

УДК 629.113/.115; 534.836.2; 534.286;
621.43.065

DOI: 10.33868/0365-8392-2024-3-280-37-44

© В. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент,
ORCID:0000-0002-1085-5112,
e-mail: fedorov.volodymyr@gmail.com;
© Г. А. Філіпова, канд. техн. наук, професор,
ORCID: 0000-0003-3427-7633,
e-mail: galina_gaj@ukr.net;
© В. М. Босенко, канд. техн. наук, доцент,
ORCID:0000-0002-9654-949X,
e-mail: bosia4ok@ukr.net;
© В. В. Яновський, канд. техн. наук, доцент,
ORCID: 0000-0001-9437-4537,
e-mail: yanovskyi_v@ukr.net
(Національний транспортний університет)

© Volodymyr Fedorov, Ph.D., Associate Professor,
ORCID:0000-0002-1085-5112,
e-mail: fedorov.volodymyr@gmail.com;
© Galyna Filipova, Ph.D., Professor,
ORCID:0000-0003-3427-7633,
e-mail: galina_gaj@ukr.net;
© Volodymyr Bosenko, Ph.D., Associate Professor,
ORCID:0000-0002-9654-949X,
e-mail: bosia4ok@ukr.net;
© Vasyl Yanovsky, Ph.D., Associate Professor,
ORCID: 0000-0001-9437-4537,
e-mail: yanovskyi_v@ukr.net
(National Transport University)

ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛІПТИЧНОГО (СФЕРИЧНОГО) ГЛУШНИКА ШУМУ

RESEARCH OF ACOUSTIC PROPERTIES ELLIPTICAL (SPHERICAL) MUFFLER

Анотація. Розглянуто сферичний та напівсферичний глушники шуму відпрацьованих газів ДВЗ як окремі випадки еліптичного глушника. Сферичний та напівсферичний глушники мають перевагу над еліптичним завдяки своїй дешевизні та простоті у виконанні із практично тією ж акустичною ефективністю. Були розглянуті схеми роботи обох вищевказаних глушників: рух відпрацьованих газів у них, вхідних та відбитих звукових хвиль. Також були наведені складальні креслення напівсферичного глушника як окремих випадок еліптичного. Були проведені аналітичні дослідження акустичних властивостей розробленого еліптичного глушника шуму в низькочастотному діапазоні частот. У високо- та середньочастотних діапазонах еліптичний глушник глушить шум за рахунок ефекту відбиття звуку від стінок глушника та повернення останніх назад у випускну трубу. Для низькочастотного шуму такий ефект практично відсутній. Цей вид шуму в розробленому глушнику глушиться за рахунок високих звукопоглинальних властивостей внутрішніх стінок глушника. Для визначення ефекту придушення шуму в низькочастотній області використовувались закони архітектурної акустики, зокрема вираховувався час реверберації для середньо геометричних частот від 125 Гц до 6000 Гц. Для забезпечення високих звукопоглинальних властивостей внутрішніх поверхонь глушників запропоновано використання скла спеціального. Наведено приблизну залежність коефіцієнту звукопоглинання скла спеціального від частоти. У процесі розрахунку акустичної ефективності глушника була отримана залежність часу реверберації у глушнику від частоти шуму. Водночас встановлено, що ефективність в діапазоні низьких частот становить 30 дБ.

Ключові слова: СБА «Новатор», глушник шуму, відпрацьовані гази, акустика, еліптичний глушник, сферичний глушник, звукопоглинання, скло, частота, акустична ефективність.

