МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «бакалавр»

на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНОЇ ЛЕВІТАЦІЇ»

Виконав : студент 4 курсу, групи НФ-41
Діана ЛАПА
Спеціальність: 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма: прикладна фізика енергетичних систем
Керівник: канд. фіз.-мат. наук, доц.
Ігор КУДРЯВЦЕВ

Рецензент:

Харків - 2021 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології____
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) __бакалавр
Напрям підготовки 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.І.Ткаченко
підпис

"____"_____2021_року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Лапі Діані Андріївні

1.Тема роботи "Дослідження акустичної левітації "

Керівник роботи: Кудрявцев Ігор Миколайович, доцент

затверджені наказом по університету від "___" _____20__р. №_____

2. Строк подання студентом роботи _____ 2021 р.

3.Перелік питань, які потрібно розробити:

Опис технології акустичної левітації. Класифікація методів статичної акустичної левітації та опис видів маніпулювання левітуючих об'єктів . Розробка та збірка простого варіанту установки для дослідження явища. Розробка установки на основі генератора AD9833. Аналіз проведеної роботи в вигляді висновку. Підготовка презентації та доповіді.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Опис технології акустичної левітації.
2	Класифікація методів статичної акустичної левітації та опис видів маніпулювання левітуючих об’єктів .
3	Розробка та збірка простого варіанту установки для дослідження явища.
4	Розробка установки на основі генератора AD9833 .
5	Аналіз проведеної роботи в вигляді висновку.

5. Дата видачі завдання _____

Студент _____ Д.А.Лапа

Керівник роботи _____ І.М.Кудрявцев

РЕФЕРАТ

Лапа Діана Андріївна "Дослідження акустичної левітації" (випускну роботу "бакалавра"). - Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2021. - 47с. Робота складається з вступу, трьох розділів, висновків; містить 28 малюнків, 1 таблиць, список використаних джерел з 20 найменувань.

Проаналізовано та класифіковано різноманітні види акустичної левітації. Здійснено проектування і розробка експериментального стенду левітуючі установки з системою ультразвукових випромінювачів. Удосконалено експериментальна установка модулем генератора AD9833. Отримано результати експериментальних досліджень акустичної левітації та здійснено аналіз вимірювань.

Ключові слова: левітація, акустична левітація, стоячі хвилі, радіаційна сила, акустичний левітатор, ультразвуковий випромінювач, радіаційне тиск, Ардуіно.

ABSTRACT

Lapa Diana Andriivna "Investigation of acoustic levitation" (bachelor's thesis). - Kharkov: KhNU named after V. N. Karazin, 2021. - 47p. The work consists of the introduction, three sections, conclusions; contains 28 figures, 1 tables, the list of sources used with 20 items.

Various kinds of acoustic levitation have been analyzed and classified. The design and development of the experimental stand of levitating installation with the system of ultrasonic emitters has been carried out. The experimental setup was improved by the AD9833 generator module. The results of experimental studies of acoustic levitation were obtained and the analysis of measurements was carried out.

Key words: Levitation, Acoustic Levitation, Standing Waves, Radiation Force, Acoustic Levitator, Ultrasonic Transducers, Arduino.

ЗМІСТ

ВСТУП..... 1

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ. 3

1.1. Технологія ультразвукової акустичної левітації. 3

1.2. Методи статичної акустичної левітації. 24

1.3. Акустичне маніпулювання і переміщення левітуючих об'єктів. 32

РОЗДІЛ 2. Постановка експерименту. 38

2.1. План експерименту. 38

2.2 Схема проведення експерименту. 44

2.3. Результат експерименту. 45

РОЗДІЛ 3. Результати експерименту і теоретичний аналіз. 48

3.1.Вимірювання тиску в звуковій хвилі. 48

3.2.Залежність тиску акустичного випромінювання від затухання хвилі. .. 49

ВСТУП

Левітацією можна назвати такий фізичний ефект, як подолання гравітації при якому об'єкт переміщується або утримується в просторі (левітує), не торкаючись поверхні рідкої або твердої опори.

Фізики довгий час вважали, що змусити об’єкт левітувати взагалі неможливо, але це стало можливим коли винайшли різні безконтактні сили, щоб протидіяти земній гравітації і дійсно підвішувати об'єкти в повітрі. Існують різні методи левітації об'єктів, включаючи магнітну, електричну, оптичну, аеродинамічну і акустичну левітації [2]. У даній роботі розглядатиметься метод акустичної левітації, головним чином тому, що він має здатність левітувати практично будь-який матеріал, включаючи тверді тіла , рідини [8] і навіть маленьких живих тварин [9]. Така універсальність робить акустичну левітацію [11] перспективним інструментом в аналітичній хімії [12],матеріалознавстві [13], фармацевтиці [14], мікроелектроніці[15], біофізиці [20] тощо.

Протягом багатьох років акустична левітація використовувалася в основному для підвішування невеликих об'єктів в фіксованих положеннях в просторі, але в останні роки був досягнутий значний прогрес і в даний час існує безліч стратегій акустичної левітації для маніпулювання левітувальних об'єктів у повітрі, таких як: ультразвукова левітація в стоячій хвилі; транспортування об'єктів методом акустичної левітації в ближньому полі; маніпулювання об’єктами за допомогою одновісної акустичної левітації.

В 1886 році було помічено, що в трубці Кундта частинки пилу концентрувались у вузлах тиску стоячої хвилі, що генерується в трубці. Це вважалося ефектом нелінійного тиску акустичного випромінювання, що генерується звуковими хвилями, дослідження яких проводив Релі. Найважливіший поштовх у розвитку цього напрямку зробив документ, опублікований Л. В. Кінгом [18], в якому описується нелінійний ефект і

виведення виразу для такого поля, припускаючи левітацію об'єктів, розташованих у вузлах тиску такого стояння. Хвильове поле лягло в основу розвитку систем акустичної левітації. Подальші теоретичні основи були отримані в результаті досліджень Л. П. Горькова [19], що врешті призвело до розробки першої системи акустичної левітації, встановленої Бюксом і Мюллером в 1933 р.

Мета. Метою роботи є провести повноцінний огляд науково-технічної літератури для розуміння технології акустичної левітації, її видів та способи маніпулювання об’єктами в умовах стоячої хвилі; зібрати експериментальну установку, здатну генерувати стоячу ультразвукову хвилю, для спостереження і вивчення можливостей акустичної левітації невеликих предметів в цій хвилі; запропонувати майбутні перспективи акустичної левітації.

Об’єкт дослідження. Акустична левітація предметів в стоячій ультразвуковій хвилі.

Предмет дослідження. Властивості стоячої хвилі (наприклад тиск у вузлах хвилі) та способи її створення.

Особистий внесок. Запропоновано методи використання досліджуваного явища в майбутньому.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.

1.1. Технологія ультразвукової акустичної левітації.

Акустична левітація використовує тиск акустичного випромінювання для протидії гравітації і підвішування матеріалів в повітрі.

Ми почнемо цей розділ з уявлення керуючих рівнянь руху рідини, а потім виведемо лінійне хвильове рівняння. Потім ці рівняння об'єднуються для отримання тиску акустичного випромінювання, і наводиться просте аналітичний вираз для сили акустичного випромінювання, що діє на маленьку сферу. Цей вислів використовується для отримання сили випромінювання, що діє на маленьку жорстку сферу в поле плоскої акустичної стоячій хвилі. Крім того, представлена числова процедура для отримання сили акустичного випромінювання на левітуючі об'єкти. Для спрощення аналізу ми припускаємо, що рідина нев’язка, а нелінійні ефекти, такі як акустичний потік [35-37] і генерація гармонічних хвиль [38], не розглядаються. Ми також нехтуємо силами акустичного взаємодії [39,40], викликаними розсіюванням хвиль від інших об'єктів.

1.1.1 Рівняння руху рідини.

Рух рідини нескінченно малого об’єму dV, що містить велику кількість молекул, так що його можна розглядати як суцільне середовище, можна описати вектором швидкості $\mathbf{u}$, щільності ρ і тиску p. Ці поля можуть змінюватися в просторі і часі, отже, є функціями положення $\mathbf{r}$ і часу t. Опис руху рідини відбувається в декартовій системі координат, в якій вектор положення $\mathbf{r} = x\hat{\mathbf{i}} + y\hat{\mathbf{j}} + z\hat{\mathbf{k}}$ записується в декартових одиничних векторах $\hat{\mathbf{i}}$, $\hat{\mathbf{j}}$ та $\hat{\mathbf{k}}$. Для спрощення аналізу, ми припускаємо, що рідина нев’язка і нетеплопровідна. В такому випадку для опису руху рідини потрібно три рівняння: рівняння нерозривності, рівняння збереження імпульсу і рівняння

стану рідини. Перше рівняння, пов'язане зі збереженням маси, це рівняння нерозривності, яке задається в такий спосіб:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1.1}$$

Нехтуючи гравітаційним полем і розглядаючи нев’язку рідину, рівняння збереження імпульсу (також називається рівнянням Ейлера) виражається в такий спосіб:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathrm{t}} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} \right] = -\nabla p \tag{1.2}$$

Рівняння стану рідини, яке пов'язує щільність рідини з тиском, дає макроскопічний опис взаємодії між молекулами рідини. У найпростішому випадку розрідженого газу при високих температурах, силами взаємодії між молекулами можна знехтувати, і газ може бути описаний законом ідеального газу. Однак, при збільшенні тиску, рівняння стану стає більш складним і описується, як:

$$p = p\,(\rho), \tag{1.3}$$

який виражає тиск як залежність від щільності рідини.

1.1.2. Лінійне хвильове рівняння.

Рівняння (1.1) - (1.3) можуть бути об'єднані для опису поширення механічних хвиль в рідинах. Однак ці рівняння нелінійні та їх аналітичне рішення не є простою задачею, навіть у найпростіших випадках. Можна спростити (1.1) - (1.3), припустивши, що механічні хвилі мають малі амплітуди.

Для опису поширення механічних хвиль малих амплітуд в рідкому середовищі будемо вважати, що під час відсутності хвилі рідина знаходиться в стані спокою ($\mathbf{u} = 0$) і має постійний тиск p_0 і постійну щільність ρ_0. Припустимо також, що коли хвиля поширюється в рідині, поля p, $\mathbf{u}$ і ρ мають невеликі зміни по відношенню до незбуреної рідини. У цьому випадку повні поля (p, $\mathbf{u}$ і ρ) можна виразити як суму незбурених полів (p_0, $\mathbf{u}_0$ і ρ_0.) і полів збурень першого порядку (p_1, $\mathbf{u}_1$ і ρ_1), в такий спосіб:

$$p = p_0 + p_1, \tag{1.4а}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_1\,, \tag{1.4б}$$

$$\rho = \rho_0 + \rho_1. \tag{1.4в}$$

В формулах (1.4) підрядковий індекс 0 відноситься до незбурених полів, а підрядковий індекс 1 – для наближень першого порядку. Передбачається, що незбурена рідина знаходиться в стані спокою, так що $\mathbf{u}_0 = 0$. Крім того, коли ми маємо справу з хвилями малих амплітуд, ми можемо також вважати, що $|p_1| << p_0$ і $|\rho_1| << \rho_0$. Використовуючи ці наближення і замінюючи (4b) і (4c) в (1.1), ми отримуємо лінійне рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{u}_1) = 0\,. \tag{1.5}$$

Таким же чином, лінійне рівняння імпульсу (при припущенні, що $|(\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}| << |\partial \mathbf{u} / \partial t|$. Тому, замінивши (1.4) в (1.2) і нехтуючи $(\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}$, отримаємо:

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} = -\nabla p_1, \tag{1.6}$$

яке є лінійним рівнянням імпульсу (також називається лінійним рівнянням Ейлера) для ідеальної рідини. Нарешті, лінійне рівняння стану може бути отримане, розкладаючи (1.3) в ряд Тейлора:

$$p = p_0 + \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0) + \dots . \tag{1.7}$$

Переставив члени в (1.7):

$$p - p_0 = \rho_0 \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{\rho_0} \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0}, \tag{1.8}$$

який виражається за допомогою:

$$p_1 = \rho_0 \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{\rho_0} \frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{B}{\rho_0} \rho_1, \tag{1.9}$$

$$B = \rho_0 \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{\rho_0} \tag{1.10}$$

B – адіабатичний коефіцієнт рідини. В (1.9) заміняємо B/ρ_0 на ${c_0}^2$, де c_0– це ізоентропічна швидкість звуку в рідині. Таким чином, лінійне рівняння стану виглядає, як:

$$p_1 = {c_0}^2 \rho_1 . \tag{1.11}$$

Лінійні рівняння (1.5), (1.6) та (1.11) треба об'єднати для отримання лінійного хвильового рівняння. Замінимо (1.11) в (1.5), а потім виведемо отримане рівняння відносно t, в результаті чого:

$$\frac{1}{{c_0}^2} \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t}\right) = 0 . \tag{1.12}$$

Підставляв (1.6) в (1.12), отримаємо:

$$\nabla^2 p_1 = \frac{1}{{c_0}^2}\frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2}\,, \tag{1.13}$$

яке є лінійним хвильовим рівнянням. Очевидно, що c_0 відповідає швидкості звуку в рідкому середовищі. Рівняння (1.13) може бути вирішено для отримання акустичного тиску p_1 у просторі, як функції часу. З акустичного тиску p_1, швидкість $\mathbf{u}_1$ та щільність ρ_1 знаходяться за допомогою (1.6) та (1.11), відповідно.

