

Розрахунок резонансних частот горлової частини резонатора Гельмгольца

Копитько Ю. С., ORCID [0000-0003-2771-5180](https://orcid.org/0000-0003-2771-5180)

e-mail yus.kopytko@aae.kpi.ua

Кафедра акустики та акустоелектроніки acoustic.kpi.ua

Факультет електроніки fel.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—Наведено розрахунок резонансних частот горловини резонатора Гельмгольца з метою подальшої оцінки взаємозв'язку резонансних частот, отриманих експериментально, з резонансними частотами одного з основних елементів резонатора для створення ширококутових акустичних систем або метаматеріалів. Метою роботи є розрахунок резонансних частот горловини резонатора Гельмгольца. Параметри горловини обрані рівними параметрам горловини одного з резонаторів досліджених експериментально. В результаті розрахунку отримані чисельні значення для перших шістдесяти чотирьох резонансних частот.

Бібл. 12, рис. 3, табл. 3.

Ключові слова — резонатор Гельмгольца; резонанси горловини; глушник; метаматеріал

I. ВСТУП

Останнім часом, питання, що стосуються резонаторів Гельмгольца, викликають все більший інтерес в науковому світі. Вони активно використовуються для вирішення різних завдань в акустиці і знаходять все нові і нові застосування - від використання в якості глушників, до використання в складі метаматеріалів.

Як спрощення, прийнято вважати, що резонатор Гельмгольца має лише одну резонансну частоту. При спробі віднайти можливі формули розрахунку резонансних частот такого резонатора за допомогою поширених систем, серед результатів пошуку переважно буде спостерігатися один і той же розрахунок, одна і та ж формула - розрахунок основного резонансу резонатора Гельмгольца [1]:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}}$$

де c - швидкість звуку в робочому середовищі, S - площа перетину горла резонатора, l - довжина горла, V - об'єм порожнини резонатора.

Існують також варіанти розрахунку частоти резонансу з урахуванням приєднаної маси та товщини стінки [2] і з урахуванням значно більшої кількості параметрів

На практиці ж, було виявлено наявність ряду додаткових резонансів. Насправді, варіанти розрахунку додаткових частот існують [3], але є досить громіздкими, оперують великим числом змінних [4].

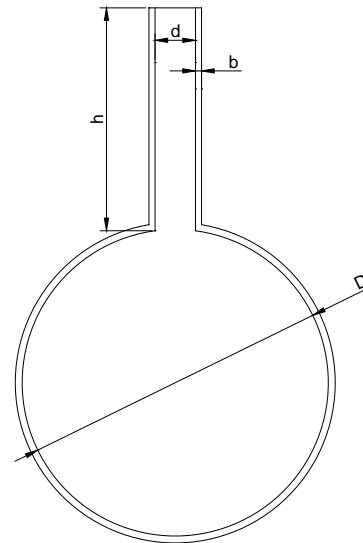


Рис. 1 Загальний вигляд резонатора

У даній роботі запропоновано підійти до питання знаходження таких частот з іншого боку і розглянути резонатор, як систему, що складається з двох більш простих елементів, піти шляхом вирішення двох більш простих задач і звести результати воедино, узгодити їх.

Метою роботи є розрахунок резонансних частот горловини резонатора Гельмгольца. Параметри горловини обрані рівними параметрам горловини одного з резонаторів досліджених в [5]. Таким чином, стає

можливим оцінити і проаналізувати результати розрахунку резонансних частот частини резонатора, враховуючи значення резонансних частот для повної конструкції резонатора, отримані в експерименті [5].

Багаторезонансність резонатора Гельмгольца і наявність методики розрахунку його резонансних частот дозволить використовувати його для створення широкосмугових акустичних систем [6], які можуть бути використані в якості глушників [7, 8], або для фокусування акустичних хвиль [9] (зокрема, у складі метаматеріалів [10]).

II. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

Резонатор, загальний вигляд якого представлений на рис.1, виготовлений зі скла і складається з горловини довжиною h , діаметром d , товщиною b і колби діаметром D .

В рамках поставленого завдання для подальших розрахунків знадобляться параметри горловини цього резонатора (див. табл.1).

Під оболонкою розуміється тіло, один з вимірів якого (товщина) значно менше двох інших. Геометричне місце точок, рівновіддалених від обох поверхонь оболонки, носить назву серединної поверхні. Якщо серединна поверхня оболонки утворює поверхню обертання в формі циліндра, то оболонку називають циліндричною.

