

УДК 629.113/.115; 534.836.2; 534.286;
621.43.065

DOI: 10.33868/0365-8392-2024-1-278-36-44

© 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;

(Національний транспортний університет)

© О. О. Кобзар, канд. фіз.-мат. наук, доцент,
ORCID:0000-0001-6956-5884,

e-mail: oleh.kobzar@gmail.com;

(Ягеллонський Університет, Краків, Польща)

© М. В. Малишко, магістрант,

e-mail: nikita03072000@gmail.com

(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;

(National Transport University)

© Oleh Kobzar, Ph.D., Associate Professor,
ORCID:0000-0001-6956-5884,

e-mail: oleh.kobzar@gmail.com;

Jagiellonian University, Cracow, Poland

© Mykyta Malysheko, Master Degree,

e-mail: nikita03072000@gmail.com

(National Transport University)

ВАКУУМНИЙ ГЛУШНИК ШУМУ ЯК ЗАСІБ ПОНИЖЕННЯ РІВНЯ ЗОВНІШНЬОГО ШУМУ БРОНЕАВТОМОБІЛЯ «КОЗАК-7»

VACUUM MUFFLER AS A MEANS OF REDUCING THE EXTERNAL NOISE LEVEL OF THE KOZAK-7 ARMORED CAR

Анотація. Важливою характеристикою військової техніки є рівень маскувальних властивостей. Серед методів маскування важливу роль відіграє зниження зовнішнього шуму військової техніки. У нашій роботі буде розглянуто саме маскування шляхом зниження зовнішнього шуму. За об'єкт дослідження було обрано броньовану бойову колісну машину (далі – броньований автомобіль) «Козак-7». На базі броньованого автомобіля «Козак-7» може бути розроблена лінійка спеціальних машин: командно-штабних, пунктів управління, протитанкових комплексів, медичних тощо. Даний броньований автомобіль, як більшість автомобілів, має декілька основних джерел шуму, які разом створюють його зовнішній шум. Шум відпрацьованих газів є найпотужнішою складовою зовнішнього шуму. Для зниження цього виду шуму використовуються відповідні глушники. Розроблений високоефективний глушник шуму, так званий вакуумний, принцип дії якого полягає у штучному створенні за допомогою насосної установки розрідження безпосередньо у глушнику та у вхідному і вихідному патрубках в момент виходу з двигуна відпрацьованих газів, що унеможлиблює створення акустичного шуму останніми. Виведена залежність часу роботи робочого циліндра глушника від частоти обертання колінчастого валу двигуна, робочого об'єму двигуна, об'єму робочого циліндра, тиску та температури у впускному колекторі двигуна, температури відпрацьованих газів тощо. Ця залежність дасть змогу визначити оптимальні параметри та межі можливостей для застосування описаної системи вакуумного глушника. Розрахунки, виконані для двигуна з робочим об'ємом 5 л, показують, що за частоти обертання 2000–2500 об./хв. робочий час не перевищує ~ 0,05 с. Це означає, що швидкодія клапанів має бути порядку 0,01 с. Зроблені розрахунки ефективності насосної установки, які показали, що для ефективного відкачування відпрацьованих газів, а тим паче для створення достатнього розрідження у вихлопній системі, об'ємна продуктивність насосної установки повинна перевищувати об'ємну продуктивність двигуна (для випадку теоретичного стопроцентного придушення шуму відпрацьованих газів, що на практиці не потрібно, – принаймні в декілька разів). Зроблено прогноз залежності рівня зовнішнього шуму броньованого автомобіля «Козак-7» від швидкості руху з існуючим глушником шуму та із розробленим.

Ключові слова: броньована бойова колісна машина, броньований автомобіль, «Козак-7», шум, маскування, глушник шуму, відпрацьовані гази, двигун, вакуум, часова діаграма, насосна установка, циліндр.

