

© 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  
 (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  
 (National Transport University)

## ГЛУШНИК ШУМУ «ЧОРНА ДІРКА» ЯК ЗАСІБ ПОЛІПШЕННЯ МАСКУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІЙСЬКОВОГО АВТОМОБІЛЯ КРАЗ-5233ВЕ «СПЕЦНАЗ»

### "BLACK HOLE" NOISE MUFFLER AS A MEANS OF IMPROVING THE CAMOUFLAGE PROPERTIES OF THE KRAZ-5233VE "SPETSNAZ" MILITARY VEHICLE

**Анотація.** Для військової техніки, крім основних експлуатаційних характеристик (тягово-швидкісних, гальмівних, паливної економічності, керованості, стійкості, плавності руху і прохідності), надзвичайно важливі також маскувальні характеристики. Мається на увазі здатність військової техніки до прихованого маскування з метою запобігання або усунення ознак оголення військ і об'єктів. Приховування забезпечується застосуванням камуфляжу, маскуванням під фон підручними засобами, створенням димових завіс, застосуванням маскувальних покриттів, звуковим маскуванням тощо. Існують два принципово протилежних види маскування звуку: або створення шумових перешкод, в яких необхідно приховати шум бойової техніки, або створення «безшумної» військової техніки шляхом зниження рівня зовнішнього шуму. Для автомобіля КРАЗ-5233ВЕ «Спецназ», який належить до військової техніки, життєво важливою характеристикою є рівень маскувальних властивостей. Очевидно, що зменшення його рівня зовнішнього шуму сприяє поліпшенню маскувальних властивостей останнього. Основними джерелами зовнішнього шуму автомобіля є двигун, корпус та колеса. У шумі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) найпотужнішою складовою є шум відпрацьованих газів. Тобто, для зменшення рівня зовнішнього шуму автомобіля необхідно або вдосконалити існуючий глушник шуму відпрацьованих газів ДВЗ, або створити новий акустично високоефективний глушник. Враховуючи, що створення глушників шуму відпрацьованих газів триває понад століття, стає практично очевидною необхідність нових підходів для розв'язування цього завдання. Під час розробки глушника за основу було взято популярну в оптиці модель абсолютно чорного тіла у вигляді ізольованої макропорожнини з малим отвором: промінь, потрапивши крізь отвір у порожнину, зазнає багаторазового відбиття, частково поглинається під час кожного з них і практично не повертається звідти. Розроблено математичну модель роботи даного глушника (надано результати розрахунків ефективності глушника). Зроблено прогноз залежності рівня зовнішнього шуму автомобіля КРАЗ-5233ВЕ «Спецназ» від швидкості руху.

**Ключові слова:** автомобіль, КРАЗ-5233ВЕ «Спецназ», шум, маскування, глушник шуму, відпрацьовані гази, абсолютно чорне тіло, чорна дірка, двигун, магістральний цикл.

**Abstract.** For military equipment, in addition to the main operational characteristics (traction and speed, braking, fuel efficiency, controllability, stability, smoothness of movement and passability), camouflage characteristics are also extremely important. It refers to the ability of military equipment to covertly disguise in order to prevent or eliminate signs of exposure of troops and objects. Concealment is ensured by the use of camouflage, masking under the background with improvised means, creating smoke screens, using camouflage coatings, sound masking, etc. There are two fundamentally opposite types of sound masking: either the creation of noise barriers, in which it is necessary to hide the noise of military equipment, or the creation of "silent" military equipment by reducing the level of external noise. For the KrAZ-5233VE "Spetsnaz" vehicle, which belongs to military equipment, a vital characteristic is the level of camouflage properties. It is obvious that reducing its level of external noise helps to improve the masking properties of the latter. The main sources of external car noise are the engine, body and wheels. In the noise of the internal combustion engine (ICE), the most powerful component is the noise of exhaust gases. That is, in order to reduce the external noise level of the car, it is necessary either to improve the existing muffler of the exhaust gases of the internal combustion engine, or to create a new acoustically highly effective muffler. Given that the development of exhaust silencers has been going on for over a century, the need for new approaches to solving this problem is almost obvious. When developing the muffler, the model of a completely black body popular in optics was taken as a basis in the form of an isolated macrocavity with a small hole: the beam, having entered the cavity through the hole, undergoes multiple reflections, is partially absorbed during each of them and practically does not return from there. A mathematical model of the oper-

ation of this muffler has been developed (the results of muffler efficiency calculations are provided). A forecast of the dependence of the external noise level of the KrAZ-5233VE "Spetsnaz" vehicle on the speed of movement was made.

**Keywords:** car, KrAZ-5233VE "Spetsnaz", noise, camouflage, silencer, exhaust gases, completely black body, black hole, engine, trunk cycle.

