

## ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ВИТРАТ ПАЛИВА ТА ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ВАНТАЖНИМ АВТОТРАНСПОРТОМ

Свічинський С. В., Свічинська О. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Аналіз відомих підходів до визначення загальних витрат палива та викидів парникових газів вантажним автомобільним транспортом як складовою національної транспортної системи України дозволив визначити спосіб оцінювання споживання палива рухомим складом та ідентифікувати основні забрудники атмосфери й методи їх розрахунку. За допомогою розроблених підходів до процесу визначення рівня витрат палива та викидів шкідливих речовин, що здійснюється на підставі даних національної та міжнародної статистики, надана відповідна інформація щодо цього.

**Ключові слова:** транспортна система, автомобільний транспорт, вантажні перевезення, навколишнє середовище, рівень викидів, витрати палива, парникові гази, транспортна екологія.

### Вступ

Нині людство дедалі більше усвідомлює наслідки свого впливу на навколишнє середовище (НС), що вимагає термінового вирішення великої кількості екологічних проблем. У цьому контексті в процесі ухвалення рішень щодо реалізації різноманітних проєктів зростає увага до їхніх екологічних аспектів.

Ця тенденція також відображається в плануванні розвитку транспортних систем (ТС). Проєктувальники країн Західної Європи, згідно з Директивою ЄС про екологічне управління та з Регламентом щодо системи екологічного менеджменту ISO 14001, завжди враховують очікувані обсяги споживання енергії та вплив проєктів на екосистему [1, 2]. В Україні ж процес транспортного планування лише починає приділяти увагу цим важливим аспектам.

Розроблення планів розвитку ТС має бути орієнтоване на максимально ефективне задоволення потреб населення в транспортних послугах, зменшення негативного впливу транспорту на НС та раціональне використання ресурсів. Наприклад, у Норвегії впроваджено екологічні норми, які сприяють зменшенню кількості викидів CO<sub>2</sub> та підвищенню ефективності використання ресурсів [3, 4].

В Україні ще не повною мірою усвідомлено важливість покращення екологічних характеристик транспортних засобів (ТЗ). Визначення рівня впливу ТС на довкілля є несистематизованим, а результати таких аналізів доступні лише обмеженій кількості осіб. Нині в Україні доступна лише загальна інформація про екологічний стан НС, що визначає необхідність більш детального

аналізу витрат пального та впливу транспортної системи на умови життя населення.

### Аналіз публікацій

Сучасні ТЗ стали значними споживачами енергії та інших ресурсів. Масове використання автомобільного та залізничного транспорту вимагає розвитку авто- та залізничних мереж, а також будівництва різноманітних транспортних споруд. Це часто призводить до значних втрат земель, що негативно впливає на інші види людської діяльності. Втрати земельних угідь відбуваються через водну та вітрову ерозію, геодинамічні процеси та зміни в рівні ґрунтових вод [4, 5].

Забруднення НС є комплексом перешкод для екосистем. Коли рівень таких перешкод перевищує здатність організмів адаптуватися, це може призвести до їх загибелі або пригнічення. Перешкоди можна класифікувати на інгредієнтні, параметричні та екологічні.

Перші з них пов'язані із забрудненням води, повітря та ґрунту. Найбільш небезпечними є токсичні та нетоксичні компоненти викидів, а також відходи, що утворюються під час виробництва й експлуатації автомобілів, локомотивів і літаків.

Параметричні перешкоди пов'язані з викидами, які з'являються під час роботи двигунів. У процесі згоряння пального лише частина його енергії перетворюється на корисну, тоді як інша втрачається. Ця втрата енергії проявляється у вигляді таких параметричних забруднень, як шум, електромагнітні поля та вібрації.

Екологічне забруднення охоплює вплив транспорту на НС загалом. Зокрема розши-

рення транспортних шляхів та інфраструктури призводить до зменшення природних місць проживання для флори та фауни, що негативно позначається на загальному функціонуванні екосистем.

Соціальними наслідками впливу транспорту є зниження фізичної активності населення та збільшення рівня стресу, зниження безпеки на дорогах, а також збільшення захворюваності, спричиненої забрудненням НС. Крім того, транспортна діяльність призводить до втрат національного доходу через витрати на медичні послуги та інші збитки, які несе суспільство.

Аналіз рівня споживання палива автомобільним транспортом є об'єктом дослідження як вітчизняних, так і закордонних науковців. Інтерес до цієї теми обумовлений необхідністю прогнозування енергоспоживання транспортної галузі та його впливу на довкілля.

Серед результатів досліджень вітчизняних науковців особливу увагу привертає формалізований підхід, наведений у роботах [6, 7]. У цих дослідженнях запропоновано таку залежність для розрахування витрат палива:

$$H_a = \frac{100 \cdot K_{ш} \cdot M_a}{H_n \cdot \rho_m \cdot \eta_a}, \quad (1)$$

де  $K_{ш}$  – шум прискорення,  $\text{м/с}^2$ ;  $M_a$  – маса автомобіля, кг;  $H_n$  – нижча теплота згорання,  $\text{кДж/кг}$ ;  $\rho_m$  – густина палива,  $\text{г/см}^3$ ;  $\eta_a$  – коефіцієнт корисної дії автомобіля.

У формулі (1) стан дорожніх умов визначається через показник шуму прискорення: чим гірші умови експлуатації автомобіля, тим більша нерівномірність руху, що призводить до зростання рівня шуму прискорення. Шум прискорення обчислюється за формулою

$$K_{ш} = 0,4 \cdot g \cdot \psi + 0,077 \cdot kF \cdot \frac{V_a^2}{M_a}, \quad (2)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;  $\psi$  – коефіцієнт сумарного дорожнього опору;  $kF$  – фактор обтічності,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $V_a$  – швидкість руху автомобіля,  $\text{км/год}$ .