Abstract. In this work, spherical and hemispherical silencers of exhaust gases of internal combustion engines are considered as separate cases of an elliptical silencer. Spherical and hemispherical mufflers are preferred over elliptical mufflers based on their cheapness and ease of implementation with practically the same acoustic efficiency. The schemes of operation of both of the above silencers were considered: the movement of exhaust gases in them, incoming and reflected sound waves. Assembly drawings of a hemispherical muffler as a special case of an elliptical muffler were also given. Analytical studies of the acoustic properties of the developed elliptical noise muffler in the low frequency range were carried out. In the high- and medium-frequency frequency ranges, the elliptical muffler suppresses noise due to the effect of sound reflection from the walls of the muffler and returning the latter back to the exhaust pipe. For low-frequency noise, such an effect is practically absent. This type of noise is suppressed in the developed muffler due to the high sound-absorbing properties of the muffler's inner walls. To determine the effect of noise suppression in the low-frequency range, the laws of architectural acoustics were used, in particular, the reverberation time was calculated for geometric mean frequencies from 125 Hz to 6000 Hz. To ensure high sound-absorbing properties of the internal surfaces of the mufflers, the use of special glass is proposed. The approximate dependence of the sound absorption coefficient of special glass on frequency is given. In the process of calculating the acoustic efficiency of the muffler, the dependence of the reverberation time in the muffler on the noise frequency was obtained. At the same time, it was established that the efficiency in the area of low frequencies is 30 dB.

Keywords: armored car, "Novator", noise muffler, exhaust gases, acoustics, elliptical muffler, spherical muffler, sound absorption, glass, frequency, acoustic efficiency.

Вступ

Враховуючи довготривалий характер повномасштабної війни проти агресії російської федерації, найбільшу гарантію перемоги України можуть дати лише Збройні Сили. Хоча допомогу партнерів також треба враховувати. Основою сухопутних військ ЗСУ є броневих автомобілі, для яких маскування – життєво важливий фактор. Зменшення зовнішнього шуму цього виду техніки веде до поліпшення її маскувальних властивостей, що часто досягається завдяки ефективним глушникам шуму. В роботі розглянуто еліптичний та сферичний глушники як окремі випадки еліптичного глушника. Зроблено аналітичні дослідження розроблених глушників.

Основна частина

У [1] розглянутий розроблений глушник шуму відпрацьованих газів ДВЗ, який через конструктивні особливості отримав назву «еліптичний». Цей глушник розроблявся для пониження рівня зовнішнього шуму передусім СБА «Новатор». У цій роботі розглянемо такі завдання:

- розробка конструкції сферичного глушника як окремого випадку еліптичного;
- дослідження акустичних властивостей еліптичного (сферичного) глушника шуму.

1. Конструкція та принцип дії сферичного глушника шуму

Розглянемо окремий випадок еліптичного глушника: сферичний. Певною мірою сферичний глушник кращий за еліптичний, оскільки дешевший у виконанні.

У запропонованому «сферичному» глушнику шуму звукові хвилі, що потрапляють у глушник, повертаються назад у вихлопну трубу, оскільки зріз останньої перебуває у фокусі – центрі сфери.

Розглянемо принцип дії сферичного глушника (рис. 1). Звукові хвилі 4 (шум відпрацьованих газів) рухаються по вхідному патрубку 2 і потрапляють у корпус 1 сфери-

чного глушника. Відбиваючись від стінок в умовній точці А, через яку проходить дотична 7 до сфери глушника, пряма звукова хвиля 4 перетворюється у відбиту звукову хвилю 5. Ця хвиля рухається назад у центр сфери, тобто у вхідний патрубок 2. При цьому у сферичний глушник зі вхідного патрубка потрапляють відпрацьовані гази, які позначені на рис. 1 стрілками 8, а відбившись від стінок глушника, залишають останній у напрямках, що показані стрілками 9 через випускний патрубок 3.

Аналогічною є робота напівсферичного глушника шуму (рис. 2).

Необхідно зазначити, що акустична ефективність сферичного глушника тим вища, чим більше співвідношення діаметрів сфери і впускного патрубка. В ідеальному випадку це співвідношення має прагнути до безкінечності. Очевидно, що на практиці це неможливо. Достатньо, щоб це співвідношення перебувало в межах 5 – 10.

На рис. 3 і рис. 4 наведений розроблений сферичний глушник шуму для СБА «Новатор»: на рис. 3 – головний вигляд та вигляд зліва; на рис. 4 – вигляд зверху.

