

УДК 534.22; 534.6.08

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ У ВИХЛОПНИХ ГАЗАХ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

В. П. САХНО, В. В. ФЕДОРОВ

Український транспортний університет, Київ

Одержано 27.12.1999 ◊ Переглянуто 30.01.2000

Розглянуто метод визначення швидкості звуку у вихлопному газі двигуна внутрішнього згорання, що є необхідною умовою при проектуванні реактивних глушників. Реалізація методу здійснюється шляхом вимірювання затухання акустичних хвиль. Вимірюється рівень шуму вихлопу без глушника та з глушником. За одержаними даними встановлюється ефективність шумоглушіння. З формули для розрахунку ефективності шумоглушіння реактивного глушника одержується формула для розрахунку швидкості звуку у вихлопі. У цій формулі всі параметри відомі: рівень ефективності глушника, частота вихлопу, відношення площ поперечних перерізів глушника та відповідної труби, довжина глушника. Встановлена таким чином швидкість звуку надалі може бути використана не тільки для двигунів того типу, для якого робились вимірювання та розрахунки, але і (з певним наближенням) для деяких інших типів двигунів. Запропоновано і теоретично обгрунтовано конструкцію експериментальної установки, яка дозволяє реалізувати даний метод. Розглянуто похибку методу та шляхи підвищення його точності.

Рассмотрен метод определения скорости звука в выхлопном газе двигателя внутреннего сгорания, что является необходимым условием при проектировании реактивных глушителей. Реализация метода осуществляется путем измерения затухания акустических волн. Измеряется уровень шума выхлопа без глушителя и с глушителем. С помощью полученных данных определяется эффективность шумоглушения. Из формулы для расчета эффективности шумоглушения реактивного глушителя получается формула для расчета скорости звука в выхлопе. В этой формуле все параметры известны: уровень эффективности глушителя, частота выхлопа, отношение площадей поперечных сечений глушителя и подводящей трубы, длина глушителя. Определенная таким образом скорость звука в дальнейшем может быть использована не только для двигателей того типа, для которого делались измерения и расчеты, но и (с определенным приближением) для некоторых других типов двигателей. Предложена и теоретически обоснована конструкция экспериментальной установки, которая позволяет реализовать данный метод. Рассмотрена погрешность метода и пути увеличения его точности.

There is considered a method of determination of a sound speed in the exhaust gas of the drive of interior combustion. Such determination is a necessary requirement at designing of jet silencers. The embodying of a method is carried out by measuring of the attenuation of acoustic waves. The noise level of an exhaust without a silencer and with it is measured. Using the obtained data the efficiency of noise attenuation is determined. From formula on calculation of the noise attenuation efficiency of a jet silencer the formula for calculation of a speed of sound in an exhaust is derived. In this formula all the parameters are known: level of the efficiency of a silencer, frequency of an exhaust, ratio of areas of the cross sections of a silencer and supply pipe, length of a silencer. The sound speed determined in this way can be utilized in further not only for drives of that type, for which measuring and calculations were made, but also (with some approximation) for some other types of drives. The design of an experimental installation which allows to implement a sectional method, is proposed and theoretically justified. The error of method and ways to rise its precision are discussed.

ВСТУП

Під час будь-якої науково-експериментальної роботи необхідно вміти теоретично передбачити кінцевий результат, який буде отримано експериментальним шляхом. Чим ближчим є прогнозоване значення до того, яке було одержано на практиці, тим точнішою є запропонована модель, метод і т. п. Очевидно, що все сказане справедливо і для проектування глушників. Взагалі кажучи, параметрами глушника шуму є величина шумоглушіння, втрати енергії двигуна внаслідок застосування глушника, герметичність, конструктивна надійність, антикорозійна стійкість, віброміцність, технологічність, габарити, маса, простота в експлуатації, естетичний вигляд. В нашому випадку за основний параметр глушника приймемо величину шумоглушіння і, виходячи з цього, розглянемо заходи, необхідні для досягнення максимуму цього параметру (на прикладі реактивного

глушника). При цьому необхідно вміти визначити швидкість звуку у вихлопних газах двигуна.

