

## ОЦІНКА ВПЛИВУ КУТА НАХИЛУ ВЕРХНЬОЇ ЧАСТИНИ ШУМОЗАХИСНОГО ЕКРАНА НА ЙОГО ЕФЕКТИВНІСТЬ

Заєць В. П.

Об'єктом дослідження є звукове поле від лінійних джерел звуку довкола округлого шумозахисного екрану однакової висоти та різних кутів нахилу верхньої частини екрану. Відомо, що ефективність шумозахисних екранів залежить насамперед від геометричних розмірів екрану та взаємного розташування джерела звуку, екрану та області шумозахисту. Дослідженню впливу цих факторів та деяких інших, таких як вплив поверхні землі, звукопоглинання, звукоізоляція екрану, приділялася велика кількість публікацій. Однак в цих роботах не було проведено дослідження впливу кута верхньої частини екрану на зміну ефективності екрану.

В даній роботі досліджено зниження рівнів звуку від лінійних джерел звуку довкола шумозахисних екранів з різним кутом нахилу верхньої частини екрану. Розглянуто округлі екрани однієї висоти з різними радіусами, що дозволило змодельовувати екрани, в яких верхня частина екрану має різний кут нахилу. Також було розглянуто ефективність таких екранів для різного розташування джерела звуку, що також могло позначитися на встановленні закономірності зміни ефективності екранів. Крім того було проведено аналіз результатів в широкому діапазоні частот. Розрахунок поля довкола такого екрану проводився за допомогою комп'ютерного моделювання із використанням методу кінцевих елементів. Даний спосіб дозволяє легко змінювати геометричні параметри екрану та положення джерела звуку. Екрани вважалися акустично жорсткими.

Таким чином, було проведено аналіз впливу кута нахилу верхньої частини екрану на звукове поле довкола екрана за різного розташування джерел звуку, в широкому діапазоні частот. Отримані результати необхідно враховувати при проектуванні шумозахисних екранів для зниження рівнів шуму від транспортних потоків.

**Ключові слова:** шумозахисний екран, кут нахилу, широкий діапазон частот, зниження рівнів шуму, шум транспортних потоків.

### 1. Вступ

Численні дослідження показують, що транспорт є найбільш розповсюдженим джерелом надмірного шуму в світі. Зниження шуму транспортних потоків є однією із найбільших проблем в акустичній екології. Одним із дієвих способів зниження шуму є встановлення шумозахисних екранів.

Питанню визначення ефективності шумозахисних екранів присвячена велика кількість публікацій, однак з плином часу кількість досліджень зростає. Причиною цього є те, що ефективність шумозахисних екранів залежить від

великої кількості параметрів, причому цей вплив є взаємопов'язаний. Так, в роботах [1, 2] було показано що ефективність шумозахисних екранів залежить від типу джерела звуку, частоти та взаємного положення джерела екрану та розрахункової точки. Роботи [3, 4] показали суттєвий вплив поверхні землі на ефективність екранів. Дослідження [5] продемонстрували вплив форми екрану на його ефективність, причому цей вплив суттєво залежить і від частоти, і від взаємного розташування джерела звуку та розрахункової точки. Останнім часом актуальним є вивчення впливу різних параметрів верхньої частини екрану на його ефективність. Тому дане дослідження присвячене визначенню впливу кута нахилу верхньої частини екрану на його ефективність.

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

*Об'єктом дослідження* є звукове поле від лінійних джерел звуку довкола округлого шумозахисного екрану однакової висоти та різних кутів нахилу верхньої частини екрану.

Шумозахисні екрани, що встановлюються вздовж автомобільних доріг можуть бути як вертикальними, так і більш складної форми, зокрема – у вигляді дуги круга.

Відомо, що ефективність шумозахисних екранів залежить насамперед від геометричних розмірів екрану та взаємного розташування джерела звуку, екрану та області шумозахисту. Дослідженню впливу цих факторів та деяких інших, таких як вплив поверхні землі, звукопоглинання, звукоізоляція екрану, приділялася велика кількість публікацій. Однак в цих роботах не було проведено дослідження впливу кута верхньої частини екрану на зміну ефективності екрану.

