

Андрошук В.Д., Макаров В.А.
Вінницький Національний Технічний Університет

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ВІДБОРУ ЗРАЗКІВ ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК ІЗ СИСТЕМИ «ШИНА-ДОРОГА» АВТОМОБІЛІВ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ВИПРОБУВАНЬ

У роботі проведено аналіз впливу типів дорожнього покриття на знос та руйнування шин, а також на викиди твердих частинок під час перевезення робітників. Вивчено та порівняно різні типи покриття, такі як асфальтовані дороги, бруківка та гравійні дороги, з точки зору їх впливу на стан шин та викиди частинок. Проведений аналіз включає оцінку видів зносу та руйнування шин на різних типах доріг, враховуючи їх абразивність, гладкість та інтенсивність руху. Отримані результати дозволили вибрати найоптимальніші маршрути для перевезення робітників із місця проживання до місця роботи. Дослідження підкреслює важливість реалізації стратегій управління та підтримки дорожньої інфраструктури з метою зменшення негативного впливу на шини, дороги та довкілля в цілому.

Ключові слова: типи дорожнього покриття; знос шин; руйнування шин; викиди частинок; перевезення робітників; оптимальні маршрути; абразивність покриття; інтенсивність руху; аналіз впливу.

ВСТУП

Тверді частинки у повітрі простору людської життєдіяльності довгий час вважаються шкідливими для навколишнього середовища та здоров'я мешканців. Зараз дорожній рух транспортних потоків автомобілів (ТПА) є основним джерелом появи таких частинок у містах. Світова тенденція до зменшення викидів вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) призвела до того, що невихлопні викиди стали основним джерелом твердих частинок від дорожнього руху. Останнє особливо важливо, оскільки це джерело не підлягає жодному законодавчому регулюванню в Україні. Стандарт ISO/TS 22638 визначає лабораторний метод для визначення швидкості стирання і частинок зносу шин та руйнування дороги [1].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Шини [2] – складні композитні еластичні гумові вироби, є фінішною точкою контакту автомобіля з дорогою. Процес їх зношування визначається чотирма основними факторами: самими шинами, транспортними засобами, умовами довкілля, станом доріг.

Трибологічні принципи, які впливають на знос гуми, включають втомний, тертєвий, адгезійний та хімічний знос. Розуміння цих механізмів є важливим для розробки методів тестування, зокрема на одноролікових стендах. Тертя та ковзання призводять до появи мікропорів і тріщин як на шинах, так і на дорозі, спричиняючи умови для інтенсифікації процесів зношування та первинного руйнування. Останнє відбувається, коли енергія тертя у зоні контакту перевищує енергію руйнування поверхні шини.

Проблема дослідження: перевезення робітників до ТОВ «ВІННИЦЬКА ПТАХОФАБРИКА» по дорогах з різним покриттям в сільській місцевості, що обумовлює особливо негативний викид частинок з системи «шина-дорога» в довкілля.

Мета дослідження: аналіз негативних викидів системи «шина-дорога» в умовах сільського довкілля.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціль даного дослідження полягає в аналізі впливу різних типів дорожнього покриття на знос шин, руйнування шин та викиди частинок під час перевезення робітників до ТОВ «ВІННИЦЬКА ПТАХОФАБРИКА». Для досягнення цієї цілі поставлено наступні завдання: провести дослідження зносу шин і руйнування шин на різних типах доріг; визначити вплив типу дороги на кількість викидів частинок; обрати оптимальні маршрути для перевезення робітників з урахуванням аналізу дорожніх умов; визначити фактори, які впливають на ефективність та безпеку перевезень у контексті зносу шин та викидів частинок. Подальше розглядання цих аспектів допоможе визначити оптимальні стратегії для мінімізації впливу дорожніх умов на швидкість зносу шин та руйнування шин, що є ключовими факторами забезпечення безпеки та ефективності дорожнього руху.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Знос і руйнування шин та дорожнього покриття часто відбуваються одночасно, утворюючи близько половини загальних токсичних викидів колісного транспортного засобу (КТЗ). До викидів гуми в атмосферу відносять від 5% до 30%, при чому до 10% маси зносу шин припадає на частинки

розміром менше 10 мкм [3]. Дослідження вказують на різноманітність розмірів частинок продуктів зношування, що зумовлено відмінностями у методиках випробувань та системах вимірювання. Основними параметрами впливу на процес зношування шин є їх хімічний склад, структура, стан поверхні дороги, а також поздовжні та поперечні прискорення в зоні контакту колісного транспортного засобу з опорною поверхнею.