Важливо відмітити, що швидкість частинки $\mathbf{u}_1$, пов'язана з звуковою хвилею в нев'язкій рідині, є ірраціональною та може бути виражена як градієнт скалярної функції ϕ_1:

$$\mathbf{u}_1 = \nabla\phi_1\,. \tag{1.14}$$

Скалярна величина ϕ_1 – це потенціал швидкості, який також є рішенням хвильового рівняння та знаходиться по формулі:

$$\nabla^2 \phi_1 = \frac{1}{{c_0}^2}\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial t^2}\,. \tag{1.15}$$

Щоб знайти потенціал швидкості, а потім розрахувати акустичний тиск, необхідно вирішити (1.15). Знаючи потенціал ϕ_1, швидкість $\mathbf{u}_1$ можна розрахувати (1.14), акустичний тиск p_1 визначається замінивши (1.14) на (1.6), в результаті отримаємо:

$$p_1 = -\rho_0\frac{\partial \phi_1}{\partial t}\,. \tag{1.16}$$

Багато акустичних проблем пов'язані з поширення тимчасових гармонічних полів. Математична обробка тимчасово гармонічних полів можу

бути спрощена шляхом використання комплексних чисел. Таким чином, потенціал швидкості описується як:

$$\phi_1(\mathbf{r},t) = \phi_1(\mathbf{r})e^{-i\omega t}, \tag{1.17}$$

де i – уявна одиниця, $\omega = 2\pi f$ – кутова частота. Реальне фізичне рішення визначається, взявши дійсну частину комплексних полів.

Заміна (1.17) на (1.15) дає незалежну від часу форму хвильового рівняння (рівняння Гельмгольца), вираженого як:

$$\nabla^2\phi_1 + k^2\phi_1 = 0\,. \tag{1.18}$$

Де $k = \omega/c_0 = 2\pi/\lambda$ – хвильове число, а λ – довжина хвилі.

1.1.3. Акустичний радіаційний тиск.

Наближення першого порядку, описане в попередньому пункті, не здатне передбачати важливий нелінійний ефект в акустиці – акустичний радіаційний тиск [18]. Для того, щоб описати тиск випромінювання, потрібно включити ефекти другого порядку: p, $\mathbf{u}$ та ρ.

$$p = p_0 + p_1 + p_2\,, \tag{19а}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2\,, \tag{19б}$$

$$\rho = \rho_0 + \rho_1 + \rho_2\,. \tag{19в}$$

Підставив (1.19а,б,в) в (1.2) и зберігаючи члени другого порядку, отримаємо:

$$\nabla p_2 = -\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} - \rho_1 \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} - \rho_0\,(\mathbf{u}_1 \cdot \nabla)\mathbf{u}_1\,. \tag{1.20}$$

В більшості додатків, пов'язаних з акустичним радіаційним тиском використовують високочастотні гармонійні поля, спостережувані ефекти яких відбуваються в набагато повільному масштабі. Отже, можна спростити

математичну обробку шляхом обчислення середнього за часом значення p_2 за велику кількість циклів. Таким чином, шляхом усереднення за часом (1.20) ми знаходимо:

$$\nabla\langle p_2\rangle = -\rho_0\left\langle\frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t}\right\rangle - \left\langle\rho_1\frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t}\right\rangle - \rho_0\langle(\mathbf{u}_1\cdot\nabla)\mathbf{u}_1\rangle\,. \qquad (1.21)$$

Де кутові дужки означають середнє значення по часу. Як обговорювалось в роботі Х. Брюса [44], швидкість другого порядку $\mathbf{u}_2$ є періодичною для гармонічного по часу поля, її розкладання в ряд Фур'є приводить до суми синусоїдальних хвиль та константи. Середнє значення по часу дорівнює нулю. Тому перший член в правій частині (1.21) також дорівнює 0, що в результаті дає:

$$\nabla\langle p_2\rangle = -\left\langle\rho_1\frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t}\right\rangle - \rho_0\langle(\mathbf{u}_1\cdot\nabla)\mathbf{u}_1\rangle\,. \qquad (1.21)$$

Об'єднав (1.6),(1.11) та (1.22) і використовуючи $\nabla({p_1}^2) = 2p_1\nabla p_1$ та $\nabla(\mathbf{u}_1\cdot\mathbf{u}_1) = 2(\mathbf{u}_1\cdot\nabla)\mathbf{u}_1$, ми отримаємо:

$$\langle p_2\rangle = \frac{1}{2\rho_0{c_0}^2}\langle{p_1}^2\rangle - \frac{\rho_0}{2}\langle\mathbf{u}_1\cdot\mathbf{u}_1\rangle, \qquad (1.23)$$

яке є тиском акустичного випромінювання (усередненим за часом). Хоча тиск випромінювання $\langle \mathrm{p}_2\rangle$ – нелінійний ефект, який розраховується з лінійних p_1 і $\mathbf{u}_1$. З акустичного радіаційного тиску, представленого в (1.23), акустична радіаційна сила $\boldsymbol{F_{rad}}$,діюча на твердий об'єкт довільної форми і розміру, розраховується за формулою:

$$\mathbf{F_{rad}} = -\int_{\boldsymbol{S_0}}\langle p_2\rangle\,\mathbf{n}dS\,. \qquad (1.24)$$

Визначення сили акустичного випромінювання на твердий об'єкт представлена на рис. 1.1а. На цьому малюнку падаюче акустичне поле представлено акустичним тиском p_1^{in}, швидкість частинки $\mathbf{u}_1^{in}$ розсіюється об'єктом. Розсіяна хвиля представлена полями p_1^{sc} та $\mathbf{u}_1^{sc}$. Суперпозиція падаючої і розсіяної хвиль $p_1 = p_1^{in} + p_1^{sc}$ та $\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_1^{in} + \mathbf{u}_1^{sc}$. З сумарних полів усереднене за часом тиск акустичного випромінювання розраховується по (1.23), а сила акустичного випромінювання, що діє на об'єкт, виходить з (1.24). В (1.24) **n** являє собою вектор нормалі до поверхні, а інтеграл оцінюється по поверхні об'єкта, представленої S_0 на рис. 1.1а.

$$\mathbf{F_{rad}} = -\int_{S_0} \langle p_2 \rangle \, \mathbf{n} dS - \int_{S_0} \rho_0 \langle (\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{n}) \mathbf{u}_1 \rangle \qquad (1.25)$$

В (1.25) інтеграл оцінюється по замкнутій поверхні $\boldsymbol{S_0}$, що охоплює об'єкт. Такий підхід до визначення сили акустичного випромінювання на об'єкт проілюстрований на рис. 1.1б.

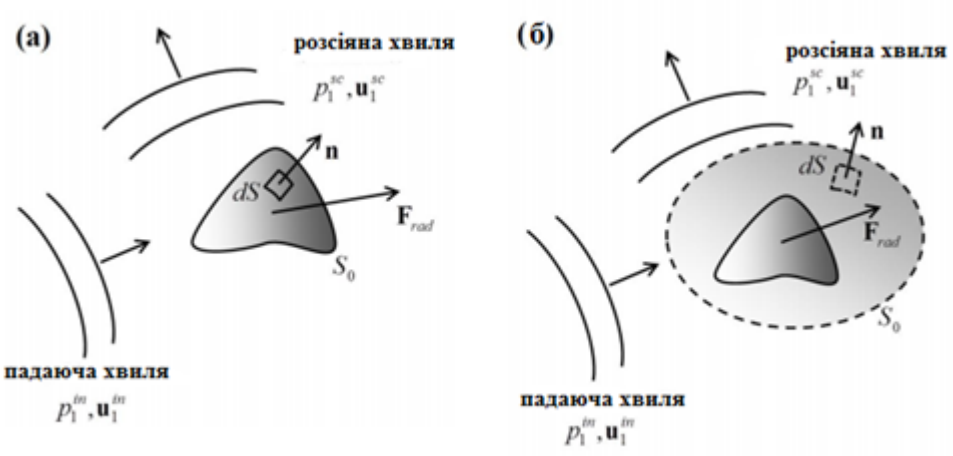


Рис. 1.1. Розрахунки сили акустичного випромінювання $\mathbf{F_{rad}}$, що діє на об'єкт в акустичному полі. У першому підході (а), тиск випромінювання інтегрується по поверхні об'єкта, в той час як в (б) інтегрування проводиться по замкнутій поверхні $\boldsymbol{S_0}$, що охоплює об'єкт.

1.1.4. Сила акустичного випромінювання на маленькій сфері в довільному акустичному полі.

В свою чергу корисний вираз для отримання сили акустичного випромінювання, що діє на маленьку сферу в довільному акустичному полі, було отримано Горьковим [18]. У своєму висновку Горьков припустив, що сфера радіуса R набагато менше довжини акустичної хвилі λ занурена в акустичне поле в ідеальній рідині. Сила випромінювання $\mathbf{F_{rad}}$, діюча на маленьку сферу виражається через потенціал акустичної сили випромінювання U, заданого як [18]:

$$U = 2\pi R^3 \left[\frac{f_1}{3\rho_0 C_0^2} \left\langle \left(p_1^{in}\right)^2 \right\rangle - \frac{f_2\,\rho_0}{2} \langle \mathbf{u}_1^{in} \cdot \mathbf{u}_1^{in} \rangle \right], \qquad (1.26)$$

де p_1^{in} та $\mathbf{u}_1^{in}$ відповідно падаючий акустичний тиск першого порядку та швидкість частинок в позиції сфери. Рівняння (1.26) є відомим виразом Горькова, яке широко використовується для отримання сили випромінювання, діючої на левітуючі частинки в повітрі, а також на мікрочастинки в рідинах. Коефіцієнти f_1, f_2 залежать від властивостей середовища та розраховуються через вирази:

$$f_1 = 1 - \frac{\rho_0 C_0^2}{\rho_\text{p} C_\text{p}^2}, \qquad (1.27)$$

$$f_2 = 2\left(\frac{\rho_\text{p} - \rho_0}{2\rho_\text{p} + \rho_0}\right) \qquad (1.28)$$

В (1.27) і (1.28), ρ_p – С щільність сфери, c_p– швидкість звуку в сфері, відповідно. У більшості експериментів по акустичної левітації в повітрі можна припустити, що щільність сфери щільність значно більше щільності повітря, що призводить до *f1 = f2 = 1*. З потенціалу U (також званого потенціалом

Горькова), сила акустичного випромінювання на маленькій сфері обчислюється через:

$$\mathbf{F_{rad}} = -\nabla U\,. \tag{1.29}$$

Основною перевагою використання виразу Горькова є те, що сила акустичного випромінювання повністю обчислюється шляхом розгляду тільки падаючих полів p_1^{in} та $\mathbf{u}_1^{in}$ на положення сфери.

1.1.5 Сила акустичного випромінювання на маленьку тверду сферу в полі плоскої стоячої хвилі.

Для отримання сили акустичного випромінювання на маленьку тверду сферу в полі плоскої стоячої хвилі необхідно застосувати вираз Горькова. В розділі 3.1, пристрій акустичної левітації складається з ультразвукового випромінювача і відбивача, між якими створюється акустичне поле стоячої хвилі. Завдяки дії сили акустичного випромінювання, невеликий об'єкт може левітувати навколо вузлів тиску стоячої хвилі.

Для розрахунку сили акустичного випромінювання знехтуємо плоским полем стоячої хвилі між випромінювачем і поверхнею, що відбиває (див. Рис. 1.2.). Це припущення дозволяє вивести простий аналітичний вираз для сили акустичного випромінювання, яка діє на левітуючий об'єкт.

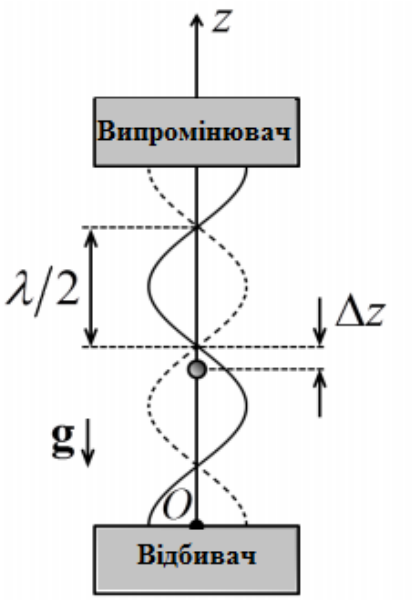


Рис. 1.2. Акустична левітація невеликої твердої сфери в вузлу тиску плоскої стоячої хвилі, встановленої між випромінювачем і відбивачем.