У формулах (1) та (2) маса автомобіля відображає його навантажувальну характеристику, а середня технічна швидкість визначає швидкісні властивості ТЗ. Добуток нижчої теплоти згорання та густини палива є показником якості пального. Коефіцієнт ко-

рисної дії (ККД) автомобіля є характеристикою ефективності його конструкції.

У роботі [8] наведено аналітичні залежності, що описують зміну загального коефіцієнта корисної дії (ККД) автомобіля, а також ККД окремих агрегатів з огляду на конструктивні й експлуатаційні характеристики. У дослідженні [9] визначено, що за низьких швидкостях ККД автомобіля більшою мірою залежить від конструктивних особливостей ТЗ, ніж від режиму навантаження та швидкості. Таким чином, на швидкостях до 30  $\text{км/год}$  значення ККД автомобіля є сталим.

З огляду на формулу (2) формулу (1) можна записати так:

$$H_a = \frac{40 \cdot g \cdot M_a \cdot \psi}{H_n \cdot \rho_m \cdot \eta_a} + \frac{7,7 \cdot kF \cdot V_a^2}{H_n \cdot \rho_m \cdot \eta_a}. \quad (3)$$

У теорії автомобілів [10] коефіцієнт сумарного дорожнього опору враховує втрати, пов'язані з опором коченню коліс і подоланням поздовжнього ухилу дороги. У складних дорожніх умовах рівень опору збільшується, а швидкість знижується. Отже, між  $\psi$  і  $V_a$  існує зворотно пропорційна залежність. У роботі [7] запропонована формула зміни коефіцієнта сумарного дорожнього опору від середньої технічної швидкості:

$$\psi = \frac{0,01 \cdot V_{\max}}{V_a}, \quad (4)$$

де  $V_{\max}$  – максимальна швидкість автомобіля,  $\text{км/год}$ .

Цей підхід був поширений на локальному рівні, проте випадків його застосування за межами країни, де він був розроблений, не виявлено. Більш загальноновизнаним елементом для визначення рівня споживання палива та викидів шкідливих речовин автотранспортом є програмне забезпечення Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM-4) [10].

HDM-4 містить спеціалізовані інструменти, що охоплюють процеси управління дорожньою інфраструктурою, забезпечуючи інженерів можливістю прийняття стратегічних рішень, зокрема щодо експлуатаційних витрат і впливу транспорту на довкілля. Сфера застосування HDM-4 вийшла за межі традиційного аналізу проєктів, надаючи потужний інструмент для аналізу інвестицій та управління дорожньою інфраструктурою.

Основна увага під час розроблення HDM була зосереджена на впорядкуванні вже наявних знань, а не на проведенні нових масштабних досліджень. Водночас у певних аспектах було запропоновано інноваційні підходи, що дозволяють ефективно використовувати сучасні наукові досягнення для вирішення технічних завдань і потреб управління дорожнім господарством у різних країнах.

Модель HDM-4 широко застосовується в багатьох країнах світу і здійснює основну функцію в обґрунтуванні збільшення фінансування на утримання та ремонт доріг. Її використовували для визначення економічної ефективності дорожніх проєктів у понад 100 країнах, щоб оптимізувати економічні вигоди для учасників дорожнього руху за різних рівнів витрат. HDM-4 пропонує вдосконалені інструменти для аналізу інвестицій у дорожню інфраструктуру з можливістю адаптації до різних природно-кліматичних умов. Однак визнається, що для максимізації результатів необхідна додаткова адаптація моделі до місцевих умов [10].

Моделювання витрат палива дорожніми ТЗ є важливим джерелом інформації щодо викидів парникових газів (ПГ) у секторі автомобільного транспорту. Процес визначення рівня кількості палива, необхідного для роботи ТЗ, є важливим для оптимізації експлуатаційних витрат і скорочення шкідливих викидів. Хоча новітні технології двигунів, проєктування екологічних маршрутів та навчання водіїв уже сприяли зниженню викидів, дослідження демонструють, що на рівень витрати палива також значно впливають стан дорожньої інфраструктури та такі фактори, як опір коченню, нерівність та текстура дорожнього покриття.

Це дозволяє дорожнім службам оцінювати ефективність управління своїми активами та підтримувати рішення щодо ремонту та реконструкції інфраструктури. Незважаючи на наявність багатьох нових способів для визначення рівня витрат палива, модель HDM-4 залишається найбільш поширеною. Вона використовується інженерами для аналізу життєвого циклу дорожнього покриття, оскільки надає можливість оцінити соціально-економічні та екологічні наслідки поганого стану доріг. Однак перед використанням модель потрібно калібрувати відповідно до місцевих умов [10, 11].

Процес калібрування HDM-4 нещодавно здійснювали в Англії, однак результати цього процесу на сьогодні не є загальнодоступними. Подібні дослідження також проводи-

лися в США, де на обмеженій кількості ТЗ і ділянок дороги за постійної швидкості та з огляду на погодні умови було здійснено польові випробування.

Варто зазначити, що ці результати ще не були перевірені щодо загального застосування, тому їх доцільно використовувати лише в умовах, подібних до локальних. Через це виникають сумніви щодо того, чи можна цю інформацію повною мірою екстраполювати на фактичні витрати палива ТЗ, що експлуатуються на мережі доріг у реальних умовах руху.

Насправді багато країн проводять аналогічні тести для адаптації HDM-4 до своїх локальних умов, що потребує значних фінансових вкладень і тривалого аналізу отриманих результатів. Основним питанням залишається тривалість ефективного використання моделі після калібрування. Крім того, актуальним є питання щодо прийнятності методології калібрування, яка базується на контрольних циклах експлуатації та обмеженій кількості ТЗ і короткому періоді випробувань. Питання щодо забезпечення цим підходом точних і надійних результатів у реальних умовах потребує подальшого дослідження.