Якщо в [1] однією із задач було вміння передбачити рівень звукового тиску, який випромінюється вихлопною трубою, на певній відстані для різних глушників, то ми як задачу ставимо вміння передбачити частоту максимального звукопоглинання глушника. Це необхідно для підвищення шумоглушіння останнього, оскільки при проектуванні його мало вміти лише передбачити вищезгадану частоту. Крім цього, глушник повинен мати максимальне шумоглушіння на відомій (передбаченій) частоті, що дорівнює основній частоті вихлопу двигуна. Частота максимального шумоглушіння глушника залежить від двох факторів: довжини глушника та швидкості звуку у вихлопних газах. Очевидно, що для вирішення поставленої задачі необхідно знати швидкість звуку. Тоді, підібравши для неї необхідну довжину глушника, можна отримати максимальний ефект шумоглушіння остан-

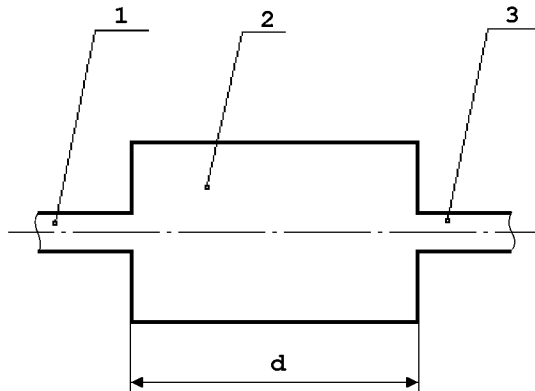


Рис. 1. Ескіз реактивного глушника:
1, 3 – вхідна і вихідна трубки відповідно,
2 – порожнина глушника

нього. Отже, задача по встановленню частоти, на якій глушник є найбільш ефективним, зводиться до наступного: проєктант повинен вміти визначати швидкість звуку у вихлопних газах двигуна.

1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ

Швидкість звуку в будь-якому середовищі найчастіше визначають шляхом вимірювання часу, за який пройшов певний сигнал відомої відстані в досліджуваному середовищі. Такі способи вимірювання були запропоновані, наприклад, в [2, 3]. Хоча в цих джерелах мова йде лише про рідкі та тверді середовища, але, за великим рахунком, такий підхід використовується і для газів. Власне, розрахувати швидкість звуку у вихлопних газах вищезгаданим способом практично неможливо. Визначити її можна за допомогою газоаналізатора і високотемпературного термометра. При цьому, газоаналізатор дає інформацію про хімічний склад вихлопної суміші, а термометр показує температуру цих компонент вихлопу. Далі встановлюється швидкість звуку в кожній із компонент суміші при вимірянні температурі та апроксимовано одержується швидкість звуку для суміші в цілому. Недоліками такого методу оцінки є:

- 1) недостатня точність у встановленні швидкості звуку для деяких газових компонент, що входять у вихлопну суміш. Якщо для повітря це встановити можна за відомою формулою [4]

$$c = c_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

де $c_0 = 333$ м/с – швидкість звуку при температурі газу $= 0^\circ\text{C}$, то для інших газів (напри-

клад, окису вуглецю) такі залежності практично невідомі;

- 2) велика похибка при отриманні швидкості звуку для суміші, виходячи з відомих швидкостей звуку для її компонентів.

У даній статті пропонується принципово новий підхід для розв'язання даної задачі: визначення швидкості звуку з використанням ефекту шумоглушіння реактивного глушника. Як відомо [4], ефективність шумоглушіння глушника, його геометричні параметри та швидкість звуку у вихлопному газі взаємозв'язані. Тому, якщо параметри та ефективність шумоглушіння глушника відомі, за ними можна визначити шукану швидкість звуку. При цьому вимірювання шуму вихлопу проводяться як з реактивним глушником, так і без нього. Встановлюється частотна характеристика шумоглушіння. Далі існують два шляхи визначення швидкості:

- а) за всіма відомими частотами шумоглушіння та відповідними їм рівнями шумоглушіння;
- б) за частотою максимального шумоглушіння.

2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Ефективність шумоглушіння реактивного глушника (рис. 1) визначається за формулою [4]:

$$L = 10 \lg \left(1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kd \right), \quad (2)$$

де $k = \omega/c = 2\pi f/c$ – хвильове число; $m = F_2/F_1$; F_1 , F_2 – площі поперечних перерізів порожнини і трубок відповідно; d – довжина порожнини глушника.

Після ряду нескладних перетворень одержуємо формулу для визначення швидкості звуку у вихлопному газі:

$$c = \frac{2\pi fd}{\arcsin \left(\frac{2\sqrt{10^{L/10} - 1}}{m - \frac{1}{m}} \right)}. \quad (3)$$

У формулу (3) по чергово підставляємо значення частот f і відповідні їм рівні звукопоглинання L , що були отримані за допомогою вимірювань. В результаті одержуємо ряд значень швидкості звуку c , за якими знаходимо осереднену величину $c_{\text{ср}}$. Це і є остаточний результат.

