

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ ДОМІНУЮЧОГО ДЖЕРЕЛА ШУМУ В ПОТОЦІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

*Розроблено математичну модель визначення висоти положення домінуючого джерела шуму у потоці транспортних засобів. Експериментально обґрунтовано запропонований у працях [1,2] підхід, який використовує методи прогнозування дорожнього шуму для підвищення точності методів визначення ефективності шумозахисних бар'єрів.*

*The mathematical model for determining the height of the dominant noise source in the flow of vehicles was developed and presented in the article. Approach of forecasting traffic noise to improve the accuracy of methods of determining the effectiveness of noise barriers, proposed in [1,2], was experimentally grounded.*

### 1. ВСТУП

На сьогоднішній день проєктанти шумозахисних бар'єрів для захисту від лінійного джерела шуму використовують методи, які не враховують специфіки сучасних транспортних потоків. Зрозуміло, що у 80-ті і навіть у 90-ті рр. процент вантажних автомобілів у потоці транспортних засобів був набагато більшим і науковці, які розробляли ці методики та нормативні документи вважали, що процент вантажних автомобілів є до 60%. У різних методиках використовують різну висоту положення джерела шуму над рівнем дороги. Для прикладу метод VDI-2720 [3] рекомендує висоту джерела шуму 0,5 м, а "Руководство по расчету и проектированию средств защиты застройки от транспортного шума" [4] 1 м. Тому задача дослідження, на якій висоті розташовані основні джерела шуму в легкових та вантажних автомобілях, та побудова математичної моделі визначення висоти положення домінуючого джерела шуму у потоці транспортних засобів в залежності від швидкості, для підвищення точності методів визначення ефективності шумозахисних бар'єрів є актуальною.

### 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Результати одержані в рамках проєктів Harmonoise і IMAGINE [5] призначені для використання державами-членами ЄС при побудові шумових карт та інших цілей пов'язаних з оцінкою шумового забруд-

---

<sup>15</sup> Національний університет «Львівська політехніка»

нення міст і захисту від нього. У рамках виконання даних проектів проведені експериментальні дослідження рівнів звукової потужності від окремих джерел шуму в легкових та вантажних автомобілях. Основними джерелами шуму є взаємодія шини з покриттям дороги та система вихлопу відпрацьованих газів. Результати експериментів представлені у вигляді графіків рис. 1 та рис. 2.

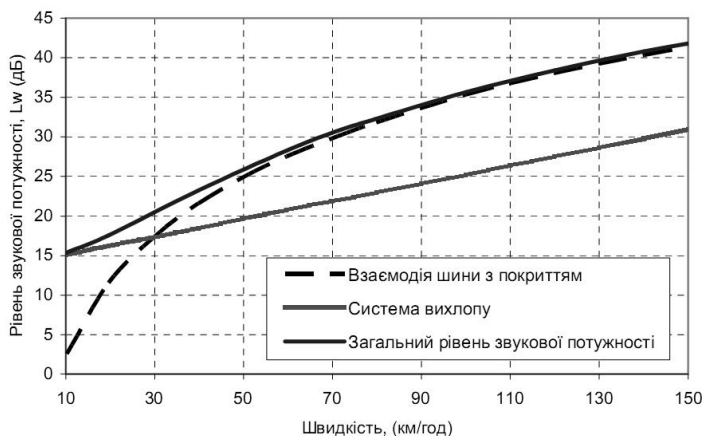


Рис. 1. Залежність рівня звукової потужності від швидкості для легкових автомобілів [6]

Три криві на графіку (рис. 1) представляють залежності рівня звукової потужності від швидкості для випадків, коли оцінюється окремо взаємодія автомобільної шини з покриттям дороги, система вихлопу відпрацьованих газів та загальний рівень звукової потужності для легкових автомобілів. Аналогічний графік для вантажних автомобілів наведено на рис. 2. Як слідує з графіку рис. 1, для легкового автомобіля рівень звукової потужності від взаємодії автомобільної шини з покриттям дороги, починає домінувати над рівнем звукової потужності системи вихлопу відпрацьованих газів при швидкості більше 30 км/год. Тому запропоновано взяти це до уваги при визначенні ефективності екранування звукової енергії. Розроблена математична модель дає змогу точніше визначити висоту домінуючого джерела шуму над рівнем дороги, та підвищити точність методів визначення ефективності шумозахисних бар'єрів.