Модель HDM-4 містить формулу для визначення кількості споживаного палива, яка є функцією потужності, необхідної ТЗ для руху дорогою, з огляду на надбавку на цю потужність, необхідну для забезпечення роботи додаткового обладнання ТЗ (наприклад, кондиціонера), та компенсації неефективності двигуна:

$$FC = f(P_{зч}, P_{обл} + P_{дв}) = \max(\alpha, \xi \cdot P_{заг} \cdot [1 + d_n]), \quad (5)$$

де  $FC$  – миттєва витрата палива, мл/с;  $P_{зч}$  – потужність, необхідна для зчеплення з дорожнім покриттям, кВт;  $P_{обл}$  – потужність, необхідна для роботи додаткового обладнання ТЗ, кВт;  $P_{дв}$  – потужність, необхідна для подолання внутрішнього тертя в двигуні ТЗ, кВт;  $\alpha$  – витрата пального на холостому ходу, мл/с;  $\xi$  – ефективність двигуна, мл/кВт/с;  $P_{заг}$  – загальна необхідна потужність двигуна, кВт;  $d_n$  – наднормативна витрата палива, спричинена заторами, мл/с.

Точність результатів, отриманих за допомогою формули (5), залежить від того, наскільки використані в моделі дані відповідають

реальним умовам експлуатації та наскільки прогнози моделі адекватно враховують взаємодію між різними факторами в умовах її застосування.

Для кожної категорії ТЗ паливні витрати розраховуються окремо для різних режимів руху та ділянок з підйомами і спусками, після чого отримані результати усереднюються для отримання єдиного середньозваженого показника.

Перевага HDM-4 полягає в наявності довідкової інформації щодо типових характеристик і умов експлуатації вантажних ТЗ різних категорій, їх класифікація в HDM-4 є достатньо деталізованою, табл. 1.

Кількість витрати пального є суттєвою часткою загальних експлуатаційних витрат автомобіля.

Модель розрахунку споживання палива, що використовується в HDM-4, базується на методології ARFCOM, яка враховує пропорційність витрат палива до загальної потужності двигуна ТЗ. Результатом цього процесу є вирахування середньої річної витрати палива в літрах на 1000 кілометрів пробігу для кожного типу ТЗ.

Такий показник зазвичай необхідний для звітів дорожніх агентств. Для отримання точної інформації рекомендується використовувати певні експлуатаційні характеристики для кожної категорії (табл. 2).

Ще одна методика визначення рівня споживання палива дорожніми ТЗ подана в документі «Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports» (EcoTransIT World – ETW), створеному в межах ініціати-ви EcoTransIT, що спрямована на розроблення загальноновизначених інструментів для визначення рівня впливу транспорту на довкілля.

ETW здебільшого орієнтована на міжнародні та міжміські вантажні перевезення. Зазвичай вони здійснюються вантажними автопоїздами з обмеженням ваги брутто до 40 тонн у більшості країн Європи (до 60 тонн у Швеції та Фінляндії) і до 80 000 фунтів на шосе в США.

Для спеціальних перевезень передбачено використання інших типів вантажних автомобілів. Класифікація вантажівок за повною масою, яка використовується в ETW, наведена в табл. 3 [12].

Таблиця 1 – Типові категорії вантажних ТЗ та їх характеристики за замовчуванням у HDM-4

Категорія ТЗ	Загальний опис	Вид палива	Кількість осей	Кількість коліс	Споряджена маса, т	Повна маса, т
Автомобіль для перевезення дрібно-партійних вантажів	Малі фургони та пікапи	бензин	2	4	1,3	1,5
Малий вантажний автомобіль	Легкий вантажний автомобіль для перевезення вантажів (зазвичай 4-колісний)	бензин	2	4	0,9	1,5
Легкий вантажний автомобіль	Невеликий двовісний вантажний автомобіль з повною масою до 3,5 т	дизельне паливо	2	4	1,8	2,0
Середній вантажний автомобіль	Середній двовісний вантажний автомобіль з повною масою більше ніж 3,5 т	дизельне паливо	2	6	4,5	7,5
Важкий вантажний автомобіль	Багатовісний вантажний автомобіль	дизельне паливо	3	10	9,0	13,0
Зчленований вантажний автомобіль	Зчленований вантажний автомобіль, вантажівка з причепом, автопоїзд	дизельне паливо	5	18	11,0	28,0

Таблиця 2 – Основні експлуатаційні характеристики категорій ТЗ

Характеристика	Легкий вантажний автомобіль	Середній вантажний автомобіль	Важкий вантажний автомобіль, автопоїзд
Річний пробіг, км	50000	90000	80000
Середня тривалість експлуатації, р.	10	12	8

Таблиця 3 – Класифікація вантажівок у ETW

Європейський Союз та Японія	США (Environmental Protection Agency (EPA) – Агенція із захисту НС), фунтів
від 3,5 т до 7,5 т	8,500–16,000
від 7,5 т до 12 т	16,000–26,000
від 12 т до 20 т	26,000–44,000
від 20 т до 26 т	44,000–60,000
від 26 т до 40 т	60,000–80,000
від 44 т до 60 т	понад 100,000

Основними джерелами інформації для визначення кінцевого споживання енергії в ETW є Handbook emission factors for road transport (HBEFA) для вантажних автомобілів, що експлуатуються в ЄС, та модель MOVES для американського стандарту EPA.

Вплив коефіцієнта використання вантажності моделюється відповідно до «Handbook Emission Factors for Road Transport» (HBEFA). Це означає, що витрата палива порожнього автомобіля може бути приблизно на третину меншою за повністю завантажений транспортний засіб. Такий вплив може збільшуватися залежно від умов руху та градієнтів дороги. Споживання енергії та рівень викидів також залежать від моделі, що використовується для визначення руху. У ETW розглядаються дві основні моделі: одна для міських поїздок, інша для міжміських. А втім, частка міського руху в загальних міжміських перевезеннях зазвичай є незначною [12].

Іншим параметром є градієнт висот, який враховує топографічні особливості країн, класифікуючи їх як «рівнинні», «горбисті» або «гірські». Наприклад, у таких країнах, як Німеччина, Швейцарія та Австрія, цей параметр призводить до збільшення споживання енергії та рівня викидів важкими транспортними засобами на 5–10 %. Водночас у таких «рівнинних» країнах, як Данія, Нідерланди та Швеція, цей фактор знижує споживання енергії приблизно на 5 %.