### Вступ

Для військових автомобілів, до яких належить і KrAZ-5233BE «Спецназ», життєво важливою характеристикою є рівень маскувальних властивостей. Очевидно, що зменшення рівня зовнішнього шуму таких автомобілів сприяє їхньому поліпшенню.

Зменшення рівня зовнішнього шуму можна досягнути або вдосконаленням існуючого глушника шуму відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ), або створенням нового акустично високоефективного глушника.

Враховуючи, що створення глушників шуму відпрацьованих газів триває понад століття, стає практично очевидно необхідність нових підходів для розв'язування цієї задачі.

### Технічні характеристики автомобіля

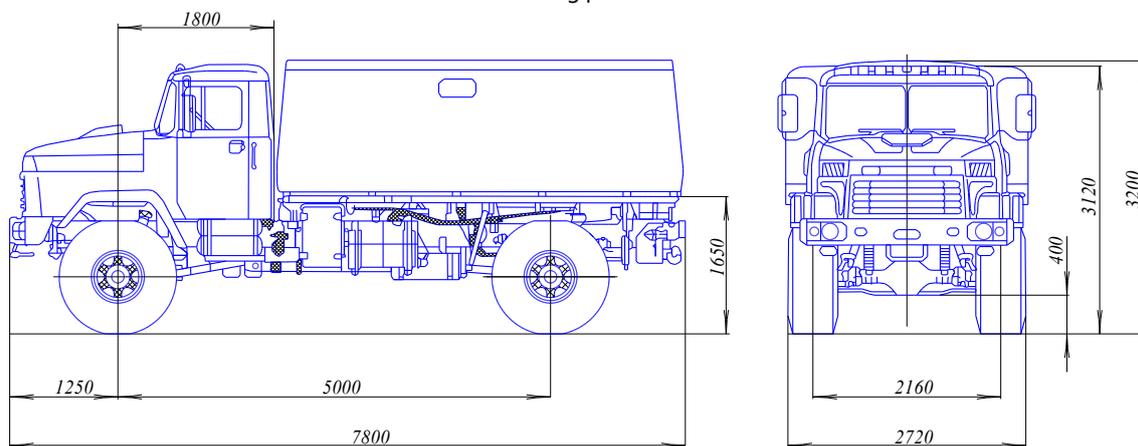
#### КрАЗ-5233 «Спецназ»

У цій роботі нами був досліджений автомобіль KrAZ-5233 «Спецназ» (рис. 1), технічні характеристики якого наведено у табл. 1. Основні геометричні (габаритні) розміри даного автомобіля показані на рис. 2 [1].

Бортовий автомобіль KrAZ-5233BE «Спецназ» підвищеної прохідності призначений для перевезення різноманітних вантажів і людей, буксирування транспортних і спеціальних причепів, а також літаків на аеродромах та експлуатації на дорогах усіх категорій та бездоріжжю. Автомобіль підвищеної прохідності KrAZ-5233BE та його модифікації призначений для оперативної доставки особового складу військових частин, підрозділів спеціального призначення, а також різного обладнання, артилерійських систем калібром до 152 мм, комплексів зв'язку та радіоелектронної боротьби.



**Рис. 1.** Військовий автомобіль KrAZ-5233BE «Спецназ» [1]



**Рис. 2.** Військовий автомобіль КраЗ-5233ВЕ «Спецназ» (основні геометричні (габаритні) розміри)

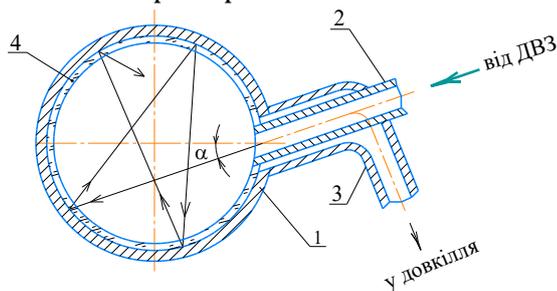
**Таблиця 1**

**Технічні характеристики автомобіля КраЗ-5233ВЕ «Спецназ»**

Колісна формула	4 × 4
Повна маса автомобіля (з лебідкою), кг	17 300
Маса спорядженого автомобіля, кг	11 200
Вантажопідйомність, кг	6000
Витрата палива, л/100 км	35
Максимальна швидкість, км/год	85
Двигун: тип, марка, модель	дизель з турбонаддувом, ЯМЗ-238ДЕ2
Кількість та розташування циліндрів	8, V-подібне
Робочий об'єм, л	14,86
Потужність, кВт (к. с.) при 2100 хв <sup>-1</sup>	243 (330)
Крутний момент, Н·м (кгс·м) при 1100–1300 хв <sup>-1</sup>	1274 (130)
Екологічні норми	Euro-2