Розглянемо коливання циліндричної оболонки (рис.2). Визначимо положення довільної точки M на серединній поверхні оболонки координатами $\alpha = x/R$ (де x – координата по осі, що співпадає з віссю циліндра, $R = d/2$ – радіус циліндра) і кутовою координатою β , додатне значення якої береться у напрямку проти годинникової стрілки.

Компоненти переміщення точки в поздовжньому, окружному і нормальному до поверхні напрямках позначимо відповідно u , V , W . Компоненти деформації серединної поверхні визначаються формулами

ТАБЛИЦЯ 1. РОЗМІРИ І ТОВЩИНА ГОРЛОВИНИ ДОСЛІДЖУВАНОГО РЕЗОНАТОРА

d, мм	h, мм	b, мм
30,5	180	3,0

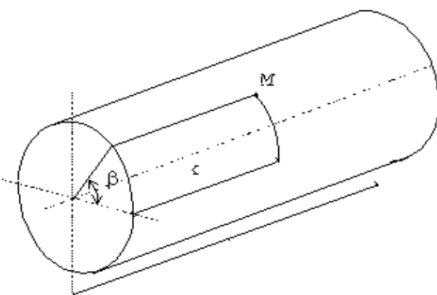


Рис. 2 Горловина резонатора

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{R \partial \alpha}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial V}{R \partial \beta} + \frac{W}{R}; \quad \gamma_{12} = \frac{\partial u}{R \partial \beta} + \frac{\partial V}{R \partial \alpha}.$$

Прирівнявши ε_1 , ε_2 і γ_{12} нулю і проінтегрувавши отримані рівняння, виразимо u , V , W через довільні функції куткової координати β

$$u = f_1(\beta); \quad V = -\alpha f_1'(\beta) + f_2(\beta); \\ W = \alpha f_1''(\beta) - f_2'(\beta).$$

З отриманих формул видно, що при деформації циліндричної оболонки без розтягування серединної поверхні твірні залишаються прямими, а осьові переміщення не залежать від поздовжньої координати.

Формули показують, що чисті згинання замкнутої циліндричної оболонки можливі в наступних випадках: а) якщо її торці вільні: в цьому випадку відмінні від нуля f_1 і f_2 ; б) якщо на одному з торців заборонені переміщення V , W , але дозволено переміщення u ; в) якщо на одному з торців заборонено переміщення u . Якщо ж оболонка оперта на обох торцях, чисте згинання її неможливо.

Складемо вирази потенційної і кінетичної енергії оболонки. Потенційна енергія деформації визначається як [11]:

$$n = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \left[(\chi_1 + \chi_2)^2 + 2(1-\mu) \times \right. \\ \left. \times (\chi_1^2 - \chi_1 \chi_2) \right] d\Omega, \quad (1)$$

де $E = 63740 \cdot 10^6$ Па – модуль пружності Юнга для скла; $\mu = 0,23$ – коефіцієнт Пуассона для скла; параметри зміни кривизни серединної поверхні:

$$\chi_1 = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2} = 0;$$

$$\chi_2 = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(V - \frac{\partial W}{\partial \beta} \right) = \frac{1}{R^2} \left(-\alpha \left[f_1''(\beta) + f_1^{IV}(\beta) \right] + \right. \\ \left. + f_2'(\beta) + f_2''(\beta) \right);$$

$$\chi_{12} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(V - \frac{\partial W}{\partial \beta} \right) = -\frac{1}{R^2} \left[f_1'(\beta) + f_1''(\beta) \right].$$

Після інтегрування виразу (1) по α з урахуванням того, що $d\Omega = R^2 d\alpha d\beta$, знаходимо

$$n = \frac{1}{2R^2} \frac{E}{12(1-\mu^2)} \int_{\beta} \left\{ A \left(f_1'' + f_1^{IV} \right)^2 - 2B \left(f_1'' + f_1^{IV} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(f_1' + f_1''' \right) + C \left[\left(f_2' + f_2'' \right)^2 + 2(1-\mu) \left(f_1' + f_1''' \right)^2 \right] \right\} d\beta,$$