Енергоспоживання та рівень викидів вантажівок у моделі ETW залежать від питомих витрат енергії на кожен кілометр пробігу і збільшуються зі зростанням використання вантажопідйомності. Таким чином, енергоспоживання на 1 км є функцією потужності автомобіля. Для визначення обсягів викидів шкідливих речовин на міжміських дорогах існує менша кількість напрацьованих методик, більшість з яких ґрунтуються на емпіричних даних.

Одним із поширених підходів до визначення рівня викидів автотранспорту є мето-

дологія, наведена в ETW, що ґрунтується на європейських екологічних стандартах, які застосовуються для регулювання викидів у багатьох країнах світу. Аналогічними міжнародними стандартами є норми викидів, затверджені Агентством з охорони довкілля США (EPA), а також японські екологічні стандарти.

В ETW, крім розміру ТЗ, важливим параметром, що визначає викиди автомобіля, є їхня інтенсивність. На європейському автотранспорті використовуються різні стандарти (від Euro I до Euro VI). Стандарт Pre-EURO не є актуальним на сьогодні для більшості перевезень на великі відстані, і тому він не вміщений до методології ETW.

Хоча більшість країн певною мірою використовують стандарти викидів ЄС або подібні до них, процес регулювання викидів все ще відрізняється в різних державах та регіонах. Тому згідно з ETW кожна країна (регіон) має використовувати власний усталений стандарт викидів.

Вміст сірки в дизельному паливі передбачено приймати відповідно до чинного законодавства. Коефіцієнти прямих викидів SO<sub>2</sub> визначаються вмістом сірки в паливі. Для Європи значення становить 10 ppm = 0,47 кг/ТДж. У певних країнах це значення є вищим та досягає 5000 проміле або навіть 8000 проміле (Іран) [12].

У попередній версії ETW стандарт Euro-V використовувався як усталений глобальний стандарт викидів [12]. Для країн ЄС доцільно застосовувати саме Euro-V, оскільки ТЗ, що відповідають цьому стандарту, вже використовуються на європейському ринку. У випадку інших країн рекомендується враховувати регіональні стандарти викидів або, як мінімум, використовувати Euro-II для розрахунків.

До цього часу типовий розмір вантажівки в ETW становив повну масу в межах 26–40 т, що є найбільш поширеним класом вантажівок у ЄС та в деяких інших країнах світу. Винятком є Швеція, де частіше використовуються надвеликі вантажівки, масою до 60 т. У деяких країнах країн більш популярними є менші вантажівки, тому в ETW вбудовано інструмент, що дозволяє враховувати розміри вантажівки для різних країн [12].

Дані для цих розмірів використовувались згідно з Євростатом, базою даних TRACCS, вони були перевірені відповідно до законодавства про допустимий розмір вантажних автомобілів для експлуатації на дорогах загального користування в різних країнах.

Для країн, що не належать до ЄС, використовувались експертні аналізи, які доповнювались внутрішніми даними перевізників, що працюють у відповідних регіонах.

За результатами аналізу публікацій можна стверджувати, що на сьогодні немає єдиної методології визначення рівня витрат палива вантажним транспортом різних видів на рівні транспортної системи країни. Найбільш розповсюджені методики засновані на стандартизації експлуатаційних характеристик ТЗ або використанні емпіричних даних про роботу ТЗ в різних умовах. Для визначення рівня споживання палива транспортною системою України та кількості викидів шкідливих речовин в атмосферу доцільно буде розробити спеціальний підхід, заснований на даних статистичної звітності, з огляду на світовий досвід з використанням відомих методик.

#### **Мета та постановка завдання**

Аналіз споживання пального та викидів ПГ вантажними автомобільними засобами має ґрунтуватися на питомих показниках споживання пального та викидів на автомобіле-кілометр (АКМ) пробігу. Це зумовлено тим, що інформація про обсяги транспортної роботи, подана в державній статистиці, не завжди є достовірною через добровільний тип звітування та відсутність законодавчої нормативної бази.

Для визначення рівня витрат пального та викидів ПГ вантажним автотранспортом доцільно розподілити ТЗ на дві категорії – легкі та важкі вантажні ТЗ.

#### **Методика визначення рівня витрат палива та викидів ПГ вантажним автомобільним транспортом**

Для вирішення завдання визначення рівня витрат палива вантажним автопарком України була розроблена методика, якає передбачає здійснення такого переліку дій:

- збір статистики про кількість вантажних ТЗ в автопарку України;
- збір статистики щодо складу вантажного автопарку України;
- отримання регресійної залежності для прогнозування кількості вантажних ТЗ станом на момент здійснення даної роботи;
- визначення загальної кількості АКМ, подоланих вантажним автопарком України;
- визначення усередненої питомої витрати палива на АКМ вантажними ТЗ;
- визначення річних витрат палива вантажним автопарком України;

– визначення річних викидів ПГ вантажним автопарком України.

Під час процесу розрахування в межах наведеного переліку дій мають використовуватись усереднені дані для всієї країни, тобто має бути усереднений аналіз перелічених показників на АКМ. Крім того, для здійснення третього етапу методики необхідна інформація в річному розрізі за декілька років.

Для здійснення зазначених етапів були розроблені такі передумови:

а) статистику щодо структури автопарку за типами ТЗ можна отримати з публікацій Державної служби статистики України «Транспорт і зв'язок України» [13];

б) для визначення середньорічного пробігу середнього вантажного ТЗ доцільно скористатись референтними характеристиками типів ТЗ з HDM-4, оскільки в українських джерелах відсутня така інформація;

в) для визначення рівня витрати пального на АКМ пропонується скористатись референтними характеристиками вантажних ТЗ, наявних в європейських методиках з наступним корегуванням на характеристики національного автопарку.