## **3. Мета та задачі дослідження**

*Мета дослідження* – оцінити вплив кута нахилу верхньої частини екрану на здатність знижувати рівні шуму за екраном.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Побудувати комп'ютерну модель звукового поля довкола округлого шумозахисного екрана.
2. Визначити ефективність екранів в широкому діапазоні частот за різного розташування джерела звуку та кута нахилу верхньої частини екрану.

## **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Одним із способів збільшення ефективності екранів є оздоблення верхньої кромки екрану дифузором спеціальної форми [6, 7]. Було запропоновано та досліджено велику кількість шумозахисних екранів з модифікованим верхнім краєм [8, 9]. Дані дослідження базувалися на чисельних методах розрахунку методом кінцевих елементів (FEM) [10] або ж методом граничних областей (BEM) [11]. Однак в деяких дослідженнях [12, 13] було показано, що ефективність застосування верхніх кромки екрану дуже сильно залежить від частоти звуку. в широкому діапазоні частот досягти суттєвої ефективності екрану не вдається.

Крім того були проведені дослідження [14, 15] збільшення ефективності екрану за рахунок зміни акустичного імпедансу верхньої частини екрану. Ці дослідження показали, що улаштування екранів з високими звукопоглинальними властивостями верхніх частин призводить до збільшення ефективності екрану на величину до 2,5 дБ.

В роботах [16, 17] запропоновано аналітичний метод знаходження ефективності шумозахисних екранів з імпедансною верхньою частиною, що базується на методі інтегральних рівнянь. Даний метод дозволяє зменшити кількість необхідної оперативної пам'яті та зменшити час розрахунку. Також знайшов застосування метод часткових областей [18, 19]. Цей метод дозволяє знаходити ефективність шумозахисних екранів більш складної форми [20], а також враховувати власну звукоізоляцію екранів [21].

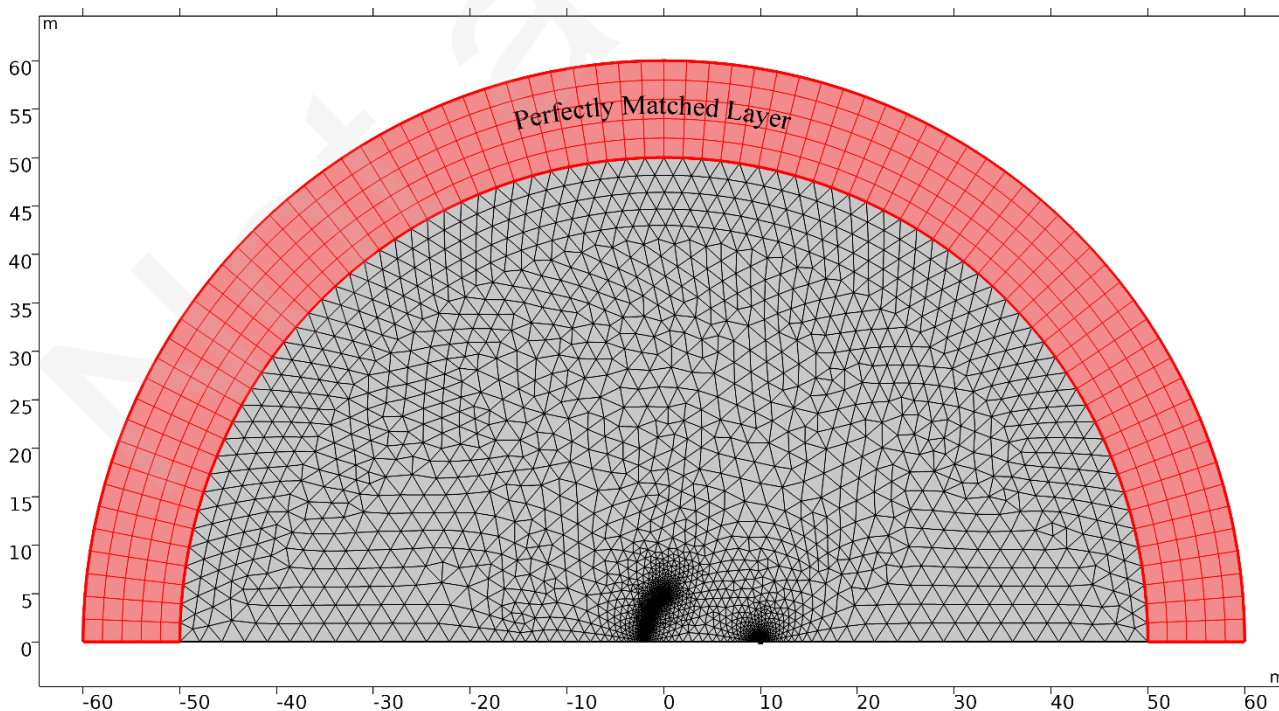
Однак застосування аналітичних методів дослідження можливе лише для достатньо простих конфігурацій екрану. При застосуванні екранів зі складною геометрією вивід аналітичних співвідношень різко ускладнюється і перевага числових методів розрахунку стає беззаперечною.

