

УДК 625.72

д.т.н., професор Є.Б. Угненко,  
О.М. Ужвієва, О.М. Тимченко, О.Д. Пупченко,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## РЕГУЛЮВАННЯ ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ВЗДОВЖ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

*В роботі проведено дослідження оптимального регулювання викидів шкідливих речовин вздовж автомобільних доріг. Запропоновано метод аналізу для визначення екстремальних значень інтенсивності руху автомобілів на заданому відрізку дороги.*

**Ключові слова:** *регулювання, викиди шкідливих речовин, автомобільна дорога, транспортний потік*

Погіршення екологічного стану населених пунктів біля автострад пов'язане із збільшенням шкідливих викидів, що залежить від зростання кількості різного типу автомобілів у транспортних потоках, збільшення потужності двигунів, погіршення якості пального, геометричних параметрів автомобільних доріг тощо. Екологи та фахівці з автотранспорту ставлять задачі спрямовані на покращення стану екосистеми та мінімізації забруднення повітря шкідливими речовинами за рахунок встановлення обмежень із пересування великовантажних машин через населені пункти, управління транспортними потоками для усунення «пробок», оптимізації геометричних параметрів доріг тощо.

**Постановка задачі.** При організації обмежень потоку автотранспорту на певному проміжку шляху виникає задача, що пов'язана із формуванням обмежень за кількістю різного типу автомобілів, які можуть рухатись у потоці з врахуванням сумарного викиду забруднюючих шкідливих речовин, що не перевищує встановлених норм [2].

Вектор, що визначає кількість автомобілів  $j$ -го типу у потоці позначимо через  $x$  [1]:

$$x = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_8), \quad (1)$$

де  $x_1$  – кількість легкових карбюраторних автомобілів;  $x_2$  – кількість легкових дизельних автомобілів;  $x_3$  – кількість малих вантажних карбюраторних автомобілів (вантажопідйомність до 3 т);  $x_4$  – кількість великих та середніх карбюраторних автомобілів (вантажопідйомність більше 3 т);  $x_5$  – кількість дизельних вантажних автомобілів;  $x_6$  – кількість карбюраторних автобусів;  $x_7$  – кількість дизельних автобусів;  $x_8$  – кількість вантажних автомобілів та автобусів, що працюють на природному газі.

Множина показників концентрації викидів шкідливих речовин:

$$F_x = \{f_i(x), i = \overline{1,8}\}, \quad (2)$$

де  $f_1(x)$  – викид оксиду вуглецю;  $f_2(x)$  – викид вуглецю;  $f_3(x)$  – викид оксидів азоту;  $f_4(x)$  – викид сажі;  $f_5(x)$  – викид сірчистого ангідриду;  $f_6(x)$  – викид сполук свинцю;  $f_7(x)$  – викид формальдегіду;  $f_8(x)$  – викид бензапірену.

Гранично допустимі концентрації цих речовин в атмосферному повітрі для населених пунктів регламентують ДСП – 201 [2] (табл. 1).

Таблиця 1

Шкідливі викиди	Типи автомобілів			
	$x_1$	$x_2$	...	$x_8$
$f_1$	$f_1(x_1)$	$f_1(x_2)$	...	$f_1(x_8)$
$f_2$	$f_2(x_2)$	$f_2(x_2)$	...	$f_2(x_8)$
...	...	...	...	...
$f_8$	$f_8(x_1)$	$f_8(x_2)$	...	$f_8(x_8)$

Значення концентрації шкідливих речовин  $f_i(x)$  обчислюють за формулою [1]:

$$f_i(x) = \frac{2 \cdot \sum_{j=1}^8 x_{ju} \cdot k \sum_{j=1}^8 p_{x_{ij}} \cdot E}{3600 \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot V \cdot \sin \varphi} + F_i, i = \overline{1,8}, \quad (3)$$

де  $k_{ju}$  – коефіцієнт, що враховує залежність величини викидів від швидкості транспортного потоку;  $p_{x_j}$  – відносна частина автомобілів  $j$ -ої групи в транспортному потоці,  $p_{x_j} = \frac{x_j}{\sum_{j=1}^8 x_j}$  при чому  $\sum_{j=1}^8 p_{x_j} = 1$ ;  $E_{ij}$  – питомі викиди  $i$ -ої шкід-

ливої речовини для автомобілів  $j$ -ої групи;  $\sigma$  – стандартне відхилення Гаусового розсіювання на заданій відстані від краю проїзної частини;  $V$  – розрахункова швидкість вітру;  $\varphi$  – кут, що складається напрямом вітру до траси дороги;  $F_i$  – фонові концентрації забруднення повітря  $i$ -ою речовиною.