Сферичний та напівсферичний глушники є помітно технологічнішими у виготовленні (а значить, і дешевшими) порівняно з еліпсоїдним глушником. Також необхідно зауважити, що напівсферичний глушник є дешевшим порівняно зі сферичним. Це припущення буде доведено нижче.

2. Дослідження акустичних властивостей розробленого еліптичного глушника шуму в низькочастотному діапазоні частот

Наші дослідження показали, що розроблений глушник шуму в різних частотних діапазонах буде проявляти принципово різні звукопридушувальні властивості. Математична модель повернення звукових хвиль назад у випускну трубу буде справедливою лише для високочастотного діапазону шуму, а для середніх частот цей ефект буде проявлятися значно слабше. Для низькочастотного шуму він практично буде відсутнім.

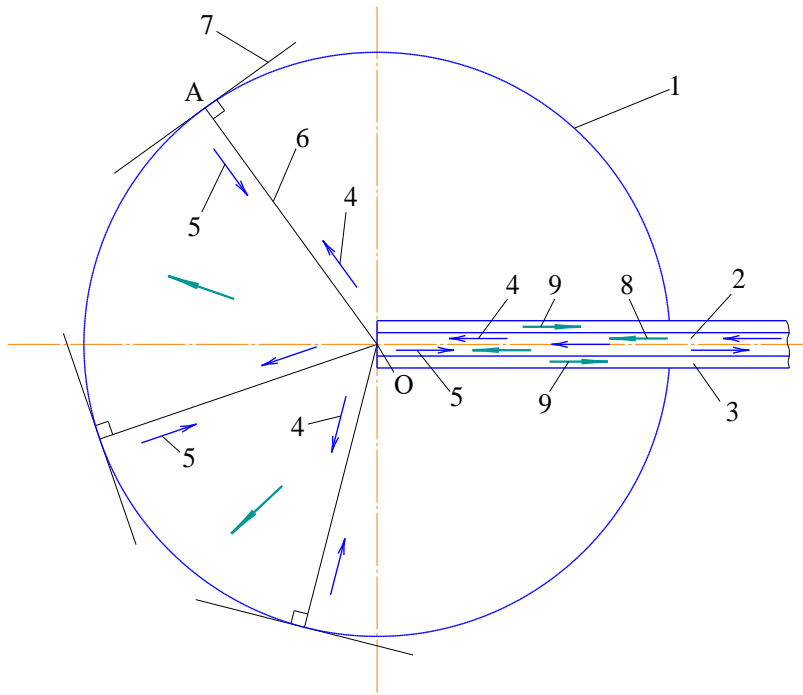


Рис. 1. Сферичний глушник шуму відпрацьованих газів ДВЗ:

О – центр сфери; А – точка на сфері, в яку надходить звукова хвиля;
 1 – корпус сферичного глушника шуму; 2, 3 – вхідний та вихідний патрубки відповідно;
 4, 5 – пряма та відбита звукові хвилі відповідно; 6 – напрям, за яким пряма звукова хвиля 4 надходить у точку А; 7 – дотична до кола сфери у точці А; 8, 9 – вхідний та вихідний потік відпрацьованих газів відповідно