Abstract. An important characteristic of military equipment is the level of camouflage properties. Among the methods of masking, an important role is played by reducing the external noise of military equipment. In this work, masking itself by reducing external noise will be considered. The Kozak-7 armored combat wheeled vehicle (hereinafter referred to as an armored car) was chosen as the object of the study. On the basis of the Kozak-7 armored car, a line of special vehicles can be developed: command and headquarters, control points, anti-tank complexes, medical, etc. This armored car, like most cars, has several main sources of noise, which together create its external noise. Exhaust gas noise is the most powerful component of external noise. Appropriate mufflers are used to reduce this type of noise. A highly efficient noise muffler, the so-called vac-

uum, has been developed, the principle of operation of which is to artificially create a vacuum with the help of a pumping unit directly in the muffler and in the inlet and outlet nozzles at the moment when the exhaust gases leave the engine, which makes it impossible for the latter to create acoustic noise. The dependence of the working time of the working cylinder of the muffler on the frequency of rotation of the engine crankshaft, the working volume of the engine, the volume of the working cylinder, the pressure and temperature in the engine intake manifold, the temperature of the exhaust gases, etc. This dependence will make it possible to determine the optimal parameters and limits of possibilities for the application of the described vacuum muffler system. Calculations made for an engine with a working volume of 5 liters show that at a rotation frequency of 2000-2500 min^{-1} , the working time does not exceed ~ 0.05 s. This means, in turn, that the speed of the valves should be of the order of 0.01 s. Calculations of the efficiency of the pumping unit were made, which showed that for the efficient pumping of exhaust gases, and even more so to create sufficient vacuum in the exhaust system, the volume performance of the pumping unit must exceed the volume performance of the engine (for the case of theoretical one-hundred percent noise suppression of exhaust gases, which is not necessary in practice - at least several times). A forecast of the dependence of the external noise level of the Kozak-7 armored car on the speed of movement with the existing silencer and with the developed one was made.

Keywords: armored combat wheeled vehicle, armored car, "Kozak-7", noise, camouflage, silencer, exhaust gases, engine, vacuum, timing diagram, pumping unit, cylinder.

Вступ

До військових автомобілів, крім загальновідомих виробничих, експлуатаційних, споживчих вимог та вимог безпеки, висувають також специфічні вимоги, зокрема щодо балістичного та протимінного захисту, здатності до маскуванню. У цій роботі розглядається поліпшення маскувальних властивостей військового автомобіля, які є вкрай важливими та залежать від низки факторів: габаритних розмірів, покриття корпусу (термічне випромінювання) та рівня зовнішнього шуму.

Один із найбільших шумів автомобілів – шум відпрацьованих газів двигунів внут-

рішнього згорання (ДВЗ), який зменшують за допомогою відповідних глушників.

Розроблений глушник шуму відпрацьованих газів, принцип дії якого суттєво відрізняється від принципу дії інших існуючих на даний час глушників, пропонується застосувати на броньованій бойовій колісній машині (ББКМ) «Козак-7».

Тактико-технічні характеристики ББКМ «Козак-7»

Тактико-технічні характеристики ББКМ (далі – бронеавтомобіль) «Козак-7» (рис. 1) наведені у табл. 1 [1, 2].



Рис. 1. Бронеавтомобіль «Козак-7» [1]

Тактико-технічні характеристики бронев автомобіля «Козак-7»

1.	Повна маса, кг	11 800
2.	Довжина, мм	6 600
3.	Ширина, мм	2 340
4.	Висота (по корпусу), мм	2 600
5.	Двигун	Power Stroke V8 turbodiesel
6.	Потужність, кВт (к.с.)	287 (390)
7.	Крутний момент, Н·м	997
8.	Коробка передач	автоматична
9.	Максимальна швидкість, км/год	150
10.	Дорожній просвіт (кліренс), мм	370
11.	Кут підйому	60
12.	Кут руху під боковим ухилом	30
13.	Балістичний захист	ПЗСА-5
14.	Протимінний захист, кг	6
15.	Кількість місць, осіб	9
16.	Основне озброєння або бойовий модуль	НСВТ/ПКМ 12,7 мм НСВТ спарений з 7,62 мм ПКТ

Вакуумний глушник шуму

З метою зниження рівня зовнішнього шуму нами був розроблений так званий вакуумний глушник шуму відпрацьованих газів ДВЗ, принцип дії якого полягає у зменшенні пульсацій мас відпрацьованих газів внаслідок потрапляння останніх у штучно створену зону пониженого тиску, а також певному зниженні звукових коливань, що існують у відпрацьованих газах, внаслідок перебування останніх деякий час у закритому просторі, де відбувається звукопоглинання стінками, що обмежують цей простір.