Щоб застосувати вираз Горькова для розрахунку сили акустичного випромінювання на сферичну частинку радіуса $R<<\lambda$, треба знайти акустичний тиск першого порядку і розподіл швидкості частинки між випромінювачем і відбивачем. Падаючий акустичний тиск першого порядку p_1^{in} в акустичній стоячій хвилі описується як:

$$p_1^{in} = p_0 \cos(\omega t)\cos(kz), \tag{1.30}$$

де ρ_0 - амплітуда акустичного тиску. Акустичний тиск в ρ_1 (1.30), є рішенням лінійного хвильового рівняння (1.13), з $k = \omega/c_0$. Підставляючи (1.30) в (1.6), швидкість частинки $\mathbf{u}_1^{in}$:

$$\mathbf{u}_1^{in} = \frac{p_0}{\rho_0 c_0}\sin(\omega t)\sin(kz)\,\hat{\mathbf{k}}, \tag{1.31}$$

Середні значення за часом можна взяти з полів першого порядку в p_1^{in} і $\mathbf{u}_1^{in}$, заданих (1.30) і (1.31) відповідно:

$$\left\langle \left(p_1^{in}\right)^2 \right\rangle = \frac{1}{T}\int_t^{t+T} {p_0}^2 cos^2(\omega t) cos^2(kz) dt = \frac{{p_0}^2}{2} cos^2(kz)\,, \qquad (1.32)$$

$$\left\langle \mathbf{u}_1^{in} \cdot \mathbf{u}_1^{in} \right\rangle \frac{1}{T}\int_t^{t+T} \left(\frac{p_0}{\rho_0 c_0}\right)^2 sin^2(\omega t) sin^2(kz) dt \frac{1}{2}\left(\frac{p_0}{\rho_0 c_0}\right)^2 sin^2(kz). \qquad (1.33)$$

Підставляючи (1.32) і (1.33) в (1.26), враховуючи *f1 = f2 = 1*, ми отримуємо потенціал сили акустичного випромінювання на сфері радіусом *R*, заданий як:

$$U = \frac{{p_0}^2 \pi R^3}{\rho_0 {c_0}^2}\left[\frac{cos^2(kz)}{3} - \frac{sin^2(kz)}{2}\right]. \qquad (1.34)$$

Отже, сила акустичного випромінювання на сферу дорівнює:

$$\mathbf{F_{rad}} = \frac{5\pi R^3 k {p_0}^2}{6\rho_0 {c_0}^2} \sin(2kz)\,\hat{\mathbf{k}}\,. \qquad (1.35)$$

Сила випромінювання, представлена в (1.35), аналогічна силі випромінювання, отриманої Кінгом в 1934 році [23]. Вирази (1.34) і (1.35) показують, що сила акустичного випромінювання, що діє на маленьку тверду сферу в акустичному полі стоячої хвилі, направлена в сторону вузлів тиску стоячої хвилі. На рис. 1.3 показано порівняння між падаючим акустичним тиском, швидкістю частки, потенціалом *U* і силою випромінювання $\mathbf{F_{rad}}$. При відсутній гравітації, сфера повинна левітувати там, де акустичний тиск нульовий, тобто на $z_n = (n\lambda/2 + \lambda/4)$ при *n* = 0, 1, 2, ... Але під впливом гравітаційного прискорення **g**, рівновага досягається, якщо об'єкт левіту трохи нижче вузла акустичного тиску, на відстані *z* від вузла (див. Рис. 1.2).

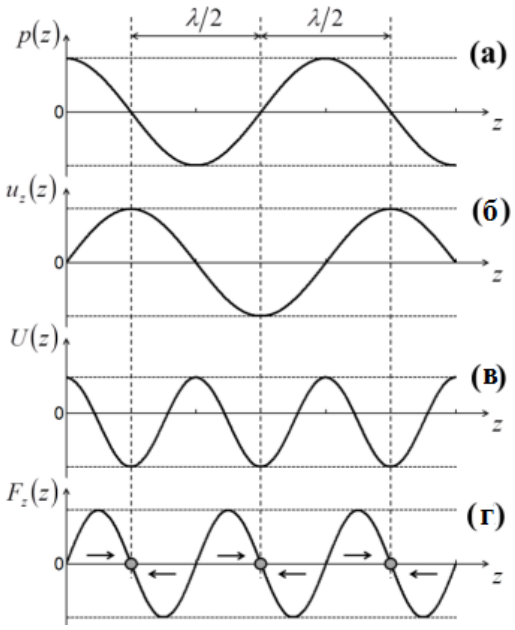


Рис. 1.3. Розподіл акустичного тиску і швидкості частинок в плоскій стоячій хвилі і її відповідного потенціалу та сили випромінювання на маленькій сфері [54]: (а) – акустичний тиск першого порядку; (б) – швидкість частинок в напрямку z; (в) – потенціал сили випромінювання; (г) – сила акустичного випромінювання, що діє на сферу.

У присутності сили тяжіння маленька сфера зазнає не тільки силу випромінювання але і гравітаційну силу $\mathbf{F_g}$, яка визначається наступним чином:

$$\mathbf{F_g} = -mg\hat{\mathbf{k}}\,, \tag{1.36}$$

де m - маса маленької сфери, g - прискорення сили тяжіння. Об'єднуючи (1.35) та (1.36), знайдемо мінімальну необхідну амплітуду акустичного тиску p_0^{min} для левітації сфери. Левітація можлива, коли максимальне значення $\mathbf{F_{rad}} > \mathbf{F_g}$. Тоді отримаємо вираз:

$$p_0^{min} = \sqrt{\frac{6\rho_0 {c_0}^2}{5\pi R^3 k}} = \sqrt{\frac{8\rho_0 \rho_p {c_0}^2 g}{5k}}\,, \tag{1.37}$$

який є мінімальною амплітудою акустичного тиску, необхідної для левітації сфери щільністю ρ_{p}. Важливо, що і гравітаційна сила, і сила випромінювання масштабуються з R^3, отже, мінімальний акустичний тиск незалежний від радіуса сфери (виключно за умови, що радіус сфери набагато менше довжини акустичної хвилі).

В області вузла тиску сила акустичного випромінювання пропорційна його зміщенню від вузла. В такому випадку сила акустичного випромінювання може бути апроксимована відновлювальної силою пружини [52]. Тоді, для малих зміщень від вузлів тиску сила випромінювання описується як:

$$\mathbf{F_{rad}} = -K(z - z_n)\hat{\mathbf{k}}\,, \tag{1.38}$$

де z – вертикальне положення сфери, z_n– положення n-го вузла тиску, а K – пружна постійна, що задається:

$$K = \frac{d^2U}{dz^2} = \frac{5\pi R^3 k^2 {p_0}^2}{3\rho_0 {c_0}^2}\,. \tag{1.39}$$

Цей висновок демонструє, що сила випромінювання, діюча на сферу в області навколо вузла тиску, можна розглядати як фіктивну пружину, де пружна постійна K пропорційна квадрату амплітуди акустичного тиску. Тому, на відміну від реальної пружини, де пружна постійна не може бути змінена, ми можемо керувати пружною постійної пружною константою нашої фіктивної акустичної пружини, просто змінюючи амплітуду тиску стоячій хвилі.

Схожість між силою випромінювання і відновлювальної силою пружини можна також можна використовувати для розрахунку відстані між становищем левітації сфери і положенням вузла тиску, позначене $\Delta z = z_n - z$ (див. Рис. 1.2.) Комбінуючи (1.36), (1.38) і (1.39), ми знаходимо:

$$\Delta z = \frac{mg}{K} = \frac{4\rho_0 \rho_p {c_0}^2 g}{5k^2 {p_0}^2}, \quad (1.40)$$

який дійсний для малих зміщень щодо вузла тиску.

Коли левітуючий об'єкт піддається збуренню з боку зовнішньої сили, він починає коливатися навколо вузла тиску. Не враховуючи загасання, цей рух може бути оброблений простим гармонійним осцилятором, в якому власна кутова частота коливань сфери розраховується за:

$$\Omega = \sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{\frac{5k^2 p_0^2}{4\rho_0 \rho_p {c_0}^2}}, \quad (1.41)$$

який демонструє, що частота коливань сфери пропорційна акустичній амплітуді тиску. У вигляді прикладу (див. Рис. 1.4.) зображений загасаючий коливальний рух поліпропіленової кулі діаметром 3 мм в одновісному акустичному левітаційному пристрої, утвореному 20,2 кГц ультразвуковим випромінювачем і увігнутим відбивачем [15]. При вимкненому джерелі звуку сфера була поміщена на відбивач, а високошвидкісна камера використовувалася для запису вертикального коливального руху сфери. Після включення випромінювача куля коливається з частотою 30,5 Гц в області вузла тиску. Згідно статті [15], частоту коливань сфери можна регулювати, змінюючи амплітуду тиску акустичної порожнини, а коливальну поведінку левітуючого об'єкта використовувати для визначення щільності різних матеріалів, рідини і твердих тіл.

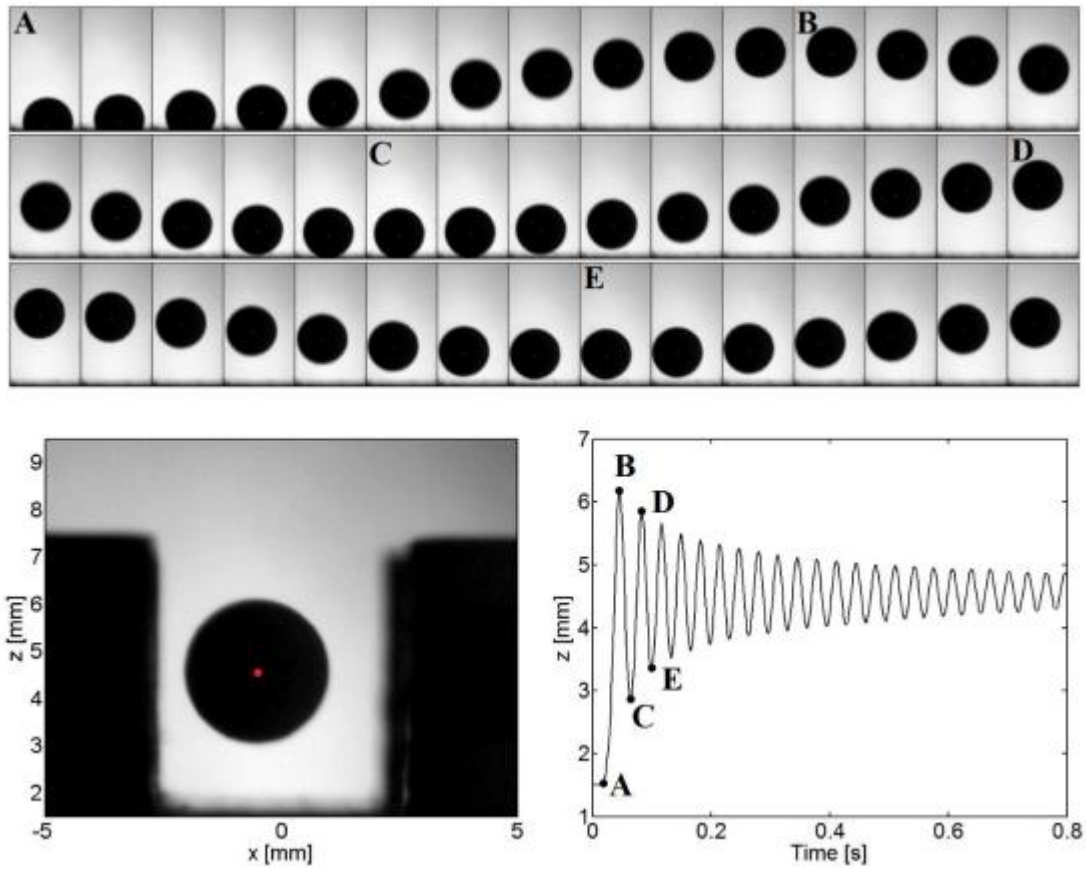


Рис. 1.4. Загасаючий коливальний рух поліпропіленової кулі діаметром 3 мм в одновісному акустичному левітаційному пристрої.[55]

1.1.6 Числове обчислення сили акустичного випромінювання.

1) Сила акустичного випромінювання на відбивач.