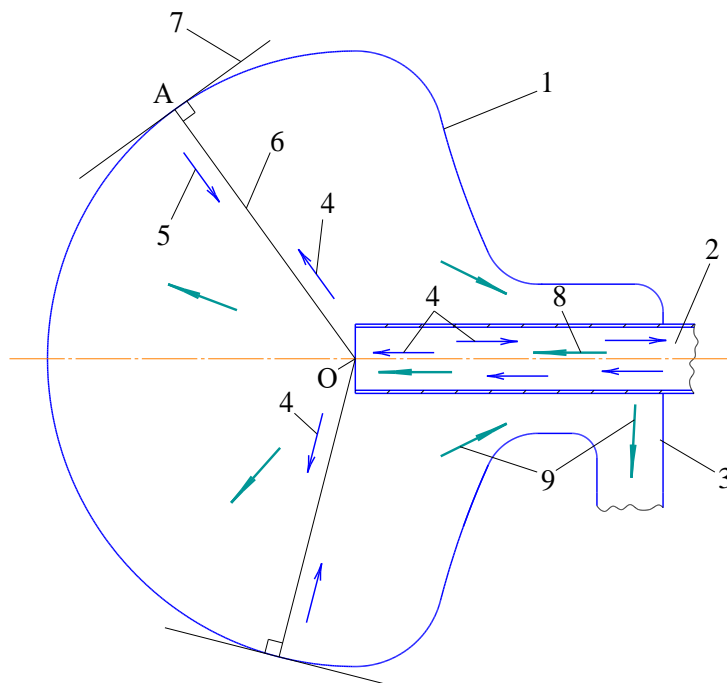


Рис. 2. Напівсферичний глушник шуму відпрацьованих газів ДВЗ:

О – центр сфери; А – точка на сфері, в яку надходить звукова хвиля;
 1 – корпус сферичного глушника шуму; 2, 3 – вхідний та вихідний патрубки відповідно;
 4, 5 – пряма та відбита звукові хвилі відповідно; 6 – напрям, за яким пряма звукова хвиля 4 надходить у точку А; 7 – дотична до кола сфери у точці А; 8, 9 – вхідний та вихідний потік відпрацьованих газів відповідно

