

ФІЗИКА ТА ХІМІЯ

УДК 502.55:621.039.7

Рудик Б. П., зав. лаб. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Остаповець Ю.,** учень 10 класу, **Лебець О. О., ст. викл.** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОГЕНЕРАТОРА ЗВУКУ

Проведено експериментальне дослідження автогенератора звуку на основі труби Рійке. Визначені фізичні характеристики автогенератора.

Ключові слова: автогенератор звуку, труба Рійке.

Вперше задокументував дослідження взаємного перетворення теплової в акустичну енергію в дослідах з термогенерації звукових коливань Хіггінс (Higgins, 1802) в 1777 році, який спостерігав утворення звуку при горінні водневого пальника у трубі з відкритими кінцями (рис. 1). Генерація звуку відбувалася завдяки конвективному руху повітря, створеному полум'ям пальника. Проте, труба «співала» лише при певних довжинах полум'я та труби, їх параметри підбиралися експериментально. Явище виникнення звуку у відкритій трубі за допомогою нагрівання повітря в ній отримало назву «співоча труба Хіггінса» [1].

Пізніше Рійке (Rijke, 1859) [2] експериментуючи отримав генерацію звуку новим способом у трубі з відкритими кінцями. Він використовував трубу, у якій на $1/4$ довжини встановлювалась металева сітка, що розжарювалась за допомогою пальника.

Згодом, уже в 50-х роках минулого століття, вивчення термоакустичних коливань набуло практичної спрямованості у зв'язку з утворенням небажаних коливань в камерах згоряння ракетних двигунів, інших установках з великими перепадами температур.

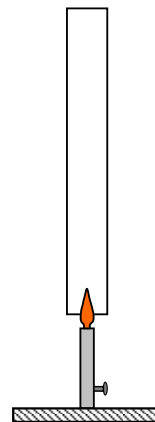


Рис. 1. «Співоча труба» Хіггінса



Відомо, що невеликі коливання є звичайним явищем, супутнім практично всім раніше розробленим і використовуваним у даний час двигунам. Шкідлива дія резонансного горіння палива в двигуні, крім руйнування корпусу двигуна при високих тисках, що перевищують розрахункові значення, призводить до:

- розтріскування заряду внаслідок вібрації навантажень (для твердопаливних двигунів);
- місцевих порушень корпусу двигуна після розтріскування теплозахисного покриття;
- втомного руйнування окремих вузлів конструкцій тощо.

Для боротьби з резонансним горінням в даний час застосовуються методи і прийоми, пов'язані з визначенням дослідним шляхом у процесі відпрацювання зразків двигунів оптимальних співвідношень геометричних розмірів вузлів та елементів двигуна. В наш час стрімкого розвитку ракетної та космічної техніки вивчення термоакустичних ефектів таким чином набуло надзвичайно важливого значення.

Експериментальні дослідження. Труба Рійке може бути виготовлена з будь-якого високотемпературного матеріалу, здатного витримати температуру газового пальника (труба з сіткою, рис. 2) або електричної спіралі (рис. 3). У своїй досліді ми зупинилися на варіанті з електричним нагрівником через простоту та наявність підручних матеріалів саме для такого варіанту труби Рійке. Матеріалом для виготовлення труби найчастіше є готові труби з металу або скла.

Для скляної трубки найкраще підходить кварцове скло, яке характеризується малими коефіцієнтами лінійного та об'ємного теплового розширення та низькою теплопровідністю. Кварцова труба не тріскається від розжареної електричним струмом спіралі, зовнішня стінка не так сильно прогрівається (зменшує вірогідність опіку), уламки кварцового скла не є настільки гострими та небезпечними, як скляні. Також, у даному випадку можливе використання боросилікатного скла (пірексу), що використовується для ви-

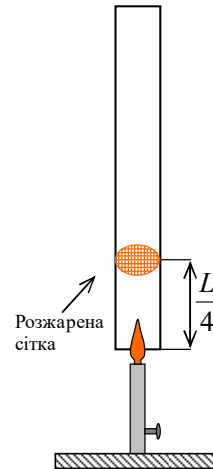


Рис. 2. Труба Рійке

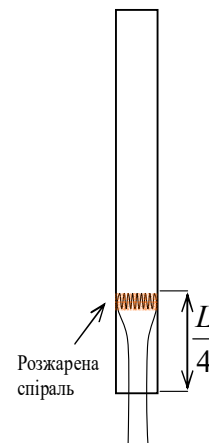


Рис. 3. Труба Рійке з електричною спіраллю

готовлення жаростійкого обладнання, лабораторного посуду, кухонного посуду для запікання тощо.