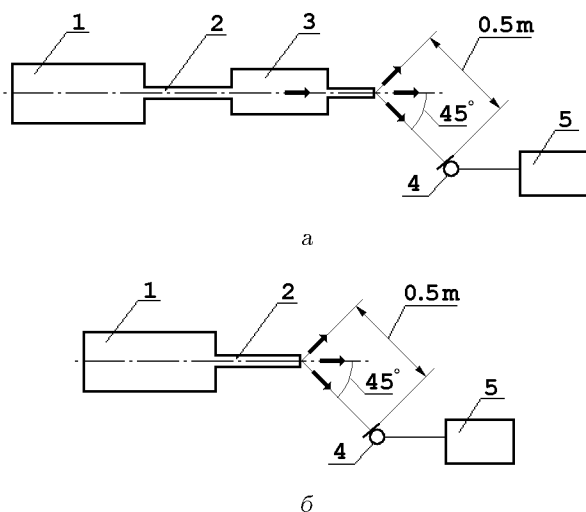


Рис. 2. Схема експериментальної установки для визначення швидкості звуку у вихлопному газі двигуна

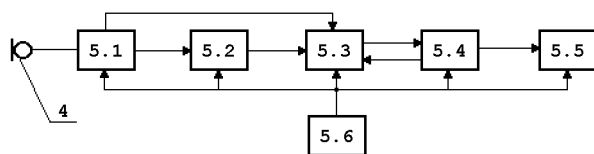


Рис. 3. Блок-схема вимірювально-обчислювального комплексу

Шукану швидкість звуку можна визначити також виходячи з частоти, для якої рівень шумоглушіння є максимальним. Безпосереднім наслідком рівняння (2) є умова настання цього максимуму:

$$\sin kd = 1 \Rightarrow \frac{2\pi f_m}{cd} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow c = 4f_{\max}d. \quad (4)$$

3. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

На рис. 2 схематично зображено експериментальну установку, що складається з реактивного глушника 3 та вимірювально-обчислювального комплексу 5 (інші позначення на рисунку: 1 – двигун; 2 – вихлопна труба). Вимірювання здійснюються з реактивним глушником (рис. 2, а) та без нього (рис. 2, б). Вихлопні гази (показані стрілками) рухаються по вихлопній трубі 2 (та глушнику – для першого етапу вимірювань) і виходять в атмосферу. На відстані 0.5 м та під кутом 45° (згідно [5]) встановлюється мікро-

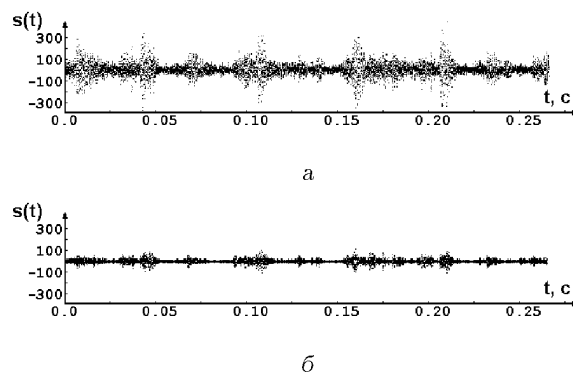


Рис. 4. Приклад сигналу, який отримується при вимірюванні шуму вихлопу:
а – без глушника, б – з глушником

фон 4, сигнал з якого поступає на вимірювально-обчислювальний комплекс 5. Детальніше схема згаданого комплексу зображена на рис. 3, на якому введені такі позначення: 4 – мікрофон; 5.1 – блок оцифровки сигналу, що поступає з мікрофону; 5.2 – спектроаналізатор; 5.3 – блок зберігання інформації; 5.4 – блок визначення рівнів сигналів та різниці рівнів; 5.5 – обчислювальний блок; 5.6 – блок керування.