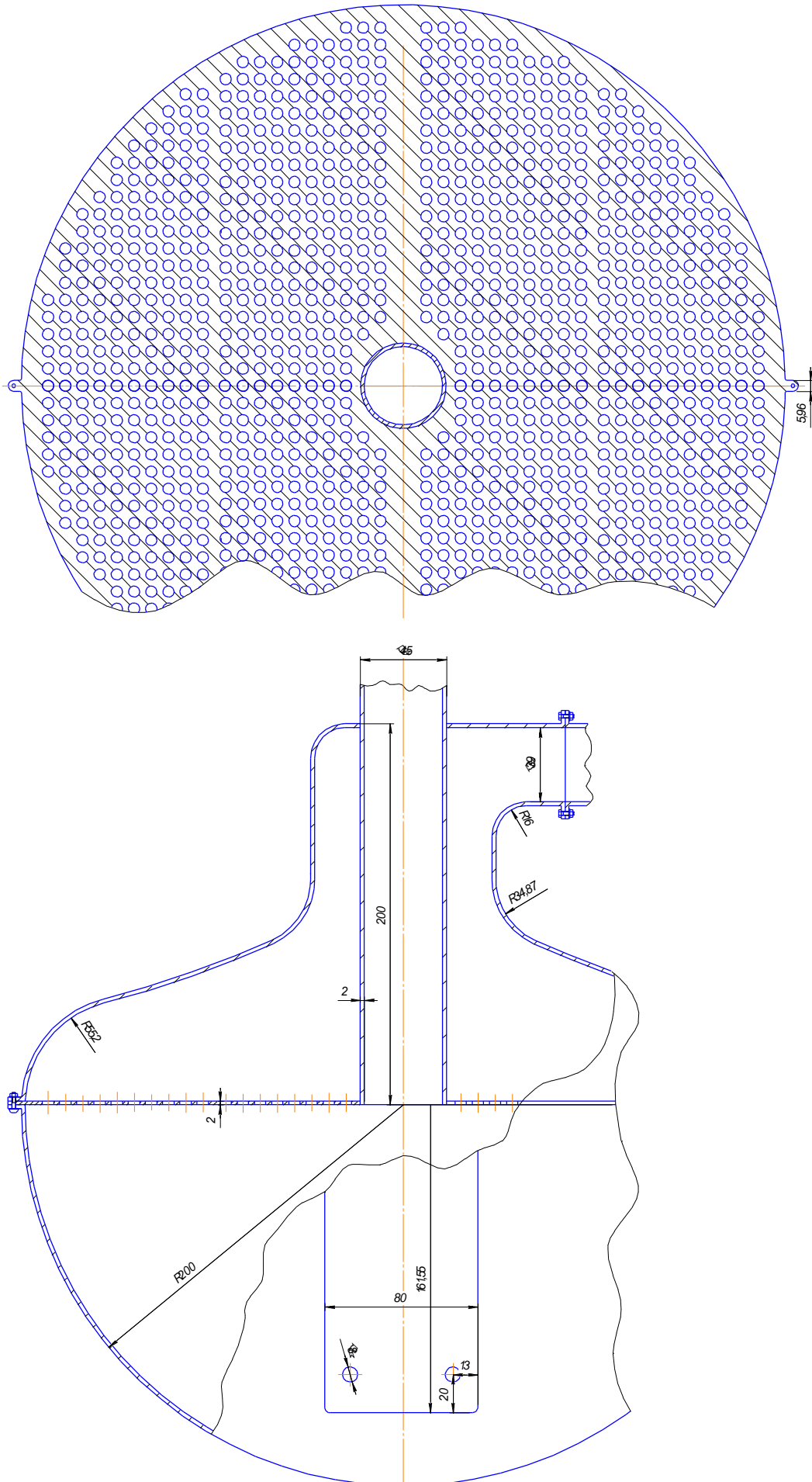


Рис. 3. Складальне креслення напісферичного глушника шуму відпрацьованих газів ДВЗ (головний вид і вид зліва)

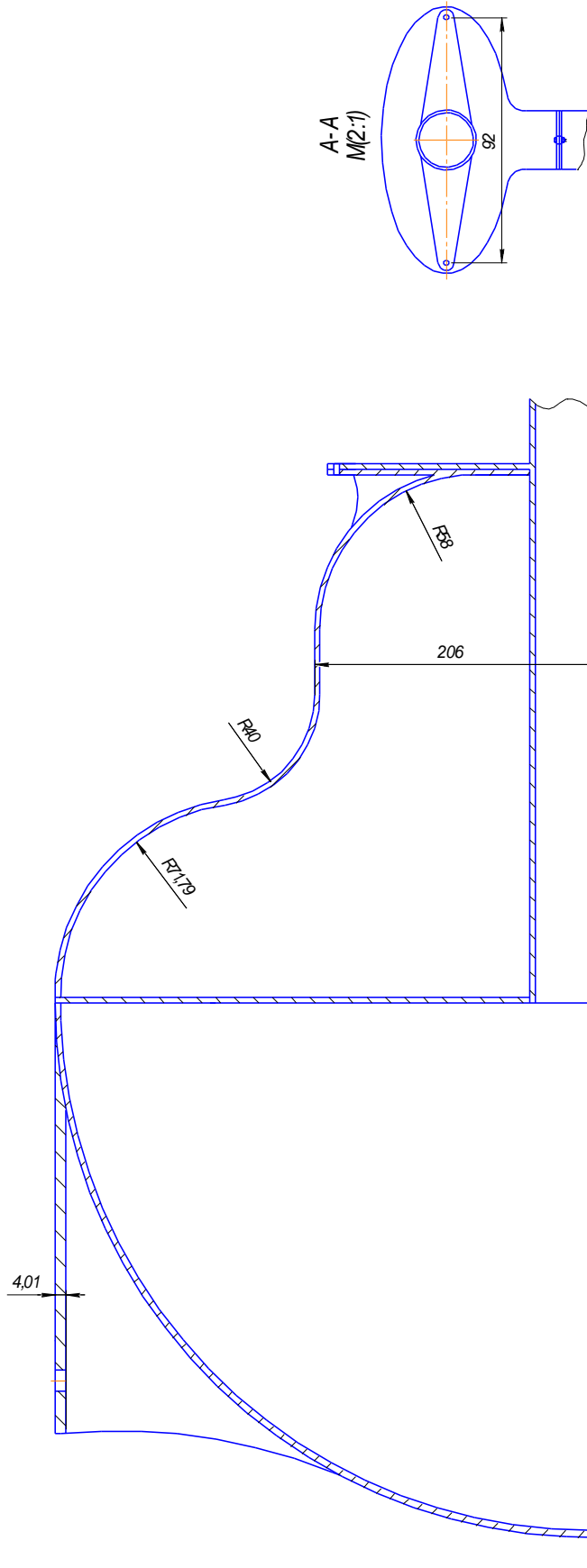


Рис. 4. Складальне креслення напісферичного глушника шуму відпрацьованих газів ДВЗ (вид зверху)

Виходячи з наведеного вище висновку, нами було розроблено таке рішення для низькочастотного (НЧ) діапазону шуму. Було запропоновано НЧ шум придушувати за допомогою внутрішнього покриття глушника. Це покриття повинно мати високі звукопоглинальні властивості саме в діапазоні, в якому еліпсоїдний ефект буде слабким.