У дослідях використовувались скляні труби різної довжини (1,05 м, 1,12 м, 1,15 м, 1,725 м) та різних діаметрів – 37,8 мм та 26,2 мм. За допомогою даних труб проводилося дослідження залежності висоти звуку від діаметра труби. Вдалим для досліджень виявився той факт, що поперечний переріз цих труб відрізнявся практично у 2 рази.

Кожна із скляних труб закріплювалась у штативі, після чого всередину труби, на відстані близько одної четвертої від нижнього кінця, поміщався нагрівач. Нагрівач виготовлявся з ніхромового дроту діаметром 0,8 мм та живився від джерела живлення ВС-10. В перших дослідях спіраль вмикалась послідовно з реостатом, який обмежував струм, що протікав у колі, до настання червоного свічення спіралі на повітрі. При внесенні спіралі у трубу, конвективний потік повітря, який утворювався, охолоджував спіраль, через що її колір переставав бути червоним.

Щоб добитись розжарення спіралі до червоного кольору всередині труби в наступних дослідях було підвищено силу струму в колі, а пізніше реостат зовсім виключили з нього. При цьому оптимальна напруга на затискачах джерела була близькою до 10 В, а сила струму у колі становила близько 5 А, тобто потужність, яку споживав нагрівник становила близько 50 Вт.

Перший етап досліджень. В експериментах даного етапу встановлювались якісні характеристики автогенератора на основі труби Рійке. Так, було встановлено, що через декілька секунд після внесення червоної спіралі у трубу, при встановленні у ній стійкого конвективного потоку повітря, з'являвся гучний звук. При внесенні холодної спіралі в трубу і ввімкненні струму, звук з'являвся після прогрівання спіралі, тобто через 15–20 секунд. При повороті труби горизонтально звук зникав, що свідчило про обов'язкову умову генерації – конвективний потік повітря в трубі.

Було перевірено і підтверджено тезу Рійке [2] про максимальну інтенсивність звуку при встановленні нагрівника на відстані $1/4$ довжини трубки від її нижнього краю. Було доведено, що при русі нагрівника з відстані 28 см до 16 см, рахуючи від нижнього краю труби, звук поступово стихає. Таке ж явище зникнення генерації спостерігалось і при переміщенні нагрівника вгору до позначки 43,5 см.

Другий етап досліджень. На даному етапі визначались кількісні характеристики автогенератора на основі труби Рійке: довжина



хвилі та частота звукових коливань, залежність цієї частоти від діаметра та довжини труби. Висота тону генерованого звуку в автогенераторі залежала, в деяких межах, від положення нагрівника у трубі, тому в експериментах це явище було досліджене докладніше. Визначення частоти генерації звукової хвилі на другому етапі досліджень проводилося електродинамічним мікрофоном та мультиметром М-980G з можливістю частотоміра до 20 кГц, з точністю до 10 Гц. Змінюючи положення нагрівника у трубі, мультиметром вимірювалася частота звукових коливань в ній, а положення нагрівника визначалося міліметровою лінійкою з кроком у 1 см. Отримані дані представлені в табл. 1 та рис. 4. З рис. 4 видно, що в експерименті спостерігалася стрибкоподібна зміна частоти з 160-170 Гц до 320-340 Гц, а потім – до 460 Гц. Ці стрибки та плато на графіку можна пояснити гармоніками до основної частоти коливань у трубі, тому що дані частоти 160 – 340 – 460 близькі до відношення 1:2:3 (табл. 1):

Таблиця 1

Визначення гармонік звукової хвилі в трубі Рійке

	Гармоніки		
	Основна (перша)	Перша побічна (друга)	Друга побічна (третя)
	×1	×2	×3
Розрахунок, Гц	160	320	480
Експеримент, Гц	160-170	320-340	460

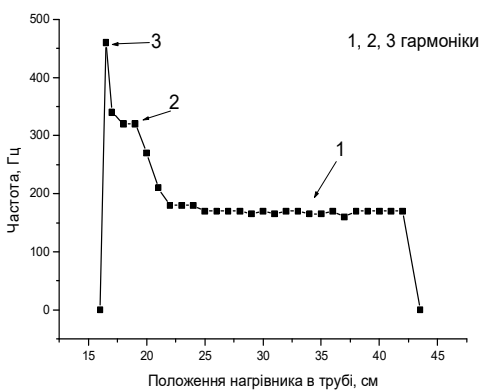


Рис. 4. Залежність частоти коливань звукової хвилі від положення нагрівника в трубі Рійке. На графіку видно, в яких межах проявляються 1, 2 та 3-я гармоніки звуку

Дослідження труб різних діаметрів з метою визначення зв'язку діаметру труби Рійке на параметри коливань (частоту, гучність) не виявили такого зв'язку. Достовірно було доведено лише залежність частоти генерованого звуку від довжини труби. Для труб різного діаметру і частота, і гучність виявилися рівними, відчутної відмінності у гучності звучання (на слух) зафіксовано не було.

