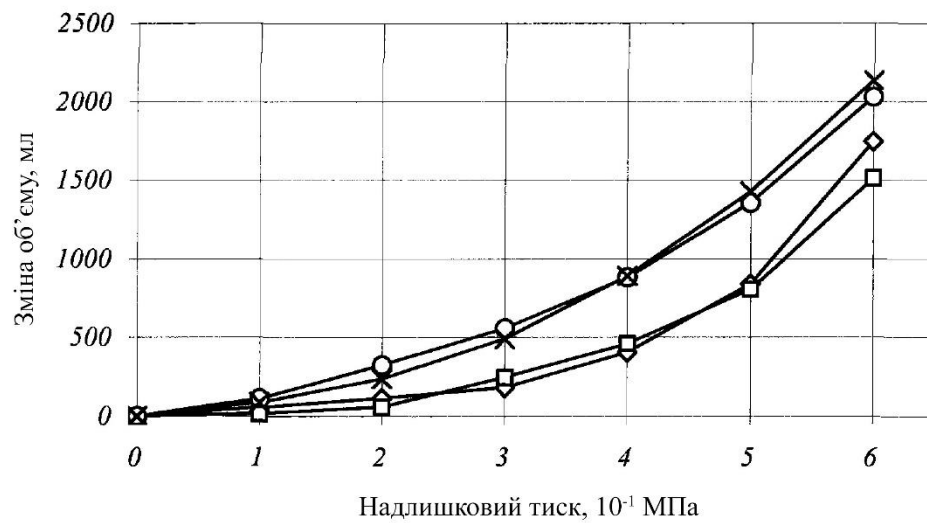
Модель шин	Тиск, МПа			
	початковий	кінцевий		
		середнє	мінімальне	максимальне
205/70R14 OI-297 C1	0,20	0,1575	0,135	0,180
205/70R14 ІД-195	0,20	0,1725	0,155	0,195
195/70R14 Pirelli P-44	0,20	0,1750	0,160	0,190

На основі отриманих результатів зроблено наступні висновки:

- середня інтенсивність падіння тиску в сучасних легкових шинах не перевищує 0,01 МПа на місяць;
- середні інтенсивності падіння тиску в літній та зимовий періоди експлуатації відрізняються незначно;
- контроль і доведення тиску до норми з періодичністю, передбаченою Правилами експлуатації шин, забезпечує компенсацію дифузійного витоку повітря.

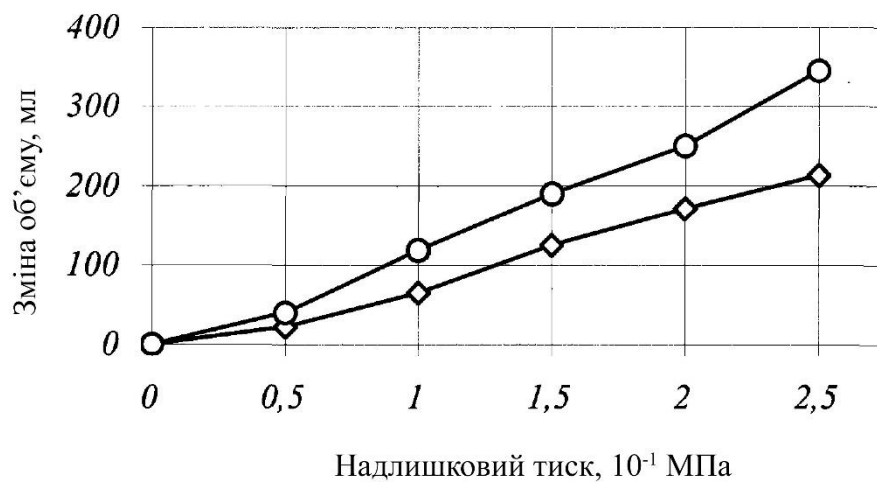
3.4 Зміна об'єму шин при зміні тиску

Результати теоретичних досліджень з оцінки впливу тиску в шині на зміну її об'єму у графічному вигляді представлені на рис. 3.2 і 3.3.