Левітуючий пристрій, який буде моделюватися, є резонансним, і, як наслідок, відстань H має бути відрегульовано до резонансного стану. Для плоскої стоячої хвилі резонанс відбувається, коли H кратна половині довжини хвилі. Але, як відзначають Ксі та Вей [16], допущення про плоску хвилю не зовсім справедливо для практичного левітатора, і резонанс настає, коли H трохи більше, ніж половина довжини хвилі.

Щоб визначити оптимальне значення H, сила акустичного випромінювання, що діє на відбивач, визначається як функція від H. Для розрахунку сили випромінювання використовується модель (див. Рис. 1.5а) для отримання акустичного тиску p_1 і швидкості частинок $\mathbf{u}_1$ в повітряній

області. Ці поля підставляються в (1.23), щоб знайти акустичний тиск випромінювання на відбивач. Ця процедура була прийнята Хонгом [17], які показали, що сила випромінювання на відбивачі значно збільшується в резонансних станах акустичного випромінювання.

Перший резонансний стан (див. Рис. 1.6.) виникає для H_1 = 7,5 мм. Резонанси високого порядку виникають при H_2 = 14,5 мм, H_3 = 21 мм і H_4 = 28,4 мм. Також при малих значеннях H досягається висока сила акустичного випромінювання на відбивачі. Область, розташована дуже близько до поверхні випромінювача, називається ближньої областю.

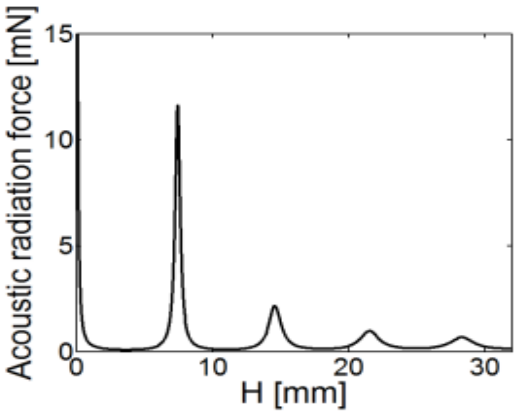


Рис. 1.5. Сила акустичного випромінювання на відбивач в залежності від *H*.

2) Сила звукового випромінювання на маленьку тверду сферу.

Після знаходження резонансів акустичної порожнини ми можемо застосувати модель (див. Рис. 1.6.) для отримання сили акустичного випромінювання, що діє на маленьку сферу в пристрої акустичної левітації.

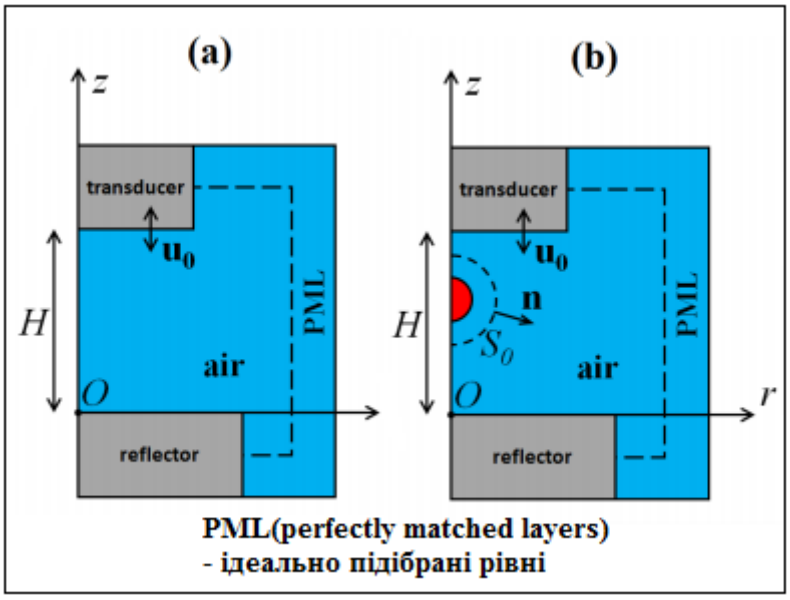


Рис. 1.6. (a) Модель, що базується на виразі Горькова. (b) Модель, що заснована на виразі (1.25).

Модель заснована на виразі Горькова, а потенціал сили випромінювання розраховується з полів акустичного тиску і швидкості. Отже, акустичне моделювання без присутності сфери виконується для отримання полів в p_1 і в $\mathbf{u}_1$. Ці поля підставляються в (1.26) для знаходження потенціала Горькова.

Для ілюстрації цієї числової процедури модель була використана для розрахунку падаючих полів в p_1 (див. Рис. 1.7. (a)) і в $\mathbf{u}_1$ (див. Рис. 1.7. (b)). Поля були отримані для третього резонансу (H_3 = 21,56 мм) акустичної порожнини і були підставлені в (1.26) для отримання потенціалу сили акустичного випромінювання, що діє на тверду (*f1 = f2 = 1*) сферу радіусом *R* = 1,55 мм. Потенціал показаний символами "+" – це місця мінімуму потенціалу (див. рис. 1.7. (c)). За відсутності гравітації маленькі сфери акустично затримуються в точках мінімального потенціалу сили випромінювання, а в земному середовищі левітуючі сфери трохи нижче точок пастки. У будь-якому випадку, положення пасток в гравітаційному полі можуть бути легко знайдені шляхом підсумовування потенціалу Горькова і гравітаційного потенціалу.

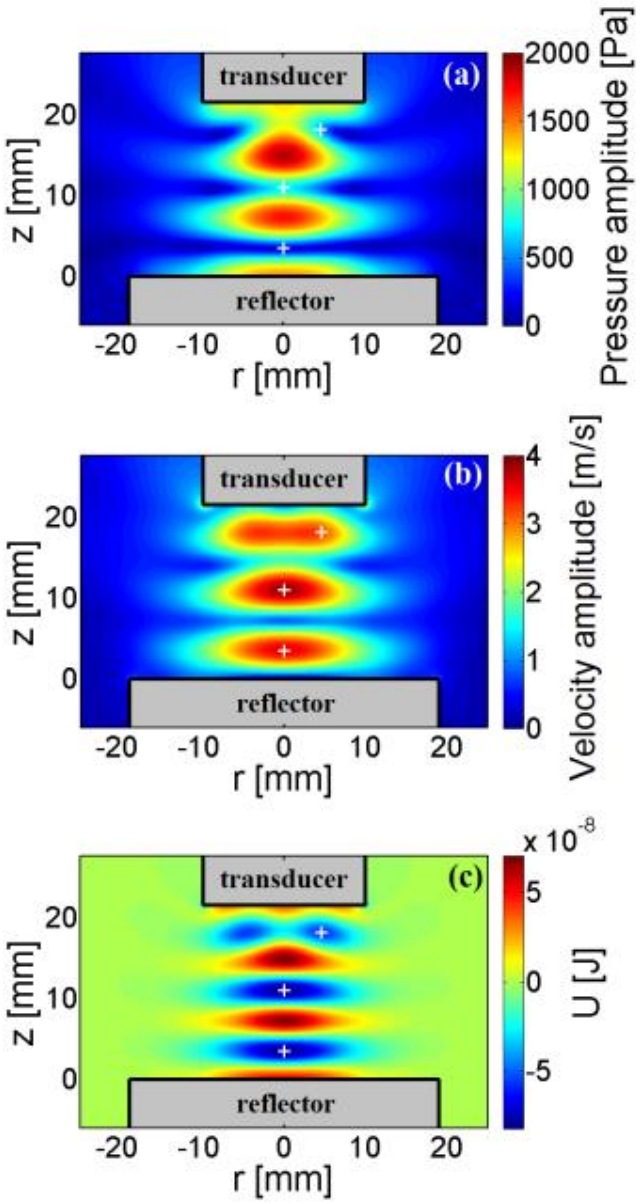


Рис. 1.7. Гармонійні коливання поверхні датчика з частотою 25,25 кГц і амплітудою швидкості 1 м / с: a – амплітуда тиску; b – амплітуда швидкості; c – потенціал сили акустичного випромінювання.

Виходячи з потенціалу сили випромінювання по осі z (див Рис. 1.8a.), вертикальна акустична сила випромінювання $\mathbf{F_z}$ визначається як:

$$\mathbf{F_z} = \frac{\partial U}{\partial z}\,. \tag{1.42}$$

Вертикальна сила акустичного випромінювання відносно осі *z*, спрямована на тверду сферу з R = 1,1 мм (див. Рис. 1.8. (a)), з радіусом R = 1,55 мм (див. Рис. 1.8. (b)). Можна помітити. що сила акустичного випромінювання дорівнює нулю в місцях мінімуму потенціалу Горькова. Також крива сили (див. Рис. 1.8. (b)) має негативний нахил в цих положеннях, а для малих зсувів щодо положення рівноваги, вона може бути апроксимована відновлювальної силою пружини.

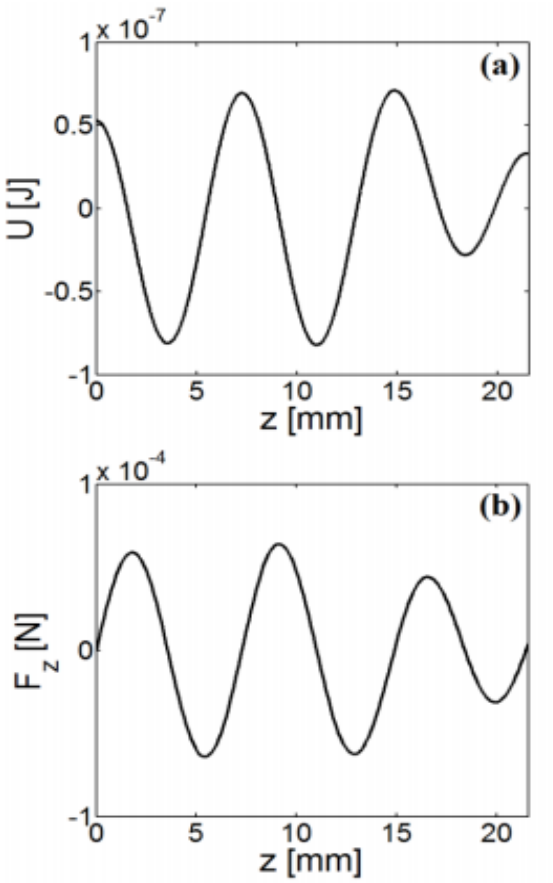


Рис. 1.8. Потенціал Горькова(a) і вертикальна сила акустичного випромінювання уздовж осі *z* (b).

Порівняння потенціалу Горькова і положення левітації маленьких сфер в одновісному акустичному левітаторі, утвореному ультразвуковим випромінювачем і плоским відбивачем (див. Рис. 1.9.). Рисунки 9 (a) і 9 (b) отримані для H_1 = 7,5 мм, а рисунки 9 (c) і 9 (d) для H_3 = 21 мм. Можна сказати,

що існує гарна схожість між мінімумом потенціалу Горькова і положеннями левітації, отриманими експериментально.

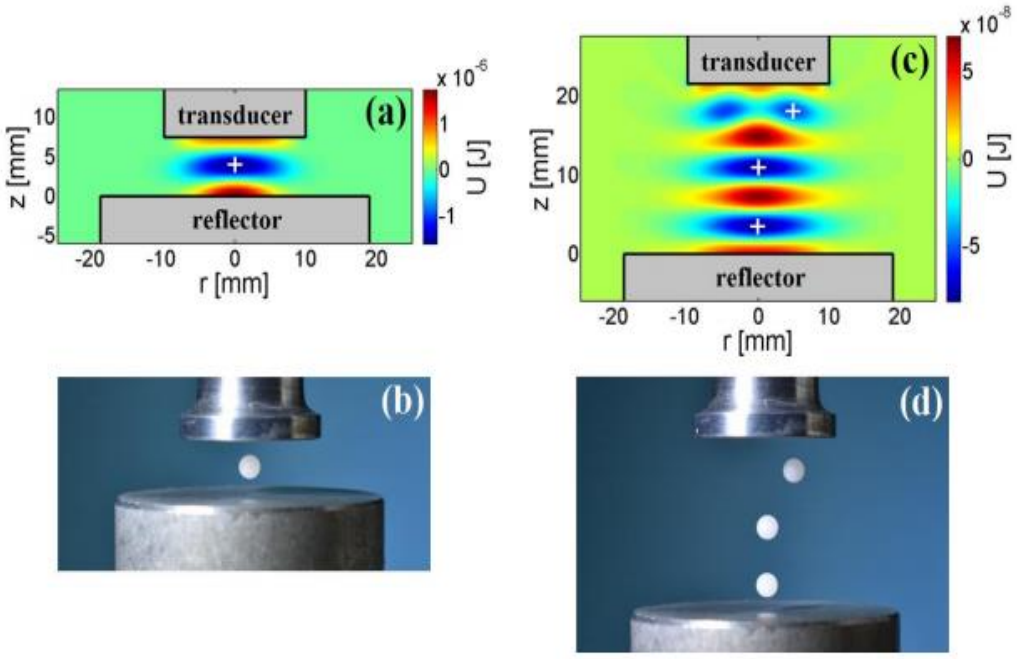


Рис. 1.9. Порівняння між потенціалом Горькова і положеннями левітації поліпропіленових сфер в одновісному акустичному левітаторі.