У праці [6] на основі експериментальних даних було визначено висоту основних джерел шуму в легковому та вантажному автомобілі. Для легкових автомобілів висота положення джерела шуму становить 0,3 м для системи вихлопу відпрацьованих газів та 0,01 м для шуму від

взаємодії автомобільної шини з дорожнім покриттям (рис. 3). Для вантажних автомобілів джерело шуму від взаємодії автомобільної шини з дорожнім покриттям становить 0,01 м, а висота джерела шуму від системи вихлопу є більшою і становить 0,7 м (рис. 3).

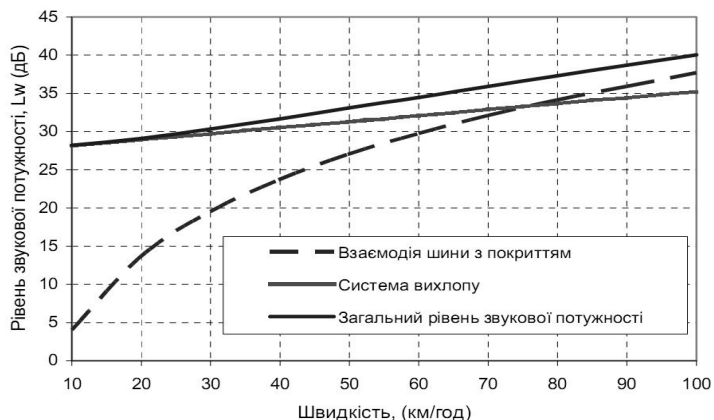


Рис. 2. Залежність рівня звукової потужності від швидкості для вантажних автомобілів [6]

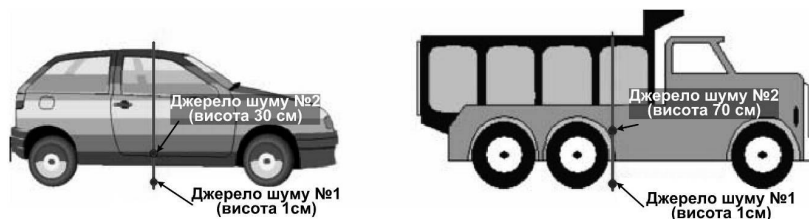


Рис. 3. Розміщення основних джерел шуму в легкових та вантажних автомобілях [6]

Використовуючи розроблену підсистему визначення ефективності шумозахисних бар'єрів (рис. 4) проведено дослідження впливу висоти для різних значень відстаней між екраном та джерелом шуму на ефективність бар'єру. Встановлено, що при невеликих відстанях до екрану точки спостереження і джерела шуму, зміна висоти домінуючого джерела шуму від 1 см до 70 см, що характерно для вантажних автомобілів дає різницю в 1 дБ, а характерна висота для домінуючих джерел шуму в легковому автомобілі від 1 см до 30 дає різницю в 0,5 дБ. Тому для вантажних і легкових автомобілів висота положення джерела шуму буде відповідно 0,7 і 0,3 м, поки рівень звукової потужності від взаємодії автомобільної шини з дорожнім покриттям не буде більшим від

рівня звукової потужності системи вихлопу на 1 дБ для вантажних і 0,5 дБ для легкових автомобілів. З графіку рис. 2, слідує, що висота для вантажних автомобілів до швидкості 85 км/год повинна становити 0,7 м. При більших швидкостях, різниця між рівнем звукової потужності від взаємодії автомобільної шини з дорожнім покриттям і системи вихлопу не суттєво збільшується. Враховуючи попередній факт, і те, що джерело шуму від системи вихлопу знаходиться вище, з цього слідує, що дане джерело шуму буде вносити суттєвий вклад в емісію звукової енергії. На підставі вище сказаного, для вантажних автомобілів пропонується прийняти висоту положення домінуючого джерела шуму незалежно від швидкості рівною 0,7 м над рівнем дороги.