Вакуумний глушник (**рис. 2**), що призначений для зменшення шуму відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згорання 1, складається з циліндра 3 та насосної установки 5. При цьому циліндр глушника, розміщений на відстані від циліндра двигуна,

більшій ніж відстань переходу хвилі розрідження-стискування відпрацьованих газів у звукову хвилю. Від двигуна 1 відпрацьовані гази через вхідний патрубок 2 глушника надходять до циліндра 3, що має певний об'єм (на **рис. 2** рух відпрацьованих газів показано стрілками). У циліндрі 3 за допомогою насосної установки 5 створюється понижений тиск. В ідеалі у циліндрі має бути вакуум (тому глушник названо *вакуумним*). Ступінь розрідження у циліндрі диктується виключно економічною доцільністю. Понижений тиск у циліндрі передається через вхідний патрубок 2 до самого випускного колектора двигуна 1 і тим самим перешкоджає утворенню хвиль розрідження-стискування, тобто згладжує пульсації тиску відпрацьованих газів, а отже, і зменшує шум останніх.

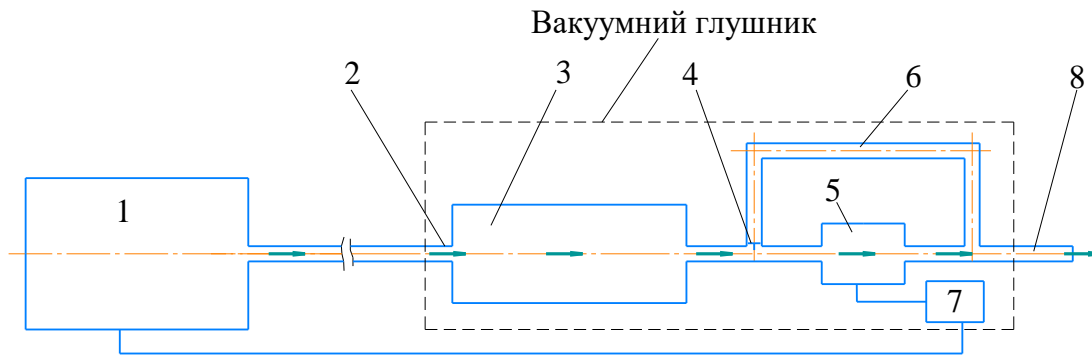


Рис. 2. Вакуумний глушник шуму (принципова схема):

1 – двигун внутрішнього згоряння; 2 – вхідний патрубок; 3 – циліндр; 4 – запобіжний клапан; 5 – насосна установка; 6 – обхідна труба; 7 – блок управління; 8 – трубка

У разі відмови насосної установки 5 відпрацьовані гази підуть в обхід останньої через обхідну трубу 6. При цьому спрацює запобіжний клапан 4. Робота насосної установки управляється блоком управління 7, який має зв'язок із двигуном. Після насосної установки відпрацьовані гази потрапляють у довкілля через трубку 8.

Розглянемо робочий процес вакуумного глушника шуму відпрацьованих газів ДВЗ (рис. 3), що складається з двох робочих циліндрів 1, 2 та компенсаційного циліндра 3, вхідного 4 та вихідного 5 патрубків, трубопроводів 6 – 11, клапанів 12 – 18, а також насосної установки 19.

Вакуумний глушник шуму працює таким чином.

Відпрацьовані гази надходять від ДВЗ до глушника по вхідному патрубку 4 (рис. 3).