Час дослідження фіксований і дорівнює одній годині [1].

Оскільки  $\sigma$ ,  $V$ ,  $\varphi$  та  $k_{ju}$  – задані сталі величини, то представимо формулу (3) наступним чином:

$$f_i(x) = C \cdot \sum_{j=1}^8 x_j \cdot \sum_{j=1}^8 p_{x_j} \cdot E_{ij} + F_i, i = \overline{1,8}, \quad (4)$$

де константа  $C = \frac{2k_{ju}}{3600 \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot V \cdot \sin \varphi}$ .

Розглянемо випадок, коли у потоці наявні автомобілі тільки одного типу. Тоді на основі формули (4) та прийнявши  $\sum_{j=1}^8 p_{x_j} = 1$  для кожного  $x_j$  окремо можна побудувати таблицю (табл. 2).

Задача пошуку максимальної кількості різного типу автотранспорту, який може рухатись у потоці на відрізку автомагістралі при умові, що концентрація викидів забруднюючих речовин не перевищувала б норми може бути сформульована як задача дискретної оптимізації у загальній постановці наступним чином:

$$\sum_{j=1}^8 r_j x_j \rightarrow \max \quad (5)$$

при обмеженнях

$$f_i(x) = \sum_{j=1}^8 f_i(x_j) \leq f_i^*, i = 1, 2, \dots, 8, \quad (6)$$

$$x = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_8), x_j \in X_j = \{0, 1, 2, \dots\}, j = 1, \dots, 8; \quad (7)$$

де  $x_j$  – деякий статистичний коефіцієнт.

Таблиця 2

Вид шкідливої речовини	Середньодобова гранично допустима концентрація (мг/м <sup>3</sup> )
1. Оксид вуглецю ( $f_1^*$ )	3,0000
2. Вуглеводні ( $f_2^*$ )	1,5000
3. Оксиди азоту ( $f_3^*$ )	0,0400
4. Сажа ( $f_4^*$ )	0,0500
5. Сірчистий ангідрид ( $f_5^*$ )	0,0500
6. Сполуки свинцю ( $f_6^*$ )	0,0003
7. Формальдегід ( $f_7^*$ )	0,0030
8. Бензапирен ( $f_8^*$ )	$10^{-6}$

**Попередній аналіз задачі.** На основі прийнятих допустимих норм концентрації шкідливих речовин для даної задачі формулюють наступні обмеження на кількість транспортних засобів кожного типу:

$$0 \leq x_j \leq x_j^{\max}, \quad (8)$$

де  $x_j^{\max}$  – максимально допустима кількість автомобілів даного типу на потоці, що допустима за обмежень по  $f_1$ ,

$$x_j^{\max} = \left[ \min_i \{V_i(x_j)\} \right], i = \overline{1, 8}, \quad (9)$$

де  $V_i(x_j)$  – кількість машин  $j$ -того типу, обчислена на основі формули (4), за умови, що концентрація  $i$ -тої забруднюючої речовини не перевищує норми:

$$V_i(x_j) = \frac{f_i^*(x) - F_i}{C \cdot E_{ij} \cdot \sum_{j=1}^8 p_{x_j}}$$

Тоді

$$x_j \in X_j = \{0, 1, 2, \dots, x_j^{\max}\}$$

З врахуванням вищезазначеного дані табл. 3 можна подати через значення допустимої кількості автомобілів кожного типу окремо, при обмеженнях на величину концентрації викидів шкідливих речовин (табл. 3).

Таблиця 3

Шкідливі викиди	Типи автомобілів			
	$x_1$	$x_2$	...	$x_8$
$f_1$	$V_1(x_1)$	$V_1(x_2)$	...	$V_1(x_8)$
$f_2$	$V_2(x_2)$	$V_2(x_2)$	...	$V_2(x_8)$
...	...	...	...	...
$f_8$	$V_8(x_1)$	$V_8(x_2)$	...	$V_8(x_8)$

**Розв'язок задачі.** Використовуючи формулу (9) та табл. 2 можемо обчислити вектор максимальної граничної кількості автомобілів кожного типу, вибираючи тільки один вид автотранспорту:

$$x^{\max} = (x_1^{\max}, \dots, x_j^{\max}, \dots, x_8^{\max}), j = \overline{1, 8}, \quad (10)$$

де  $x_j^{\max}$  - максимальна гранична кількість автомобілів  $j$ -того типу у потоці.