Узагальнена маса оболонки

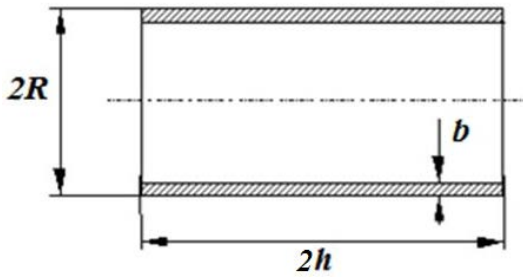


Рис. 3 Загальний вигляд циліндричної оболонки

$$\tilde{M} = \rho R^2 \int_{\beta} \left\{ A_1 \left[(f_1')^2 + (f_1'')^2 \right] - 2B_1 (f_1' f_2 + f_1'' f_2') + C_1 \left[f_1^2 + f_2^2 + (f_2')^2 \right] \right\} d\beta,$$

де

$$A = \int_{\alpha} h^3 \alpha^2 d\alpha; \quad B = \int_{\alpha} h^3 \alpha d\alpha; \quad C = \int_{\alpha} h^3 d\alpha;$$

$$A_1 = \int_{\alpha} h \alpha^2 d\alpha; \quad B_1 = \int_{\alpha} h \alpha d\alpha; \quad C_1 = \int_{\alpha} h d\alpha.$$

Інтегралі в виразах A , B , C , A_1 , B_1 , C_1 обчислюються по всій довжині оболонки.

З основного рівняння методу Релея-Рітца (див. п.9.4 в [11]) випливає, що вираз $\frac{1}{2} \omega^2 \tilde{M} - n$ (де ω - частота власних коливань) повинно мати стаціонарне значення.

Звідси випливає система звичайних диференціальних рівнянь для функцій $f_1(\beta)$, $f_2(\beta)$. В цьому випадку, якщо форма всіх меридіональних перерізів однакова (товщина оболонки не залежить від β), коефіцієнти A , B , C , A_1 , B_1 , C_1 постійні і рівняння отримують такий вигляд:

$$\left(\frac{d^2}{d\beta^2} + 1 \right) \frac{d^2}{d\beta^2} \left[A \frac{d^2 f_1}{d\beta^2} - B \frac{d^2 f_2}{d\beta^2} - 2(1-\mu) C f_1 \right] - \omega^2 \times \frac{12(1-\mu^2) \rho R^4}{E} \times \left[A_1 \left(\frac{d^2}{d\beta^2} - 1 \right) \frac{d^2 f_1}{d\beta^2} - \right. \quad (2)$$

$$\left. - B_1 \left(\frac{d^2}{d\beta^2} - 1 \right) \frac{d^2 f_2}{d\beta^2} + C_1 f_1 \right] = 0;$$

$$\left(\frac{d^2}{d\beta^2} + 1 \right) \frac{d^2}{d\beta^2} \left[B \frac{d f_1}{d\beta} - C f_2 \right] - \omega^2 \times \frac{12(1-\mu^2) \rho R^4}{E} \left(\frac{d^2}{d\beta^2} - 1 \right) \left[B_1 \frac{d f_1}{d\beta} - C_1 f_2 \right] = 0. \quad (3)$$

Розв'язок цих диференціальних рівнянь для відкритих оболонок повинно бути підпорядковане грани-

чним умовам на поздовжніх краях. На цих краях можуть бути задані переміщення u (постійні уздовж кожної кромки), а також переміщення V , W і кут повороту, утворений між зовнішньою нормаллю до контуру та віссю x ;

$$\theta = \frac{1}{R} \left(V - \frac{\partial W}{\partial \beta} \right)$$

в двох різних перетинах по довжині оболонки. Всього є сім кінематичних граничних умов на кожній поздовжній кромці, що відповідає чотирнадцятому порядку рівнянь (2) - (3). Якщо закріплення відсутні, то кінематичні граничні умови замінюються природними граничними умовами.

Якщо оболонка симетрична щодо поперечного перерізу $\alpha = 0$ (рис.3), то $B = B_1 = 0$ і функції $f_1(\beta)$, $f_2(\beta)$ визначаються незалежними диференціальними рівняннями

$$\begin{cases} \left(\frac{d^2}{d\beta^2} + 1 \right)^2 \frac{d^2}{d\beta^2} \left[A \frac{d^2 f_1}{d\beta^2} - 2(1-\mu) C f_1 \right] - \omega^2 \times \\ \times \frac{12(1-\mu^2) \rho R^4}{E} \left[A_1 \left(\frac{d^2}{d\beta^2} - 1 \right) \frac{d^2 f_1}{d\beta^2} + C_1 f_1 \right] = 0; \\ \left(\frac{d^2}{d\beta^2} + 1 \right)^2 \frac{d^2 f_2}{d\beta^2} - \omega^2 \frac{12(1-\mu^2) \rho R^4}{E} \frac{C_1}{C} \left(\frac{d^2 f_2}{d\beta^2} - f_2 \right) = 0. \end{cases}$$

Функція f_1 описує в цьому випадку кососиметричні щодо перерізу $\alpha = 0$ форми коливань, а функція f_2 - симетричні.