На першому етапі роботи глушника (рис. 3, а) відпрацьовані гази по трубопроводу 7 через відкритий клапан 13 (клапан 12 закритий) надходять у робочий циліндр 2, тиск у якому був заздалегідь понижений завдяки роботі насосної установки 19. Відпрацьовані гази (позначені товстими стрілками) у робочому циліндрі 2 мають енергію

турбулентних та звукових коливань. Водночас відпрацьовані гази, які перебували у замкненому робочому циліндрі 1, заспокоївшись, починають виходити з останнього. Клапани 14 і 16 при цьому відкриті, відпрацьовані гази з робочого циліндра 1 відкачуються насосною установкою 19 і викидаються у довкілля.

На другому етапі (рис. 3, б) відпрацьовані гази поступають по трубопроводу 6 у робочий циліндр 1, а відпрацьовані гази із робочого циліндра 2, які заспокоїлись, перебуваючи у ньому, відкачуються насосною установкою 19 та викидаються у довкілля. При цьому клапани 12, 15 і 16 відкриті, а клапани 13, 14 закриті.

Під час перепідключення робочих циліндрів 1 і 2 з метою запобігання зниженню ефективності роботи глушника відпрацьовані гази направляються у компенсаційний циліндр 3. При цьому клапан 17 відкривається. Після перепідключення робочих циліндрів 1 і 2 клапан 17 закривається, а клапан 18 відкривається, і відпрацьовані гази виходять з компенсаційного циліндру 3. Щойно відпрацьовані гази вийдуть з компенсаційного циліндру 3, клапан 18 одразу ж закривається.