Тому для з'ясування впливу кута нахилу верхньої частини округлих екранів запропоновано використати метод часткових елементів.

## 5. Методи досліджень

Для вирішення поставлених задач була створена комп'ютерна модель шумозахисних екранів в програмному середовищі Comsol Multiphysics. Акустичне поле від лінійного джерела звуку, що працює на нульовій моді коливань, розраховувалося методом кінцевих елементів.

Двовимірною геометричною моделлю шумозахисного екрану наведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Сітка для розрахунку методом кінцевих елементів з використанням Perfectly Matched Layer

Горизонтальна поверхня дороги та землі за екраном моделювалася акустично жорсткою площиною.

Поверхня екрану була також акустично жорсткою, що не пропускає звук.

Застосування Perfectly Matched Layer дозволило змодельовати вільне поле в розрахунковій області, як це було показано в роботі [14].

Товщина екрану становила 0,1 м. Для частот в діапазоні до октавної смуги з середньгеометричною частотою 500 Гц можна вважати, що екран був тонким.

## 6. Результати досліджень

### 6.1. Побудова комп'ютерної моделі

Для аналізу результатів було проведено розрахунки ефективності екрану для семи кутів нахилу верхньої частини екрану та п'яти положень джерел звуку (рис. 2) в трьох октавних смугах частот. Всі вихідні дані до розрахунку зведені до табл. 1.