коло – 9R20; квадрат – 10R20; ромб – 12R20; хрест – 240-508

Рисунок 3.2 – Вплив внутрішнього тиску на зміну об'єму шин



коло – 205/70R14; ромб – 195/70R14

Рисунок 3.3 – Вплив внутрішнього тиску на зміну об'єму шин

Аналіз отриманих результатів показав, що, по-перше, ця закономірність описується експоненціальною моделлю з достатньою точністю; по-друге, при зміні тиску від атмосферного до нормативного об'єм шин змінюється не більше ніж на 2 %, а при його зміні в межах, зумовлених коливаннями зовнішньої

температури, – не більше 0,3 %. Отже, зміну об'єму можна вважати несуттєвою, а процес зміни тиску при зміні температури – ізохорним.

3.5 Зміна тиску в шині при прогріванні

Задача теоретичних досліджень передбачає перевірку адекватності та розрахунок числових значень параметрів математичної моделі зміни тиску повітря при прогріванні шин.

Використання моделі, яка не враховує нерегулярний режим прогрівання, показало, що її точність є цілком задовільною у статистичному сенсі. Середня похибка апроксимації не перевищує 3,5 %. Максимальна різниця між розрахунковими та експериментальними значеннями тиску не перевищує 6,2 %.

Але відповідно до Правил експлуатації автомобільних шин відхилення тиску від норми не повинно перевищувати 0,1 кгс/см² для шин легкових автомобілів і 0,2 кгс/см² для шин вантажних автомобілів, що не перевищує 5 % від нормативного тиску. Тому для практичного використання модель (2.6) непридатна.

РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ

4.1 Методика практичного використання результатів досліджень

Один із найважливіших факторів, що визначають зміну тиску в шині, – її температура в момент перевірки та доведення тиску до норми. При перевірці тиску під час технічного обслуговування або ремонту вона залежить від температури зовнішнього середовища в місці перевірки та часу, що минув з моменту заїзду автомобіля у виробниче приміщення.

У результаті проведених досліджень встановлено закономірності розподілу тиску повітря в шинах при експлуатації автомобілів, виявлено фактори, що впливають на надійність збереження тиску повітря в шинах, розроблено математичну модель їх впливу на математичне сподівання та коефіцієнт варіації тиску в шинах групи автомобілів, встановлено закономірності прогрівання й охолодження шин при зміні температури навколишнього середовища, встановлено закономірності зміни тиску в шині при прогріванні та охолодженні, визначено вид і розраховано числові значення параметрів математичних моделей зміни тиску та температури повітря при прогріванні й охолодженні для шин найбільш масових розмірів.

На основі отриманих результатів необхідно розробити методику контролю та доведення до норми тиску повітря в шинах у зимовий період, використання якої забезпечує суттєве зменшення відхилень тиску в шинах від норми, а отже, збільшення ресурсу шин і зниження витрати палива автомобілем.

Методика спрямована на забезпечення нормативного тиску повітря в шині як при контролі та доведенні його до норми на вулиці, так і в опалюваному приміщенні.

Відповідно до запропонованої методики, якщо автомобіль зберігається на відкритій стоянці й контроль тиску проводиться на вулиці, то підвищувати його відносно норми не потрібно. Якщо ж ця операція виконується на ділянці ТО-1, ТО-2 або в шиномонтажній дільниці, то для усунення похибки через різницю

температур на вулиці та в приміщенні тиск необхідно підвищувати на величину Δp .

Таблиця 4.1 – Методика контролю та доведення до норми тиску повітря в шинах у зимовий час

Місце перевірки тиску	Величина тиску
Відкрита стоянка	p
Закрита стоянка	$p + \Delta p$
Зона ТО	$p + \Delta p$
Шиномонтажна ділянка	$p + \Delta p$

Величина підвищення тиску відносно нормативного значення залежить від:

- температури повітря на вулиці;
- температури повітря в приміщенні;
- часу, що минув з моменту заїзду автомобіля в приміщення.

У результаті виконаних аналітичних та експериментальних досліджень встановлено закономірність зміни тиску в процесі прогрівання шини. Відповідно до неї при переміщенні шини в тепле приміщення тиск починає зростати. Якщо на вулиці тиск був рівний нормативному, то в приміщенні він буде вищим за нормативний на величину Δp . Причому Δp тим більша, чим більше часу мине з моменту заїзду шини в приміщення. У міру збільшення часу інтенсивність підвищення тиску знижується. Через 180...300 хвилин (залежно від об'єму та товщини каркаса шини) температура повітря всередині шини вирівнюється з температурою повітря в приміщенні і встановлюється тиск, що відповідає цій температурі.