Для ефективного відбору факторів та вимірювання величин параметрів викидів необхідно забезпечити надійний транспорт частинок, що перевищують розмір 1 мкм, до місця збору зразків. Це необхідно з міркувань уникнення значних впливів ударів або седиментації. Різномісний характер концентрацій твердих частинок є результатом різноманітних геометрій шин на ринку та умов руху, що ускладнюють отримання репрезентативних зразків. Особливо це стосується процесу випробувань, коли різноманітні початкові умови, такі як швидкість руху транспортного засобу та умови ТПА, переважають протягом циклу. Лише високий рівень однорідності, отриманий завдяки рівномірному розподілу частинок, забезпечує можливість відбору репрезентативних зразків, навіть при частковому їх відборі. Для досягнення цієї мети використовуються CVS системи (рисунок 1), які забезпечують подачу викинутих частинок у постійний об'ємний потік до каналу відбору зразків із вбудованим зондом. Це має вагомое значення з погляду транспортування частинок від місця їх викиду до місця їх відбору.



Рисунок 1 – Система щодо візуалізації потоку відбору проб для захоплення частинок зносу шини під час випробувань на дорозі: а) структура системи на автомобілі б) фрагмент системи за правим переднім колесом

Розглянемо методи відбору зразків викидів твердих частинок із автомобільних шин та дороги у різних середовищах випробувань [4].

Дорожнє вимірювання викидів частинок зношення шин

Для вимірювання масової концентрації частинок використовується аерозольний монітор TSI DustTrak II 8530 разом із попереднім сепаратором 10 мкм. Цей пристрій дозволяє оцінювати концентрацію частинок. Досліджувалась поведінка викидів в широкому спектрі навантажень, зокрема бічні прискорення $\pm 0,1$ g; $\pm 0,3$ g і $\pm 0,5$ g на максимальних швидкостях 50 км/год. Хоча головними факторами, які впливають на рівень викидів, є маневри гальмування, збільшені значення також спостерігаються при певних прискореннях у діапазоні від 30 до 50 км/год. Найвищі концентрації спостерігаються при русі на поворотах з одночасним прискоренням або гальмуванням. Збільшення швидкості також суттєво впливає на викиди, навіть при невеликих прискореннях.

Досліджуються максимально бічні прискорення до 0,6 g на максимальних швидкостях 40 км/год з міркувань безпеки, і вони співпали з найвищими концентраціями. Тертя між шиною та дорогою перетворюється на теплову та механічну енергію, при цьому утворюються частинки розміром менше 10 мікрон. Використано TSI OPS 3330 для аналізу розмірного розподілу частинок у діапазоні від 0,3 до 10 мкм [5]. Залучає увагу збільшення концентрації частинок розміром 2–3 мкм при зростанні бічного прискорення, що пояснюється механічною енергією. Також вимірюються високі концентрації частинок < 1 мкм при найвищих прискореннях. Хоча концентрації змінюються зі збільшенням напруги, діапазони розмірів частинок майже не змінюються.

Для порівняння результатів, отриманих на закритій дорозі, представлені вимірювання в циклі випробування реальних викидів. Виявлено, що значні піки концентрації не спостерігаються, оскільки поздовжні та бічні прискорення демонстрували низькі значення. Характеристики дорожнього покриття прямо відображають швидкість зносу. Величина викидів вимірюється протягом циклу випробування для оцінки впливу викидів із зовнішніх джерел. Інтенсивність тертя, що передається на

праву передню шину, порівнюється з відповідними значеннями викидів. Для спрощення враховується пропорційне співвідношення між передачею потужності та навантаженням на колесо кожної шини, використовуючи коефіцієнт статичного навантаження та динамічну зміну навантаження на шину.

Високі рівні викидів спостерігаються при низькій силі тертя, можливо, що пов'язано із забрудненням дорожнього покриття. Незважаючи на те, що реакція викидів на силу тертя менша, деякі ефекти подібні до тих, що спостерігались на тестовій доріжці (наприклад, висока концентрація при поворотах). Підвищена концентрація твердих частинок спостерігається на ділянках з підвищеною силою тертя, особливо у міських умовах (рисунок 2).