Рис. 4. Підсистема визначення ефективності шумозахисних бар'єрів різними методами в залежності від зміни одного з параметрів

Аналізуючи графік для легкових автомобілів рис. 1, висота положення джерела шуму для швидкості до 32 км/год буде сталою і становитиме 0,3 м. Якщо різниця між рівнем звукової потужності системи вихлопу і взаємодії шини з покриттям становить більше 10 дБ [7], то шум від системи вихлопу не враховується. Тому для швидкості більше 100 км/год шум від системи вихлопу, є незначний. З цього слідує, що висота джерела шуму рівна 0,01м (відповідає висоті джерела шуму взаємодії шини з поверхнею дороги). Для швидкості в діапазоні від 32 до 100 км/год висота джерела шуму буде мінятися пропорційно до швидкості. На основі вищеописаного було побудовано наступний математичний вираз:

$$h_{A, \text{еаае}} = \begin{cases} 0,3 & \text{і δè } V < 32 (\text{èì } / \text{а̃ ä}) \\ -0,0043 \cdot V + 0,4365 & \text{і δè } 32 \leq V < 100 (\text{èì } / \text{а̃ ä}) \\ 0,01 & \text{і δè } V \geq 100 (\text{èì } / \text{а̃ ä}) \end{cases} \quad (1)$$

де  $h_{A, \text{еаае}}$  – висота домінуючого джерела шуму для легкових автомобілів;  $V_{\text{еаае}}$  – середня швидкість легкових автомобілів.

Вираз (1) дає змогу визначити висоту домінуючого джерела шуму у легковому автомобілі в залежності від швидкості.

Методи прогнозування дорожнього шуму CoRTN [8], Statens Planverk 48 [9] та ін. не дозволяють окремо визначити звуковий вклад від кожної категорії транспортних засобів. Для таких випадків потрібно розробити модель, яка буде визначати висоту в залежності від проценту вантажних автомобілів у потоці транспортних засобів.

Тому поставлена задача дослідити зміну еквівалентного рівня шуму при 10% вантажних автомобілів в залежності від інтенсивності руху. Для цього було використано підсистему прогнозування дорожнього шуму методом RLS-90 [8], головне вікно якої представлено на рис. 5. Використовуючи розроблену підсистему для різних інтенсивностей ТЗ, 10% вантажних автомобілів та віддалі від джерела шуму 10 м, було розраховано еквівалентні рівні шуму. Одержані результати представлені у табл. 1.

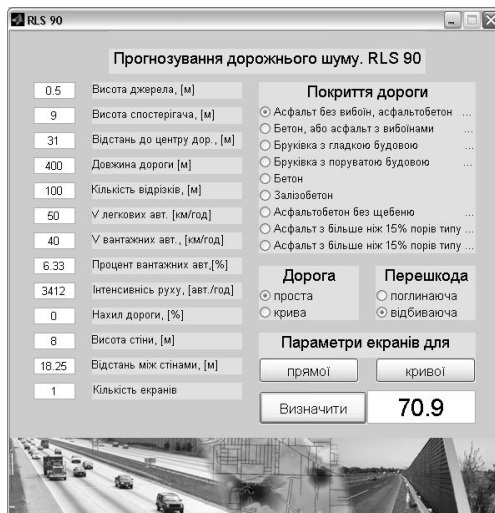


Рис. 5. Підсистема прогнозування рівня дорожнього шуму методом RLS90

Таблиця 1

Залежність еквівалентного рівня звуку від інтенсивності руху  
для відстані від джерел шуму 10 м

Інтенсивність руху, ТЗ/год	Вантажні автомобілі	Легкові автомобілі	Різниця між вантажними і легковими, дБ	Разом
	Лекв, дБ	Лекв, дБ		Лекв, дБ
200	61,1	57,3	3,7	62,5
400	64,1	60,4	3,7	65,5
600	65,8	62,1	3,7	67,2
800	67,1	63,4	3,7	68,5
1000	68	64,3	3,7	69,5
1200	68,8	65,1	3,7	70,2
1400	69,5	65,8	3,7	70,9
1600	70,1	66,4	3,7	71,5
1800	70,6	66,9	3,7	72
2000	71,1	67,3	3,7	72,5

На основі даних з табл. 1 було побудовано графічну залежність представлену на рис. 6.