На рис. 4, як приклад, зображені сигнали для випадку, коли глушник не застосовується ($s_1(t)$), та для випадку застосування реактивного глушника ($s_2(t)$). Очевидно, що амплітуда сигналу в другому випадку є меншою, ніж у першому. Певних змін зазнала також і його структура (це пояснюється вибірковою акустичною фільтрацією звуку при проходженні реактивного глушника). Робота комплексу відбувається таким чином. Сигнал з мікрофону 4 подається на вхід блоку оцифровки 5.1, який перетворює аналоговий електричний сигнал у цифровий в заданому форматі з необхідною частотою дискретизації та іншими параметрами. Зареєстровані сигнали $s_1(t)$ і $s_2(t)$ передаються на блок 5.3 для довгострокового збереження, а також на спектроаналізатор 5.2, де визначаються їх амплітудний або енергетичний спектри (далі для простоти – спектр). Зі спектроаналізатора 5.2 одержані спектри $S_1(\omega)$ та $S_2(\omega)$ поступають на блок зберігання інформації 5.3. З блоку 5.3 спектри поступають на блок 5.4, де вираховуються їх рівні та різниця рівнів L :

$$L(f) = L_1(f) - L_2(f). \quad (5)$$

Тут $L_1(f)$ і $L_2(f)$ – рівні $S_1(\omega)$ та $S_2(\omega)$ відповідно. Вони вираховуються відносно стандартного порогу для акустичного тиску: $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Функція $L(f)$ зберігається в блоці 5.4 і передається в обчи-

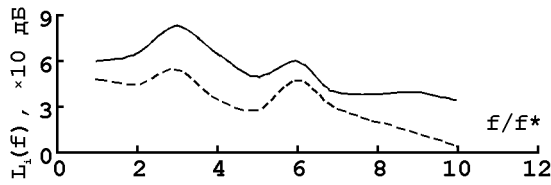


Рис. 5. Частотні характеристики шуму вихлопу, виміряні з застосуванням реактивного глушника (а) та без нього (б)

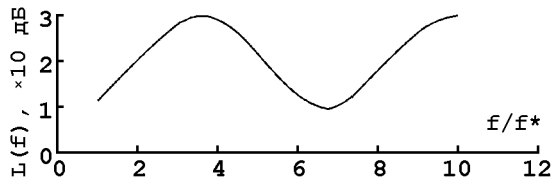


Рис. 6. Графік ефективності шумоглушіння реактивного глушника

слювальний блок 5.5, де за частотою максимального шумоглушіння та/або за всіма частотами і відповідними їм рівнями шумоглушіння вираховується значення швидкості звуку. На рис. 5 зображені, як приклад, графіки функцій $L_1(f)$ та $L_2(f)$, а на рис. 6 – $L(f)$.

Одночасно можна вести обчислення швидкості за формулою (3). При необхідності, осереднене значення $c_{\text{ср}}$, отримане за цією формулою, може бути осереднене зі значенням, отриманим згідно методики відшукування частоти максимального шумоглушіння.

4. ТОЧНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ

Точність одержаних результатів залежить від ряду умов:

- організаційних: дотримання однакових акустичних умов навколо досліджуваного об'єкту, підтримання роботи двигуна в заданому робочому режимі, фіксування мікрофону в заданому положенні в просторі і т. п.;
- технічних: похибки частотної характеристики мікрофону, точності роботи всіх блоків вимірювально-обчислювального комплексу і т. п.;
- параметричних: частоти дискретизації та тривалості запису акустичного сигналу.

Детальніше зупинимось на третьому блоці умов. Частота дискретизації сигналу f_d вибирається за теоремою Котельникова [6]:

$$f_{\text{верх}} \leq f_d/2, \quad (6)$$

де $f_{\text{верх}}$ – верхня частота спектру сигналу, що був отриманий шляхом дискретизації. Крім того, в нашому випадку повинна виконуватись ще одна умова:

$$f_{\text{верх}} = (8 \div 10)f_{\text{вихл}}. \quad (7)$$

Тут $f_{\text{вихл}}$ – основна частота вихлопу двигуна внутрішнього згорання, яка визначається за формулою [7]

$$f_{\text{вихл}} = \frac{ni}{60\tau}, \quad (8)$$

де n – частота обертання валу двигуна, об/хв; i – кількість циліндрів; τ – коефіцієнт тактності. Формула (7) впливає з умови врахування існування вищих гармонік основної частоти вихлопу. Ця формула була одержана емпірично, причому автори не претендують на її абсолютність.