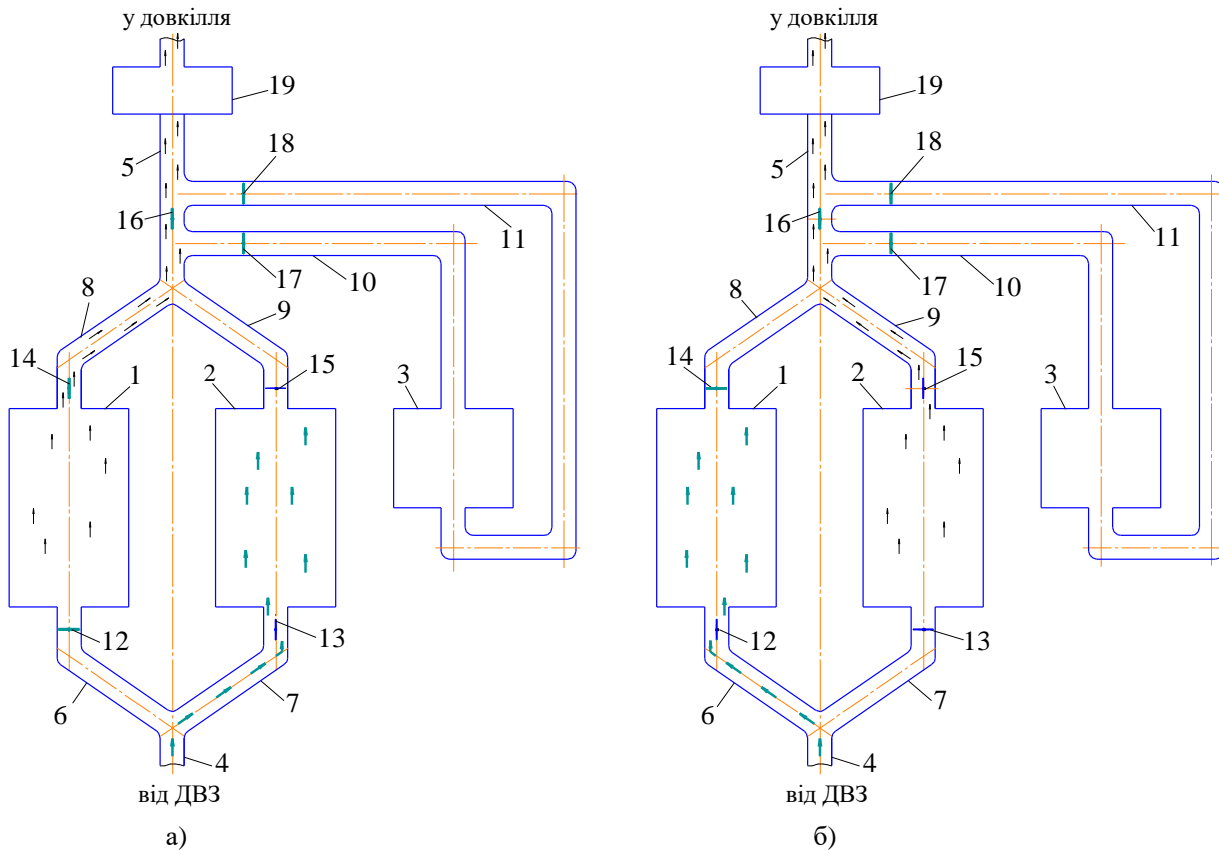


Рис. 3. Етапи роботи розробленого вакуумного глушника шуму:

а – етап заповнення правого робочого циліндра; б – етап заповнення лівого робочого циліндра; 1, 2 – робочі циліндри; 3 – компенсаційний циліндр; 4, 5 – вхідний та вихідний патрубки відповідно; 6 – 11 – трубопроводи; 12 – 18 – клапани; 19 – насосна установка

Під час наповнення одного з робочих циліндрів і відкачування іншого обидва клапани 16 і 18 відкриті, що забезпечує відкачування компенсаційного циліндра. Під час перепідключення система клапанів 12 – 15 мала спрацьовувати синхронно «по діагоналі», наприклад, 12 і 15 закриваються, а 13 і 14 одночасно відкриваються. Для спрощення будемо вважати, що час спрацьовування всіх клапанів на відкриття і закриття приблизно однаковий і дорівнює Δt . Тоді час перепідключення робочих циліндрів 1 і 2 також становить Δt .

Під час наповнювання одного з робочих циліндрів і відкачування іншого обидва клапани 16 і 18 відкриті, що забезпечує відкачування компенсаційного циліндра. Під час перепідключення система клапанів 12 – 15 має спрацьовувати синхронно «по діаго-

налі», наприклад, 12 і 15 закриваються, а 13 і 14 одночасно відкриваються. Для спрощення будемо вважати, що час спрацьовування всіх клапанів на відкриття і закриття приблизно однаковий і дорівнює Δt . Тоді час перепідключення робочих циліндрів 1 і 2 також становить Δt .

Закриття клапанів 16 і 18 починається на Δt раніше безпосередньо перед перепідключенням робочих циліндрів. Вони залишаються закритими у процесі перепідключення і знову відкриваються після його завершення протягом такого ж часу Δt . Таким чином, враховуючи всі перераховані етапи, сумарний час переключання клапанів 16 і 18 становить щонайменше $3\Delta t$. Часова діаграма роботи клапанів показана на **рис. 4**.

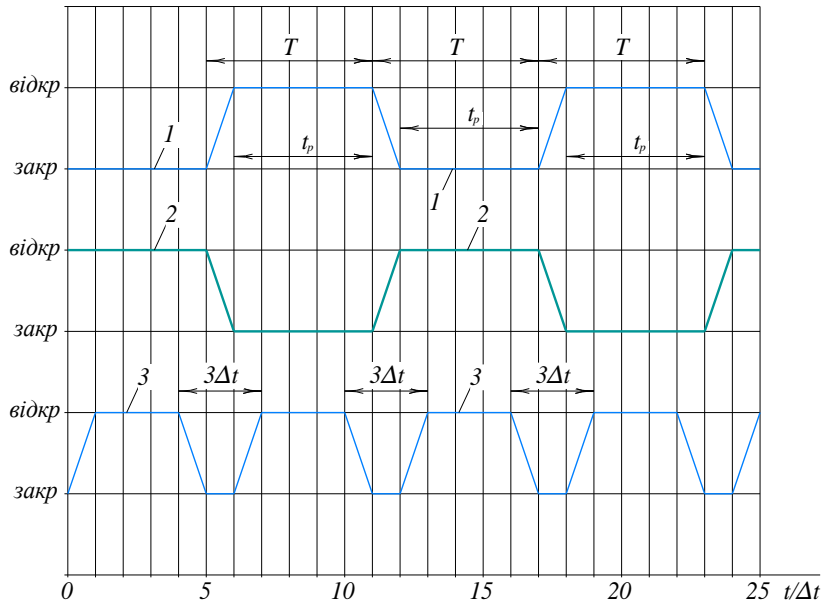


Рис. 4. Часова діаграма роботи клапанів:

1 – клапани 12 і 15; 2 – клапани 13 і 14; 3 – клапани 16 і 18; горизонтальний крок сітки дорівнює часу спрацьовування клапанів Δt ; T – період перепідключення робочих циліндрів; t_p – час роботи циліндра

Якщо перепідключення циліндрів відбувається з періодом T , то час роботи (наповнювання або відкачування) робочого циліндра визначається як:

$$t_p = T - \Delta t$$

З рівняння стану ідеального газу, записаного у формі, яка має назву рівняння Клапейрона – Менделєєва:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT. \quad (1)$$

де p , V , m , T , M , ν – відповідно тиск, об'єм, маса, температура, молярна маса та кількість речовини газу,

R – універсальна газова стала,

знайдемо кількість речовини газу, що всмоктується двигуном:

$$\nu_0 = \frac{p_0 V}{RT_0},$$

де p_0 і T_0 – відповідно тиск і температура газу у впускному колекторі.

Тоді:

$$\frac{d\nu_0}{dt} = \frac{p_0}{RT_0} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{p_0}{RT_0} \cdot W_{ДВ}$$

Розрахунок часу наповнення робочого циліндра глушника

Введемо поняття об'ємної продуктивності двигуна $W_{ДВ}$, тобто швидкості перекачування газів (продуктів згорання). Для чотиритактного двигуна з робочим об'ємом V_l :

$$W_{ДВ} = \frac{dV}{dt} = \frac{V_l}{2\tau_{ДВ}} = \frac{V_l \cdot n}{120},$$

де $\tau_{ДВ}$ – період обертання колінчастого валу двигуна, хв, n – відповідна частота обертання валу, об./хв.

Відпрацьовані гази викидаються в замкнений об'єм робочого циліндра глушника V_{Γ} за температури T_{Γ} . З рівняння (1) знайдемо тиск відпрацьованих газів у глушнику:

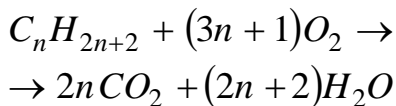
$$p_{\Gamma} = \frac{RT_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} \cdot v_{\Gamma}$$

і відповідно зміну тиску газів у глушнику:

$$\frac{dp_{\Gamma}}{dt} = \frac{RT_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} \cdot \frac{dv_{\Gamma}}{dt}$$

де v_{Γ} – кількість речовини, що викидається на вихлопі.

Для подальших розрахунків необхідно врахувати зв'язок між кількостями речовини газу v_0 , що засмоктується у впускний колектор, і v_{Γ} , що викидається на вихлопі: $v_{\Gamma} = k \cdot v_0$. Автомобільне паливо – головним чином це суміш вуглеводнів типу $C_n H_{2n+2}$, де для бензину величина n лежить у межах 5–12, а для дизельного палива має ще більші значення. З огляду на реакцію горіння вуглеводнів:



та з урахуванням вмісту кисню в повітрі близько 21 %, значення коефіцієнта k для бензинових двигунів лежить у межах 1,04–1,05, а для дизелів $\sim 1,06$, що за умови оціночних розрахунків можна вважати рівним 1. Таким чином, зміна тиску газів у глушнику описується рівнянням:

$$\frac{dp_{\Gamma}}{dt} = \frac{RT_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} \cdot k \frac{dv_0}{dt} = \frac{RT_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} \cdot k \frac{p_0}{RT_0} \cdot W_{ДВ}$$

або остаточно:

$$\frac{dp_{\Gamma}}{dt} = kp_0 \cdot \frac{V_{\lambda}}{V_{\Gamma}} \cdot \frac{T_{\Gamma}}{T_0} \cdot \frac{n}{120}$$