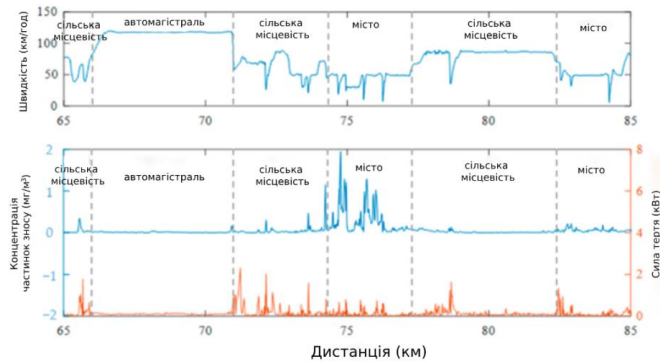


Рисунок 2 – Візуалізація кореляційної залежності між параметрами руху та виміряною масовою концентрацією твердих частинок

Відповідно до рисунку 2 рівні викидів виміряні в сільській місцевості та на ділянках шосе є значно нижчими ніж на інших типах доріг. Ділянки автомагістралі, які характеризуються набагато більш постійною швидкістю руху та меншими кутами повороту, демонструють мало піків викидів, за винятком випадків прискорення та гальмування. Підсумовуючи, велика частка викидів, виміряних під час випробувань на дорозі, є результатом роботи, спричиненої шинами, або походить від зовнішніх джерел викидів (наприклад, процеси згоряння двигуна внутрішнього згорання). Тим не менш, не можна зробити чітких висновків щодо порівняння різних джерел викидів за допомогою вимірювальної установки, оскільки їх неможливо чітко розділити. Найточнішим твердженням, яке можна було зробити щодо параметрів впливу, було те, що великий рівень інтенсивності руху ТПА та висока щільність маневрів КТЗ сприяли викиду частинок гальм, шин та асфальту.

Лабораторне вимірювання викидів частинок зносу шин

Даний метод використовує випробувальний стенд (рисунок 3) з одним роликом для динамічного моделювання сили й коефіцієнтів ковзання, опору руху та кутів ковзання [6].

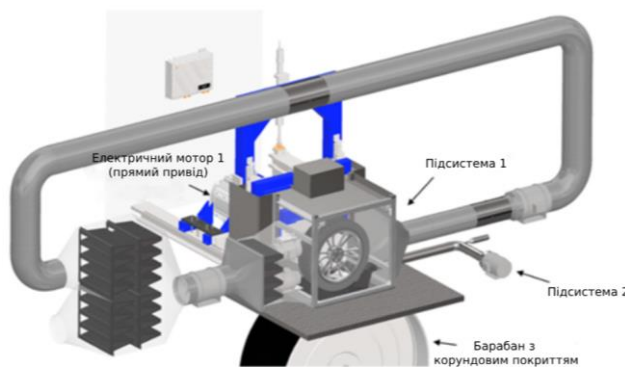


Рисунок 3 – Фрагмент випробувального стенду для аналізу швидкості зношення та коефіцієнтів викидів твердих частинок шин та дороги

Це дозволяє оцінювати окремі параметри чи цілі цикли випробувань у відтворюваних умовах, що відображають швидкість зносу та коефіцієнти викидів твердих частинок. Система подвійного розведення поєднує в собі переваги більш реалістичних умов охолодження й оптимальних умов відбору проб.

Перша підсистема використовується для охолодження шин за допомогою регульованого потоку, а друга — для всмоктування твердих частинок напряму від контакту шина-ролик і для

транспортування частинок до вимірювальної системи. Додатково, система включає фільтри перед входом у кожух шини для зменшення фонові концентрації частинок зовнішнього середовища.

У камері з фільтрованим повітрям створюється надлишковий тиск за допомогою регульованої системи вентиляторів для запобігання забрудненню частинками. Контроль температури й вологості здійснюється системою кондиціонування повітря у випробувальній камері. Для втілення динамічних реальних циклів водіння використовується обчислювальна система в реальному часі. Крім того, можна регулювати кут ковзання на $\pm 2^\circ$ [7].