Як покриття внутрішньої частини було обране скло спеціальне, звукопоглинальні властивості якого наведені на **рис. 5**.

Виразуємо ефект зниження шуму в глушнику в діапазоні НЧ через явище реверберації. Для визначення часу реверберації T у замкнутому просторі необхідно визначити його об'єм V , м³, сумарну площу обмежувальних поверхонь $S_{заг}$, м², еквівалентну площу звукопоглинання $A_{заг}$, м² [2]:

$$T = 0,163V/A_{заг}.$$

Еквівалентну площу звукопоглинання знаходимо наступним чином:

$$A_{заг} = \sum \alpha_i S_i.$$

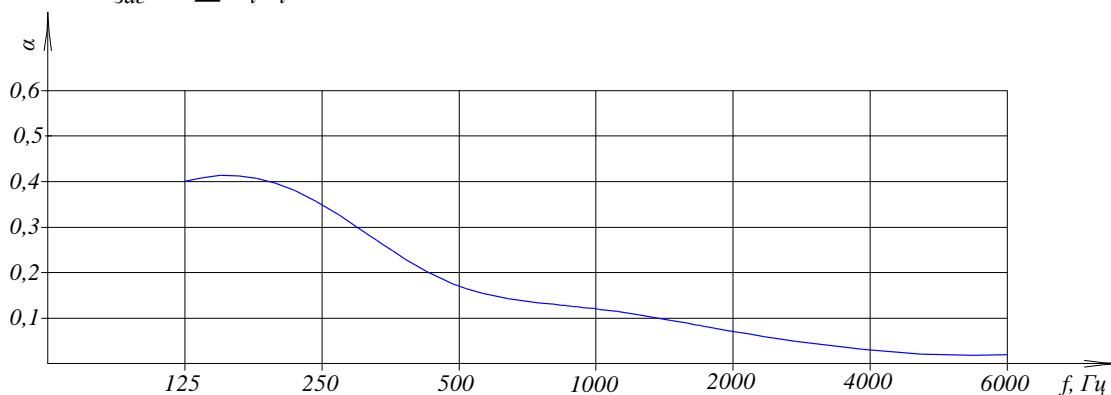


Рис. 5. Залежність коефіцієнту звукопоглинання α скла спеціального від частоти

Об'єм та площу поверхні еліпсоїда обертання можна знайти за такими формулами (**рис. 6**) [3]:

$$V_{елінса} = \frac{4}{3} \pi abc;$$

$$S_{елінса} = 2\pi a \left(a + \frac{b^2}{\sqrt{b^2 - a^2}} \arcsin \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{b} \right)$$

Оскільки, як було показано вище, економічно доцільніше використати напівеліптичний глушник, то відповідно будемо мати його об'єм та площу поверхонь (**рис. 7**):

$$V_{1/2елінса} = \frac{2}{3} \pi abc.$$

$$S_{1/2елінса} = \pi a \left(a + \frac{b^2}{\sqrt{b^2 - a^2}} \arcsin \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{b} \right)$$