Під час аналізу рівня викидів ПГ можливий перехід від основних забруднюючих речовин CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO до CO<sub>2</sub>-е способом поділу обсягу викидів CO<sub>2</sub> на 0,989. Цей коефіцієнт отриманий зі звіту Агентства США з охорони НС (EPA) [13].

Якщо а відомий обсяг спожитого пального для кожного типу ТЗ та АКМ, можна розрахувати загальне споживання пального та викидів ПГ вантажним автопарком України.

#### **Збір інформації та визначення рівня обсягу витрат палива та викидів ПГ вантажним автомобільним транспортом**

Інформація щодо чисельності автопарку вантажних ТЗ в Україні була знайдена в збірниках Державної служби статистики України «Транспорт і зв'язок». Ці збірники є єдиними доступними та придатними для використання джерелами інформації [14–18].

Водночас у збірнику «Транспорт і зв'язок України 2018» [14] відсутня актуальна інформація про чисельність як вантажного автопарку, так і про кількість будь-яких автотранспортних засобів.

Це спричинило потребу пошуку необхідної інформації, під час якого було встановлено, що статистичні дані про кількість автотранспорту в країні не надавались Держа-

вною службою статистики з 2015 року [15]. У збірнику «Транспорт і зв'язок України 2014» [17] наявна інформація про кількість автотранспортних засобів, зокрема вантажних ТЗ, у нашій державі з 2000 р.

Аналіз збірників за попередні роки [16–18] дозволив визначити масив інформації про кількість вантажних автомобілів в Україні за їхніми видами в річному розрізі за період з 2000 р. по 2011 р. Ця інформація наведена в табл. 4.

Зазначені в табл. 4 типи вантажних ТЗ доцільно об'єднати в більш укрупнені групи, поділивши всі ТЗ на легкі та важкі вантажні автомобілі.

Згідно з результатами проведеного аналізу у вітчизняній класифікації існує окрема група сідлових тягачів, тобто важких вантажних автомобілів, а також група легких вантажних автомобілів з усередненими характеристиками споживання палива та викидів парникових газів.

З метою прогнозування кількості легких та важких вантажних автомобілів в Україні станом на сьогодні з використанням регресійного аналізу визначено, що для визначення тренду до зміни кількості сідлових тяга-

чів можна використовувати таку лінійну залежність:

$$N_{CT} = -10513,446 + 5,282 \cdot x, \quad (6)$$

де  $x$  – рік, для якого розраховується прогнозна кількість сідлових тягачів.

Наведена регресійна модель має переконливі статистичні характеристики, що підтверджується даними табл. 5.

Для визначення тренду до зміни загальної кількості вантажних автомобілів найбільш придатною є така поліноміальна модель:

$$N_{BA} = 17291067,584 - 17268,12 \cdot x + 4,312 \cdot x^2. \quad (7)$$

Отримана модель також визначається прийнятними статистичними характеристиками (табл. 6).

З використанням отриманих регресійних моделей була визначена кількість вантажних ТЗ в Україні в 2020 році:

- кількість важких вантажних автомобілів дорівнює 156500 од.;
- загальна кількість вантажних автомобілів дорівнює 2164600 од.

Таблиця 4 – Статистична кількість вантажних автомобілів в Україні за період 2000–2011 рр.

Рік	Кількість вантажних автомобілів				
	бортових	самоскидів	сідлових тягачів	спеціальних вантажних	загальна
2000	286400	245500	52200	160600	837500
2001	297500	243600	57600	190200	871500
2002	308600	241700	63000	219800	905500
2003	319800	239700	68500	311500	939500
2004	319900	214600	75000	308000	917500
2005	308900	208000	71500	300000	888500
2006	302400	207900	79000	320800	910200
2007	297800	199900	82700	341800	922100
2008	335100	201200	94900	345000	976200
2009	300800	200700	95800	338000	935300
2010	307700	199800	99500	338200	945200
2011	302900	207200	119600	708200	1337900

Таблиця 5 – Статистична характеристика моделі прогнозування кількості сідлових тягачів в Україні

Показник моделі	Значення
Множинний коефіцієнт кореляції $R$	0,972
$R$ -квадрат	0,945
Нормований $R$ -квадрат	0,940
Стандартна помилка	4,812
Кількість спостережень	12
Інформаційна здатність моделі	$1,250 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 6 – Статистична характеристика моделі прогнозування загальної кількості вантажних автомобілів в Україні

Показник моделі	Значення
Множинний коефіцієнт кореляції $R$	0,779
$R$ -квадрат	0,607
Нормований $R$ -квадрат	0,520
Стандартна помилка	91,637
Кількість спостережень	12
Інформаційна здатність моделі	$1,494 \cdot 10^{-2}$

Відповідно до цього категорія легких вантажних автомобілів становить 2008100 од. ТЗ. За умови відсутності відкритої офіційної статистики цю інформацію можна використовувати для орієнтовного аналізу рівня викидів ПГ та кількості палива, спожитого вантажними автотранспортними засобами.

З метою визначення загальної кількості АКМ, подоланих вантажним автопарком України, був здійснений пошук референтних усереднених значень пробігу вантажних ТЗ. В описі до моделі HDM була зазначена така інформація щодо цього:

- для легких вантажних автомобілів пробіг становить 50000–90000 км;
- для важких вантажних автомобілів – 80000 км [19].

Ця інформація порівнювалась з показниками фактичної експлуатації вантажівок. Для цього було використано єдиний доступний параметр середньорічного пробігу вантажних автомобілів, наведений у дослідженні [20]. Відповідно до інформації дилера «DAF TRUCKS» в Україні середній пробіг вантажівки DAF в країні становить орієнтовно 116 000 км на рік. Такий показник є приблизним, оскільки це відповідає показнику 10 000 км щомісяця, що узгоджується із законодавчими нормами праці та відпочинку водіїв. Щоб перевірити можливість застосування цих показників у нашій роботі, вони були порівняні з показниками пробігу за даними Департаменту енергетики США [21]. Таким чином, було визначено, що пробіг українських вантажівок подібний до пробігу вантажівок у США (62571 миля), що вказує на доцільність корегування наведеної в HDM інформації про середньорічний пробіг важких вантажних автомобілів. Аналогічне порівняння було здійснене і для легких вантажних автомобілів, було визначено, що їх пробіг у США становить 11543 милі [21], і це також свідчить про можливість корегування даних HDM.