Інтегруючи отримане рівняння, можемо знайти зростання тиску в глушнику під час його наповнення протягом робочого часу t_p :

$$\Delta p = p_2 - p_1 = kp_0 \frac{V_{\lambda}}{V_{\Gamma}} \cdot \frac{T_{\Gamma}}{T_0} \cdot \frac{n}{120} \cdot t_p$$

Звідси час наповнення робочого циліндру глушника відпрацьованими газами, тобто робочий час глушника:

$$t_p = \frac{\Delta p}{k \cdot p_0} \cdot \frac{V_{\Gamma}}{V_{\lambda}} \cdot \frac{T_0}{T_{\Gamma}} \cdot \frac{120}{n}$$

Робочий час глушника є ключовим параметром, який накладає низку вимог і обмежень на решту елементів. Зокрема, для ефективної роботи всієї системи мають одночасно виконуватись умови:

$$t_p > 3\Delta t,$$

де $3\Delta t$ – сумарний час перепідключення циліндрів,

та

$$\frac{V_K}{V_{\Gamma}} > \frac{\Delta t}{t_p},$$

де V_K – об'єм компенсаційного циліндра разом зі з'єднувальними трубопроводами 10 і 11.

Розрахунки, виконані для двигуна з робочим об'ємом $V_{\lambda} = 5$ л, показують, що за умови частоти обертання 2000–2500 об./хв. робочий час не перевищує $\sim 0,05$ с. Це означає, що швидкодія клапанів Δt має бути порядку 0,01 с.

Крім того, насосна установка повинна бути достатньо ефективною, щоб за такий короткий час забезпечувати необхідне розрідження.

Розрахунок ефективності насосної установки

Для характеристики ефективності насосної установки введемо за аналогією з об'ємною продуктивністю ДВЗ об'ємну продуктивність насосної установки W_n , з якою перекачуються гази:

$$W_n = -\frac{dV}{dt}.$$

Знак «мінус» враховує той факт, що насос працює на відкачування об'єму V . Записавши з рівняння (1) кількість речовини відкачуваних насосом газів та взявши від неї похідну по часу, отримуємо швидкість відкачування газів:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p}{RT} \cdot \frac{dV}{dt} = -\frac{p}{RT} \cdot W_n.$$

Враховуючи, що насос відкачує замкнений об'єм V , знайдемо швидкість зміни тиску:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \cdot \frac{dv}{dt} = -\frac{p}{V} \cdot W_n.$$

Розділивши змінні в останньому рівнянні та переписавши його у формі:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{W_n}{V} \cdot dt,$$

шляхом інтегрування легко отримати стандартний розв'язок типу:

$$p(t) = p_0 \exp\left(-\frac{W_n}{V} t\right),$$

де p_0 – початковий тиск, а $p(t)$ – тиск через час t в об'ємі V .

Ураховуючи, що в розглядуваній системі вакуумного глушника відбувається відкачування об'єму $V = V_\Gamma + V_K$ протягом

робочого часу t_p від тиску p_2 до тиску p_1 , де $p_2 > p_1$, остаточно отримуємо співвідношення:

$$\frac{p_2}{p_1} = \exp\left(\frac{W_n}{V_\Gamma + V_K} \cdot t_p\right). \quad (2)$$

Оцінимо необхідну продуктивність насосної установки. Для спрощення припустимо, що вона забезпечує зниження тиску в e разів, тобто:

$$\frac{p_2}{p_1} = e.$$

Тоді в рівнянні (2) вираз під експонентою:

$$\frac{W_n}{V_\Gamma + V_K} \cdot t_p = 1.$$

Підставивши сюди вираз для робочого часу, отримуємо:

$$W_n = \frac{k p_0}{\Delta p} \cdot \frac{V_\Gamma + V_K}{V_\Gamma} \cdot \frac{T_\Gamma}{T_0} \cdot \frac{V_l \cdot n}{120}.$$

Таким чином, для ефективного відкачування відпрацьованих газів, а тим паче для створення достатнього розрідження у вихлопній системі, об'ємна продуктивність насосної установки повинна перевищувати об'ємну продуктивність двигуна:

$$W_n > W_{ДВ}.$$

При цьому продуктивність насоса має змінюватись синхронно зі зміною обертів двигуна, щоб забезпечити стабільність роботи вихлопної системи в різних режимах.