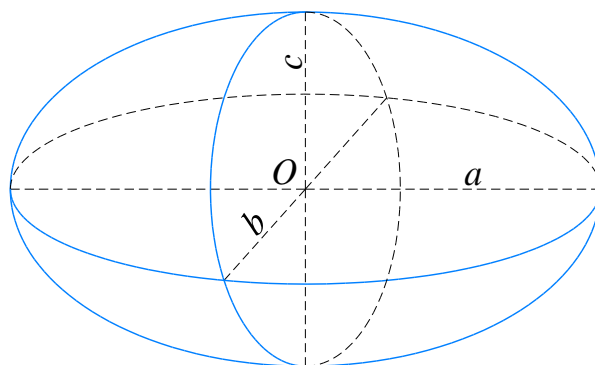


Рис. 6. До визначення об'єму та площі еліпсоїда обертання

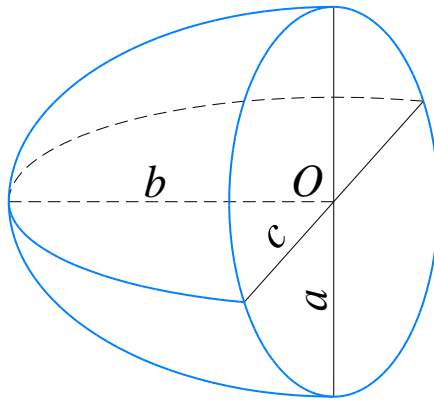


Рис. 7. До визначення об'єму та площі напівеліпсоїда обертання

Оскільки ми взяли простіший випадок напівеліпсоїда: півсферу, то знайдемо для нього об'єм та площу поверхонь з урахуванням розмірів (**рис. 7**):

$$V_{1/2\text{еліпсоїда}} = \frac{2}{3} \pi abc = \frac{2}{3} \pi 0,2^3 = 0,01676 \text{ м}^3;$$

$$S_{1/2\text{еліпсоїда}} = 2\pi a^2 = 2\pi 0,2^2 = 0,251 \text{ м}^2.$$

Тоді знайдемо сумарну площу обмежувальних поверхонь $S_{\text{заг}}$, час реверберації T з урахування коефіцієнту звукопоглинання α скла (**рис. 5**) для ряду частот:

$$125 \text{ Гц} - A_{\text{заг}} = 0,4 \times 0,251 = 0,10 \text{ м}^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow T_{125} = 0,163 \times 0,01676 / 0,10 = 0,027 \text{ с};$$

$$250 \text{ Гц} - A_{\text{заг}} = 0,35 \times 0,251 = 0,088 \text{ м}^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow T_{250} = 0,031 \text{ с};$$

$$500 \text{ Гц} - A_{\text{заг}} = 0,18 \times 0,251 = 0,045 \text{ м}^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow T_{500} = 0,061 \text{ с};$$

$$1000 \text{ Гц} - A_{\text{заг}} = 0,12 \times 0,251 = 0,030 \text{ м}^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow T_{1000} = 0,091 \text{ с};$$

$$2000 \text{ Гц} - A_{\text{заг}} = 0,08 \times 0,251 = 0,020 \text{ м}^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow T_{2000} = 0,137 \text{ с};$$

$$4000 \text{ Гц} - A_{\text{заг}} = 0,04 \times 0,251 = 0,010 \text{ м}^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow T_{4000} = 0,273 \text{ с};$$

$$6000 \text{ Гц} - A_{\text{заг}} = 0,03 \times 0,251 = 0,0075 \text{ м}^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow T_{6000} = 0,364 \text{ с}.$$

Отримані результати можна представити графічно (**рис. 8**).