Барабан з корундовим покриттям відтворює дорожнє покриття, що дозволяє вибірково аналізувати тверді частинки. Це спрощує частину змодельованого циклу тестування для ілюстрації функціональності. Низька фонові концентрація частинок дозволяє онлайн-аналізувати найдрібніші викиди і перетворення енергії.

Дорожні умови також істотно впливають на фактичні контактні поверхні. На більш гладкій поверхні ролика спостерігається рівномірний розподіл тиску в контакт з дорогою. Контактна поверхня асфальтової дороги характеризується нерівностями, що призводить до зменшення ефективної поверхні контакту при збільшенні точності макрозіймки та контактного тиску на піках текстури. Зниження тиску в шинах збільшує ефективну площу контакту з поверхнею стенду більш значуще ніж на асфальтовій дорозі. Площа поверхні зростає зі зниженням тиску накачування шин, проте глибина проникнення між піками шорсткості зменшується через зниження контактного тиску.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для забезпечення максимально репрезентативних та інформативних результатів дослідження викидів твердих частинок, було ретельно обрано маршрути з різними типами дорожнього покриття. Враховуючи різноманіття дорожніх умов, була визначена більша сукупність доріг для охоплення широкого спектру факторів, що впливають на процес зносу шин та викиди частинок, що досліджуються.

В процесі вибору маршрутів були враховані наступні аспекти:

- типи покриття: вибір доріг із різними типами покриття (асфальт, бруківка, гравій) дозволяє охопити різноманітність умов експлуатації, що може впливати на процеси зносу та викиди; покриття мають різні характеристики тертя та абразивності;

- інтенсивність руху ТПА: врахування доріг з різною інтенсивністю руху, включаючи як високонавантажені автомагістралі, так і менш інтенсивні місцеві дороги, дозволяє оцінити вплив об'єму транспорту на процеси зношування і руйнування шин і дороги та викиди частинок матеріалу на поля.

Для деталізації дослідження та врахування практичного досвіду водіїв, які здійснюють перевезення робітників до ТОВ «ВІННИЦЬКА ПТАХОФАБРИКА», проводилось опитування.

Опитування водіїв, здійснюючих перевезення робітників, було проведено за допомогою структурованої анкети, яка враховувала їхні враження від різних маршрутів із різними типами дорожнього покриття. Водії обрали раціональні маршрути руху для перевезення робітників, враховуючи дорожні умови, час перевезення, та загальний комфорт.

З урахуванням більшої сукупності доріг, було отримано наступні результати:

- асфальтовані дороги: 68% водіїв визначили асфальтовані дороги як оптимальні через покращену якість покриття та зручність руху;

- бруківка: 22% водіїв обрали маршрути через дороги з бруківкою, вказавши на їхню меншу інтенсивність руху, розміщення біля села робітників та естетичний вигляд;

- гравійні дороги: 10% водіїв вибрали гравійні дороги, пояснюючи це більш коротким маршрутом.

Грунтуючись на результатах опитування з дослідження були виключені дороги, які мало використовуються або мають обмежений доступ.

З урахуванням результатів опитування та аналізу дорожніх умов були визначені два найоптимальніші маршрути для перевезення робітників від Тульчина до Ладижина. Ці маршрути враховують різноманітність дорожнього покриття та інтенсивність руху, забезпечуючи комфорт та ефективність подорожі.

Обрано наступні маршрути:

- Тульчин - Холодівка - Заозерне – Ладижин; маршрут характеризується наступним: асфальтованою дорогою; інтенсивністю руху: висока; (78% водіїв визначили цей маршрут як найшвидший та найзручніший).

•Тулчин - Клебань - Богданівка – Ладжин. Маршрут характеризує типом дороги: бруківка, гравійна дорога, асфальтована дорога; інтенсивність руху середня; (22% водіїв обрали цей маршрут через меншу інтенсивність руху та більш короткий маршрут).

Ці два маршрути надають можливість враховувати вплив різних типів доріг на зношування та руйнування шин і дороги та викиди частинок під час перевезення робітників до ТОВ «ВІННИЦЬКА ПТАХОФАБРИКА».