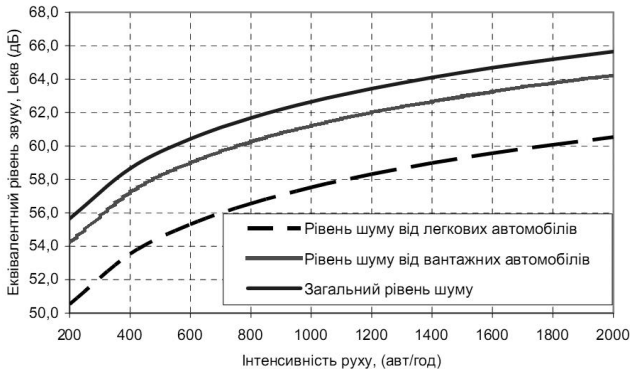


Рис. 6. Залежність еквівалентного рівня звуку від інтенсивності руху автомобілів

Аналізуючи вище наведений графік, встановлено, що різниця між еквівалентним рівнем шуму від легкових автомобілів і вантажних не міняється при зміні інтенсивності і є константою.

Проведено дослідження чи ця різниця залишається сталою при зміні віддалі від джерела шуму. Для цього розрахуємо еквівалентний рівень шуму при різній інтенсивності руху для віддалі 25 м від джерела шуму, значення якого представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Залежність еквівалентного рівня звуку від інтенсивності руху  
для відстані 25 м від джерел шуму

Інтенсивність руху, ТЗ/год	Вантажні автомобілі	Легкові автомобілі	Різниця між вантажними і легковими, дБ	Разом
	Лекв, дБ	Лекв, дБ		Лекв, дБ
200	50,5	55,6	3,7	54,2
400	53,5	58,7	3,7	57,2
600	55,3	60,4	3,7	59,0
800	56,5	61,7	3,7	60,3
1000	57,5	62,6	3,7	61,2
1200	58,3	63,4	3,7	62,0
1400	59,0	64,1	3,7	62,7
1600	59,6	64,7	3,7	63,3
1800	60,1	65,2	3,7	63,8
2000	60,5	65,6	3,7	64,2

Як слідує з табл. 2, різниця між еквівалентним рівнем шуму від легкових автомобілів і вантажних при зміні відстані до джерела шуму теж є константою. У зв'язку з цим визначивши, для якого відсоткового складу вантажних автомобілів у потоці ТЗ еквівалентний рівень шуму від них буде переважати, це значення буде справедливе для будь-якої відстані і інтенсивності. На наступному кроці потрібно визначити як буде залежати еквівалентний рівень звуку від проценту вантажних автомобілів у потоці ТЗ. Розраховані дані представлені у табл. 3, та на рис. 7.

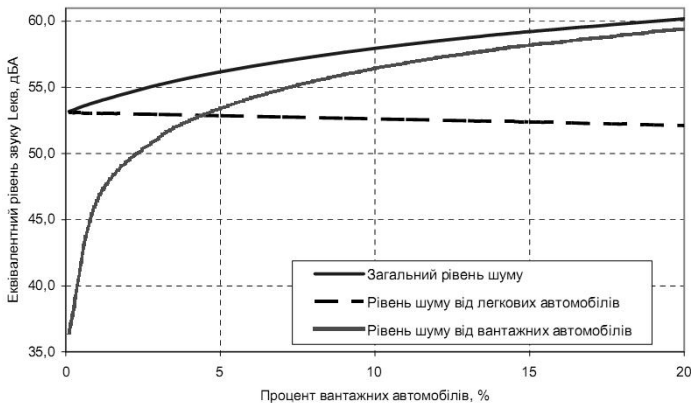


Рис. 7. Залежність еквівалентного рівня звуку від відсоткового складу вантажних автомобілів

Таблиця 3

Залежність еквівалентного рівня звуку від проценту вантажних автомобілів у потоці ТЗ