У розділі 1.1.5 був отриманий вираз для акустичної радіаційної сили, діючої на маленьку тверду сферу в полі плоскої стоячої хвилі, що було корисно для розрахунку вертикальної сили на сферу. Але для успішної левітації потрібно не тільки осьова сила, а й бічна відновлююча сила, щоб запобігти відрив об'єкта від землі в бічному напрямку. Оцінка ступеня стабільності потенційної свердловини є розрахунок її пружних констант у вертикальному і горизонтальному напрямках, які визначаються наступним чином:

$$K_z = \frac{d^2U}{dz^2}, \tag{1.43}$$

$$K_r = \frac{d^2U}{dr^2}, \tag{1.44}$$

де K_z - пружна постійна в вертикальному напрямку, а K_r - пружна постійна в радіальному напрямку.

3) Сила акустичного випромінювання на зразок будь-якої форми і розміру.

Сила акустичного випромінювання достовірна, коли радіус сфери набагато менше довжини акустичної хвилі. Для великих сфер сила акустичного випромінювання може бути визначена за допомогою (1.25).

Порівняння вертикальної сили, отриманої за допомогою моделей (R=0,45 мм, R=1,6 мм) показано на рис. 1.10. Для сфери радіусом R = 0,45 мм сили, розраховані обома моделями, дуже схожі. Однак, коли радіус сфери збільшується до R = 1,6 мм, сила випромінювання, що забезпечується моделлю, заснованої на вираженні Горькова, відрізняється від сили випромінювання заснованої на (1.25)

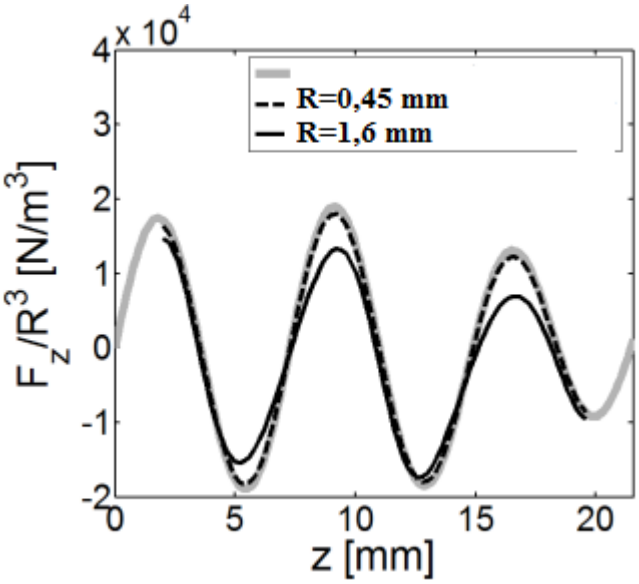


Рис. 1.10. Графік вертикальної акустичної сили випромінювання на тверду сферу.

1.2. Методи статичної акустичної левітації.

До недавнього часу акустична левітація поділялася тільки на два типи: акустична левітація об’єктів в ультразвуковій стоячій хвилі [18] і левітація в ближньому полі [19]. Однак, завдяки останнім досягненням в області

акустичної левітації, цю класифікацію розширено до п'яти типів (див. Рис. 1.11).

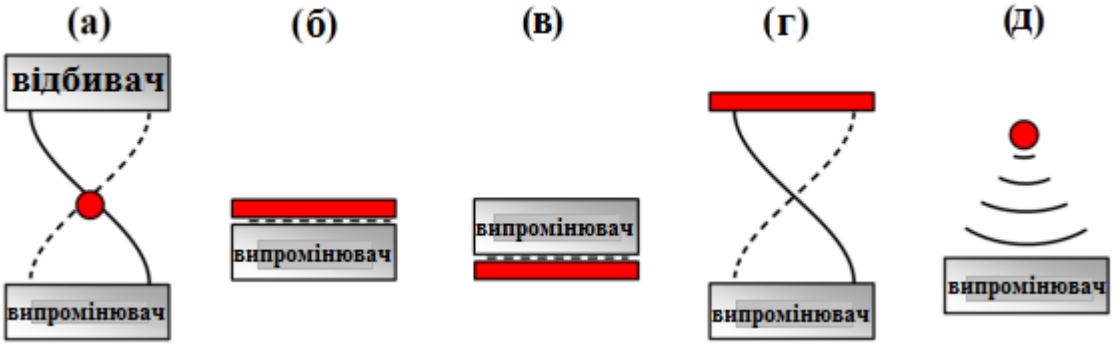


Рис. 1.11. Методи акустичної левітації: (а) Акустична левітація в стоячій хвилі; (б) Акустична левітація в ближньому полі; (в) Зворотня левітація ближнього поля; (г) Акустична левітація дальнього поля; (д) Однопроменева левітація.

Метод акустичної левітації в стоячій хвилі полягає в «підвішуванні» в вузлах тиску твердих об'єктів і крапель рідини розміром набагато менше довжини акустичної хвилі. Докладно описується в пункті 1.2.1 .

В пункті 1.2.2 буде розглянуто другий метод - це акустична левітація в ближньому полі (також звана левітацією стислій плівки). Великий плоский об'єкт левітує трохи вище вібруючої поверхнею випромінювача.

Третій метод аналогічний левітації в ближньому полі, але плоский об'єкт левітує нижче поверхні випромінювача. Через його схожості з левітацією ближнього поля, ми будемо називати цю методику Зворотною левітацією ближнього поля. Більш детально метод описаний в пункті 1.2.3 .

Акустична левітація великого об'єкта на відстані кратній половині довжини хвилі від поверхні випромінювача буде розглянута в пункті 1.2.4 . Між випромінювачем і об'єктом утворюється стояча хвиля, що не характерно для методу левітації в ближньому полі. Для розрізнення цього методу від

левітації ближнього поля, можна використовувати термін "левітація дальнього поля", прийнятий Хонгом і іншими [17].

Останній метод акустичної левітації буде розглянутий в пункті 1.2.5. . Цей метод за допомогою одного променю левітує частинки набагато менші, ніж довжина акустичної хвилі.

1.2.1 Акустична левітація в стоячій хвилі.

Першим, хто експериментально спостеріг а описав дрібних частинок у вузлах тиску стоячій хвилі був Август Кундт [20] в 1866 році. Експеримент, відомий сьогодні як експеримент з трубкою Кундта, де генерація акустичної стоячої хвилі відбувалося всередині горизонтальної прозорої трубки за допомогою резонуючого стержня на одному кінці. З протилежного боку був рухливий жорсткий поршень для регулювання довжини. При генерації акустичної стоячій хвилі в трубці, дрібні частинки пилу концентрувались у вузлах тиску. Однак, оскільки сконцентровані частинки залишалися в контакті зі стінками трубки, ми не можемо сказати, що це був перший експеримент з акустичною левітацією, але експеримент продемонстрував акустичного випромінювання на дрібні частинки під дією поля стоячої хвилі.

Перше використання сили акустичного випромінювання для левітації приписується Бюксу і Мюллеру [21] в 1933 році, коли вони повідомили підвішену краплю спирту в вузлах тиску стоячій хвилі, встановленої між вібруючих кварцовим стрижнем і відбивачем. З того часу було створено безліч акустичних левітаційних пристроїв, заснованих на цьому явищі.

Існує два основних типи левітаторів зі стоячою хвилею: одновісний (в основному складається з випромінювача і відбивача) та левітатор з резонансною камерою. Одновісні левітатори також можна розділити на резонансні і нерезонансні. У резонансному пристрої, резонанс плоскої стоячої хвилі виникає, коли відстань між випромінювачем і відбивачем кратна половині довжини хвилі. Резонансні одновісним левітатор були застосовані для левітації твердих матеріалів [22], крапель рідини [23], фармацевтичних

препаратів [24], мильних бульбашок [25], і навіть маленьких живих тварин [26]. Перевага використання резонансних левітаторів полягає в можливості досягнення високих амплітуд акустичного тиску, що дозволяє здійснювати акустичну левітації матеріалів високої щільності, наприклад, левітація дрібних живих тварин (див. Рис. 1.12) за допомогою експеримента з одновісним резонансним левітатором, проведеного Ксі і співавторами [26].

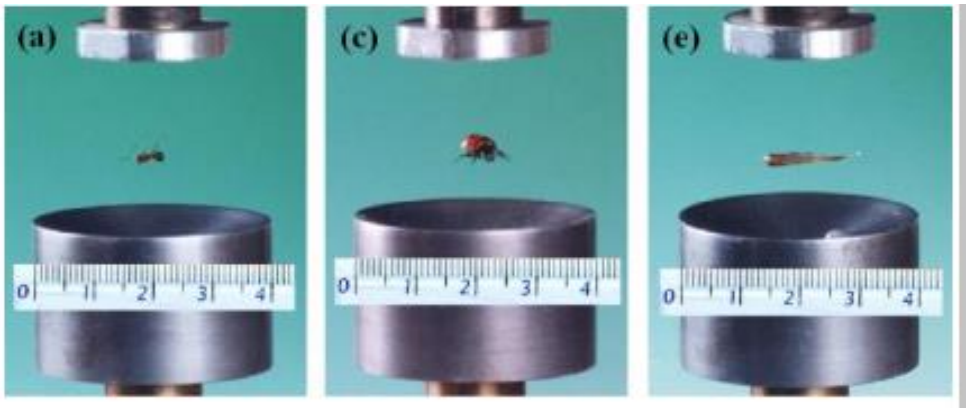


Рис. 1.12. Акустична левітація дрібних живих тварин за допомогою резонансного одновісного пристрою.

Нерезонансні одновісні левітатори можуть бути утворені одним випромінювачем і відбивачем або двома протилежними випромінювачами [27]. В цьому пристрої стояча хвиля формується суперпозицією двох зустрічних поширених хвиль, коли в резонансному стояча хвиля створюється суперпозицією відбитих хвиль між випромінювачем і відбивачем. Основною перевагою використання нерезонансних левітаторів полягає в тому, що відстань між випромінювачем і відбивачем (або відстань між випромінювачами) можна регулювати. Наприклад, у пристрої нижче (див. Рис. 1.13.) випромінювач зафіксовано, а відбивач можна нахиляти і переміщати вертикально і горизонтально. Хоча схема нерезонансного левітатора схожа на схему резонансного, випромінювач нерезонансного левітатора має малий діаметр по відношенню до довжини хвилі. Тому маємо два наслідки: 1) випромінювач поширює майже сферичну хвилю; 2) відображення високого

порядку зведені до мінімуму, так як енергія хвилі майже повністю розсіюється в навколишнє середовище після першого відображення на поверхні відбивача. Відповідно можна припустити, що стояча хвиля в основному формується суперпозицією випромінюваною і першою відбитою хвилями.



Рис. 1.13. Акустична левітація частинок полістиролу в нерезонансному одновісному левітаторі.

Нещодавно було представлено Марзо і співавторами [27] одновісний нерезонансний акустичний левітатор, який був складений з системи малих випромінювачів 40 кГц. Такий левітатор має низьку вартість і простий у виготовленні, оскільки механічні частини левітатора можуть бути виготовлені на 3D-принтері, а випромінювачі управляються електронною схемою, що складається з плати Arduino і драйвера H-Bridge. Автори очікують, що новий левітатор забезпечить більш демократичний доступ до акустичної левітації.

1.2.2 Акустична левітація в ближньому полі.

Левітація в ближньому полі (також називається левітацією стискуваної плівки) великий плоский об'єкт левітує трохи вище поверхні випромінювача, при цьому їх розділяє тонкий шар повітря .Максимальна вага левітуючих об'єктів може складати близько кількох міліграмів. Типовий одновісний левітатор генерує стоячу хвилю між випромінювачем і відбивачем, коли в методі ближнього поля сам об'єкт виступає як відбивач. Проаналізувавши силу акустичного випромінювання на рис. 1.6, можна помітити, що сила

акустичного випромінювання, діюча на відбивач, значно зростає, коли відбивач наближається до поверхні випромінювача. Тому, якщо замінити відбивач об'єктом, силу акустичного випромінювання можна використовувати для левітації плоского об'єкта над поверхнею випромінювача.

Зазвичай цей метод використовується для левітації плоских об'єктів над вібруючої поверхнею [28], але вона також може бути застосована для левітації неплоских об'єктів, таких як сфери [29], об'єкти циліндричної форми [30] та L-образні балки [31]. Також можна застосовувати для управління тертям між вібруючої поверхнею і кінчиками пальців людини [32]. Багато дослідників [33] вважають, що цей принцип може бути застосований до сенсорних екранах для створення враження дотику до різних видів поверхонь.