Одним із ключових аспектів дослідження впливу різних типів дорожнього покриття на транспортні засоби є оцінка виду зносу та руйнування шин. Враховуючи різноманітність доріг із різними типами покриття, було проведено аналіз впливу кожного типу на стан шин під час перевезення робітників. Результати аналізу наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Аналіз впливу типів доріг та знос та руйнування шин

Тип дороги	Вид зносу	Руйнування шин
Асфальтовані дороги	Асфальтовані дороги, завдяки гладкому та однорідному покриттю, сприяють рівномірному виду зносу шин, забезпечуючи тривалий термін служби. Однак, висока інтенсивність руху може збільшити загальний обсяг зносу.	Мінімальний ризик руйнування, оскільки асфальт добре адаптується до шин і не створює значних ударних навантажень.
Бруківка	Бруківка може спричинити збільшений абразивний знос, особливо при високій швидкості або інтенсивному гальмуванні. Нерівномірність поверхні може призводити до різних видів зносу.	Підвищений ризик руйнування через нерівності бруківки, які можуть викликати пошкодження боковин та протектора шини.
Гравійні дороги	Гравій може викликати інтенсивний абразивний та ударний знос, зокрема на великих швидкостях. Зношені гравійні частинки можуть пошкоджувати шар протектора.	Підвищений ризик руйнування через удари та вплив великого та гострого гравію.

Проведений аналіз впливу типів доріг на знос та руйнування шин надав важливі висновки для подальших досліджень. Асфальтовані дороги виявилися найбільш сприятливими для тривалого терміну служби шин, завдяки гладкому та однорідному покриттю, при цьому маючи мінімальний ризик руйнування. Бруківка, хоча може призводити до підвищеного абразивного зносу, однак має підвищений ризик руйнування шин через нерівномірності поверхні. Гравійні дороги демонструють інтенсивний абразивний та ударний знос, що може призводити до підвищеного ризику руйнування шин. Останні два види доріг використовуються, якщо вони наближені до місця мешкання робітників.

ВИСНОВКИ

На основі наведеної інформації можна очікувати значно меншу швидкість зношування під час випробувань на стенді з одним роликом, ніж під час випробувань на дорозі. Очікувані відхилення через обмежений кут ковзання підтвердилися вимірюванням. Хоча функціональність випробувального стенду з одним роликом для визначення ступеню кореляції була доведена, швидкість зносу відхиляється на коефіцієнт >5 від вимірювань під час реального випробування на водінні.

Отже, було проаналізовано та детально описано методи вимірювання викидів твердих частинок зношення шин та дороги у різних середовищах. Було надано результати проведених досліджень, що базувались на описаних методах.

Також було здійснено вибір оптимального маршруту для перевезення робітників, що має важливе значення для мінімізації впливу на знос та руйнування шин. Було враховано типи дорожнього покриття, інтенсивність руху та обрано найкращі маршрути на основі опитування водіїв.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Стандарт ISO/TS 22638 [Електронний документ]. Режим доступу: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:ts:22638:ed-1:v1:en>
2. Zhang, Xinfeng, Ping Chen, and Fengyang Liu. "Review of tires wear particles emission research status." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 555. No. 1. IOP Publishing, 2020.
3. FeiBel, T.; Kunze, M.; Hesse, D.; Ivanov, V.; Augsburg, K.; Gramstat, S. On-Road Vehicle Measurement of Tire Wear Particle Emissions and Approach for Emission Prediction. In Proceedings of the 40th Annual Meeting of the Tire Society, Akron, OH, USA, 2 September 2021.
4. Huang, H. Study on the Mechanism of Tire Abnormal Wear and Life Prediction. Ph.D. Thesis, Tongji University, Shanghai, China, 2007.

5. Optical Particle Sizer (OPS) 3330 [Elektronnyy dokument]. Rezhim dostupa: [https://tsi.com/products/particle-sizers/supermicron-capable-particle-sizer-spectrometers/optical-particle-sizer-\(ops\)-3330/](https://tsi.com/products/particle-sizers/supermicron-capable-particle-sizer-spectrometers/optical-particle-sizer-(ops)-3330/)

6. Wagner, S.; Hüffer, T.; Klöckner, P.; Wehrhahn, M.; Hofmann, T.; Reemtsma, T. Tire wear particles in the aquatic environment—A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects. *Water Res.* 2018, 139, 83–100.