% – вантажних автомобілів	Разом	Вантажні автомобілі	Легкові автомобілі	Різниця між вантажними і легковими, дБ
	Лекв, дБ	Лекв, дБ	Лекв, дБ	
0,1	50,6	34,2	50,5	-16,3
10	55,6	54,2	50,1	4,2
20	57,9	57,2	49,6	7,7
30	59,4	59,0	49,0	10,0
40	60,5	60,3	48,3	11,9
50	61,4	61,2	47,5	13,7
60	62,1	62,0	46,5	15,5
70	62,8	62,7	45,3	17,4
80	63,3	63,3	43,5	19,7
90	63,8	63,8	40,5	23,2

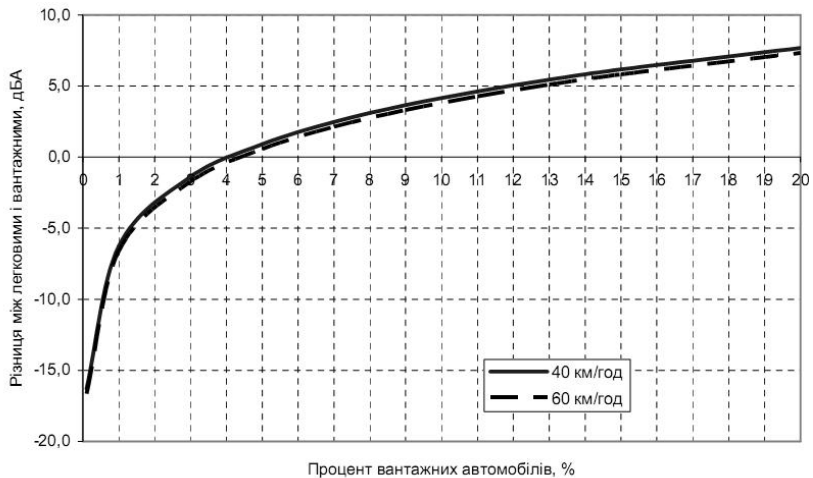


Рис. 8. Різниця еквівалентних рівнів звуку між вантажними і легковими автомобілями

Як слідує з графіків на рис. 7 та рис. 8, при більше як 4% вантажних автомобілів висота джерела шуму буде як у вантажних автомобілів і становитиме незалежно від швидкості 0,7 м. При менше 0,5% висота джерела шуму визначатиметься з залежності (1), як для легкового автомобіля. Висота домінуючого джерела шуму для потоків транспор-



тних засобів, які складаються від 0,5% до 4% вантажних автомобілів визначатиметься з наступної залежності:

$$h_A = 0,198 \cdot p - 0,089. \quad (2)$$

Отже для визначення висоти домінуючого джерела шуму у потоці транспортних засобів в залежності від швидкості і проценту вантажних автомобілів побудуємо наступне співвідношення:

$$h_A = \begin{cases} 0,3 & \text{ї δè } V < 32(\text{èì / } \tilde{a} \tilde{a}) \\ -0,0043 \cdot V + 0,4365 & \text{ї δè } 32 \leq V < 100(\text{èì / } \tilde{a} \tilde{a}) \quad \text{ї δè } p \leq 0,5 \\ 0,01 & \text{ї δè } V \geq 100(\text{èì / } \tilde{a} \tilde{a}) \\ 0,198 \cdot p - 0,089 & \text{ї δè } 0,5 < p \leq 4 \\ 0,7 & \text{ї δè } p > 4 \end{cases} \quad (3)$$

Вираз (3) може бути використаний для визначення висоти домінуючого джерела шуму у потоці транспортних засобів в залежності від швидкості і проценту вантажних автомобілів. Це в свою чергу має забезпечити більш точне визначення ефективності шумозахисних бар'єрів.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

У літературних джерелах у більшості випадках методи визначення ефективності шумозахисних бар'єрів, які базуються на числі Френеля вираз (5), або різниці шляхів вигнутої хвилі на краю екрану і хвилі прямої видимості вираз (4) [9] ми зустрінемо схему взаємного розміщення джерела шуму, екрану і точки спостереження як на рис. 9. Підставляючи  $A$ ,  $B$  та  $d$  у (4), та наступним кроком підставивши (4) у (5), ми знайдемо число Френеля.