Для замкнутої оболонки граничні умови замінюються умовами періодичності, яким задовольняють функції $f_1 = M \cos K\beta$, $f_2 = N \cos K\beta$.

Таким чином формула для розрахунку резонансних частот циліндричної оболонки (для симетричних коливань) має такий вигляд:

$$\omega_K^2 = \frac{1}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\rho R^4} \frac{C}{C_1} \frac{K^2 (K^2 - 1)^2}{K^2 + 1}, \quad (4)$$

де $E = 63740 \cdot 10^6$ Па - модуль пружності Юнга для скла; $\mu = 0,23$ - коефіцієнт Пуассона для скла; $\rho = 2650$ кг/м³ - густина скла; $K = 1, 2, n$.

Для оболонки постійної товщини b і довжини $2h$ (рис.3) значення коефіцієнтів рівні:

$$C = 2b^3 \int_0^{\frac{h}{R}} d\alpha = 2b^3 \frac{h}{R}; \quad C_1 = 2b \int_0^{\frac{h}{R}} d\alpha = 2b \frac{h}{R}.$$

Таким чином, формула (4) спрощується і її можна записати в наступному вигляді:

$$\omega_K^2 = \frac{Eb^2}{12(1-\mu^2)\rho R^4} \frac{K^2(K^2-1)^2}{K^2+1}. \quad (5)$$

для використання у подальших розрахунках.

III. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розрахунок проводимо в програмному середовищі MathCAD для випадку $R=0,01525\text{м}$; $\mu = 0,23$; $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$; $K = 1, 2, \dots, n$; $E = 63740 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

Для проведення аналізу отриманих результатів спочатку слід навести результати [5], отримані при проведенні експерименту (див. табл.2). В роботі було отримано 9 резонансних частот в діапазоні від 99 до 4060 Гц. Слід також врахувати, що на частоті 3978 Гц спостерігався резонанс усередині колби, в області горлової частини резонанс був відсутнім. На частотах 3037 Гц, 3568 Гц і 4060 Гц резонанс в горловині був слабо виражений.

За допомогою програмного середовища MathCAD проведемо необхідні розрахунки за формулою (5) для отримання значень резонансних частот в діапазоні від 0 до 4200 Гц і результати зведемо у таблицю 3.

Виходячи з результатів отриманих в [5] можна також зробити висновок, що резонансні частоти горлової частини, що перевищують значення 3000 Гц не матимуть суттєвого впливу на значення резонансів всього резонатора, т.я. для цих значень частоти резонанс у горловій частині не спостерігався експериментально.

Тобто в подальшому аналізі є сенс проводити порівняння перших п'яти значень резонансних частот, отриманих експериментально, з найближчими до них значеннями резонансних частот, отриманих в результаті розрахунку. Таким чином, для кожної частоти, отриманої експериментально, можливо протиставити одну або пару частот, отриманих в результаті розрахунку. Тоді частоті 99 Гц (табл.2) будуть відповідати частоти 94 та 114 Гц (табл.3), частоті 893 Гц – 857 та 916 Гц, частоті 1681 Гц – 1682 Гц, частоті 1947 Гц – 1931 Гц, частоті 2625 Гц – 2579 та 2679 Гц.

Для проведення більш точного аналізу отриманих результатів, є необхідність провести розрахунок амплітуд коливань, що відповідають розрахованим резонансним частотам.

