

ЕКОЛОГІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ОБСЯГІВ ВИКИДІВ ДИСПЕРГОВАНОЇ САЖІ ПОТОКАМИ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Шелудченко Л.С., Комарницький С.П., Замойський С.М., Теренов Д.Б.

Подільський державний аграрно-технічний університет
вул. Шевченка, 13, 32316, м. Кам'янець-Подільський
seludcenkolesa@gmail.com

Наведено результати аналітичного оцінювання обсягів утворення й емісії сажі (технічного вуглецю), яка диспергована в атмосферному повітрі, що продукується потоками автотранспортних засобів, залежно від інтенсивності та щільності потоку, а також від частки транспортних засобів, які обладнані дизельними двигунами. *Ключові слова:* автомобільна дорога, сажа, дизельний двигун, потік автотранспортних засобів.

Экологическая оценка количества выбросов диспергированной сажи потоками автотранспортных средств. Шелудченко Л.С., Комарницкий С.П., Замойский С.М., Теренов Д.Б. Приведены результаты аналитической оценки объемов образования эмиссии сажи (технического углерода), диспергированной в атмосферном воздухе, которая произведена автотранспортными потоками, в зависимости от интенсивности и плотности потока, а также доли транспортных средств, оборудованных дизельными двигателями. *Ключевые слова:* автомобильная дорога, сажа, дизельный двигатель, поток автотранспортных средств.

Environmental assessment of the scattered emissions of soot from vehicles. Sheludchenko L., Komarnitsky S., Zamoysky S., Terenov D. The results of analytical estimation of volumes of formation and emission of carbon black (carbon black) dispersed in atmospheric air, which is produced by motor transport flows, depending on the intensity and density of the flow, as well as the share of vehicles equipped with diesel engines. *Key words:* road, soot, diesel engine, specific output transport stream.

Постановка проблеми. Забруднюючі речовини, які викидаються автотранспортними засобами, є суттєвим джерелом негативного впливу на здоров'я людей та природні системи в зоні впливу автомобільної дороги. Особливо небезпечними забруднювачами придорожніх територій із понад 200 компонентів, які викидаються разом із вихлопними газами автомобіля, є вуглеводні, альдегіди, мінеральний пил, сажа (технічний вуглець) та важкі метали [1]. Загалом склад відпрацьованих газів залежить від виду пального, яке використовується транспортними засобами, присадок і масел, режимів роботи двигуна, його технічного стану, умов руху автомобіля. Саме тому для проведення екологічної оцінки впливу автотранспортних засобів на довкілля велику увагу варто приділяти не лише автотранспортному потоку, але і частці автотранспортних засобів, які обладнані дизельними двигунами.

Актуальність дослідження. Відпрацьовані гази бензинових двигунів небезпечні через наявність карбон(II) оксиду та нітроген оксиду, а до викидів дизельних двигунів додається сажа. Дизельні двигуни мають як переваги, так і недоліки. До переваг варто віднести високу надійність, економічність пального (30–40%), а до недоліків – велику вагу і розміри (за умови однакової потужності з карбюраторними двигунами), підвищення шуму у процесі ек-

сплуатації, значні викиди сажі. Зауважимо, що сажа у своєму чистому вигляді нетоксична, але її частки мають велику адсорбційну активність, можуть нести на своїй поверхні токсичні речовини. Небезпечність її впливу на здоров'я людини полягає ще й у тому, що вона має здатність тривалий час бути в повітрі в межах впливу автомобільної дороги у зваженому стані, збільшуючи час впливу токсиканту на здоров'я людини, зокрема водія [2; 3].

Загалом розподіл використання пального у транспортному секторі Європейського Союзу (далі – ЄС) такий: на автотранспорт припадає приблизно 84%, на авіацію – 11%, на залізницю – 2,5%, на річковий транспорт – 2%. Отже, автомобільний транспорт є одним із найбільших пересувних забруднювачів довкілля, може розглядатися як екологічна загроза довкіллю [4; 5]. Саме тому у європейських країнах поступово посилюються вимоги Комітету з екологічної політики Європейської економічної комісії (далі – ЄЕК ООН) щодо токсичності відпрацьованих газів транспортних двигунів шляхом уведення норм токсичності вихлопу легкових автомобілів (г/км). В Україні дане питання є ключим, оскільки, орієнтуючись на природоохоронне законодавство ЄС, запроваджуються та застосовуються більш жорсткі заходи для зменшення небезпечних впливів автотранспорту на об'єкти навколишнього середовища, здоров'я людини.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Сажа є основним компонентом нерозчинних твердих викидів у відпрацьованих газах дизельних двигунів, яка утворюється за об'ємного піролізу (термічне розкладення) вуглеводнів у газоподібній (паровій) фазі дизельних палив в умовах недостачі кисню. Викиди дизельного двигуна мають характерний вигляд (рис. 1): чорний дим – сажа (частки вуглецю 0,1–0,3 мкм), що адсорбує органіку; білий дим – туман із парів пального, крапель води, альдегідів, який проявляється у вигляді перебоїв у системі запалювання на холостому ході і за малих навантажень; блакитний дим містить краплі C_mH_n , які утворюються після охолодження відпрацьованих газів.