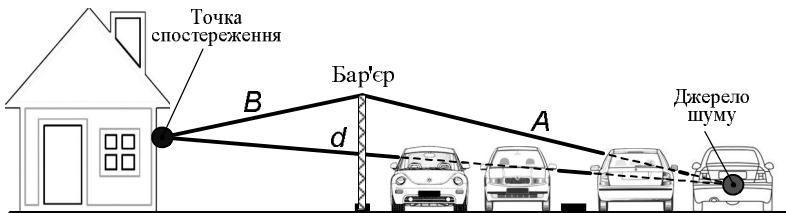


Рис. 9. Взаємне розміщення джерела шуму-екрану-точки спостереження

$$\delta = A + B - d \quad (4)$$

$$N = 2\delta / \lambda \quad (5)$$

Зважаючи на те, що такою схемою незручно користуватися, пропонується використовувати іншу схему, яка базується на підходах

висвітлених у [1,2] також дозволить підвищити точність методів, визначаючи екранування окремо від кожної смуги руху, та від кожної категорії транспортних засобів. Змінні  $A$ ,  $B$  та  $d$  знайдемо з залежностей (6), (7), (8).

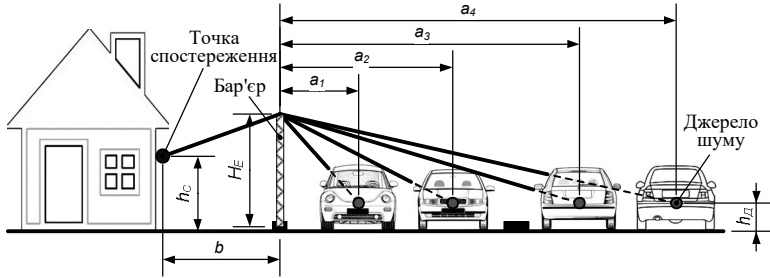


Рис. 10. Взаємне розміщення джерела шуму-екрану-точки спостереження

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + (H_E - h_A)^2}, \quad (6)$$

$$B = \sqrt{b^2 + (H_E - h_C)^2}, \quad (7)$$

$$d_i = \sqrt{(a_i + b)^2 + (|h_A - h_C|)^2}. \quad (8)$$

Кінцевий вираз, на знаходження числа Френеля з використанням даних як на рис. 10 набуде вигляду:

$$N_i = \frac{2 \left( \sqrt{a_i^2 + (H_E - h_A)^2} + \sqrt{b^2 + (H_E - h_C)^2} - \sqrt{(a_i + b)^2 + (|h_A - h_C|)^2} \right)}{\lambda}. \quad (9)$$

Використовуючи побудовані вирази і запропонований у [1,2] підхід розроблено алгоритм блок-схему якого зображено на рис. 11.

У роботі [10] проведено експериментальну оцінку ефективності вибраних конструкцій шумозахисних бар'єрів визначену з рівнів шуму скоригованих характеристикою  $A$ . Шумоміри, якими проводилося зняття експериментальних даних паралельно заміряють і записують еквівалентний рівень шуму  $z$  і без характеристики  $A$ . З еквівалентних рівнів звуку без корекції фільтром  $A$ , отриманих під час вимірювань при написанні роботи [10] були розраховані ефективності шумозахисних бар'єрів. Отримані результати будуть нам потрібні для перевірки точності розробленої моделі. Оскільки метод Маскави [11], на якому базується наш алгоритм призначений для визначення ефективності екранів в децибелах.