У процесі пошуку референтних значень питомого споживання палива вантажними ТЗ визначено, що в європейських країнах для прогнозних розрахунків на національному рівні використовуються скореговані значення з моделі HDM, які для використаної у цій роботі класифікації ТЗ складають такі показники:

- для легких вантажних автомобілів – 19,4 л/100 км (що є середнім значенням з діапазону (15,5–23,33) л/100 км) [11];
- для важких вантажних автомобілів – 26,5 л/100 км [12, 22].

Для визначення рівня річних викидів ПГ вантажним автопарком України були знайдені питомі викиди парникових газів: згідно з [23] викиди ПГ на 1 км пробігу вантажних автомобілів можна прийняти згідно з табл. 7 та 8.

Таблиця 7 – Питомі викиди парникових газів легкими та важкими вантажними автомобілями

Забрудник	Питомі викиди, г/км	
	легкими вантажними автомобілями	важкими вантажними автомобілями
CO <sub>2</sub>	208,8	721,1
NO <sub>x</sub>	0,773	0,890
PM	0,00438	0,01135

Таблиця 8 – Усереднений річний пробіг вантажних ТЗ

Вид ТЗ	Усереднений пробіг, км/рік
легкий вантажний автомобіль	55000
важкий вантажний автомобіль	90000

Для визначення річного пробігу вантажних ТЗ можна скористатися кількістю ТЗ та усередненою величиною річного пробігу кожного з них. Таким чином, річний пробіг легких та важких вантажних автомобілів в Україні становить:

$$L_{\text{рiчВЛ}} = 2008100 \cdot 55000 = 110445500000 \text{ км.}$$

$$L_{\text{рiчВВ}} = 156500 \cdot 90000 = 14085000000 \text{ км.}$$

Для визначення річних витрат палива вантажними ТЗ отримані пробіги потрібно помножити на відповідні їм питомі витрати палива:

$$ВП_{\text{ВЛ}} = \frac{110445500000}{100} \cdot 19,4 = 21426427000 \text{ л.}$$

$$ВП_{\text{ВВ}} = \frac{14085000000}{100} \cdot 26,5 = 3732525000 \text{ л.}$$

Згідно з отриманими значеннями пробігів та наявними в табл. 7 питомими викидами ПГ на кілометр шляху можна визначити загальний річний обсяг викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря, перемноживши ці величини:

$$\begin{aligned} ПГ_{\text{ВЛCO}_2} &= \frac{110445500000 \cdot 208,8}{1000000} = \\ &= 23061020,4 \text{ т,} \end{aligned}$$



$$ПГ_{ВЛ\text{NO}_x} = \frac{110445500000 \cdot 0,773}{1000000} = 85374,4 \text{ т,}$$

$$ПГ_{ВЛ\text{PM}} = \frac{110445500000 \cdot 0,00438}{1000000} = 483,8 \text{ т,}$$

$$ПГ_{ВВ\text{CO}_2} = \frac{14085000000 \cdot 721,1}{1000000} = 10156693,5 \text{ т,}$$

$$ПГ_{ВВ\text{NO}_x} = \frac{14085000000 \cdot 0,89}{1000000} = 12535,7 \text{ т,}$$

$$ПГ_{ВВ\text{PM}} = \frac{14085000000 \cdot 0,01135}{1000000} = 159,9 \text{ т.}$$

Якщо нам відомі обсяги споживання палива та викидів шкідливих речовин за видами вантажних ТЗ, можна розрахувати загальні обсяги споживання палива та викидів ПГ вантажним автотранспортом України. Результати розрахунків цих величин наведені в табл. 9.

Таблиця 9 – Загальні обсяги споживання палива та викидів шкідливих речовин в атмосферу вантажними ТЗ України

Показник	Значення		
	легкі вантажні автомобілі	важкі вантажні автомобілі	всього
Загальний обсяг споживання палива, тис.л	21426427	3732525	25158952
Загальний обсяг викидів CO <sub>2</sub> , тис. т	23061,02	10156,69	33217,71
Загальний обсяг викидів NO <sub>x</sub> , т	85374,4	12535,7	97910,1
Загальний обсяг викидів PM, т	483,8	159,9	643,7

Згідно з інформацією табл. 9 наявний суттєвий вплив автотранспорту на довкілля, отже, можна дійти висновку про доцільність заходів щодо покращення екологічних характеристик ТЗ.

### Висновки

Розроблені методики визначення рівня споживання пального та викидів парникових газів вантажним транспортом різних видів в Україні дозволять отримати відсутні на сьогодні величини середньорічної потреби в паливі та обґрунтовані значення загальних викидів парникових газів вантажних ТЗ на національному рівні.

Згідно із проведеними дослідженнями загальний річний обсяг споживання палива вантажними автомобілями в транспортній системі України становить 25158952 тис. л, а загальний обсяг викидів шкідливих речовин в атмосферу – 33217,71 тис.т.