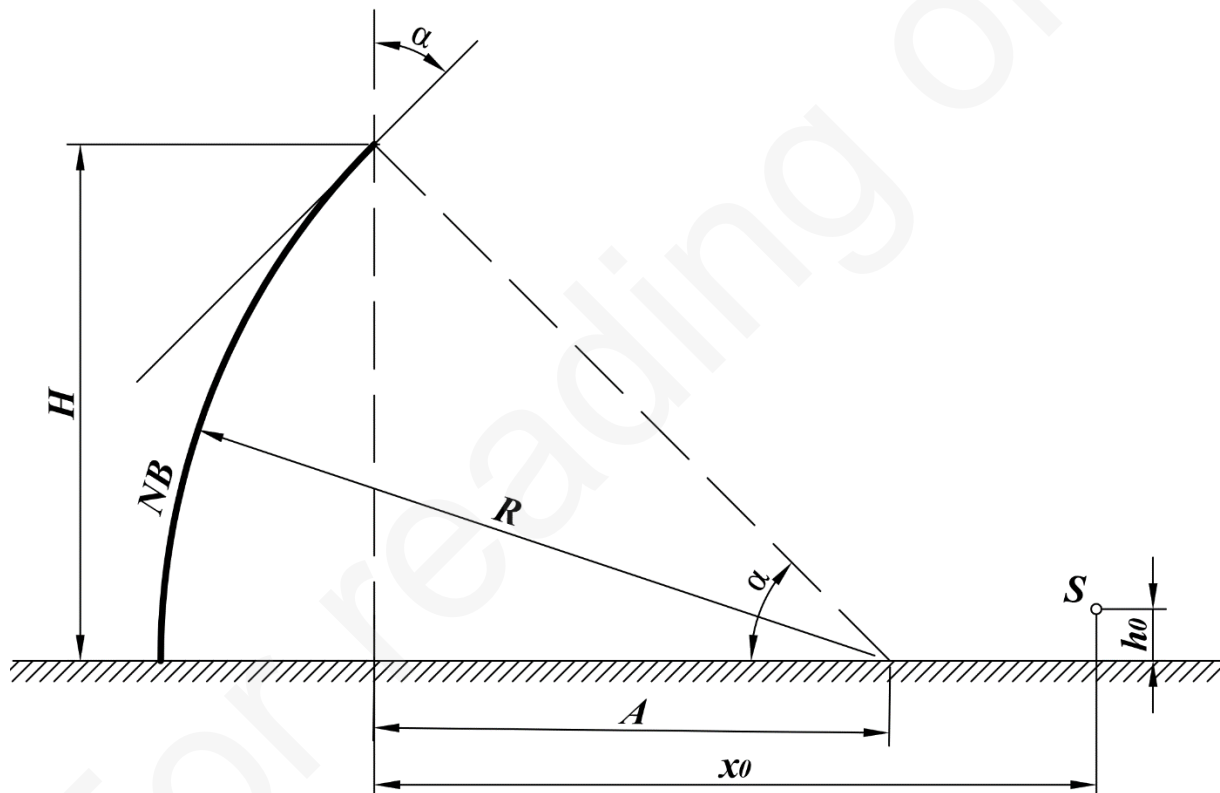


Рис. 2. Взаємне розташування шумозахисного екрану (NB) та джерела звуку (S)

В комп'ютерній моделі за одного геометричного розміру екрану та розташування джерела звуку проводився розрахунок на 11 частотах, що рівномірно розташовані в октавній смугі частот. Результатом розрахунку була енергетична сума звукових полів на кожній частоті. Більш детально про це наведено в роботі [21].

Таблиця 1

Вихідні дані до комп'ютерного моделювання

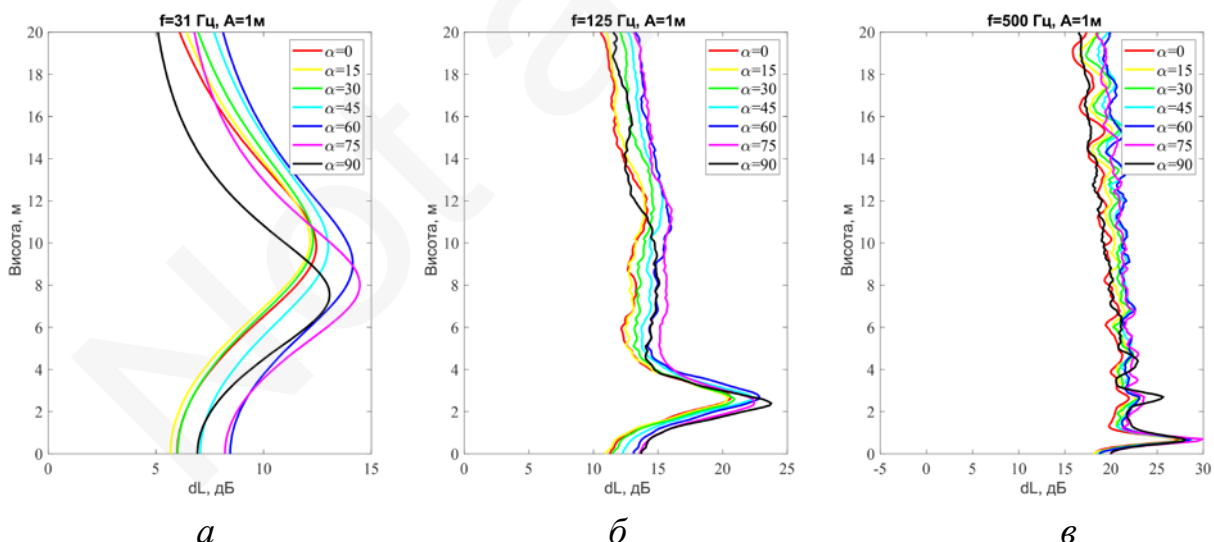
Чергове число	Параметр	Значення						
		0	15	30	45	60	75	90
1	Кут нахилу верхньої частини екрану, $\alpha^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
2	Радіус кривизни екрану, $R$ , м	$\infty$	19,52	10,00	7,07	5,77	5,18	5,00
3	Зміщення центра кола, $A$ , м	$\infty$	18,66	8,66	5,00	2,87	1,34	0
4	Зміщення джерела звуку, $x_0$ , м	1; 5; 15						
5	Середньгеометрична частота октавної смуги, $f$ , Гц	31; 125; 500						
6	Кількість частот в октавній смузі	11						
7	Висота джерел звуку, $h_0$ , м	0,01						
8	Висота екрану, $H$ , м	5,0						