### Глушник шуму «чорна дірка»

Для зменшення зовнішнього шуму автомобіля КраЗ-5233ВЕ «Спецназ» нами було вирішено розробити вискоєфективний глушник шуму відпрацьованих газів ДВЗ, який буде принципово відрізнятися від існуючих глушників. За основу взято популярну в оптиці модель абсолютно чорного тіла у вигляді ізольованої макропорожнини з малим отвором:



**Рис. 2.** Принципова схема глушника шуму відпрацьованих газів ДВЗ «чорна дірка»

промінь, потрапивши крізь отвір у порожнину, зазнає багаторазового відбиття, частково поглинається під час кожного з них і практично не повертається звідти.

У розробленому глушнику «чорна дірка» (рис. 2) забезпечується багаторазове відбиття звукових хвиль від внутрішніх поверхонь [2].

Внутрішню поверхню корпусу пропонується покрити шаром звукопоглинального матеріалу 4, зокрема скло; зовнішня поверхня корпусу може бути покрита вібропоглинальним матеріалом (на рис. 2 не показаний).

Глушник шуму відпрацьованих газів працює так:

- відпрацьовані гази, які несуть у собі звукові хвилі, по входному патрубку 2 попадають всередину сферичного корпусу. Оскільки звукові хвилі входять у корпус під кутом  $\alpha$  до

діаметра сфери, вони не відбиваються назад, у вхідний патрубок, а починають багаторазові відбиття від внутрішньої поверхні і решті-решт затухають внаслідок поглинання їхньої енергії при кожному падінні на внутрішню поверхню. У цей час відбувається також аеродинамічне затухання коливань відпрацьованих газів – після попадання у великий об'єм і розширення відбувається вирівнювання тиску у всьому об'ємі сферичного корпусу. Акустично і аеродинамічно заспокоєні гази виходять у вихідний патрубок 3. Аеродинамічний опір руху відпрацьованих газів у глушнику мінімальний.

Розміщення вхідного патрубку 2 всередині вихідного патрубку 3 певною мірою ускладнює конструкцію, проте збільшує кількість відбиттів звукової хвилі до того, як вона повернеться до отвору вихідного патрубку, а отже, збільшує акустичну ефективність глушника.

Якщо внутрішню сферичну поверхню корпусу 1 покрити шаром пористого звукопоглинального матеріалу, акустична ефективність глушника збільшиться, але також збільшиться і втрата потужності двигуна в глушнику. Застосування ж скла як звукопоглинального матеріалу не призведе до збільшення втрат потужності двигуна.

Покриття зовнішньої поверхні глушника вібропоглинальним матеріалом зменшуватиме випромінювання шуму поверхні глушника при її вібрації.

Придушення шуму у розробленому глушнику шуму за рахунок акустичних чинників забирає мінімум енергії у потоку газу, а отже, при цьому втрати потужності двигуна через використання глушника мінімальні. Під акустичними чинниками мається на увазі багаторазові відбиття та одночасне поглинання звукових хвиль внутрішніми стінками глушника.

Придушення шуму у більшості сучасних глушників за рахунок аеродинамічних чинників забирає значну частину енергії двигуна. Під аеродинамічними чинниками мається на увазі тертя збурених відпрацьованих газів об внутрішню поверхню глушника; втрата цими газами коливальної енергії, яка є джерелом шуму, а також в окремих випадках тертя відп-

рацьованих газів об звукопоглинальний матеріал.

### Вплив швидкості руху газів на процес шумоглушіння

Передусім зауважимо, що звукові хвилі в глушнику поширюються не в нерухомому середовищі, а в потоці газів. Оцінимо величину цього впливу. Двигун із робочим об'ємом  $V_h$  за частоти  $n$  обертів за хвилину має об'ємну продуктивність, тобто швидкість перекачування газів

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_h \cdot n}{120} \quad (1)$$

Водночас під час перетікання газів по трубці до глушника:

$$\frac{dV}{dt} = S_1 \cdot v_2 \quad (2)$$

де  $S_1 = \pi r_1^2$  – площа перерізу вхідного патрубку,  $v_2$  – швидкість газів у ньому.