Рис. 1. Викиди сажі дизельного двигуна автомобіля

Сажові частинки формуються у збагаченій дизельним паливом камері згоряння двигуна (особливо за безпосереднього вприскування пального в камеру згоряння – рис. 2), де недостатня кількість кисню для здійснення вихідного вуглеводню в CO_2 та H_2O [6].

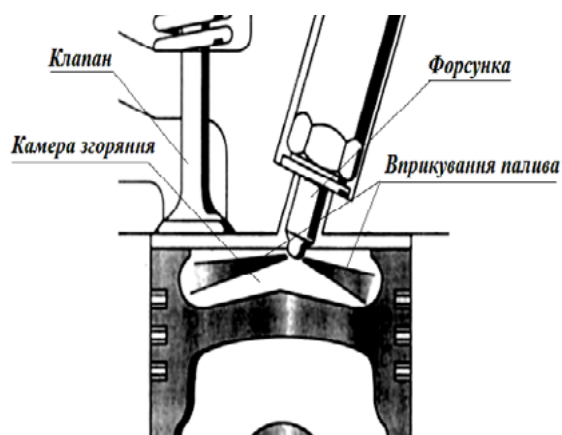


Рис. 2. Принципова схема вприскування пального в камеру згоряння дизельного двигуна

Загалом, процес утворення сажі складається з таких стадій [6]:

– утворення зародків розміром до 5 нм, які містять декілька атомів вуглецю, унаслідок піролізу вуглеводнів;

– збільшення (зростання) зародків до первинних частинок із майже сферичною (або ланцюговою) формою, містять понад 3×10^5 атомів вуглецю;

– утворення сажових агломератів (кластерів), які містять іноді понад 500 первинних частинок (сферул) із діаметром до 100 нм;

– коагуляція кластерів до складних утворень – конгломератів із розміром від 10–20 нм до 300 нм із вмістом 95,6% вуглецю та 4,2% водню, що відповідає хімічній формулі C_8H_4 .

Саме тому для вирішення практичного завдання щодо зменшення негативного впливу викидів сажі від частки потоку транспортних засобів, які обладнані дизельним двигуном, необхідно дати наукове обґрунтування всіх стадій механізму утворення сажі, провести аналітичне оцінювання щодо встановлення обсягів викидів диспергованої сажі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання вивчення впливу та захисту від негативного впливу автотранспортного комплексу на навколишнє середовище активно вивчають вітчизняні та закордонні науковці. Однак специфіка підходу до вирішення цієї проблеми різниться залежно від масштабу проблеми країн у даній галузі, їхньої технологічної та, як наслідок, екологічної спрямованості. До проблем системи «автомобіль – дорога – середовище», на вивчення яких спрямовані вітчизняні науковці, зазвичай належать такі: захист автомобільної дороги від зовнішніх погодних-кліматичних впливів, як-от снігові та піщані перементи проїжджої частини, гідрологічний та протилітний захист, підвищення міцності схилів та насипів тощо. Зокрема, вагомі результати щодо проблем екологічної безпеки автотранспортного комплексу зазначені у працях Н.В. Внукової (розроблення науково-методологічних основ екологічної безпеки комплексу «автомобіль – дорога – середовище»), Г.І. Рудька й О.М. Адаменка (визначення основних принципів конструювання ландшафтів природно-техногенних геоекосистем із розвинутою автотранспортною мережею), В.М. Шмандія (управління екологічною безпекою), С.М. Степаненка (дослідження міграційних та дифузійних процесів газо-пилових повітряних аерозолів, зокрема викидів, які продукуються автотранспортними потоками). Досвід закордонних науковців переважно спрямовується на вирішення таких проблем, як: використання безпечних хімічних сумішей для боротьби з обледенінням дорожнього покриття автомобільної дороги; зменшення фрагментації природних екосистем тощо. Отже, питання визначення впливу автотранспортних засобів, які обладнані дизельними двигунами, у потоці різної інтенсивності шляхом визначення кількості викидів диспергованої сажі є актуальним і потребує вивчення.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Систему «автомобіль – дорога – середовище» ми визначаємо як когерентно-адитивну (ціліс-

но-незалежну). Оскільки всі її елементи, з одного боку, пов'язані між собою так, що зміна в одному веде до зміни в іншому, і, як наслідок, до змін в усій системі (когерентність). З іншого боку, фізична адитивність (незалежність) даної системи полягає у незалежності функціонування її компонентів так, що зміна в кожному елементі залежить суто від його специфічних особливостей або характеристик. Дана робота полягає у визначенні кількості диспергової сажі, яка викидається в навколишнє середовище автотранспортними засобами, обладнаними дизельними двигунами.