1.2.3 Зворотна акустична левітація в ближньому полі.

В методі акустичної левітації в ближньому полі, показаної (див. Рис. 1.11.(б)), перетворювач (випромінювач) створює відштовхувальну силу акустичного випромінювання на плоский об'єкт, це дозволяє левітувати трохи вище поверхні випромінювача. В деяких умовах сила відштовхування може змінюватися на притягальну. В такому випадку випромінююча поверхня джерела звуку спрямована вниз, а плоский об'єкт левітує нижче випромінюючої поверхні датчика (див. Рис. 1.1. (с)). Тонкий повітряний шар відокремлює предмет від випромінювача. Цьому методу не дано офіційну назву, тому будемо називати її зворотною акустичною левітацією в ближньому полі.

Експеримент Такасакі [34], з використанням випромінювача Ланжевена (21 кГц), де в якості левітуючого об’єкту виступає невеликий диск, продемонстрував зворотну левітацію (див. Рис. 1.14.) . Між перетворювачем і диском під ним є маленький повітряний зазор. Експериментальні результати показали, що відштовхувальна сила між перетворювачем і об'єктом виникає при великих діаметрах випромінювача і об’єкта щодо довжини акустичної хвилі. Коли випромінювач і об'єкт мають малі діаметри щодо довжини хвилі,

сила випромінювання притягує об’єкт. Тоді можна зробити висновок, що повинен існувати певний діаметр щодо довжини хвилі, при якому сила випромінювання змінюється на притягальну. Дуже важливо розуміти, що зворотна акустична левітація не стосується випромінювача, а стосується сили випромінювання, яка змінюється на притягальну, коли об’єкт досягає певної відстані від поверхні випромінювача.

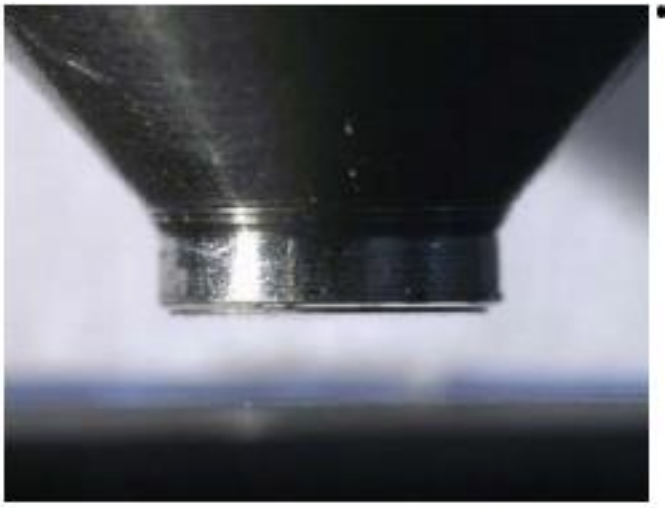


Рис. 1.14. Зворотна левітація диска, розташованого трохи під ультразвуковим випромінювачем.

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що на відміну від левітації в ближньому полі, де великі плоскі об'єкти парує вище поверхні випромінювача, в зворотній левітації невеликі плоскі об'єкти можуть левітувати нижче поверхні випромінювача.

1.2.4 Акустична левітація в дальньому полі.

Акустична левітація в дальньому полі (див. Рис. 1.11. (д)) може бути використана для підвішування об'єктів, розмір яких більше довжини акустичної хвилі. Цей метод заснований на створенні акустичної стоячої хвилі між поверхнею об'єкта і одним перетворювачем (або декількома). Коли відстань між джерелом звукової хвилі і об'єктом створює резонансний стан, сила акустичного випромінювання на об'єкт буде значно збільшуватися.

Згідно літературі, перший випадок, коли об'єкт, що перевищує довжину акустичної хвилі знаходився в стані левітації був у 1975 році при описі одновісного левітуючого пристрою Уаймарком [35]. Пристрій був складений з випромінювача 20 кГц і плоского відбивача. В одному з експериментів відбивач був замінений латунним диском, який почав левітувати на відстані кратній половині довжини хвилі від поверхні випромінювача.

Із нещодавніх експериментів можна привести в приклад левітацію людської фігури, зробленої з картонного паперу та прикріпленою до злегка вигнутого аркуша. Об'єкт був підвішений пристроєм, утвореним алюмінієвою вібруючою пластиною та двома випромінювачами Ланжевена з частотою 25 кГц, які були прикріплені до кінців алюмінієвої пластини. Такий пристрій генерував випромінювачами вигнуту стоячу хвилю уздовж пластини.

Між пластиною і об'єктом виникає акустична стояча хвиля в момент, коли вигнутий об'єкт поміщається на відстань кратний половині довжини хвилі від алюмінієвої пластини. Пристрій забезпечував силу акустичного випромінювання, що здатна підвішувати об'єкт в повітрі. Також було продемонстровано, що кривизна об'єкта відповідає за створення горизонтальної сили випромінювання, яка забезпечує горизонтальну стійкість об'єкта.

1.2.5 Однопроменева левітація.

В даному методі (див. Рис. 1.11.(д)) використовується два протилежних випромінювача або випромінювач і протилежний відбивач. Це означає, що частинка повинна бути зафіксована між ними.

Вперше однопроменева пастка була продемонстрована в рідкому середовищі з використанням сфокусованого випромінювача з частотою 30 МГц для захоплення ліпідної краплі в фокусі випромінювача. Але осьовий рух частинок був обмежений тонкою плівкою, бо пастка була досягнута тільки в поперечному напрямку. Згодом одночасно осьова і поперечна пастка була показана в експерименті Бареша для уловлювання полістиролів кульок у

водному середовищі [36], який використовував масив перетворювачів, що працює на частоті 1,15 МГц.

Мемолі [37] та інші проводили дослідження, використовуючи набір метаматеріальних цеглинок для формування акустичного поля. При дослідженні використовувалося 16 типів цегли, відповідних фазовим затримкам, виготовлених за допомогою 3D-принтера.

В одному з експериментів, вони розташували цеглинки матеріалу, щоб створити пляшковий промінь для левітації полістиролової кульки в повітрі (див. Рис. 1.15).

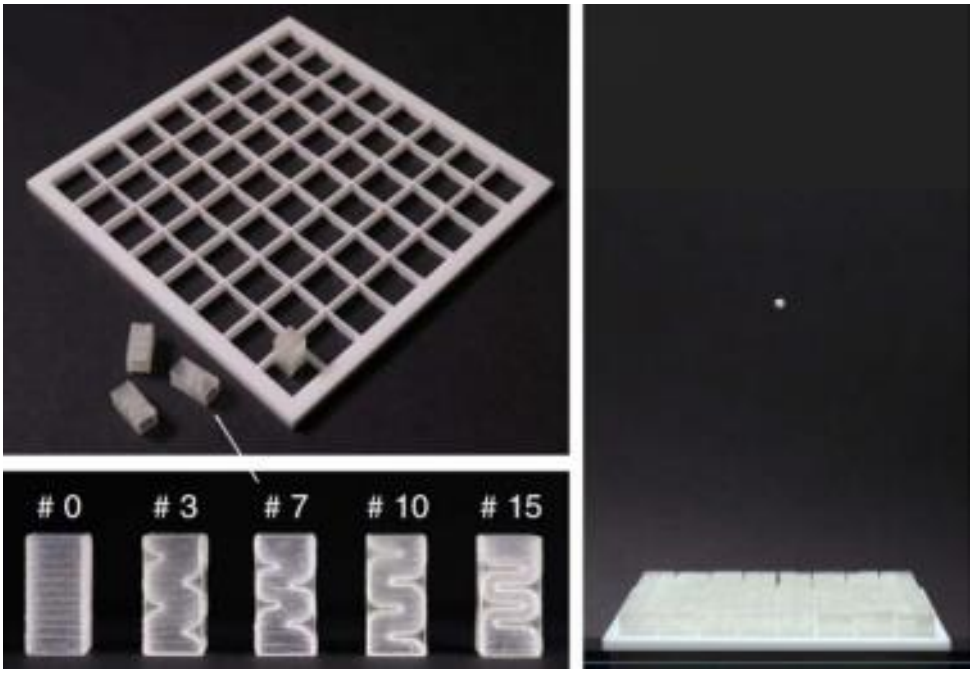


Рис. 1.15. Однопроменева акустична левітація з використанням безліччю метаматеріальних цеглинок перед масивом перетворювачів.

1.3. Акустичне маніпулювання і переміщення левітуючих об'єктів.

З початку перших експериментів, повідомлених в 1933 році [38], до початку цього століття, розвиток акустичної левітації був достатньо повільним. Методи акустичної левітації були обмежені статичними експериментами, в яких невеликі об'єкти і краплі рідини можна було

левітувати в певних положеннях в просторі. В перших пристроях левітації маніпулювання об'єктом досягалося шляхом переміщення всього вузла але такий спосіб незручний тим, що вимагає наявності рухомих частин. Хоча перші стратегії акустичної левітації об'єктів були представлені три десятиліття назад і вони мали обмежені можливості маніпулювання, тільки в останні роки було розроблено безліч акустичних левітаційних пристроїв, здатних маніпулювати об'єктами в 3D.

Даний підрозділ описує як можна розширити можливості методів левітації(стоячої хвилі, ближнього поля, однопроменевий метод), щоб забезпечити маніпулювання та переміщення об’єктів у повітрі.

1.3.1 Маніпуляція методом акустичної левітації в стоячій хвилі.

Перші роботи, пов'язані з акустичним маніпулюванням об'єктами, були пов'язані з можливістю безконтактної обробки [44] матеріалів в області мікро гравітації. У порівнянні із земним середовищем, акустичні маніпуляції в космічному кораблі потребують акустичні сили, які набагато менше гравітаційних сил. Тому не викликає подиву, що перші дослідження акустичної маніпуляції були проведені для маніпулювання об'єктами в умовах мікро гравітації.

У 1975 році Флетчером та іншими [38] було описано акустичний метод безконтактного управління об'єктами в резонансній прямокутній камері. Акустична стояча хвиля генерується трьома ортогональними випромінювачами. Камера має одну рухливу стінку, а вузол тиску знаходиться в центрі камери (див. Рис. 1.16.).

Оскільки сила акустичного випромінювання утримує об'єкт у вузлу тиску, безконтактне управління може бути досягнуто шляхом зсуву рухомої стінки в той же час, змінюючи частоту протилежної динаміка таким чином, щоб зберігався резонанс акустичної системи. Таким чином, переміщаючи стінки на конкретну відстань, об'єкт переміщається на половину відстані рухомої стіни.

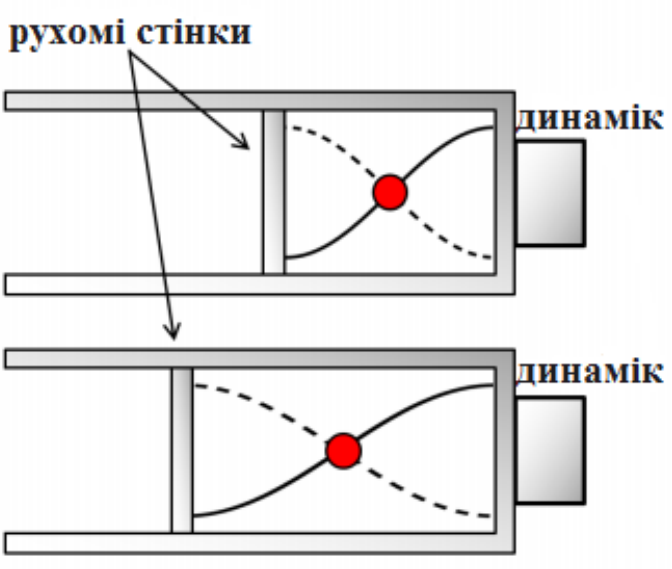


Рис. 1.16. Безконтактна маніпуляція в горизонтальному виконанні завдяки переміщенню підвісної стінки і управління частотою протилежного динаміка.

Іншим методом маніпулювання левітуючим об'єктом всередині прямокутної камери є метод переключення режимів (частот), який був представлений Трінхом та іншими [39] у 1986 році. Цей метод не вимагає переміщення частинок, маніпуляція здійснюється за рахунок переключень між різними модами акустичної порожнини (див. Рис 1.17.). Підхід був запропонований з метою маніпулювання речовинами з низькотемпературної зони в області високих температур в прямокутній камері (в умовах мікро гравітації).

