

## АНАЛІТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ОБСЯГІВ ВИКИДІВ ДИСПЕРГОВАНОЇ САЖІ АВТОТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ

Шелудченко Л.С.

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

Наведено результати аналітичного оцінювання обсягів утворення сажі (технічного вуглецю) диспергованої в атмосферному повітрі, яка продукується автотранспортними потоками залежно від їх інтенсивності, частки транспортних засобів, обладнаних дизельними двигунами та категорії автомобільної дороги. *Ключові слова:* автодорога, сажа, твердий технічний вуглець, дизельний двигун, питомий викид, автотранспортний поток.

**Аналитическая оценка объемов выбросов диспергированной сажи автотранспортными потоками. Шелудченко Л.С.** Приведены результаты аналитической оценки объемов образования сажи (технического углерода) диспергированного в атмосферном воздухе, которая продуцирована автотранспортными потоками в зависимости от их интенсивности, доли транспортных средств, оборудованных дизельными двигателями, и категории автодороги. *Ключевые слова:* автодорога, сажа, твердый технический углерод, дизельный двигатель, удельный выброс, автотранспортный поток.

**Analytical estimation of volumes of emissions dispersed soot by motor flows. Sheludchenko L.** The results of analytical estimation of the amounts of soot (carbon black) dispersed in the atmospheric air, which is produced by the motor flows depending on their intensity, the share of vehicles equipped with diesel engines and category of the road. *Keywords:* road, soot, hard carbon black, diesel engine, specific output transport stream.

Одним із найсуттєвіших чинників впливу на природно-техногенні геокосистеми з щільною мережею автомобільних доріг є емісія забруднюючих речовин, які продукуються потоками автотранспортних засобів. Найнебезпечнішими забруднювачами придорожніх територій є Карбон(ІІ)оксид, Нітроген оксиди, вуглеводні, альдегіди, мінеральний пил та сажа (технічний вуглець), важкі метали тощо [1, 2, 4]. При цьому нерозчинні викиди відпрацьованих палив двигунів внутрішнього згоряння становлять

до 70-75% загальної маси твердих викидів, які продукують автотранспортні потоки, що призводять до суттєвого впливу не лише на об'єкти навколошнього середовища, але й здоров'я людини.

Сажа (твердий технічний аморфний вуглець) є основним компонентом нерозчинних твердих викидів у відпрацьованих газах дизельних двигунів (рис. 1).

Сажа утворюється при об'ємному піролізі (термічному розкладанні вуглеводнів в газоподібній (паровій) фазі дизельних палив в умовах нестатку

кисню. Сажові частинки формують у збагачений дизельним паливом камері згоряння двигуна (особливо при безпосередньому вприскуванні палива в камеру згоряння – рис. 2), де кількість кисню є недостатнім для здійснення вихідного вуглеводню в  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$  [1, 4]. Процес утворення сажі складається з стадій [2]:

- утворення зародків розміром до 5 нм, які містять кілька атомів вуглецю внаслідок піролізу вуглеводнів;
- збільшення (ростання) зародків до первинних частинок з майже сферичною (або ланцюговою) формою, які містять понад  $3 \times 10^5$  атомів вуглецю;
- утворення сажових агломератів (кластерів), які містять іноді понад 500 первинних часток (сферул) діаметром до 100 нм;



Рис. 1. Викиди сажі дизельного двигуна автомобіля

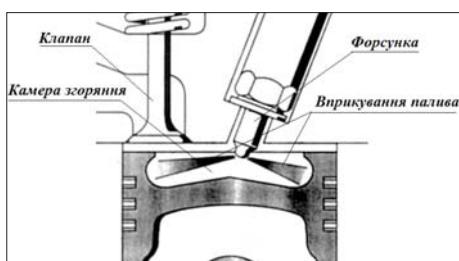


Рис. 2. Принципова схема безпосереднього вприскування палива в камеру згоряння дизельного двигуна

- коагуляція кластерів до складних утворень – конгломератів розміром від 10-20 нм до 300 нм з умістом вуглецю 95,6% та водню – 4,2%, що відповідає хімічній формулі  $\text{C}_8\text{H}_4$ .

#### Методика оцінювання викидів сажі автотранспортними потоками

У камерах згоряння дизельних двигунів порівняно з двигунами іскрового запалювання локальні перенасичені паливом зони утворюються значно частіше, а отже повною мірою реалізуються стадії сажоутворення. Утворення сажових викидів дизельних двигунів залежить від властивостей палива – чим більшим є співвідношення  $C/H$  у паливі, тим уміст сажі у відпрацьованих викидах більше. Маса кисню, який споживається з атмосфери, для повного згоряння палива [кг/кг палива] становитиме [1]:

$$m_{O_2} = 0,23 \cdot \alpha \cdot l_0, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря в паливо-повітряній суміші;

$l_0$  – стехіометричне число;

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

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

де  $G_m$  – годинна витрата палива [кг/год];

$G_m \cdot l_0$  – мінімальна, теоретично необхідна для повного згоряння палива, кількість повітря [кг/год].

Якщо  $\alpha=1$ , то паливо-повітряна суміш має стехіометричний (теоретичний) склад; якщо  $\alpha>1$  – суміш є збідненою, за  $\alpha<1$  суміш збагачена

паливом. Для дизельних двигунів номінальний режим роботи характеризується показником  $\alpha=1,4-2,2$  [1].