При цьому число  $\min_j(x_j^{\max}), j = \overline{1, 8}$  буде мінімальною гарантованою кількістю автомобілів у потоці, сумарний шкідливих речовин яких не перевищуватиме норм [2], а число  $\max_j(x_j^{\max}), j = \overline{1, 8}$  буде максимальною можливою кількістю автомобілів у потоці, тобто:

$$\min_j(x_j^{\max}), j = \overline{1, 8} \leq \sum_{j=1}^8 p_{x_j} x_j \leq \max_j(x_j^{\max}), j = \overline{1, 8}. \quad (11)$$

Для визначення конкретних значень кількості автомобілів кожного типу, що знаходяться у потоці, потрібно проводити додаткові дослідження, аналізуючи також показник  $p_{x_j}$ .

**Приклад.** Розглянемо ділянку дороги довжиною в 100 км, допустима швидкість транспортного потоку 60 км/год, розрахункова швидкість вітру 7 м/с, напрям вітру знаходиться під кутом  $30^\circ$  до траси дороги, погода похмура (наприклад, дощ), початкова фоновіа концентрація забруднення нульова для кожної речовини. Визначимо забруднення на відстані 10 м від кромки проїзної частини.

Максимально допустима кількість автомобілів першого типу у потоці за формулою (9):

$$x_1^{\max} = \left[ \min_i \{V_i(x_i)\} \right] = \min \{8311; 43866; 1003; 43866; 2632; 8311; 30964\} = 1003$$

Аналогічно для інших типів автомобілів:

$$x_2^{\max} = 5264; x_3^{\max} = 183; x_4^{\max} = 157; x_5^{\max} = 157; x_6^{\max} = 75; x_7^{\max} = 51; x_8^{\max} = 1620.$$

Тоді отримаємо

$$x^{\max} = (1003; 5264; 183; 157; 75; 51; 1620)$$

Таким чином кількість автомобілів різного типу у потоці, у цьому прикладі, може змінюватися на проміжку від 51 до 5264 одиниць. Максимальне значення кількості автомобілів у потоці досягається, коли у ньому наявні тільки автомобілі типу  $x_2$  (легкові дизельні автомобілі). Концентрація викидів при цьому наведена у табл. 4.

Таблиця 4

Шкідливі викиди	Концентрація, мг/м <sup>3</sup>
Оксид вуглецю	0,200003063
Вуглеводні	0,130001991
Оксиди азоту	0,025000383
Сажа	0,010000153
Сірчистий ангідрид	0,021000322
Сполуки свинцю	0,000300005
Формальдегід	0
Бензапирен	0

Показник концентрації речовини  $f_6(x)$  (сполуки свинцю) досягає граничного значення. Розглянемо випадок, коли у потоці присутні 2 типи легкових автомобілів:  $x_1$  (карбюраторні) та  $x_2$  (дизельні). Тоді якщо залишити значення потоку на позначці 5264 одиниці, а автомобілів першого типу прийняти 5% ( $p_{x_1}=0,05$ ), а другого – 95% ( $p_{x_2}=0,95$ ), отримаємо  $x=(263; 5001; 0; 0; 0; 0; 0; 0)$  і концентрація викидів, значення яких наведені у табл. 5.

Таблиця 5

Шкідливі викиди	Концентрація, мг/м <sup>3</sup>
Оксид вуглецю	0,285004365
Вуглеводні	0,132502029
Оксиди азоту	0,034250525
Сажа	0,009500146
Сірчистий ангідрид	0,020250310
Сполуки свинцю	0,000315005
Формальдегід	$9,50015 \cdot 10^{-5}$
Бензапирен	$8,50013 \cdot 10^{-9}$

У цьому випадку показник для  $f_6(x)$  (сполуки свинцю) перевищує норму, тому потрібно зменшити кількість машин у потоці для такого розподілу типів машин.

### Висновок

Поставлена задача пошуку допустимої кількості автомобілів є необхідною для управління транспортними потоками. За допомогою запропонованого у цій роботі методу аналізу, можна визначити екстремальні значення інтенсивності руху автомобілів на заданому відрізку дороги.

### Література

1. М 218-02071168-626:2007 Методика оцінки екологічного впливу автомобільної дороги загального користування на навколишнє середовище.- Харків: ХНАДУ, 2007.- 65с.
2. ДСП-201-97 Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами). Затв. Наказом МОЗ України від 09.07.1997 р. № 201.

### Аннотація

В работе проведено исследование оптимального регулирования выбросов вредных веществ вдоль автомобильных дорог. Предложен метод анализа для определения экстремальных значений интенсивности движения автомобилей на заданном отрезке дороги.

**Ключевые слова:** регуляция, выбросы вредных веществ, автомобильная дорога, транспортный поток

### Annotation

The article investigates the problem of optimum regulating of harmful substances emissions along highways. The method of analysis is offered to determine extreme values of traffic intensity of cars on the set section of road.

**Keywords:** adjusting, extrass of harmful matters, highway, transport stream