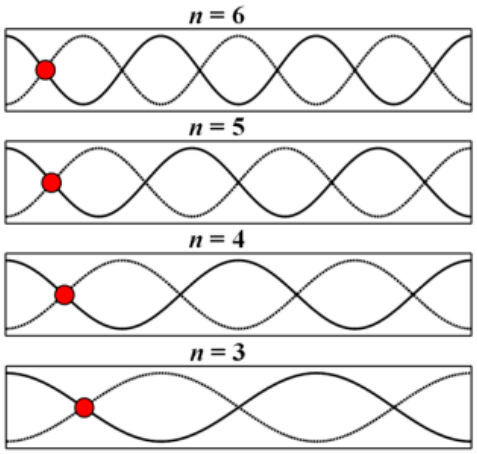


Рис. 1.17. Акустичне маніпулювання методом переключення режимів.

Важливий шаг в акустичній маніпуляції був укладений Очія, Хоші та Рекімото [40], які розробили акустичну левітаційну систему маніпулювання об'єктами в трьох вимірах. Система (див. Рис. 1.18.(а)) складається з 4 масивів-перетворювачів. Масиви випромінювачів розташовані на площі 170 x 170 мм2 квадратної області. Випромінювачі працюють з частотою 40 кГц, а виготовлена на замовлення електронна схема дозволяє контролювати фазову затримку кожного масива випромінювачів.

Збудження кожного випромінювача регулюється таким чином, щоб випромінюючі хвилі поступали в фазі в конкретну та необхідну фокальну точку. У фокальних точках існує ряд вузлових передач, які можуть бути використані для левітації невеликих об'єктів (див. Рис. 1.18.(б)).

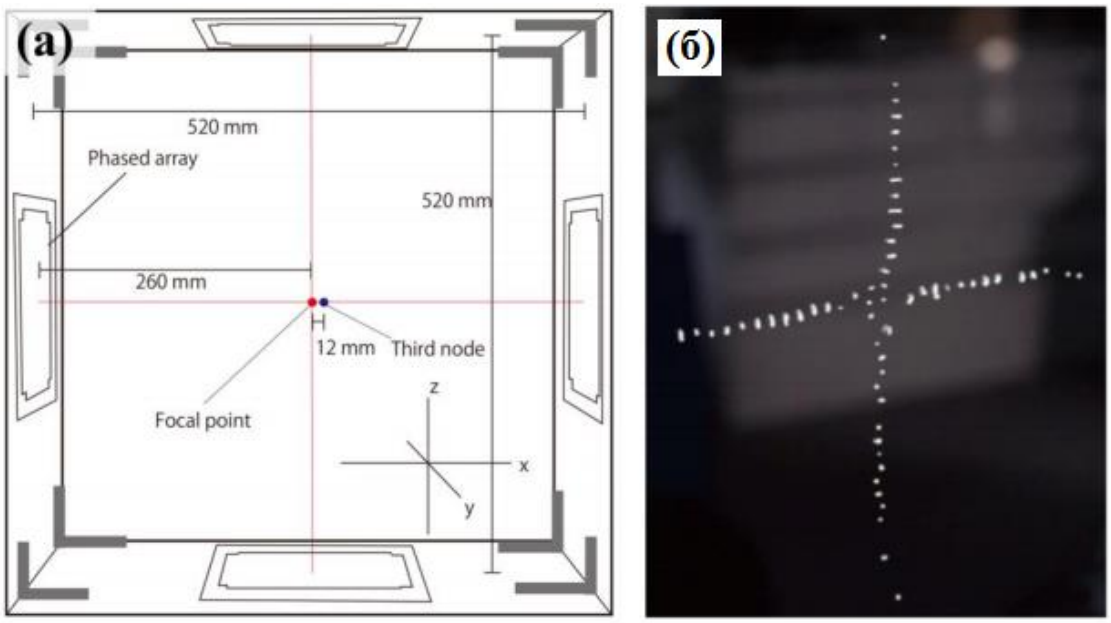


Рис. 1.18. Акустична маніпуляційна система [40]: (а) Ілюстрація системи 4 масивами ультразвукових перетворювачів із частотою 40 кГц; (б) Підвішені частинки.

1.3.2 Транспортування об'єктів методом акустичної левітації ближнього поля.

Методика акустичної левітації у ближньому поле може бути застосована не тільки для підвішування плоских об'єктів над поверхнею виведення, але і для переміщення важких плоских об'єктів трохи вище вібруючої пластини [41]. Хашімото та інші [41] розробили акустичну левітаційну транспортну систему ближнього поля (див. Рис. 1.19).

Система складається з двох випромінювачів із частотою 19,52 кГц, підкріплених до металевої пластини. Один випромінювач генерує бігучу хвилю вздовж пластини, а протилежний випромінювач приймає її. Система переміщення в найближчому поле була використана для контролю та транспортування бакелітової пластини (довжиною 9 см, шириною 6,5 см і вагою 8,64 г) із швидкістю 0,75 м / с.

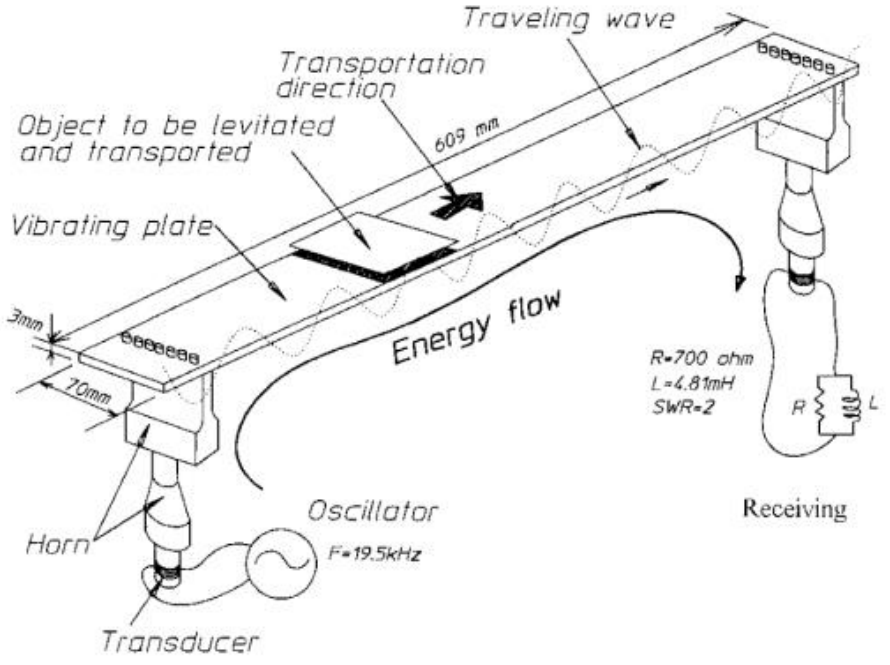


Рис. 1.19. Система акустичної левітації ближнього поля для транспортування об’єктів, розроблена Хашімото та ін. [41].

1.3.3 Маніпуляція з використанням методу однопроменевої акустичної левітації.

Однопроменева акустична левітація також може бути використана для маніпулювання левітуючими об'єктами. Марзо і інші [42] описали та продемонстрували метод акустичної левітації та маніпулювання невеликих об'єктів за допомогою однопроменевого випромінювання в повітрі (див. Рис. 1.20.). Маніпуляція досягалася шляхом зміни фазових затримок кожного окремого випромінювача одностороннього масиву випромінювачів.

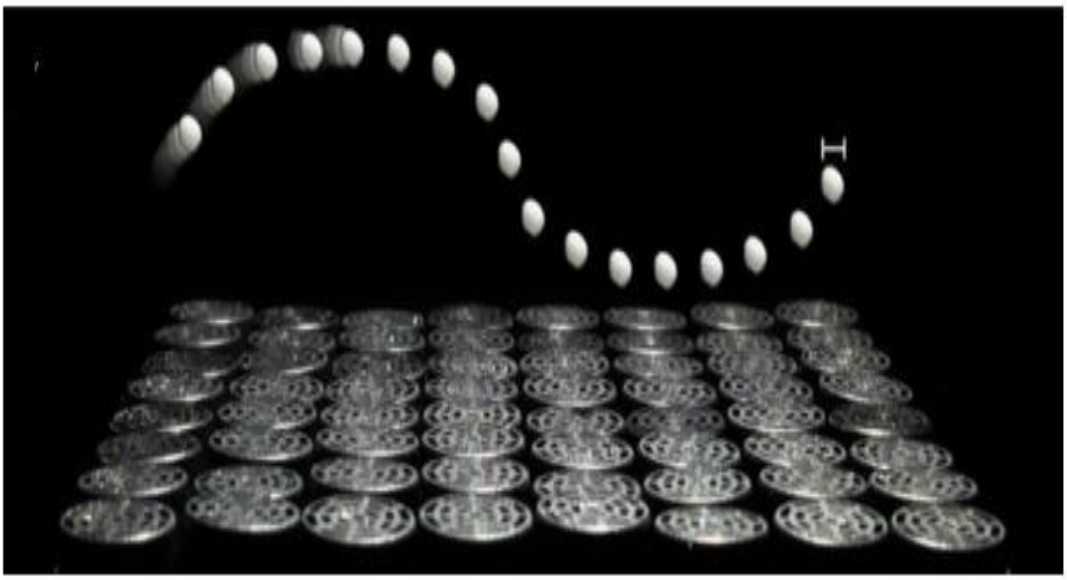


Рис. 1.20. Однопроменева акустична маніпуляція левітація невеликих об'єктів.

РОЗДІЛ 2. Постановка експерименту.

2.1. План експерименту.

План проведення дослідження явища акустичної левітації та властивостей стоячої хвилі складається з наступних розділів:

1. Розробка і збірка експериментальної установки, яка буде детально розглянута в пункті 2.1.2.
2. Дослідження акустичної левітації поліетиленового шматку в полі стоячої хвилі за допомогою розробленої установки.
3. Теоретична оцінка результатів експериментальних досліджень.

2.1.2 Розробка експериментальної установки.

Для демонстрації і дослідження явища акустичної левітації ми зібрали і використовували просту установку №1 (див. Рис. 2.1.) з мінімальним складом деталей:

1. Мікроконтролер Arduino Uno ATME-GA328P (позначений буквою А);
2. драйвер L298N (позначений буквою Б);
3. Два ультразвукових випромінювачів (позначені під буквою В);
4. блок живлення на 12 В (позначений буквою Г);

Ультразвуковий левітатор с такою не складною схемою не буде піднімати важкі предмети, але продемонструє, як маленький поліетиленовий шматок буде підвішений в утвореній стоячій хвилі.

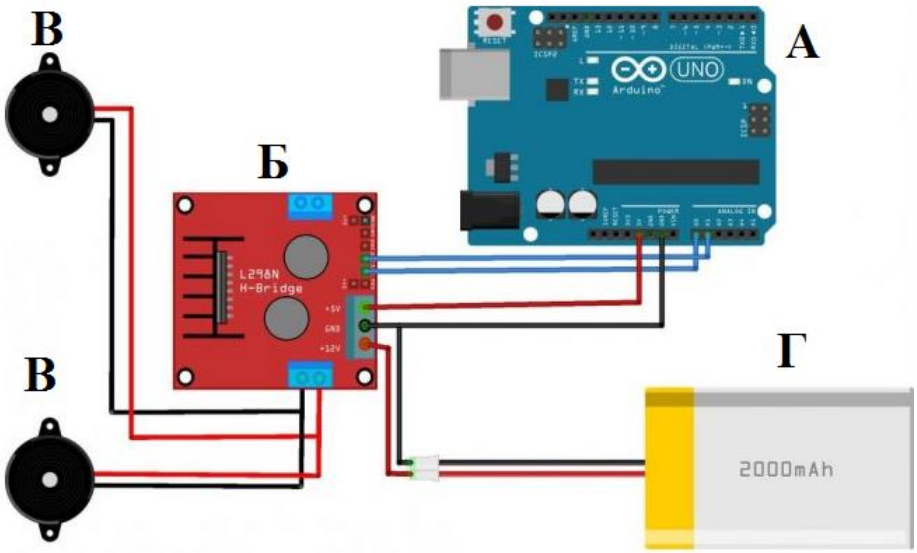


Рис. 2.1. Електронна схема установки №1.

Під час роботи ультразвукові випромінювачі створюють дві однакові за амплітудою і частотою хвилі (але протилежні по напрямку). В результаті інтерференції цих хвиль утворюються стояча звукова хвиля з нерухомими точками вузлами, в яких тиск хвилі завжди дорівнює атмосферному. Застосовуваний мікроконтролер Arduino Uno для реалізації роботи звуко генераторів (випромінювачів) представлений на рис. 2.3.