Розташування 3 лінійних джерел звуку характерно для автотранспортних потоків з різною кількістю смуг руху. Висота джерел звуку – 0,01 м відповідає шуму, що виникає під час кочення шини по поверхні дороги.

Дослідження зміни рівнів звуку за екраном проводилося в точках на відстані 20 м за екраном з висотою від 0 до 20 м (з кроком 0,1 м).

## 6.2. Результати розрахунку

На рис. 3–5 зображено ефективність шумозахисних екранів за різних кутів нахилу верхнього краю, при різних положеннях джерела звуку та на різних частотах.

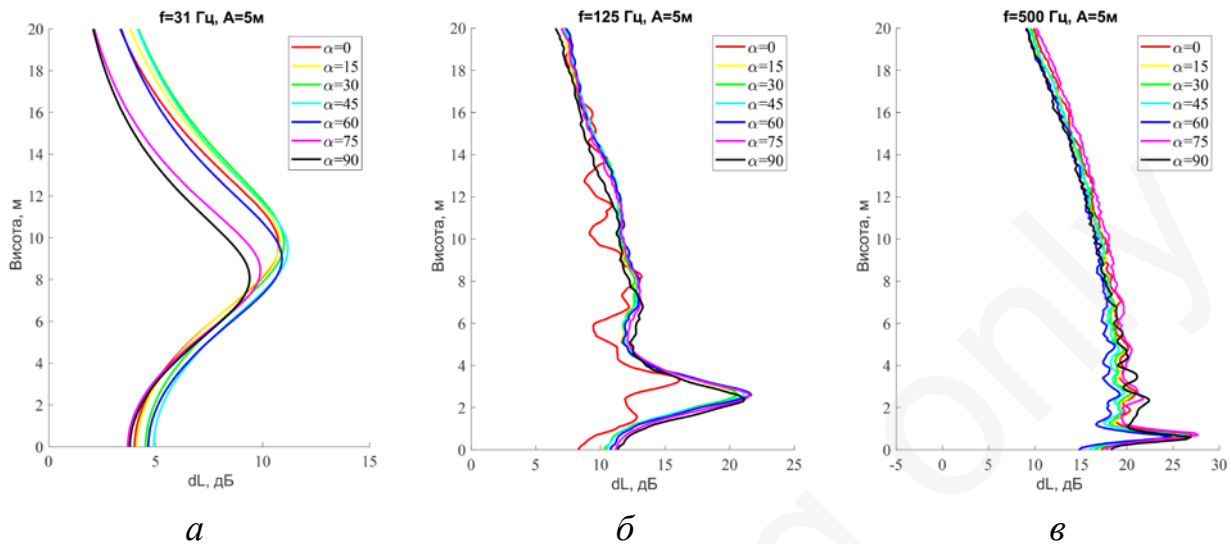


**Рис. 3.** Ефективність екрану в залежності від кута нахилу верхньої частини екрану при  $A=1$  м: *а* –  $f=31$  Гц; *б* –  $f=125$  Гц; *в* –  $f=500$  Гц