### Література

1. Шевцов А. І. Майбутнє людства необхідно спланувати: глобальні загрози і довгострокова стратегія розвитку України. *Стратегічні пріоритети*. 2007. № 1. С. 187–193.
2. Транспортна екологія: навчальний посібник / О. І. Запорожець та ін. Київ, 2017. 508 с.
3. Коблянська І. І. Онтологічна характеристика соціо-еколого-економічних взаємодій як основа для формування управлінських механізмів у цій сфері. *Економіка і суспільство*. 2017. № 13. С. 910–916.
4. Costanza R., Daly H., Bartholomew J. Goals, Agenda And Policy Recommendations for Ecological Economics. *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*. 1991. P. 1–20.
5. Екологічні аспекти автотранспортного комплексу: кол. моногр. Харків, 2020. 194 с.
6. Literature Review: the Impact of Pavement Roughness on Vehicle Operating Costs. Alabama, 2015. URL: <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep15-02.pdf> (дата звернення: 20.10.2024).
7. Організація технічної експлуатації автомобілів в умовах формування інтелектуальних транспортних систем / В. П. Волков. та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2013. №29. С. 138–144.
8. Hulbert, S., Mollan, C., and Pandey, V. Fault Diagnosis and Prediction in Automotive Systems With Real-Time Data Using Machine Learning. *SAE Technical Paper*. 2022. № 0217. 6 p. <https://doi.org/10.4271/2022-01-0217>.
9. Gong J., Shang J., Li L., Zhang C., He J., Ma J. A Comparative Study on Fuel Consumption Prediction Methods of Heavy-Duty Diesel Trucks Considering 21 Influencing Factors. *Energies*. 2021. №14(23). 18 p. <https://doi.org/10.3390/en14238106>
10. Kerali H. R., Odoki J. B., Stannard E. E. Overview of HDM-4. The Highway Development and Management Series. International Study of Highway Development and Management (ISOHDM). *World Roads Association (PIARC)*. Paris. 2006. 53 p.
11. Perrotta F., Parrya T., Neves L., Buckland T., Benbow E., Mesgarpour M. Verification of the HDM-4 Fuel Consumption Model Using a Big Data Approach: A UK case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019. № 67. P. 109–118.
12. Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports : Methodology and Data

- Update 2019. *Berne-Hannover-Heidelberg: Eco-TransIT World Initiative* (EWI). 2019. 117 p.
13. Transport Related Air Pollution and Health Impacts – Integrated Methodologies for Assessing Particulate Matter : Report on Railway Emission Factors «TRANSPHORM» Collaborative and Large-Scale Integrating Project; Erik Fridell (Ed.). Hertfordshire, 2014. 9 p. № 243406.
  14. Транспорт і зв'язок України 2018: статистичний збірник Державної служби статистики України. Київ, 2019. 154 с.
  15. Транспорт і зв'язок України 2015: статистичний збірник Державної служби статистики України. Київ, 2016. 186 с.
  16. Транспорт і зв'язок України 2014: статистичний збірник Державної служби статистики України. Київ, 2015. 204 с.
  17. Транспорт і зв'язок України 2013: статистичний збірник Державної служби статистики України. Київ, 2014. 204 с.
  18. Транспорт і зв'язок України 2012: статистичний збірник Державної служби статистики України. Київ, 2013. 269 с.
  19. Yogesh S. U., Jain S. S., Devesh T. Adaptation of HDM-4 Tool for Strategic Analysis of Urban Roads Network. *Transportation Research Procedia*. 2016. № 17. P. 71–80.
  20. Дослідження ринку вантажних автомобільних перевезень України за сучасних умов. URL: <https://logist.fm/publications/doslidzhennya-rinku-vantazhnih-avtomobilnih-perevezen-ukrayini-za-suchasnih-umov> (дата звернення: 20.10.2024).
  21. Average Annual Vehicle Miles Traveled by Major Vehicle Category. Alternative Fuels Data Center. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. URL: <https://afdc.energy.gov/data/widgets/10309> (Last accessed: 16.10.2024).
  22. Katreddi S., Thiruvengadam A. Trip Based Modeling of Fuel Consumption in Modern Heavy-Duty Vehicles Using Artificial Intelligence. *Energies*. 2021, №14. P. 12. <https://doi.org/10.3390/en14248592>.
  23. Murrells T., Murrells T., Rose R. Production of Updated Emission Curves for Use in the NTM and WebTAG : *Report for the Department for Transport* (NTM and WebTAG). Harwell. 2019. 57 p.
  4. Costanza, R., Daly, H., Bartholomew, J. (1991). Goals, Agenda And Policy Recommendations for ecological economics. *Ecological economics: The science and management of sustainability*. Pp. 1–20.
  5. *Ekolohichni aspekty avtotransportnoho kompleksu* [Environmental aspects of the automotive transport complex]: kol. monohr. Kharkiv, 2020. 194 p.
  6. Literature review: the impact of pavement roughness on vehicle operating costs. Alabama, 2015. URL: <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/necat/files/technical-reports/rep15-02.pdf> (accessed: 20.10.2024).
  7. Volkov, V. P., Mateichyk, V. P., Komov, P. B., Hrytsuk, I. V. (2013). Organization of technical operation of vehicles in the context of forming intelligent transport systems. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. № 29. Pp. 138–144.
  8. Hulbert, S., Mollan, C., and Pandey, V. (2022). Fault diagnosis and prediction in automotive systems with real-time data using machine learning. *SAE Technical paper*. № 0217. 6 p. <https://doi.org/10.4271/2022-01-0217>.
  9. Gong, J., Shang, J., Li, L., Zhang, C., He, J., Ma, J. (2021). A comparative study on fuel consumption prediction methods of heavy-duty diesel trucks considering 21 influencing factors. *Energies*. №14(23). 18 p. <https://doi.org/10.3390/en14238106>.
  10. Kerali, H. R., Odoki, J. B., Stannard, E. E. (2006). Overview of HDM-4. The highway development and management series. international study of highway development and management (ISOHDM). *World roads association* (PIARC). Paris. 53 p.
  11. Perrotta, F., Parry, T., Neves, L., Buckland, T., Benbow, E., Mesgarpour, M. (2019). Verification of the HDM-4 fuel consumption model using a big data approach: A UK case study. *Transportation research part D: Transport and environment*. № 67. P. 109–118.
  12. Ecological transport information tool for worldwide transports : methodology and data update 2019. *Berne-Hannover-Heidelberg: EcoTransIT World Initiative* (EWI). 2019. 117 p.
  13. Transport related air pollution and health impacts – integrated methodologies for assessing particulate matter : Report on railway emission factors «TRANSPHORM» Collaborative and large-scale integrating project; Erik Fridell (Ed.). Hertfordshire, 2014. 9 p. № 243406.
  14. *Transport i zviazok Ukrainy* 2018 [Transport and communication of Ukraine 2015]: State statistics service of Ukraine. Kyiv, 2019. 154 p.
  15. *Transport i zviazok Ukrainy* 2015 [Transport and communication of Ukraine 2015]: State statistics service of Ukraine. Kyiv, 2016. 186 p.
  16. *Transport i zviazok Ukrainy* 2014 [Transport and communication of Ukraine 2015]: State statistics service of Ukraine. Kyiv, 2015. 204 p.