ТАБЛИЦЯ 2 РЕЗОНАНСНІ ЧАСТОТИ РЕЗОНАТОРА, ОТРИМАНІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕКСПЕРИМЕНТУ

№	1	2	3	4	5
Частота резонансу, Гц	99	893	1681	1947	2625
№	6	7	8	9	
Частота резонансу, Гц	3037	3568	3978	4060	

ТАБЛИЦЯ 3 РЕЗОНАНСНІ ЧАСТОТИ ГОРЛОВИНИ РЕЗОНАТОРА

№	1	2	3	4
f, Гц	7.24	13.9	22.5	32.9
№	5	6	7	8
f, Гц	45.3	59.7	75.9	94.0
№	9	10	11	12
f, Гц	114.04	135.99	159.84	185.60
№	13	14	15	16
f, Гц	213.28	242.86	274.35	307.74
№	17	18	19	20
f, Гц	343.05	380.27	419.39	460.42
№	21	22	23	24
f, Гц	503.36	548.21	594.97	643.63
№	25	26	27	28
f, Гц	694.21	746.69	801.08	857.38
№	29	30	31	32
f, Гц	915.59	975.71	1038	1102
№	33	34	35	36
f, Гц	1168	1235	1305	1376
№	37	38	39	40
f, Гц	1450	1525	1603	1682
№	41	42	43	44
f, Гц	1763	1846	1931	2018
№	45	46	47	48
f, Гц	2106	2197	2290	2384
№	49	50	51	52
f, Гц	2481	2579	2679	2781
№	53	54	55	56
f, Гц	2885	2991	3099	3209
№	57	58	59	60
f, Гц	3320	3434	3549	3667
№	61	62	63	64
f, Гц	3786	3907	4030	4155

ВИСНОВОК

Було отримано 64 резонансні частоти горла в діапазоні резонансних частот резонатора, отриманих раніше експериментально. Частина цих резонансів не матиме істотного впливу на резонанси системи, через малість їх амплітуд коливань. Цим можливо пояснити і відмінність в кількості резонансів отриманих в результаті розрахунку і експериментально (чим менша амплітуда коливань, тим складніше зафіксувати резонанс експериментально).

Отже, врахування амплітуд коливань всередині горлової частини допоможе скоротити кількість частот, що є цікавими для подальших розрахунків, і виділити серед них частоти, які будуть мати найбільший вплив на значення резонансних частот всього резонатора, тобто матимуть найбільші амплітуди коливань всередині горловини. Тому метою подальших досліджень буде розрахунок амплітуд коливань, які відповідають отриманим резонансним частотам.



ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] H. M. Atassi, "The Helmholtz Resonator," [Online]. Available: <https://www3.nd.edu/~atassi/Teaching/AME%2060633/Notes/resonator.pdf>. [Accessed 26 October 2018].
- [2] S. Uosukainen, *Absorption properties of generic plate and Helmholtz resonator structures*, Espoo: VTT, 2012.
- [3] A. Rona, "The acoustic resonance of rectangular and cylindrical," *Journal of Algorithms and Computational Technology*, pp. 329-356, 1 October 2007, DOI: [10.1260/174830107782424110](https://doi.org/10.1260/174830107782424110).
- [4] L. Kela, "Resonant frequency of an adjustable Helmholtz resonator in a hydraulic system," *Archive of Applied Mechanics*, pp. 1115-1125, 16 December 2008.
- [5] V. Didkovskiy, S. Naida and V. Zaets, "Experimental study of Helmholtz resonators resonance-frequency behaviour in the broad frequency band," unpublished.
- [6] S. A. Najda and V. S. Didkovskij, "Novye širokopolosnye elektroakusticheskie pribory dlya mediciny [New broadband electroacoustic devices for medicine]," *Elektronika i svyaz*, pp. 211-216, 2010.
- [7] K.-L. Koai, T. Yang and J. Chen, "The Muffling Effect of Helmholtz Resonator Attachments to a Gas Flow Path," in *The Muffling Effect of Helmholtz Resonator Attachments to a Gas Flow Path*, West Lafayette, 1996.
- [8] C. Wu, L. Chen, J. Ni and J. Xu, "Modeling and experimental verification of a new muffler based on the theory of quarter-wavelength tube and the Helmholtz muffler," *SpringerPlus*, 19 August 2016, DOI: [10.1186/s40064-016-3060-1](https://doi.org/10.1186/s40064-016-3060-1).
- [9] D. Sun, L. Qiu, B. Wang and Y. Xiao, "Novel Helmholtz resonator used to focus acoustic energy of thermoacoustic engine," *Applied Thermal Engineering*, pp. 945-949, April 2009.
- [10] S. Zhang, L. Yin and N. Fang, "Focusing Ultrasound with an Acoustic Metamaterial Network," *Phys. Rev. Lett.*, 15 May 2009, DOI: [10.1103/PhysRevLett.102.194301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.194301).
- [11] "Razdel 9. Kolebaniya plastin i obolochek [Section 9. Plate and shell vibrations]," [Online]. Available: <http://www.detalmach.ru/lectdinamika9.htm>. [Accessed 10 October 2018].
- [12] I. Karimov, "Lekciya 8. Raschet obolochek [Lecture 8. Shell calculation]," [Online]. Available: <http://www.soprotmat.ru/obol.htm>. [Accessed November 2018].