На рис. 3, *а–в* показана ефективність екрану за умови, що відстань до джерела звуку  $A=1$  м. На рис. 3, *а* видно, що найбільша ефективність на частоті

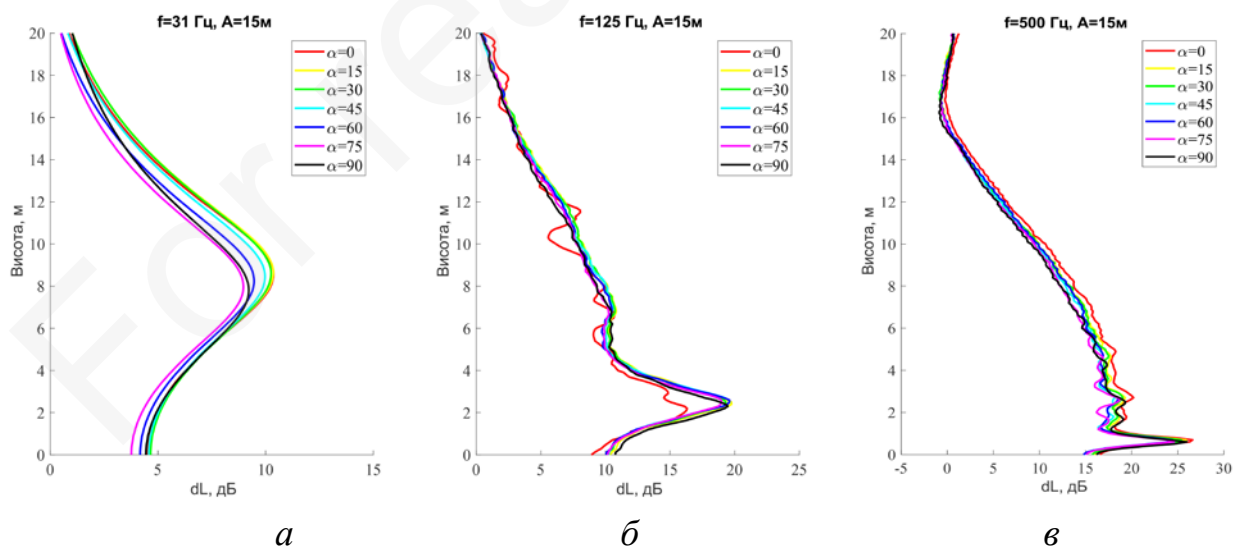
31 Гц досягається при кутах нахилу верхньої частини екрану  $60^\circ$  та  $75^\circ$ .

Для октавної смуги з середньгеометричною частотою 125 Гц (рис. 3, б) також найбільша ефективність екрану спостерігається для кутів  $60^\circ$  та  $75^\circ$ . При збільшенні частоти до 500 Гц (рис. 3, в) ефективність екрану сягає максимальних значень на різних висотах за кутів  $45-75^\circ$ .



**Рис. 4.** Ефективність екрану в залежності від кута нахилу верхньої частини екрану при  $A=5$  м: *a* –  $f=31$  Гц; *б* –  $f=125$  Гц; *в* –  $f=500$  Гц

Збільшення відстані між джерелом звуку та екраном до 5 м (рис. 4, *a-v*) призводить до того, що максимальна ефективність спостерігається при кутах  $30-60^\circ$  в октавній смузі 31 Гц. На частотах 125 Гц та 500 Гц ефективність вже слабо залежить від кута нахилу верхньої кромки екрану.



**Рис. 5.** Ефективність екрану в залежності від кута нахилу верхньої частини екрану при  $A=15$  м: *a* –  $f=31$  Гц; *б* –  $f=125$  Гц; *в* –  $f=500$  Гц

При відстані 15 м між екраном та джерелом звуку (рис. 5, *a-v*) вплив кута нахилу стає менш вираженим навіть для октавної смуги з середньгеометричною

частотою 31 Гц. Однак максимальні значення ефективності спостерігаються при кутах  $0-30^\circ$ . При більших частотах (рис. 5, б–в) ефективність екрану не залежить від кута нахилу верхньої частини екрану.