Прирівнявши (1) і (2), отримуємо:

$$v_2 = \frac{V_h \cdot n}{120 S_1} \quad (3)$$

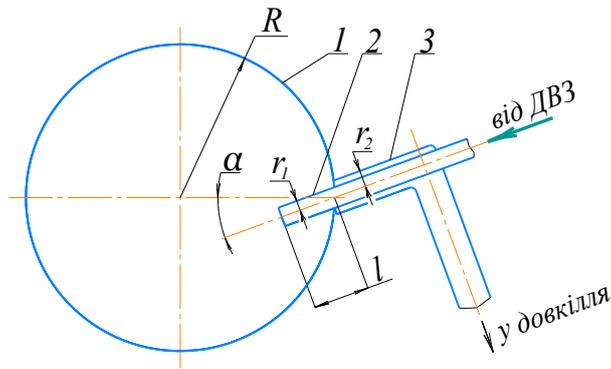
Підставляючи в (3) типові значення ( $V_h = 5 \text{ л}$ ,  $n = 2500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $r_1 = 3 \text{ см}$ ), отримуємо швидкість газів у патрубку  $v_2$  близько 10 % від швидкості звуку. Під час розходження газів порожниною глушника ця швидкість ще значно зменшується, тому потоки газів у глушнику практично не впливають на розповсюдження звукових хвиль.

### Математична модель та прогнозована ефективність розробленого глушника

У математичній моделі розробленого глушника враховано, що:

- між внутрішнім радіусом  $R$  сферичного корпусу глушника (рис. 3) і внутрішніми радіусами вхідного  $r_1$  і вихідного  $r_2$  патрубків виконується співвідношення  $r_1 \ll r_2 \ll R$ ;

- вхідний патрубок висунутий у напрямку до центру сфери на деяку відстань  $l$ , таку, що  $r_1 \ll l \ll R$ , щоб запобігти безпосередньому передаванню звуку найкоротшим шляхом до вихідного патрубку;



**Рис. 3.** До математичної моделі розробленого глушника шуму: 1 – корпус глушника; 2, 3 – вхідний і вихідний патрубки відповідно

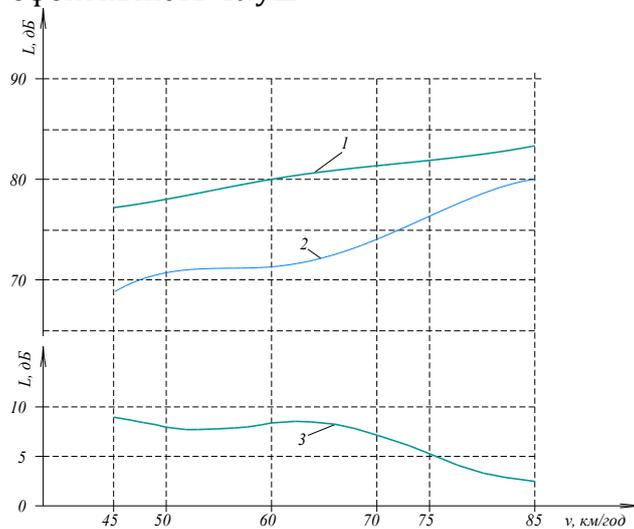
- з огляду на технічні обмеження розмірів глушника його габаритні розміри менші за довжини звукових хвиль  $\lambda$  в областях середніх та низьких частот;

- практично на всіх робочих частотах  $r_1 \ll \lambda$ , тому отвір вхідного патрубка працює як точкове джерело хвиль, яке випромінює їх у вигляді кінцевого кругового пучка.

Розрахунки за розробленою математичною моделлю показали ефективність запропонованого глушника шуму в області низьких частот близько 23 дБ. Хоча ефективність глуш-

ника поки що визначена лише в області низьких частот, можна зробити досить достовірний прогноз щодо зменшення загального рівня шуму військового автомобіля КраЗ-5233ВЕ «Спецназ» завдяки розробленому глушнику шуму.

На **рис. 4** показана прогнозована залежність рівня зовнішнього шуму автомобіля КраЗ-5233ВЕ «Спецназ» від швидкості руху (у магістральному циклі на дорозі) з існуючим та зі розробленим глушниками.



**Рис. 4.** Залежність рівня зовнішнього шуму автомобіля КраЗ-5233ВЕ «Спецназ» від швидкості руху (у магістральному циклі на дорозі): 1 – з існуючим глушником; 2 – зі розробленим глушником; 3 – зменшення рівня зовнішнього шуму автомобіля КраЗ-5233ВЕ «Спецназ»

### Висновки

У результаті впровадження розробленого глушника шуму прогнозується зменшення рівня зовнішнього шуму військового автомобіля КраЗ-5233ВЕ «Спецназ» на 3,5–8,0 дБА у діапазоні швидкостей руху 45–85 км/год. Це значно поліпшить маскувальні властивості автомобіля.

### References

1. KRAZ. (2024). KRAZ-5233VE. Retrieved from <https://banga.ua/pages/avtomobili-kraz/bortovoy-kraz-5233be>.
2. V. V. Fedorov, V. P. Sakhno. (2005). Utility model patent No. 79130 UA, IPC (2006) F01N 1/06. Exhaust silencer. National Transport University. Application 09.02.2005; Publ. 05/25/2007; Bul. No. 7.