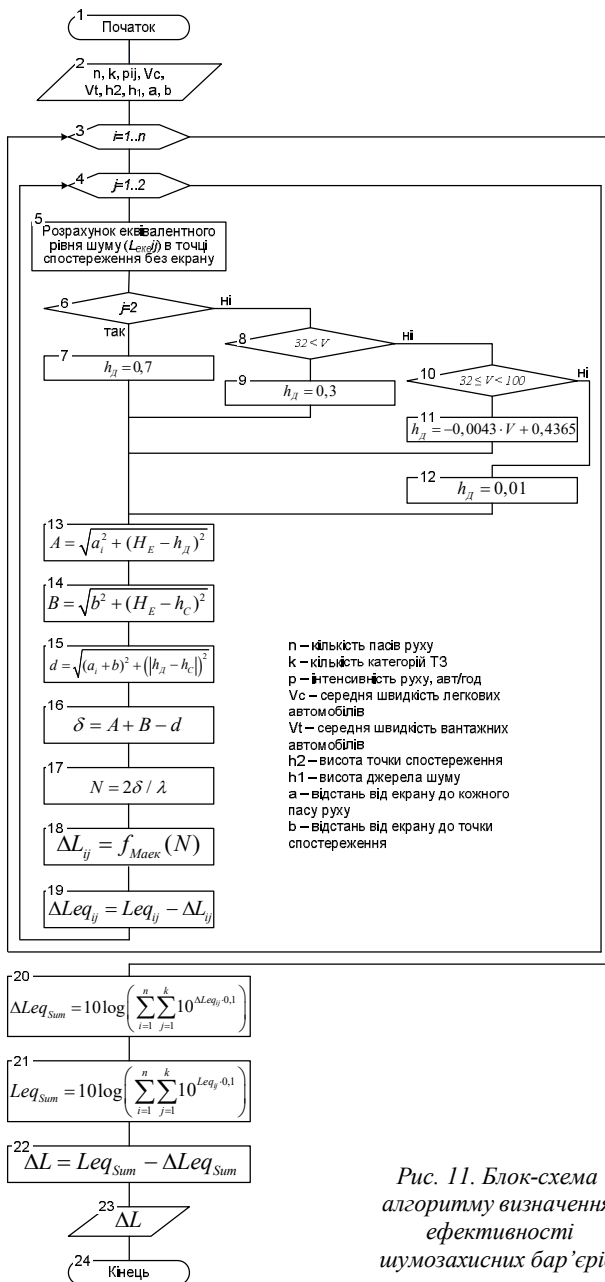


Рис. 11. Блок-схема алгоритму визначення ефективності шумозахисних бар'єрів

Для порівняння значень розрахованих згідно з розробленим алгоритмом та експериментальних даних їх було представлено у вигляді гістограми (рис. 12).

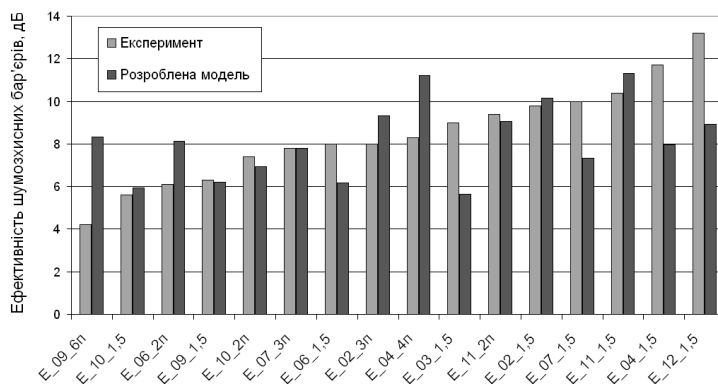


Рис. 12. Гістограма ефективності шумозахисних бар'єрів

У працях [3] і [4] пропонується різна висота положення джерела шуму над рівнем дороги і різне розташування від екрану, тому для порівняння, ефективність була визначена для різної висоти розташування джерела шуму над рівнем дороги, а також розміщення відносно екрану. Експериментальні та розрахункові дані для різних вхідних параметрів зіставлені у табл. 4.

Таблиця 4

Експериментальні та розрахункові дані ефективності шумозахисних бар'єрів

Експ.	Розроблена методика		Середина дороги, вис. 0,5 м		Середина дороги, вис. 0,1 м		Крайня смуга руху, висота 1 м		Кр. смуга руху, вис. 0,5 м	
	$\Delta L$ , дБ	Відх., дБ	$\Delta L$ , дБ	Відх., дБ	$\Delta L$ , дБ	Відх., дБ	$\Delta L$ , дБ	Відх., дБ	$\Delta L$ , дБ	Відх., дБ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,7	8,35	7,65	—	—	8,02	7,32	10,70	10,00	10,16	9,46
4,2	8,32	4,12	8,70	4,50	7,93	3,73	7,06	2,86	7,63	3,43
5,6	5,94	0,34	5,80	0,20	4,98	0,62	—	—	4,60	—
6,1	8,13	2,03	8,30	2,20	7,40	1,30	6,47	0,37	7,12	1,02
6,3	6,21	0,09	4,60	1,70	—	—	—	—	—	—
7,4	6,92	0,48	—	—	9,12	—	11,39	3,99	11,00	3,60