За отриманими даними було визначено довжини звукових хвиль у трубі Рійке (табл. 2):

Таблиця 2

Розрахунок довжин хвиль в трубі Рійке

Частота, Гц	λ , м	L/λ , м
160	2,125	0,52
320	1,0625	1,05
460	0,74	1,51

В табл. 2 L/λ – це відношення довжини труби до довжини хвилі.

Можна зробити висновок, що труба Рійке є півхвильовим резонатором, тобто в трубі вкладається половина хвилі.

Також було знято форму звукових коливань осцилографом С1-72 (рис. 5). Видно, що менша за амплітудою хвиля є сума принаймні двох хвиль. Для порівняння та перевірки сигналу, був «прослуханий» камертон, він дав чисту синусоїду.

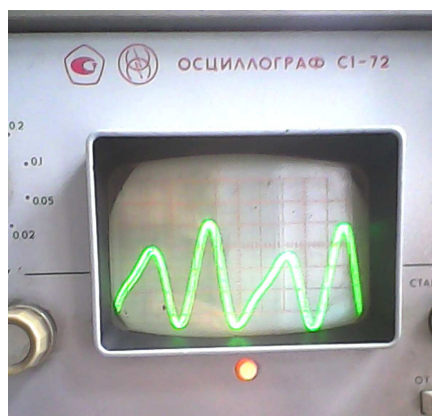


Рис. 5. Осцилограма коливань.
Параметри розгортки:
0,2 В/поділку та 1 мс/поділку

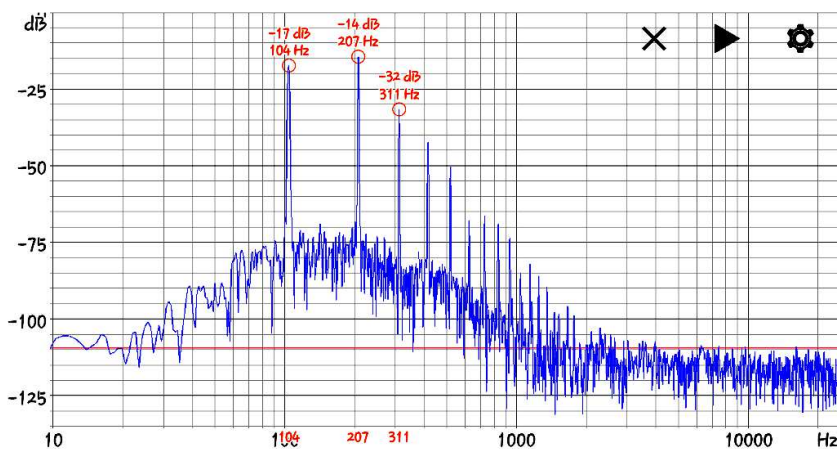


Рис. 6. Скріншот програми Spectroid з визначення амплітудно-частотної картини звуку труби Рійке

Третій етап досліджень. На даному етапі досліджувались амплітудно-частотні спектри звукової хвилі автогенератора на основі труб Рійке різної довжини. Такі дослідження проводилися з використанням програмно-апаратного комплексу на базі смартфона Samsung J710 з обробкою експериментальних даних програмами «Oscilloscope» [3] та «Spectroid» [4].

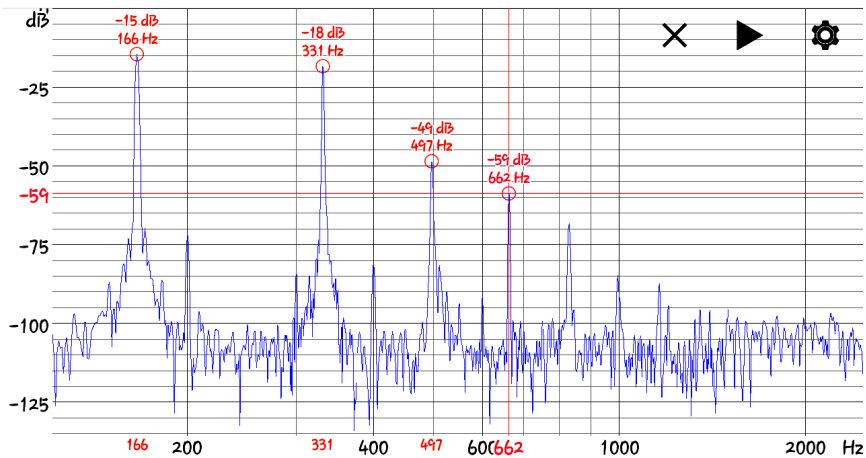


Рис. 7. Скріншот програми Spectroid з визначення амплітудно-частотної картини звуку труби Рійке

Дані програми дозволяють знімати оцифровані дані з АЦП звукового модуля телефону з подальшим аналізом, розкладом за частотними характеристиками та індикацією на екрані смартфона в режимі реального часу. Програми завантажувались з сервісу «Google Play маркет» (обидві програми є безкоштовними).