Для того щоб використовувати цю методику, необхідно розрахувати величину тиску для різних температур повітря на вулиці, у приміщенні та часу, що минув з моменту заїзду автомобіля в приміщення.

РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Економічний ефект від використання результатів дослідження в АТП утворюється за рахунок зменшення відхилення тиску в шинах від норми в середньому по парку. У результаті зменшуються втрати ресурсу шин і знижується перевитрата палива, пов'язані з відхиленням тиску від норми.

Визначити фактичний економічний ефект від упровадження результатів досліджень можна лише після тривалого їх використання в АТП.

У межах даної роботи це не є можливим. Тому для визначення розрахункового ефекту умовно приймаємо, що при впровадженні розроблених рекомендацій втрати ресурсу шин і перевитрата палива, пов'язані з відхиленням тиску в шинах від норми, знизяться на 50 %.

$$E = E_{ш} + E_m, \quad (5.1)$$

де $E_{ш}$ – ефект, пов'язаний зі зниженням втрат ресурсу шин; E_m – ефект, пов'язаний зі зниженням перевитрати палива.

Витрата шин по АТП за розрахунковий період

$$N = \frac{L_{заг}}{L_{\phi}}, \quad (5.2)$$

де $L_{заг}$ – загальний пробіг усіх шин за розрахунковий період; L_{ϕ} – фактичний ресурс шин.

$$L_{заг} = L_p n A_c, \quad (5.3)$$

де L_p – середній пробіг одного автомобіля за розрахунковий період, у тисячах км; n – кількість ходових коліс на одному автомобілі, шт.; A_c – середньооблікова кількість автомобілів, шт.

Тоді

$$N = \frac{L_p n A_c}{L_{\phi}}. \quad (5.4)$$

Після впровадження рекомендацій середній фактичний ресурс шин збільшиться на величину

$$\Delta L - \Delta L_1, \quad (5.5)$$

де ΔL – втрати ресурсу шин до впровадження рекомендацій; ΔL_1 – втрати ресурсу шин після впровадження рекомендацій.

Витрата шин по АТП становитиме

$$N = \frac{L_p n A_c}{L_\phi + (\Delta L - \Delta L_1)}, \quad (5.6)$$

де ΔL , ΔL_1 мають ту саму розмірність, що й L_ϕ .

Якщо ж ΔL , ΔL_1 подаються у відсотках, то остання формула набуває вигляду:

$$N = \frac{L_p n A_c}{L_\phi + (\Delta L - \Delta L_1) / 100}, \quad (5.7)$$

або після перетворень:

$$N = \frac{L_p n A_c}{L_\phi (1 + (\Delta L - \Delta L_1) / 100)}. \quad (5.8)$$

Ефект у натуральному вираженні становитиме

$$E_u = N - N_1, \quad (5.9)$$

або після підстановки у формулу (5.9) виразів (5.4) і (5.8) отримаємо:

$$E_u = \frac{L_p n A_c}{L_\phi} - \frac{L_p n A_c}{L_\phi (1 + (\Delta L - \Delta L_1) / 100)}. \quad (5.10)$$

Після перетворень отримаємо:

$$E_u = \frac{L_p n A_c}{L_\phi} \left(1 - \frac{1}{1 + (\Delta L - \Delta L_1) / 100} \right). \quad (5.11)$$

Витрата палива автомобілями за розрахунковий період

$$Q_m = \frac{L_{\text{заг}} q_n}{100}, \quad (5.12)$$

де q_n – норма витрати палива, у літрах на 100 км.

З урахуванням формули (5.3) отримаємо:

$$Q_m = \frac{L_p n A_c q_n}{100}. \quad (5.13)$$

Втрати палива через відхилення тиску в шинах від норми до впровадження рекомендацій:

$$\Delta Q = \frac{L_p n A_c q_n}{100} \left(\frac{dQ}{100} \right). \quad (5.14)$$

де dQ – втрати палива, пов'язані з відхиленням тиску повітря в шинах від норми до впровадження рекомендацій, у відсотках.

Втрати палива з тієї ж причини після впровадження рекомендацій:

$$\Delta Q_1 = \frac{L_p n A_c q_n}{100} \left(\frac{dQ_1}{100} \right), \quad (5.15)$$

де dQ_1 – втрати палива, пов'язані з відхиленням тиску повітря в шинах від норми після впровадження рекомендацій, у відсотках.