### 6.3. Обговорення результатів

Як показали результати досліджень, зі збільшенням відстані між джерелом звуку та екраном вплив кута нахилу верхньої частини екрану на його ефективність зменшується. Можна стверджувати, що при  $kA > 10$ , де  $k = 2\pi f/c$ , ефективність шумозахисного екрану не залежить від кута нахилу верхньої частини екрану.

На низьких частотах при близькому розташуванні джерела звуку та екрану ( $kA \leq 10$ ) найбільша ефективність шумозахисних екранів досягається при кутах нахилу, що відповідають нормальному падінню звукової хвилі на верхню частину екрана. Тобто бажано, щоб джерело звуку та центр кола, частиною якого є екран, збігалися. Величина збільшення ефективності екрану з похилою верхньою частиною, в порівнянні з вертикальним екраном, може становити 2–4 дБ.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Проведені дослідження показали, що вплив кута нахилу верхньої частини екрану на його ефективність можливий лише на низьких частотах за відносно невеликої відстані між джерелом звуку та екраном. При  $kA > 10$  вплив нахилу верхньої частини екрану на його ефективність є незначним.

*Weaknesses.* До недоліків проведених досліджень слід віднести те, що на даному етапі було проведено лише комп'ютерне моделювання звукового поля довкола округлого екрану з різним кутом нахилу верхньої частини.

*Opportunities.* В подальшому необхідно провести експериментальні дослідження з визначення звукового поля довкола округлих екранів з різними радіусами в натурних умовах чи на фізичних моделях.

Результати таких досліджень дозволять на практиці оцінити необхідність застосування екранів з похилими верхніми частинами.

*Threats.* Застосування екранів з похилою верхньою частиною призводить до зміщення центру мас екрану, що спричиняє необхідність застосування більш масивних стійок та збільшення вимог до несучої здатності фундаментів. Такі матеріальні затрати можуть призвести до нівелювання тих переваг, які обумовлені наявністю похилої верхньої частини екрану.

## 8. Висновки

1. Було побудовано комп'ютерну модель округлих шумозахисних екранів з різними радіусами, що дозволило проаналізувати звукове поле довкола екранів з різними кутами нахилу верхньої частини. За допомогою створеної моделі вдалося оцінити вплив кута нахилу екрану в діапазоні від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  різного положення джерела звуку (від 1 м до 15 м) та в діапазоні частот від 31 Гц до 500 Гц.

2. В результаті проведених досліджень встановлено, що в ближньому полі джерела звуку ( $kA \leq 10$ ), кут нахилу верхньої частини екрану суттєво впливає на зниження рівнів звуку за екраном. Величина збільшення ефективності екрану, в

порівнянні з вертикальним екраном, може сягати 4 дБ. Причому доцільно вибирати кут нахилу верхньої частини екрану таким, щоб напрям звукової хвилі був перпендикулярним до поверхні верхньої частини екрану. В дальньому полі при  $kA > 10$  кут нахилу верхньої частини екрану майже не впливає на його ефективність.