Новизна. Наукова новизна результатів роботи полягає у досягненні екологічно безпечного функціонування системи «автомобіль – дорога – середовище», що передбачає системний підхід до розроблення концепції розвитку автотранспортного комплексу в межах конкретних природно-техногенних геоекосистем із розвинутою автотранспортною мережею.

Методологічне або загальнонаукове значення.

У камерах згоряння дизельних двигунів, порівняно із двигунами іскрового запалювання, локальні перенасичені палим зони утворюються значно частіше, отже, повною мірою реалізуються перелічені вище стадії утворення сажі. Утворення сажі залежить від властивостей пального, яке використовується: чим більше співвідношення C/H , тим більший вміст сажі у викидах. Маса кисню, який споживається з атмосфери, для повного згоряння пального [кг/кг_{пального}] становитиме [6; 7]:

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot \alpha \cdot l_0$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря в паливо-повітряній суміші; l_0 – стехіометричне число.

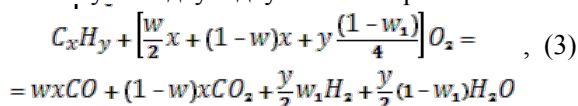
Коефіцієнт надлишку повітря є відношенням кількості повітря, яке міститься в паливо-повітряній суміші, G_n до його мінімальної кількості, яка теоретично потрібна для повного згоряння всього пального G_m суміші. Тобто:

$$\alpha = \frac{G_n}{G_T \cdot l_0}, \quad (2)$$

де G_m – годинна витрата палива (кг/год); $G_T \cdot l_0$ – мінімальна, теоретично необхідна для повного згоряння пального, кількість повітря (кг/год).

Якщо $\alpha = 1$, то паливо-повітряна суміш має стехіометричний (теоретичний) склад, якщо $\alpha > 1$ – суміш є збідненою, а якщо $\alpha < 1$, то суміш збагачена паливом. Для дизельних двигунів номінальний режим роботи характеризується показником $\alpha = 1,4 - 2,2$.

Коли кількість кисню менша за стехіометричну, то процес окислення буде неповним: частина вуглецю окислиться лише до CO , а частина водню взагалі не згорить. Окислення вуглеводневої молекули C_xH_y у загальному випадку відбувається за рівнянням:



де w – масова частка вуглецю, окисленого до CO ; w_1 – масова частка водню, який не згорів; x – маса вуглецю в молекулі пального; y – маса водню в молекулі пального.

Якщо знехтувати наявністю кисню, то для дизельного пального «умовна» молекула C_xH_y матиме молярну масу M_n [6]:

$$M_n = 1_2x + y. \quad (4)$$

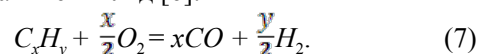
Відповідно до (4), у продуктах згоряння дизельного пального з'являється водень (H_2), який не згорів, та оксид вуглецю (CO). Тоді:

$$\begin{cases} N_{CO} + N_{CO_2} = x \\ N_{H_2} + N_{H_2O} = \frac{y}{2} \end{cases} \quad (5)$$

відповідно на 1 кг пального (кмоль):

$$\begin{cases} N_{CO} + N_{CO_2} = \frac{w_c}{1_2} \\ N_{H_2} + N_{H_2O} = \frac{w_H}{2} \end{cases} \quad (6)$$

Зі зменшенням кількості кисню у продуктах згоряння пального буде збільшуватися вміст CO та H_2 і зменшуватися вміст H_2O та CO_2 . За $w_1 = w = 1$ у продуктах згоряння буде міститися лише чадний газ CO та водень H_2 , який не згорів. Відповідне рівняння окислення матиме вигляд [6]:



Кількість кисню (кмоль) $NO_2 = x/2$ відповідає умові, за якої кількість атомів вуглецю дорівнює кількості атомів кисню, тобто $C/O = 1$. За подальшого зменшення вмісту кисню в паливо-повітряній суміші $C/O > 1$ у продуктах згоряння пального з'являється вуглець, який не згорів (сажа).