Ефект, пов'язаний зі зниженням перевитрати палива, у натуральному вираженні

$$E_m^* = \Delta Q - \Delta Q_1. \quad (5.16)$$

Після підстановки у формулу (5.16) виразів (5.14), (5.15) і перетворень отримаємо

$$E_m^* = \frac{L_p A_c q_n (dQ - dQ_1)}{10000}. \quad (5.17)$$

Ефект у вартісному вираженні

$$E_{uu} = E_m^* C_{uu}; \quad (5.18)$$

$$E_m = E_m^* C_m, \quad (5.19)$$

де C_{uu} – вартість однієї шини, грн; C_m – вартість одного літра палива, грн.

Таблиця 5.1 – Розрахунок економічної ефективності

Показник	Чисельне значення для автомобіля	
	КамАЗ-5320	Татра-815
A_c , од.	30	60
L_p , тис. км	40	50
n , шт.	10	10
L_ϕ , тис. км	70	70
dL , %	10	10
dL_l , %	5	5
C_{ui} , грн	1000	1750
E_{ui}^* , шт.	9	21
E_{ui} , грн	9000	36750
dQ , %	2	2
dQ_l , %	1	1
Q_h , л/100 км	25	42
C_m , грн	1,3	1,3
E_m^* , л	3000	12600
E_m , грн	3900	16380
E , грн в год:		
на 1 автомобіль	322,5	885,5
по парку	12900	53130

ВИСНОВКИ

Розв'язано проблему зниження собівартості автомобільних перевезень за рахунок підвищення довговічності шин і зменшення витрати палива шляхом забезпечення експлуатації шин із тиском, що відповідає нормативному.

Встановлено закономірності розподілу тиску повітря в шинах під час експлуатації автомобілів. Усі закономірності поділено на три групи за величиною коефіцієнта варіації та формою емпіричної кривої розподілу. До першої групи належать розподіли з яскраво вираженою додатною асиметрією та коефіцієнтом варіації в межах 0,20...0,35.

При цьому домінуючим фактором, що формує розподіл, є візуальний контроль тиску. Такі закономірності з імовірністю 0,95 описуються законом Ерланга.

До другої групи належать розподіли з незначною асиметрією та коефіцієнтами варіації 0,15...0,25. На їх формування впливає велика кількість факторів, жоден із яких не є домінуючим. З імовірністю 0,95 вони підпорядковуються нормальному закону.

Третя група розподілів характерна для великих АТП із добре організованою системою контролю тиску. На їх формування переважний вплив має інструментальний контроль тиску.

Вони мають яскраво виражену від'ємну асиметрію, коефіцієнт варіації 0,04...0,15. Для їх опису запропоновано новий закон розподілу, названий ТР-законом.

Виявлено фактори, що впливають на надійність збереження тиску повітря в шинах, встановлено ступінь їх впливу. На основі аналізу раніше виконаних досліджень сформовано перелік факторів, що впливають на тиск повітря в шинах.

За результатами теоретичного експерименту оцінено ступінь їх впливу на математичне сподівання та коефіцієнт варіації тиску в шинах групи автомобілів. На математичне сподівання тиску найбільше впливає температура

навколишнього повітря, а на коефіцієнт варіації – розмір автотранспортного підприємства.

Встановлено закономірності прогрівання й охолодження шин при зміні температури навколишнього середовища. Процеси охолодження та прогрівання шин проходять через дві стадії: стадію нерегулярного режиму та стадію регулярного режиму. На основі досліджень встановлено, що практично для всіх шин перша стадія триває близько 40...60 хвилин, після чого утворюється впорядковане температурне поле, і процес переходить у регулярний режим.

Встановлено закономірності зміни тиску в шині при прогріванні та охолодженні. Для опису закономірності зміни тиску при зміні температури запропоновано використовувати закон Шарля.

На його використання накладається обмеження: процес повинен бути ізохорним, тобто об'єм не повинен змінюватися. Для оцінки ступеня впливу тиску на зміну об'єму шини проведено теоретичний експеримент, у результаті якого встановлено:

- по-перше, ця закономірність описується експоненціальною моделлю;
- по-друге, при зміні тиску від атмосферного до нормативного об'єм шин змінюється не більше ніж на 2 %, а при його зміні в межах, зумовлених коливаннями зовнішньої температури, – не більше ніж на 0,3 %. Отже, зміну об'єму можна вважати незначною.