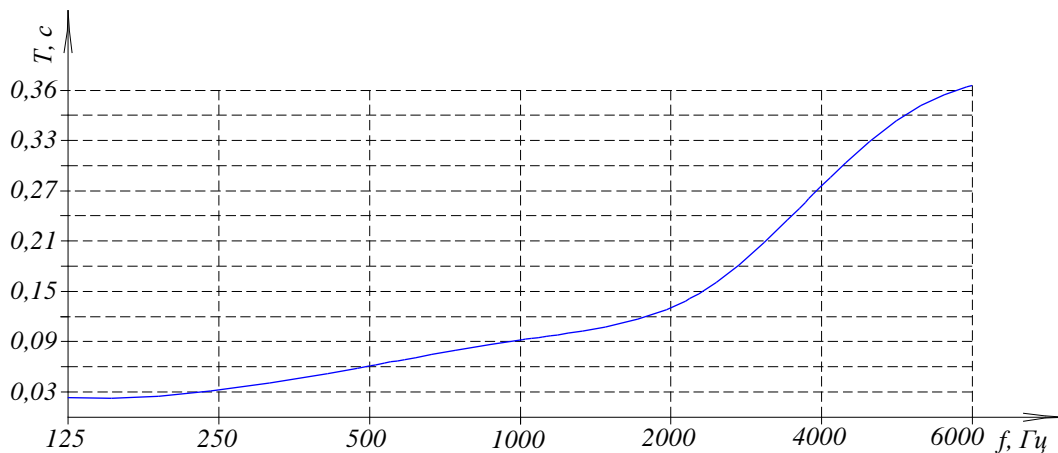


Рис. 8. Залежність часу реверберації у глушнику від частоти шуму

Виходячи з вищенаведеної залежності, маємо наближену залежність зниження

рівня шуму від частоти в діапазоні НЧ (рис. 9).

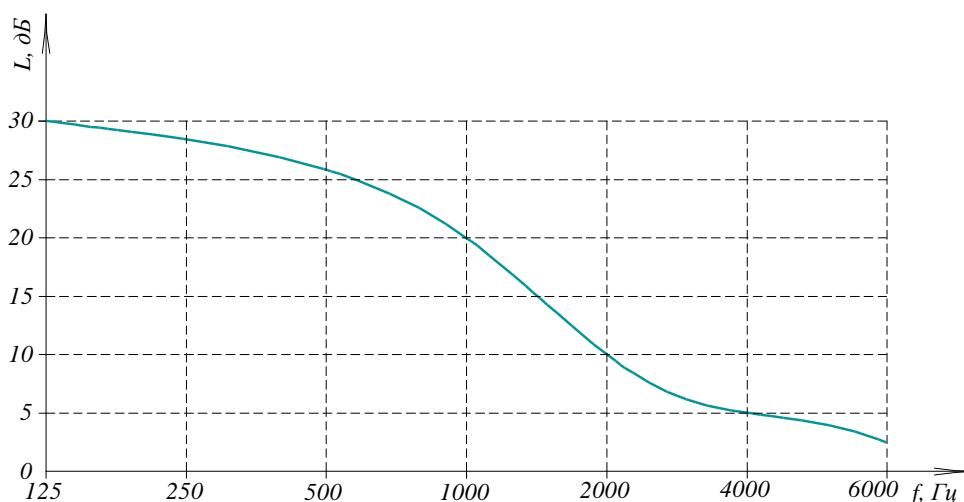


Рис. 9. Залежність зниження рівня шуму від частоти (діапазон НЧ)

Висновки

У роботі визначено аналітичним шляхом акустичну ефективність в діапазоні низьких частот розробленого напівсферичного глушника шуму відпрацьованих газів ДВЗ, який є окремим випадком еліптичного глушника. При цьому встановлено, що ефективність в діапазоні НЧ становить 30 дБ. Для визначення цієї ефективності використовувались закони архітектурної акустики, затухання звуку розглядалось у глушнику як у замкнутому приміщенні з розрахунком часу реверберації.

References

1. Fedorov V.V., Korpach O.A., Yashchenko D.M., Bosenko V.M. (2023). External noise reduction "Novator" armored car using a highly efficient silencer [Znyzhennya zovnishn'oho shumu broneavtomobilya «Novator» zastosuvannyam vysokoefektyvnoho hlushnyka shumu]. Kyiv, Avtoshlyahovik Ukraine, 3 (275), 36 – 41. Retrieved from http://journal.insat.org.ua/?page_id=6071&lang=uk
2. Fedorov V.V. (2008). Car acoustics: Print [Akustyka avtomobilya: Prynt]. Kyiv, 285 [in Ukraine].
3. Financial Calculator. Calculator of the ellipsoid volume [Finansovyy kal'kulyator. Kal'kulyator ob'yemu elipsoyida] Retrieved from <https://fin-calc.org.ua/ua/calculator/geometry/volume/ellipsoid/>.