Відповідно до методики [6], обсяги викидів сажі автотранспортного засобу, обладнаного дизельним двигуном (кг/км), визначаються як:

$$M_s = B_s \cdot J_s, \quad (8)$$

де M_s – валовий викид сажі фізичним автотранспортним засобом, кг/км; B_s – питома кількість витраченого пального, кг/км; $J_s = 0,015_5$ – питома кількість викидів сажі, кг/кг.

Статистична усереднена питома кількість витрати дизельного пального окремим автотранспортним засобом, який обладнаний дизельним двигуном, становитиме $B_s = 0,5_5$ кг/км. Отже, з урахуванням інтенсивності потоку автотранспортних засобів N отримуємо значення M_s (кг/год × км):

$$M_s = \frac{B_s \cdot J_s \cdot N \cdot S}{24} = 3,55 \cdot 10^{-4} \cdot N \cdot S. \quad (9)$$

Виклад основного матеріалу. Результати розрахунку викидів сажі потоками автотранспортних засобів, які обладнано дизельними двигунами, встановлено на підставі формули (9) та наведено в таблиці 1.

Головні висновки. Отже, результати аналітичного оцінювання обсягів викидів диспергової сажі потоками автотранспортних засобів дозволяють встановити, що за наявності в автотранспортних

Обсяги викидів сажі автотранспортними потоками, кг/год × км

Категорія автомобільної дороги	Інтенсивність автотранспортного потоку, авт. / добу	Частка автомобілів у потоці автотранспортних засобів, які обладнано дизельними двигунами		
		$S < 5\%$	$5\% < S < 25\%$	$S \geq 25\%$
I-а, I-б	> 10 000	0,266	1,065	1,864
II	3 000–10 000	0,173	0,693	1,212
III	1 000–3 000	0,053	0,213	0,373
IV	150–1 000	0,017	0,070	0,122
V	< 150	0,023	0,107	0,187

потоках частки транспортних засобів, обладнаних дизельними двигунами, понад 25%, сажові викиди можуть досягати для автомобільних доріг категорій I-а та I-б – 1,86 кг/год × км, категорій II – 1,21 кг/год × км, категорій III – 0,37 кг/год × км.

Перспективи використання результатів дослідження. У процесі активного антропогенного впливу на об'єкти довкілля, первинні природно-територіальні комплекси практично перетворилися на природно-техногенні геоекосистеми (далі – ПТГЕС), екологічний стан яких визначається складною взаємодією людини та природи. Функціонування та рівновага такої системи визначається не лише її природними складовими частинами, але й штучними об'єктами, які забезпечують задоволення потреб суспільства, від розвитку транспортно-комунікацій-

ної системи також, зокрема автодорожньої мережі. Зона впливу автомобільної дороги поширюється на придорожні території, у межах яких проявляється негативний вплив. Загальне уявлення про граничну екологічну насиченість території автошляховою структурою та автотранспортними засобами характеризується автотранспортною ємністю цієї території, тобто здатністю ландшафту задовольняти транспортні потреби без порушення екологічної рівноваги, зокрема враховувати частку забруднення об'єктів довкілля сажею, яка привноситься автотранспортними засобами, обладнаними дизельними двигунами. Отже, аналіз потоку автотранспортних засобів є одним з основних методів управління екологічною безпекою ПТГЕС із розвинутою автотранспортною мережею.

Література

1. Шило В.В. Автомобиль глазами эколога. Харьков : Торнадо, 2002. 159 с.
2. Гутаревич Ю.Ф. Запобігання забрудненню повітря сажею. Київ : Урожай, 1982, 62 с.
3. Сажевые аэрозоли в верхней тропосфере: Свойства и последствия эмиссии / О.Б. Поповичева и др. Москва, 2005. 83 с.
4. Naumov V., Vnukova N., Zhelnowach G. Możliwość zastosowania sieci neuronowej do oceny bezpieczeństwa ekologicznego dróg na Ukrainie. *Budownictwo i Architektura* : Collection of Scientific Works. 2014. Vol. 17. P. 10–14.
5. Grytsenko A., Vnukova N., Barun M. Scientific bases of environmental security complex "Automobile-Road-Environment". *Sustainable Development*. 2014. Vol. 17. P. 10–14.
6. Луканин В., Трофименко Ю. Промышленно-транспортная экология : учебник для вузов / под ред. В. Луканина. Москва : Высшая школа, 2001. 273 с.
7. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів, затверджено наказом Держкомстату України від 13 листопада 2008 р. № 452. URL: <http://ukrstat.org/>.