У випадку, коли кількість кисню буде меншою за стехіометричну, окислення буде неповним: частина вуглецю окислиться лише до  $CO$ , а частка водню взагалі не згорить. Окислення вуглеводневої молекули  $C_xH_y$  у загальному випадку відбувається за рівнянням:

$$C_xH_y + \left[ \frac{w}{2}x + (1-w)x + y \cdot \frac{(1-w_1)}{4} \right] O_2 = wxCO + (1-w)xCO_2 + \frac{y}{2}w_1H_2 + \frac{y}{2}(1-w_1)H_2O, \quad (3)$$

де  $w$  – масова частка вуглецю, окисленого до  $CO$ ;

$w_1$  – масова частка незгорівшого водню;

$x$  – маса вуглецю в молекулі палива;

$y$  – маса водню в молекулі палива.

Для дизельного палива (якщо знештувати наявністю кисню) “умовна” молекула палива  $C_xH_y$  буде мати молярну масу  $M_n$  [1, 4]:

$$M_n = 12x + y. \quad (4)$$

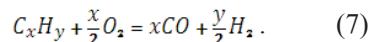
Відповідно (4), у продуктах згоряння дизельного палива з’являються незгорівший водень ( $N_{H_2}$ ) та оксид вуглецю ( $N_{CO}$ ). Тоді:

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

і, відповідно, на 1 кг палива (кмоль):

$$\begin{cases} N_{CO} + N_{CO_2} = \frac{w_c}{12} \\ N_{H_2} + N_{H_2O} = \frac{w_h}{2} \end{cases}. \quad (6)$$

Із зменшенням кількості кисню в продуктах згоряння палива буде збільшуватись вміст  $CO$  та  $H_2$  і зменшуватись вміст  $H_2O$  та  $CO_2$ . При  $w_1=w=1$  у продуктах згоряння буде міститись лише чадний газ  $CO$  та незгорівший водень  $H_2$ . Відповідне рівняння окислення матиме вигляд [1]:



Кількість кисню (кмоль)  $N_{O_2} = \frac{x}{2}$  відповідає умові, за якої кількість атомів вуглецю дорівнює кількості атомів кисню, тобто  $\frac{C}{O} = 1$ . При подальшому зменшенні вмісту кисню в паливо-повітряній суміші  $\frac{C}{O} > 1$  в продуктах згоряння палива з’являється незгорівший вуглець (сажа).

Відповідно до “Методики проведення инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу автотранспортных предприятий (расчетным методом)” обсяги викидів сажі автотранспортного засобу, обладнаного дизельним двигуном [кг/км], визначаються як [3]:

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

де  $M_s$  – валовий викид сажі фізичним автотранспортним засобом, кг/км;

$B_s$  – питома кількість витраченого палива, кг/км;

$J_s = 0,015_s$  – питомий викид сажі, кг/кг.

Статистична усереднена питома кількість витрати дизельного палива фізичною автотранспортною одиницею, яка обладнана дизельним двигуном, становитиме  $B_s = 0,5_s$  кг/км [1, 3]. Отже, з урахуванням інтенсивності  $N$  автотранспортного потоку отримуємо значення  $M_s$  [кг/год.×км]:

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

### Результати визначення викидів сажі автотранспортними потоками

Результати інвентаризації викидів сажі автотранспортними потоками залежно від їх швидкості та інтенсивності, категорії автомобільної дороги

і частки транспортних засобів у двигунами, визначені на підставі потоці, які обладнано дизельними виразу (табл. 1) [9].

Таблиця 1

**Обсяги викидів сажі автотранспортними потоками, кг/год.×км**

Категорія автомобільної дороги	Інтенсивність автотранспортного потоку, авт./добу	Частка автомобілів у автотранспортному потоці, які обладнано дизельними двигунами		
		S < 5%	5% < S < 25%	S ≥ 25%
I-a, I-б	> 10000	0,266	1,065	1,864
II	3000 – 10000	0,173	0,693	1,212
III	1000 – 3000	0,053	0,213	0,373
IV	150 – 1000	0,017	0,070	0,122
V	< 150	0,023	0,107	0,187

**Висновки**

Результатами аналітичного оцінювання обсягів викидів диспергоованої сажі автотранспортними потоками встановлено, що за наявності в автотранспортних потоках частки тран-

спортивних засобів, обладнаних дизельними двигунами, понад 25%, сажові викиди можуть сягати для автомобільних доріг категорій I-а та I-б – 1,864 кг/год.×км, категорії II – 1,212 кг/год.×км, категорії III – 0,373 кг/год.×км.

**Література**

- Луканин В.Н. Промышленно-транспортная экология / В.Н. Луканин, Ю.В. Трофименко. – М.: Выш. шк., 2001. – 273 с.
- Поповичева О.Б. Сажевые аэрозоли в верхней тропосфере: свойства и последствия эмиссии / Поповичева О.Б., Персианцева Н.М., Зубарева Н.А., Шония Н.К., Стариц А.М., Савельев А.М. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова / Препринт НИИЯФ МГУ – 2005 – 17/783. – 83 с.
- Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів / Затверджено. Наказ Держкомстату України. – 13.11.2008 № 452. – <http://ukrstat.org/>.
- Ямборак Р.С. Інженерна екологія. Хімічна екологія Навч. посібник / Р.С. Ямборак, Б.А. Шелудченко, І.А. Шелудченко. – Кам'янець-Подільський: В-во ФОП Сисин О.В., 2011. – 164 с.