Експ.	Розроблена методика		Середина дороги, вис. 0,5 м		Середина дороги, вис. 0,1 м		Крайня смуга руху, висота 1 м		Кр. смуга руху, вис. 0,5 м	
7,8	7,81	0,01	8,30	0,50	7,45	0,35	6,47	1,33	7,14	0,66
8,0	6,17	1,83	–	–	–	–	6,27	1,73	5,67	2,33
8,0	9,31	1,31	–	–	14,31	–	16,38	–	16,12	–
8,3	11,21	2,91	10,80	2,50	10,24	1,94	9,50	1,20	9,86	1,56
9,0	5,63	3,37	5,20	3,80	4,67	4,33	–	–	–	–
9,4	9,06	0,34	9,40	0,00	8,53	0,87	7,41	1,99	8,01	1,39
9,8	10,15	0,35	10,30	0,50	9,63	0,17	8,80	1,00	9,22	0,58
10,0	7,32	2,68	8,00	2,00	7,15	2,85	6,34	3,66	6,97	3,03
10,4	11,30	0,90	10,90	0,50	10,39	0,01	9,65	0,75	10,00	0,40
11,7	7,97	3,73	8,70	3,00	7,66	4,04	6,34	5,36	7,15	4,55
13,2	8,92	4,29	5,60	7,60	4,77	8,43	–	–	–	–

#### 4. ВИСНОВКИ

Порівнюючи ефективності екранів розрахованих для різних входних даних з експериментальними даними встановлено, що найменшу розбіжність дають результати розраховані згідно з розробленою методикою. Цього і слід було очікувати, адже при великій кількості смуг руху (у нашому випадку по 3 у кожному напрямку руху) завантаженість всіх пасів руху рідко буває однаковою, а з цього випливає, що і екранування буде різним.

1. Melnyk M., Lobur M. Information model of computer-aided noise barriers design system. *Monitoring środowiska : Proc. of 1-st Intern. Conf. – Krakov, Poland, 2010. – P. 24.* 2. Melnyk M., Lobur M., Petsukh A. Structure Development Of Computer-Aided Noise Barriers Design System. *Proc. of the VIth International Conference (MEMSTECH'2010) – Lviv - Polyana, 2010. – P.235 – 236.* 3. VDI-Richtlinie 2720, Blatt 1: Schallschutz durch Abschirmung im Freien. pp. 1-14, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, February 1991. 4. *Руководство по расчету и проектированию средств защиты застройки от транспортного шума.* - М.: Стройиздат, 1982. - 30с. 5. *Imagine [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.imagine-project.org>* 6. Graaff E. Road source model / E. Graff // *IMAGINE Informal document No. GRB-48-6, 48th GRB. – 2008.* 7. ГОСТ ИСО 362-2006 (ISO 362:1998, IDT). *Шум машин. Измерение шума, излучаемого дорожными транспортными средствами при разгоне.* -М.: Госстандарт, 2007. -17с. 8. Department of Transport, Welsh Office. *Calculation of Road Traffic Noise.* HSMO Publication, UK. 9. *Satens planverk, Report No. 48, Stockholm, 1980.* 10. Melnyk M., Ciesielka W., Kerytsky A. *The study of accuracy of RLS 90 prognostication method for city traffic. CAD in Machinery Design. Implementation and Education Problems (CADMD'2008): proc. of XVIth Ukrainian -*

*Polish conference. – Lviv, Ukraine, 2008. – P. 104 – 106.* 11. M. Möser, “*Engineering Acoustics-An Introduction to Noise Control,*” second edition, Springer, Berlin, 2004.

12. Мельник М., Цісельська В. Експериментальне дослідження впливу геометричних параметрів та акустичних властивостей екранів на їх ефективність. *Комп’ютерні технології друкарства: Збірник наук. праць УАД. – Львів, 2009. – № 21. – С. 146 – 154.* 13. Bies, David A. and Colin H. Hansen. 2009. *Engineering Noise Control: Theory and Practice. 4rd ed. New York: Spon Press.*