7. Hesse, D. Beitrag zur Experimentellen und Analytischen Beschreibung Partikelförmiger Bremsenemissionen. Ph.D. Thesis, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany, 2020.

REFERENCES

1. Standart ISO/TS 22638 [Elektronnyy dokument]. Rezhim dostupa: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:ts:22638:ed-1:v1:en>

2. Zhan, Xinfeng, Ping Chen, i Fengyang Liu. "Rekomendatsiya zapisey, kotoryye sodержat emissiyu issledovaniya statistiki." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 555. No. 1. IOP Publishing, 2020.

3. Feißel, T.; Kunze, M.; Hesse, D.; Ivanov, V.; Augsburg, K.; Gramstat, S. On-Road Vehicle Measurement of Tire Wear Particle Emissions and Approach for Emission Prediction. V protsedurakh 40-y godovshchiny poseshcheniya magazina kompanii, Akron, OH, USA, 2 September 2021.

4. Khuang, KH. Studiya na tekhnike prodolzhitel'nosti prodolzhitel'nosti zhizni i zhizni. Ph.D. Thesis, Tongji University, Shankhay, Kitay, 2007.

5. Optical Particle Sizer (OPS) 3330 [Elektronnyy dokument]. Rezhim dostupa: [https://tsi.com/products/particle-sizers/supermicron-capable-particle-sizer-spectrometers/optical-particle-sizer-\(ops\)-3330/](https://tsi.com/products/particle-sizers/supermicron-capable-particle-sizer-spectrometers/optical-particle-sizer-(ops)-3330/)

6. Wagner, S.; Hüffer, T.; Klöckner, P.; Wehrhahn, M.; Hofmann, T.; Reemtsma, T. Tire wear particles in the aquatic environment—A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects. *Water Res.* 2018, 139, 83-100.

7. Hesse, D. Beitrag zur Experimentellen i Analytischen Beschreibung Partikelförmiger Bremsenemissionen. Ph.D. Thesis, Tekhnicheskii universitet Il'menau, Il'menau, Germaniya, 2020.

Androshchuk V.D., Makarov V.A. Comparison of methods for sampling particulate matter emissions from the tire-road system of automobiles in different test environments

The work analyzes the impact of road surface types on tire wear and tire failure, as well as on particulate matter emissions during the transportation of workers. Different types of pavement, such as asphalt roads, paved roads, and gravel roads, are studied and compared in terms of their impact on tire condition and particle emissions. The analysis includes an assessment of the types of tire wear and failure on different types of roads, taking into account their abrasiveness, smoothness and traffic volume. The results allowed us to select the most optimal routes for transporting workers from their homes to their workplaces. The study emphasizes the importance of implementing road infrastructure management and maintenance strategies to reduce the negative impact on tires, roads, and the environment as a whole.

The conducted studies demonstrate the effectiveness of the developed method for analyzing the impact of different types of road surfaces on tire wear and destruction. The proposed quantitative methodology makes it possible to assess the degree of influence of asphalt, paved, and gravel roads on tire wear and particle emissions in real conditions.

Experimental studies show that the type of road surface affects the uniformity of tire wear and destruction, as well as the amount of wear particles emitted into the environment. The results of the analysis indicate a significant impact of the road type on the condition of tires and environmental safety. The use of this methodology will allow designers and manufacturers of automobile tires and road surfaces to improve the quality of their products and reduce the negative impact on the environment.

Key words: types of road surfaces; tire wear; tire destruction; particle emissions; transportation of workers; optimal routes; abrasiveness of the surface; traffic intensity; impact analysis.

АНДРОЩУК Віктор Дмитрович, студент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, спеціальності 275 - транспортні технології, Вінницький національний технічний університет, e-mail: androshchukvictor@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0005-1312-2132>

МАКАРОВ Володимир Андрійович, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: makarov@vntu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7012-4952>.

Viktor ANDROSHCHUK, student of the Department of Automobiles and Transport Management, specialty 275 - Transport Technologies, Vinnytsia National Technical University, e-mail: androshchukvictor@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0005-1312-2132>

Volodymyr MAKAROV, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, e-mail: makarov@vntu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-7012-4952>.

DOI 10.36910/automash.v1i22.1347