Для опису зміни тиску в шині в процесі охолодження та прогрівання шини запропоновано використовувати кусочно-лінійну апроксимацію: на стадії нестационарного режиму – лінійну модель; при стаціонарному режимі – експоненціальну.

Розраховано числові значення параметрів математичних моделей зміни тиску й температури повітря при прогріванні та охолодженні для шин найбільш масових типорозмірів.

Розроблено методику контролю та доведення до норми тиску повітря в шинах під час технічного обслуговування в зимовий період, розраховано числові значення надбавок до тиску в шині. Економічний ефект при використанні

методики утворюється за рахунок часткового зниження втрат ресурсу шин і перевитрати палива, пов'язаних із відхиленням тиску від норми. Екологічний ефект полягає у скороченні маси продуктів зношування шин і викидів шкідливих речовин із відпрацьованими газами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gent A.N., Walter J.D. The Pneumatic Tire. 2nd Edition, NHTSA / SAE International, 2021 reprint. ISBN: 978-1560918318
2. Hall D.E., Moreland J.C. Fundamentals of Tire Pressure Monitoring. SAE International, 2021. ISBN: 978-1468602555
3. Ejsmont J.A., Świczko-Żurek B., Ronowski G. Rolling resistance and tyre pressure influence on vehicle energy efficiency. *Energies*, 2021, Vol. 14(11). DOI: 10.3390/en14113268
4. Mohanavel V., Ravichandran M., Karthick A. Influence of tyre inflation pressure on fuel consumption and tyre wear characteristics of transport vehicles. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, Vol. 34. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102041
5. Singh K., Chandel N.S., Kumar S. Experimental analysis of tyre inflation pressure on tractor performance and fuel efficiency. *Agriculture*, 2023, Vol. 13(4). DOI: 10.3390/agriculture13040817
6. Pacejka H.B. Tire and Vehicle Dynamics. 4th Edition, Butterworth-Heinemann, 2021. ISBN: 978-0081029978
7. Gillespie T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. SAE International, 2021 reprint edition. ISBN: 978-1468601763
8. Wong J.Y. Theory of Ground Vehicles. 5th Edition, Wiley, 2021. ISBN: 978-1119635857
9. Zhao X., Wang T., Li H. Effects of tire inflation pressure on vehicle ride comfort, fuel consumption and tire wear. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12(9). DOI: 10.3390/app12094231
10. Kim Y.S., Park S.U., Lee J.H. Statistical modelling of tire pressure variability in commercial vehicle fleets. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, Vol. 233. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109104
11. SAE International. Tire Pressure Monitoring Systems (TPMS): Standards and Practices. SAE, 2022. ISBN: 978-1468605228

12. Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control. 3rd Edition, Springer, 2021. ISBN: 978-3030713683
13. Wang H., Xu L., Zhao Y. Thermal behavior of pneumatic tires under transient environmental conditions. Applied Thermal Engineering, 2021, Vol. 193. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117039
14. Li X., Chen Y., Zhang P. Investigation of tire temperature and pressure evolution under varying ambient temperatures. International Journal of Automotive Technology, 2022, Vol. 23(5). DOI: 10.1007/s12239-022-0098-x
15. ISO 4250-1:2021. Earth-mover tyres and rims — Part 1: Tyre designation and dimensions. International Organization for Standardization, 2021. ISBN: 978-0539148947
16. ISO 18164:2022. Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres — Methods of measuring rolling resistance. International Organization for Standardization, 2022. ISBN: 978-0539171907
17. Etrma (European Tyre and Rubber Manufacturers' Association). Tyre Pressure and Fuel Efficiency Report. Brussels, 2021. ISBN: 978-9083215518
18. Sharma A., Kumar P. Influence of ambient temperature on pneumatic tire pressure and durability characteristics. Journal of Terramechanics, 2023, Vol. 108. DOI: 10.1016/j.jterra.2023.04.002
19. Verbitsky V., Nadykto V., Kyurchev V. Operational factors affecting tire pressure stability in transport vehicles. Applied Sciences, 2024, Vol. 14(6). DOI: 10.3390/app14062418
20. Cengel Y.A., Boles M.A. Thermodynamics: An Engineering Approach. 10th Edition, McGraw-Hill, 2023. ISBN: 978-1266152115

ДОДАТКИ