Надіслано до редакції 20 вересня 2018 р.

УДК 534.16

Расчет резонансных частот горловой части резонатора Гельмгольца

Копытько Ю. С., ORCID [0000-0003-2771-5180](https://orcid.org/0000-0003-2771-5180)

e-mail yus.kopytko@aae.kpi.ua

Кафедра акустики и акустоэлектроники acoustic.kpi.ua

Факультет электроники fel.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—Приведен расчет резонансных частот горловины резонатора Гельмгольца с целью дальнейшей оценки взаимосвязи резонансных частот, полученных экспериментально с резонансными частотами одного из элементов резонатора (горловой части) для создания широкополосных акустических систем или метаматериалов. Целью работы является расчет резонансных частот горловины резонатора Гельмгольца. Параметры горловины выбраны равными параметрам горловины одного из резонаторов, исследованных экспериментально. В результате расчета получены численные значения для первых шестидесяти четырёх резонансных частот.

Библ. 12, рис. 3, табл. 3.

Ключевые слова – резонатор Гельмгольца; резонанс горловины; глушитель; метаматериал



UDC 534.16

Calculation of the Resonant Frequencies of the Throat Part of the Helmholtz Resonator

J. S. Kopytko, ORCID [0000-0003-2771-5180](https://orcid.org/0000-0003-2771-5180)

e-mail yus.kopytko@aae.kpi.ua

Department of acoustics and acoustoelectronics acoustic.kpi.ua

Faculty of Electronics fel.kpi.ua

National technical university of Ukraine "Kyiv polytechnic institute named after Igor Sikorsky" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—The calculation of the resonant frequencies of the Helmholtz resonator neck for the purpose of further evaluating the relationship between the resonant frequencies, obtained experimentally with the resonant frequencies of one of the main elements of the resonator to create broadband acoustic systems or metamaterials is presented.

Recently, the issues concerning Helmholtz's resonators are of increasing interest in the scientific world. They are actively used to solve various problems in acoustics and find more and more applications - from use as mufflers, for use in the composition of metamaterials.

As a simplification, it is assumed that the Helmholtz resonator has only one resonant frequency. In practice, the presence of a number of additional resonances was discovered.

In this paper, it is proposed to approach the question of finding additional resonant frequencies on the other hand and consider the cavity as a system consisting of two more simple elements, to go by solving two more simple problems and to bring the results together, to reconcile them.

The aim of the work is to calculate the resonant frequencies of the Helmholtz resonator neck. The throat parameters are chosen equal to the throat parameters of one of the resonators investigated in experiment.

Using the MathCad software environment, the necessary calculations to obtain the values of resonant frequencies in the range from 0 to 4200 Hz were made.

The 9 resonant frequencies in the range from 99 to 4060 Hz was obtained experimentally. As a result of the calculation, numerical values are obtained for the first sixty four resonant frequencies. Some of these resonances will not have a significant effect on the resonances of the system, due to the smallness of their amplitudes of oscillations. This may explain the difference in the number of resonances obtained as a result of the calculation and experimentally (the smaller the amplitude of the oscillations, the more difficult to fix the resonance experimentally).

At a frequency of 3978 Hz, resonance was observed inside the flask experimentally; in the throat region, resonance was absent. At the frequencies 3037Hz, 3568Hz and 4060Hz, the resonance in the neck was poorly expressed. It can be concluded that the resonant frequencies of the throat, exceeding the value of 3000 Hz, will not have a significant effect on the resonance values of the entire resonator, i.e. for these values of frequency, resonance in the throat part was not observed experimentally.

Taking into account the amplitudes of oscillations inside the neck will help reduce the number of frequencies that are interesting for further calculations and select among them the frequencies that will have the greatest influence on the value of the resonance frequencies of the entire resonator, that is, they will have the greatest amplitudes of fluctuations within the neck. Therefore, the purpose of further research is to calculate the amplitudes of oscillations that correspond to the received resonance frequencies.

Ref. 12, fig. 3, tabl. 3.

Keywords — Helmholtz resonator; throat resonance; muffler; metamaterial