### References

1. Shevtsov, A. I. (2007). The future of humanity must be planned: global threats and a long-term development strategy for Ukraine. *Stratehichni priorityety*. № 1. Pp. 187–193.
2. Zaporozhets, O. I., Boichenko, S.V., Matvieieva, O. L., Shamanskyi, S. I., Dmytrukha, T. I., Madzhd, S. M. (2017). *Transportna ekolohiia* [Transport ecology]. Kyiv. 508 p.
3. Koblianska, I. I. (2017). Ontological characteristics of socio-ecological-economic interactions as a basis for the formation of management mechanisms in this field. *Ekonomika i suspilstvo*. № 13. Pp. 910–916.

17. *Transport i zviazok Ukrainy 2013* [Transport and communication of Ukraine 2015]: State statistics service of Ukraine. Kyiv, 2014. 204 p.
18. *Transport i zviazok Ukrainy 2012* [Transport and communication of Ukraine 2015]: State statistics service of Ukraine. Kyiv, 2013. 269 p.
19. Yogesh, S. U., Jain, S. S., Devesh, T. Adaptation of HDM-4 tool for strategic analysis of urban roads network. *Transportation research procedia*. 2016. № 17. P. 71–80.
20. *Doslidzhennia rynku vantazhnykh avtomobilnykh perevezen Ukrainy za suchasnykh umov* (Market research of freight road transport in Ukraine under modern conditions) URL : <https://logist.fm/publications/doslidzhennya-rynku-vantazhnykh-avtomobilnykh-perevezen-ukrayini-za-suchasnykh-umov> (accessed 20.10.2024).
21. Average annual vehicle miles traveled by major vehicle category. Alternative fuels data center. *Office of energy efficiency & renewable energy*. URL: <https://afdc.energy.gov/data/widgets/10309> (accessed 16.10.2024).
22. Katreddi, S., Thiruvengadam, A. (2021). Trip based modeling of fuel consumption in modern heavy-duty vehicles using artificial intelligence. *Energies*. №14. P. 12. <https://doi.org/10.3390/en14248592>
23. Murrells, T. Murrells, T., Rose, R. (2019). Production of updated emission curves for use in the NTM and WebTAG: *Report for the department for transport* (NTM and WebTAG). Harwell. 57 p.

**Свiчинський Станiслав Валерiйович**, к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем i логiстики, [stas\\_svichinsky@ukr.net](mailto:stas_svichinsky@ukr.net), тел. +38 050-609-00-00,

**Свiчинська Ольга Володимирiвна**, к.т.н., доцент кафедри транспортних систем i логiстики, [svichinskayaolga@gmail.com](mailto:svichinskayaolga@gmail.com), тел. +38 050-993-19-97.

Харкiвський нацiональний автомобiльно-дорожнiй унiверситет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харкiв, 61002, Україна.

### Assessment of the Environmental Impact of Passenger Road Transport Fleet in Ukraine

**Abstract. Problem.** Today, humanity is increasingly aware of the consequences of its impact on the environment, necessitating urgent solutions to a range of ecological problems. In this context, there is growing attention to the ecological aspects of decision-making regarding various project implementations. This trend is also reflected in the planning of transportation systems. Designers in Western European

countries, guided by the EU Directive on environmental management and the ISO 14001 environmental management system regulation, always take into account the expected energy consumption and the impact of projects on ecosystems. Currently, in Ukraine, only general information about the environmental state is available, highlighting the need for a more detailed analysis of fuel consumption and the impact of the transportation system on living conditions. This article is dedicated to studying this issue. **Goal.** The purpose of this article is to develop an approach for assessing the environmental impact of freight road transport in Ukraine based on relevant modern European methodologies for evaluating fuel consumption and greenhouse gas emissions. **Methodology.** The assessment of fuel consumption and greenhouse gas emissions from freight vehicles should be based on specific indicators per vehicle-kilometer. This is due to the fact that the data on transport work volumes, presented in state statistics, are not always reliable because of the voluntary nature of reporting and the lack of a legislative framework. For a more accurate assessment, it is advisable to divide freight vehicles into two categories: light and heavy. The methodology for analyzing fuel consumption and greenhouse gas emissions is based on modern models, particularly the HDM-4 model, which is one of the most widely used for such calculations. **Results.** The developed approach allowed for the determination of total fuel consumption and greenhouse gas emissions from freight road transport on a national scale. **Originality.** For the first time, approximate current data on the environmental impact of the entire freight vehicle fleet in the transportation system of Ukraine has been obtained. **Practical value.** The obtained figures for fuel consumption and greenhouse gas emissions from freight transport can be used by government authorities for the ecological assessment of scenarios for the development of Ukraine's transportation system. **Keywords:** transport system, road transport, freight transport, environment, emissions, fuel consumption, greenhouse gases, transport ecology.

**Svichynskyi Stanislav**, PhD, associate professor at the Transport Systems and Logistics Department, [stas\\_svichinsky@ukr.net](mailto:stas_svichinsky@ukr.net), tel. +38 050-609-00-00, **Svichynska Olha**, PhD, associate professor at the Transport Systems and Logistics Department, [svichinskayaolga@gmail.com](mailto:svichinskayaolga@gmail.com), tel. +38 050-993-19-97. <sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.