### Література

1. Maekawa, Z. (1968). Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1 (3), 157–173. doi: [http://doi.org/10.1016/0003-682x\(68\)90020-0](http://doi.org/10.1016/0003-682x(68)90020-0)
2. Kurze, U. J., Anderson, G. S. (1971). Sound attenuation by barriers. *Applied Acoustics*, 4 (1), 35–53. doi: [http://doi.org/10.1016/0003-682x\(71\)90024-7](http://doi.org/10.1016/0003-682x(71)90024-7)
3. Simón, F., Pfretzschner, J., de la Colina, C., Moreno, A. (1998). Ground influence on the definition of single rating index for noise barrier protection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104 (1), 232–236. doi: <http://doi.org/10.1121/1.423273>
4. Isei, T. (1980). Absorptive noise barrier on finite impedance ground. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 1 (1), 3–10. doi: <http://doi.org/10.1250/ast.1.3>
5. Hothersall, D. C., Chandler-Wilde, S. N., Hajmirzae, M. N. (1991). Efficiency of single noise barriers. *Journal of Sound and Vibration*, 146 (2), 303–322. doi: [http://doi.org/10.1016/0022-460x\(91\)90765-c](http://doi.org/10.1016/0022-460x(91)90765-c)
6. Oldham, D. J., Egan, C. A. (2011). A parametric investigation of the performance of T-profiled highway noise barriers and the identification of a potential predictive approach. *Applied Acoustics*, 72 (11), 803–813. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.04.012>
7. Kim, K. H., Yoon, G. H. (2015). Optimal rigid and porous material distributions for noise barrier by acoustic topology optimization. *Journal of Sound and Vibration*, 339, 123–142. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.11.030>
8. Yang, C., Pan, J., Cheng, L. (2013). A mechanism study of sound wave-trapping barriers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134 (3), 1960–1969. doi: <http://doi.org/10.1121/1.4816542>
9. Wang, Y., Jiao, Y., Chen, Z. (2018). Research on the well at the top edge of noise barrier. *Applied Acoustics*, 133, 118–122. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.12.018>
10. Zhao, S., Qiu, X., Cheng, J. (2015). An integral equation method for calculating sound field diffracted by a rigid barrier on an impedance ground. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138 (3), 1608–1613. doi: <http://doi.org/10.1121/1.4929933>
11. Ishizuka, T., Fujiwara, K. (2004). Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions. *Applied Acoustics*, 65 (2), 125–141. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2003.08.006>
12. Monazzam, M. R., Lam, Y. W. (2005). Performance of profiled single noise barriers covered with quadratic residue diffusers. *Applied Acoustics*, 66 (6), 709–730. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.08.008>
13. Okubo, T., Fujiwara, K. (1998). Efficiency of a noise barrier on the ground with an acoustically soft cylindrical edge. *Journal of Sound and Vibration*, 216 (5), 771–790. doi: <http://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1720>



14. Didkovskiy, V., Zaets, V., Kotenko, S. (2020). Improvement of the efficiency of noise protective screens due to sound absorption. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (1 (53)), 11–15. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.206018>
15. Fujiwara, K., Hothersall, D. C., Kim, C. (1998). Noise barriers with reactive surfaces. *Applied Acoustics*, 53 (4), 255–272. doi: [http://doi.org/10.1016/s0003-682x\(97\)00064-9](http://doi.org/10.1016/s0003-682x(97)00064-9)
16. Huang, X., Zou, H., Qiu, X. (2020). Effects of the Top Edge Impedance on Sound Barrier Diffraction. *Applied Sciences*, 10 (17), 6042. doi: <http://doi.org/10.3390/app10176042>
17. Wang, Y., Jiao, Y., Chen, Z. (2018). Research on the well at the top edge of noise barrier. *Applied Acoustics*, 133, 118–122. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.12.018>
18. Zaets, V. P. (2012). Noise reduction with soundproof screens. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10), 25–33. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/5605>
19. Trochymenko, M. P., Zaets, V. P., Osipchuk, L. N., Kotenko, S. G. (2019). The efficiency calculation method for noise barriers located on bridge structures. *Science & construction*, 22 (4), 45–51. Available at: <http://journal-niisk.com/index.php/scienceandconstruction/article/view/119/114>
20. Сотникова, Т. А. (2009). Акустические свойства шумозащитного барьера с козырьком. *Акустичний вісник*, 12 (2), 57–64. Available at: [http://hydromech.org.ua/content/pdf/av/av-12-2\(57-64\).pdf](http://hydromech.org.ua/content/pdf/av/av-12-2(57-64).pdf)
21. Zaets, V., Kotenko, S. (2017). Investigation of the efficiency of a noise protection screen with an opening at its base. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (89)), 4–11. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112350>