На **рис. 5** показана прогнозована залежність рівня зовнішнього шуму бронев автомобіля «Козак-7» від швидкості руху (у

магістральному циклі на дорозі) з існуючим та із розробленим глушниками.

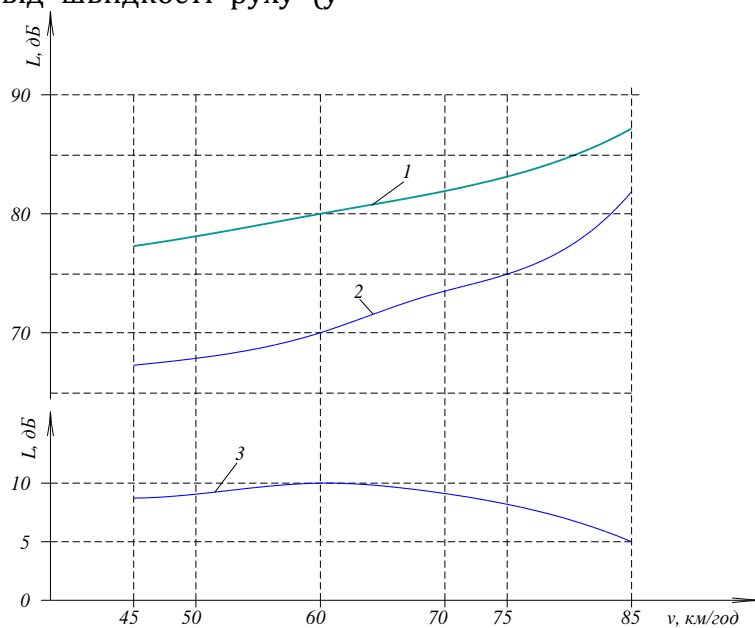


Рис. 5. Прогнозована залежність рівня зовнішнього шуму бронев автомобіля «Козак-7» від швидкості руху (у магістральному циклі на дорозі):

1 – з існуючим глушником; 2 – з розробленим глушником

Висновки

Розроблено вакуумний глушник шуму відпрацьованих газів ДВЗ, принцип дії якого полягає у штучному створенні розрідження, що своєю чергою зменшує перепади тиску у відпрацьованих газах у всьому випускному трубопроводі, починаючи від двигуна і закінчуючи глушником. Зменшення перепадів тиску у відпрацьованих газах призводить до послаблення шумоутворення в останніх.

Проаналізувавши отримані результати, можемо виділити найбільш істотні вимоги, без виконання яких було б складно забезпечити достатню ефективність роботи глушника:

- висока швидкодія клапанів, на рівні порядку $\Delta t \approx 10 \text{ мс}$;

- об'ємна продуктивність насосної установки більша за об'ємну ефективність двигуна (для випадку теоретичного стоп-процентного придушення шуму відпрацьо-

ваних газів, що на практиці не потрібно, – принаймні в декілька разів).

У результаті впровадження розробленого глушника шуму прогнозується зменшення рівня зовнішнього шуму бронев автомобіля «Козак-7» на 3–11 дБА в діапазоні швидкостей руху 45–85 км/год.

References

1. Militaryi. (2023). The paratroopers were armed with Kozak-7 armored vehicles. "Kozak-7". Retrieved from <https://mil.in.ua/uk/news/desantnykiv-ozbroyily-bronemashynamy-kozak-7/>.
2. Defence Express. (2022). The leadership of the Armed Forces was shown the new "Kozak-7" BBKM for the first time "Kozak-7". Retrieved from https://defence-ua.com/people_and_company/nvo_praktika_za_proponovalo_zsu_novu_bronemashinu_kozak_7-5954.html.