Програма Spectroid – це звуковий спектр-аналізатор у режимі реального часу з достатньою роздільною здатністю за частотою по всьому спектру частот (20 Гц–22,4 кГц). Spectroid використовує кілька швидких перетворень Фур'є, які перекриваються за частотою, з тим щоб забезпечити вищу роздільну здатність за частотою на нижчих частотах, ніж одне перетворення FFT.

Для перевірки роботи програми Spectroid і оцінки похибки вимірювання частоти звуку було проведено дослідження звуку камертона з власною частотою 440 Гц (нота «ля»). Програма показала лише один гострий пік з частотою 439 Гц, що, на наш погляд, є цілком задовільним та відповідає висунутим до роботи вимогам по точності отриманих даних та інструментальних похибках обладнання. Отримані результати свідчать про непотрібність додаткового калібрування або нормалізацію даних отриманих цією програмою.

Побудова амплітудно-частотної картини звуку отриманого від

термоакустичного генератора дала можливість побачити, що труба Рійке генерує не одну частотну моду, а цілу низку гармонік (рис. 6, 7). Схожу картину можна спостерігати при звучанні будь-якого музичного інструменту, де використовується резонатор у вигляді труби, наприклад – органу.

В дослідженні визначались частоти звукових гармонік труб Рійке різних довжин (№ 1 – 1,15 м, № 2 – 1,053 м, № 3 – 1,725 м), подані в таблиці 3.

Таблиця 3

Частоти звукових гармонік ν та різниця між сусідніми частотами $\Delta\nu$ труб Рійке різних довжин, ν в Гц, $\Delta\nu$ в Гц

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	ν	152	305	457	609	762	914	1066	1218	1371	1523								
	$\Delta\nu$	153	152	152	153	152	152	153	152	152									
2	ν	170	337	504	674	844	1008	1184	1348	1523	1688	1852							
	$\Delta\nu$	167	167	170	170	164	176	164	175	165	164								
3	ν	104	207	311	416	519	623	727	832	935	1040	1143	1248	1351	1453	1559	1664	1770	1875
	$\Delta\nu$	103	104	105	103	104	104	105	103	105	103	105	105	102	106	105	106	105	

За результатами таблиці 3 за методом найменших квадратів розраховувались довжина хвилі λ та швидкість звуку ν в трубах Рійке довжиною L (табл. 4).

Таблиця 4

Розрахунок довжини хвилі λ та швидкості звуку ν в трубах Рійке довжиною L

№ дос- лід ду	$\langle \nu \rangle$, Гц	L , м	λ , м	ν , м/с	n	$\sum x$	$\sum x^2$	$x \sigma_n$	$x \sigma_{n-1}$
1	152,33	1,15	2,30	350,36	9	1371	208851	0,471	0,5
2	168,2	1,053	2,106	354,23	10	1682	283092	4,238	4,467
3	104,17	1,725	3,45	359,39	17	1771	184519	1,149	1,185
сер				354,66					

Відмінність у швидкостях звуку можна пояснити тим, що досліди проводилися у різний час, і, можливо, за різної температури повітря. Ми не ставили перед собою задачу прив'язати швидкість звуку у повітрі до температури, тому вона не вимірювалася.

1. R. L. Raun, M. W. Beckslead, J. C. Finlinson and K. P. Brooks. Review of Rijke Tubes, Rijke Burners and related devices. Prog. Energy Combust. Sci. 1993, Vol. 19, pp. 313–364.
2. Pieter L. Rijke (1859) «On the vibration of the air in a tube open at both ends», *Philosophical Magazine*, vol. 17, pages 419–422.



3. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.xyz.scope>, звуковий осцилограф. 4. <https://play.google.com/store/apps/details?id=org.intoorbit.spectrum>.

Рецензент: к.т.н., доцент Гаращенко В. І. (НУВГП)

Rudyk B. P., Head of Lab. (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Ostapovets Y., Senior Student of the 10th form, Lebed O. O., Senior Lecturer** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

EXPERIMENTAL STUDIO OF THE SOUND AUTOGENERATOR

An experimental investigation of the sound generator based on the Rijke tube principle was carried out. The physical characteristics of generator were determined.

Keywords: thermoacoustic generator, Rijke tube.

Рудык Б. П., зав. лаб. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно), **Остаповец Ю., ученик 10 класса, Лебедь А. А., ст. выкл.** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОГЕНЕРАТОРА ЗВУКА

Проведено експериментальне дослідження автогенератора звука, побудованого на принципі труби Рійке. Визначені фізичні характеристики автогенератора.

Ключевые слова: автогенератор звука, труба Рійке.