Для досягнення більшої точності результату необхідно, щоб під час вимірювань значення частот були одержані з якомога меншою похибкою. Ця умова з очевидністю впливає з формул (3) і (4), оскільки похибка значення частоти напряму впливає на похибку результату – значення швидкості звуку у вихлопних газах. Похибка значення частоти буде тим меншою, чим меншим буде крок дискретизації по частоті Δf , який, у свою чергу, буде тим меншим, чим більшою буде тривалість оброблюваного сигналу, знятого з мікрофону t_c [8]:

$$\Delta f = 1/t_c. \quad (9)$$

Так, при $t_c = 1$ с, $\Delta f = 1$ Гц. Тоді, якщо швидкість звуку визначається за формулою (4), при $f_{\text{max}} = 100$ Гц похибка становитиме 1%, а при $f_{\text{max}} = 500$ Гц – 0.2%. Звідси випливає, що збільшення частоти максимального рівня шумоглушіння призводить до підвищення точності кінцевого результату. Керування частотою максимального рівня шумоглушіння може здійснюватись за допомогою зміни під час вимірювань довжини реактивного глушника d . Але очевидно, що частоту f_{max} не можна піднімати безмежно, точніше вона повинна знаходитися в межах

$$f_{\text{max}} = (1 \div 6)f_{\text{вихл}}. \quad (10)$$

Умова (10) впливає із факту наявності наростаючого затухання вищих гармонік основної частоти вихлопу. В результаті цього буде зменшуватись

звукопоглинаючий ефект реактивного глушника, і, як наслідок, утруднюватись встановлення f_{\max} . Верхня межа $6f_{\text{вихл}}$ в рівнянні (10) була отримана експериментально для італійського дизельного двигуна RD 210.

При визначенні шуканої швидкості звуку за формулою (3) окрім точності визначення ряду частот, точність буде залежати ще й від точності визначення відповідних їм рівнів шумопоглинання. Ця умова відноситься до блоку технічних умов забезпечення точності, тому зупинятись на ній детальніше не будемо. Зауважимо лише, що чим точніше вимірювально-обчислювальний комплекс визначає рівні шумових компонент, тим вищою є точність кінцевого результату. Те ж саме можна сказати і про інші параметри, які впливають на значення швидкості звуку у вихлопних газах двигуна: довжину реактивного глушника d , відношення площ поперечних перерізів порожнини і трубок m .

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження є основою для розробки методики проектування реактивних глушників для двигунів внутрішнього згорання. Розглянуті заходи по досягненню максимуму цього параметру. Показано, що при цьому необхідно вміти визначити швидкість звуку у вихлопних газах двигуна. Запропоновано метод розрахунку швидкості звуку у вихлопному газі двигуна внутрішнього згорання шляхом вимірювання затухання акустичних хвиль. Зроблено порівняльний аналіз даного методу з іншими методами по визначенню швидкості звуку в середовищі. Представлено експериментальну установку, на базі якої реалізується ви-

щезгаданий метод. Розглянуті умови, які впливають на точність результату: організаційні, технічні та параметричні. Увагу акцентовано на таких параметричних умовах, як частота дискретизації й тривалість запису акустичного сигналу. Точність підвищується при збільшенні тривалості оброблюваного сигналу, а також при збільшенні частоти максимального шумоглушіння. Якоюсь мірою точність підвищується також за рахунок збільшення частоти дискретизації оброблюваного сигналу і, як наслідок, “підняття” верхньої межі спектру останнього. Тим самим збільшується кількість даних для обробки і зростає точність кінцевого результату.

1. Sridhara B. S., Malcolm J. Crocker M. J. Review of theoretical and experimental aspects of acoustical modeling of engine exhaust systems // J. Acoust. Soc. Amer. – 95, N 5, Pt. 1. – 1994. – P. 2363–2370.
2. Стефанов С. Р., Трохан А. М., Хохуля Ю. П., Никишин К. Е. Измеритель скорости звука. Авт. св. СССР N 530194 // БИ. – 1976. – N 36. – С. 88.
3. Стефанов С. Р., Чистосердов Ю. П., Масляный В. П. Устройство для измерения скорости звука. Авт. св. СССР N 1068729 // БИ. – 1984. – N 3. – С. 129.
4. Алексеев С. П., Казаков А. М., Колотилов Н. Н. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1970. – 208 с.
5. ГОСТ 27436-87 (СТ СЭВ 4864-84). Внешний шум автотранспортных средств. Допустимые уровни и методы измерений. Введен с 01.01.1989. – 13 с.
6. Харкевич А. А. Основы радиотехники. – М.: Связьдат, 1963. – 559 с.
7. Разумовский М. А. Прогнозирование шумовых характеристик поршневых двигателей. – Минск: Высшая школа, 1981. – 31 с.
8. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Сов. радио, 1971. – 672 с.