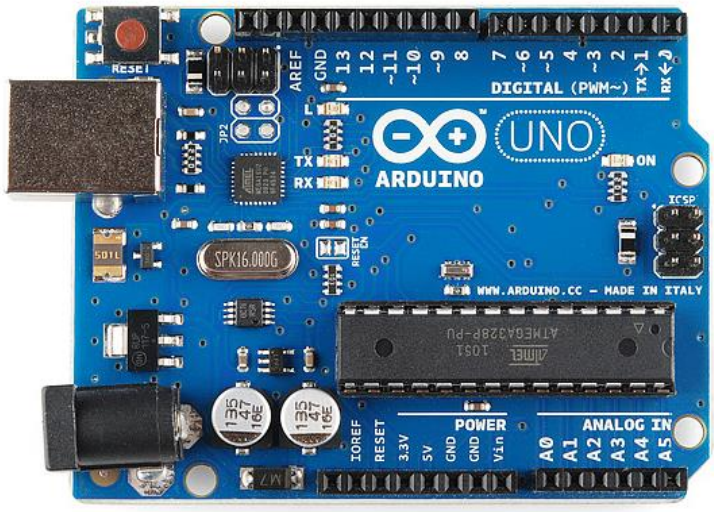


Рис. 2.3. Мікроконтролер Arduino Uno.

Цей мікроконтролер використовується для генерування частоти, необхідної для отримання ультразвукових хвиль через випромінювачі. Порти Arduino за вибором програмуються для вирішення конкретних завдань, таких як передача бітових сигналів по дротах, підключеним до H-мосту (L298N).

Порти керуються в коді таким чином, щоб прямий зв'язок міг встановити більш високу ефективність і швидкість передачі сигналів для мікроконтролера. Кожен мікроконтролер на платі Arduino містить різні набори регістрів портів, якими можна маніпулювати, деактивувавши їх в коді. Це також дозволяє використовувати мінімальну кількість пам'яті для роботи мікросхеми. Порти наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Портове маніпулювання мікросхемою Arduino ATME-GA328P

Порти	Виводи
D	Цифрові (від 0 до 7)
B	цифрові (від 7 до 13)
C	аналогові (від 0 до 7)

Нижче наведено використаний код на Arduino.

Технічні характеристики [152]:

- модель ATmega328;
- робоча напруга 5В;
- Напруга живлення 7-12В;
- Цифрових входів / виходів 14 (з них 6 в якості ШИМ-виходів), аналогових входів 6;
- Тактова частота 16 МГц;

Скетч-код на Arduino:

```
byte TP = 0b10101010;  // Кожен інший порт отримує інвертований сигнал
void setup()  {
  DDRC = 0b11111111;  // Встановіть усі аналогові порти на вихід
// Ініціалізувати Timer1
noInterrupts();  // Вимкнути переривання
TCCR1A = 0;
TCCR1B = 0;
TCNT1 = 0;
OCR1A = 200;  // Встановити регістр порівняння (16 МГц / 200 = 80 кГц квадратна хвиля -> 40 кГц повна хвиля)
TCCR1B |= (1 << WGM12);  // Режим CTC
TCCR1B |= (1 << CS10);  // Встановіть для попереднього масштабування значення 1 ==> відсутність попереднього масштабування
TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);  // Увімкнути переривання таймера порівняння
interrupts();  // Увімкнути переривання
}
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
  PORTC = TP; // Надішліть значення TP на виходи
TP = ~TP; // Інвертувати TP для наступного запуску
}
void loop()
{
// Ніякого циклу, більшу частину робить H-Bridge
постійними джерелами живлення та сигналу.
}
```

В установці використовувався Н-міст (L289N) , який представлений на рис. 2.4. Цей драйвер двигуна необхідний для управління і подачі сигналу на випромінювачі. Він також налаштовує частоту на необхідний діапазон і встановлює постійний ланцюг зворотного зв'язку для випромінювання звукових хвиль.

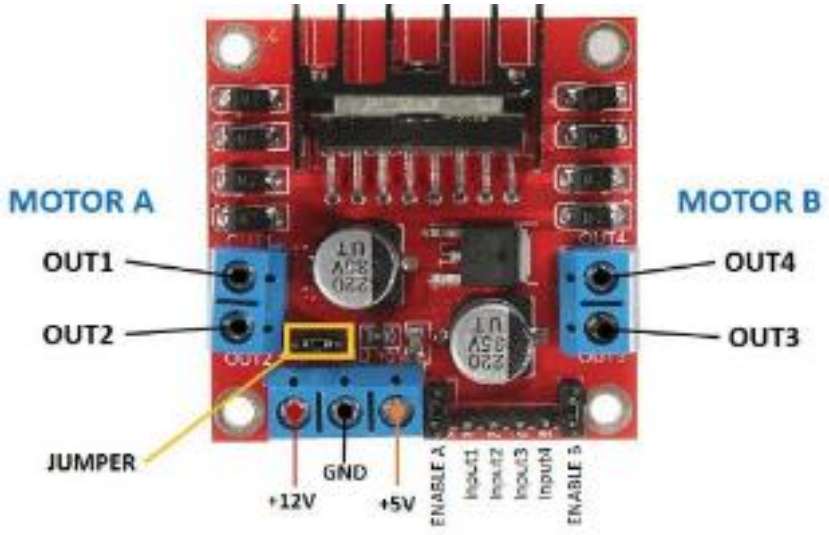


Рис. 2.4. Н-міст (L289N) в якості підсилювача сигналу.

Контактні входи підключені до аналогових виходів Arduino, які встановлюють частоту сигналу в драйвері, який посилюється харчуванням +12 В від джерела постійного струму (адаптера) і зовнішнім +5 від порту Arduino. Ми використовуючи вихідні контакти, подаємо похідні сигнали певних частот на перетворювачі (тут OUT-12).

Технічні характеристики [151]:

- Напруга живлення 5 В;
- Робочий струм драйвера 2 А;
- Розміри модуля: 43.5 х 43.2 х 29.4 мм;

Частота сигналу змінного струму, що надходить на перетворювачі від Н-моста, трансформується в ультразвукові звукові хвилі, які створюють вібрації, поширювані в середовищі (повітрі), при робочій напрузі 5 В.

Використані випромінювачі ми випаяли з ультразвукового датчика відстані HC-SR04. Система випромінювачів зображена на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Два ультразвукових випромінювача.

Коли випромінюючі хвилі зустрічають перешкоду (див. Рис. 2.6.) , вони відбиваються від неї і повертаються до приймача, який зазвичай може розрахувати відстань. У цьому полягає основна ідея цих сенсорних модулів, що використовують перетворювачі.

Технічні характеристики:

- Напруга живлення: +5 В;
- Робоча сила струму: 15 мА;

У цьому експерименті ми подаємо близько 6 У напруги на кожен перетворювач, щоб вони виробляли частоту з амплітудою, що перевищує амплітуду вихідної частоти змінного струму, що посилається аналоговими контактами Arduino.

2.2 Схема проведення експерименту.

1. Випаюємо з сенсора відстані випромінювачі. За допомогою пару проводів проводимо однакову пайку на обох випромінювачах (зліва буде плюс, ліворуч мінус);
2. В якості генератора частоти беремо Arduino. Знаходимо скетч-код цього генератора. Ділимо робочу частоту на регістр порівняння 16МГц : 200 = 80 кГц;
3. Після завантаження коду для генерування сигналу з встановленої частотою в мікросхему Arduino (ATMEGA328P) ми повинні з'єднати всі роз'єми, як показано на блок-схемі (див. рис. 2.6.)
4. Щоб посилити сигнал використаємо H-міст L298N до 12 В. На одному із його виходів підключимо обидві головки випромінювачів. А на Arduino задіємо виходи A0 і A1 та підключимо до підсилювача на ту ж сторону, де і випромінювачі;
5. Центральний пін на підсилювачі(мінус) треба заземлити з Arduino (також мінус);
6. Подаємо живлення на Arduino і на підсилювач.
7. Спостерігаємо ефект акустичної левітації (див. Рис. 2.8).

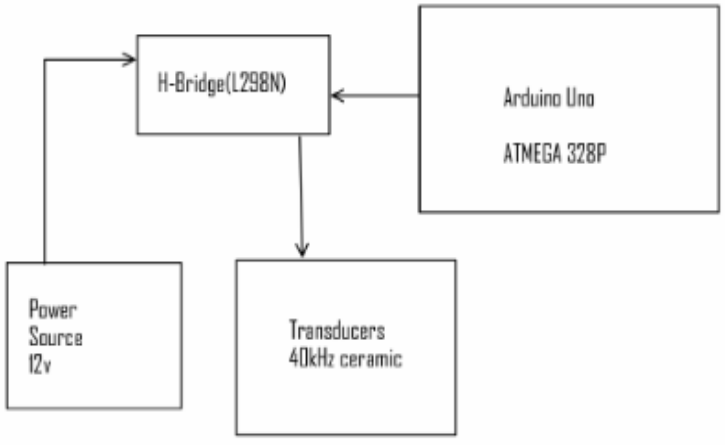


Рис. 2.6. Блок-схема.

Включимо джерело живлення 12 В постійного струму, і тоді ми побачимо, як Н-міст буде світитися яскравіше при 5 В від Arduino і 12 В від джерела постійного струму. Це забезпечить близько 6 В. У харчування для кожного ультразвукового перетворювача, який повинен тепер працювати на частоті, заданої в коді.

Частоту можна дізнатися за допомогою осцилографа. Це дозволить нам підрахувати і перевірити, генерується чи частота в потрібній кількості від кожного з перетворювачів. І якщо вони працюють, ми не зможемо почути звук, що видається цими перетворювачами, тому що частота вище 20 кГц, що вище чутної людиною частоти. Але ми можете почути деякий шум чи вібрації від самих випромінювачів.

Тепер, обидва перетворювача виробляють хвилі звукового тиску приблизно однаковою частоти, вони утворюють стоячі хвилі, як це пояснюється в теорії, і ми повинні бути в змозі левітувати об'єкт низької щільності в одній з вузлових або вихрових точок між випромінювачами.

Щоб створити стоячу хвилю необхідно розташувати випромінювачі один проти одного на певній відстані.

2.3. Результат експерименту.

На рис. 2.7. продемонстровано зібрану та робочу установку для дослідження акустичної левітації поліетиленового шматку в умовах стоячої хвилі.

Ми врахували навколишні середовища та показники установки. Температура повітря в кімнаті становила 20 градусів по Цельсію; Вологість повітря складала 50%; Випромінювачі поширювали хвилі з частотою 40 кГц;

При таких умовах швидкість поширення звуку повинна бути 343 м/с, тоді довжина нашої хвилі повинна бути 343000мм/40000Гц = 8,5 мм.

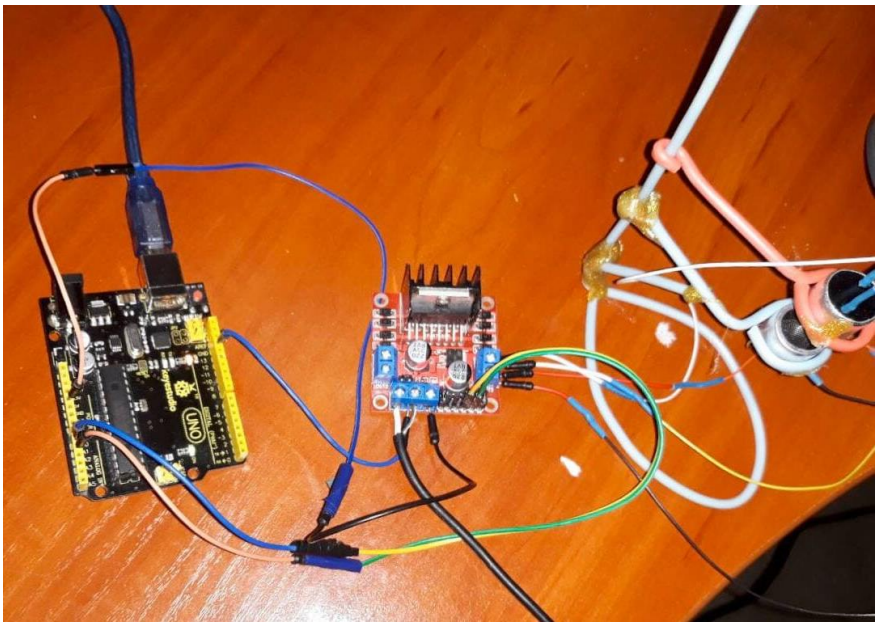


Рис. 2.7. Робоча установка для дослідження акустичної левітації.

Для спостереження акустичної левітації ми помістили шматок поліетилену між звуковими випромінювачами. Звукові генератори розташовувалися один над одним на відстані, кратному половині довжини хвилі.

Швидкість звуку при нормальних умовах ≈ 340 м / с, а частота звукових генераторів = 40 кГц. Таким чином, в нашому випадку l = 8,5 мм. В ході експериментів отримали такі результати:

1) Поліетиленовий шматок левітує, тобто знаходяться в повітрі між генераторами звуку (див. Рис. 2.8.).
2) Коли кілька шматків пінополістиролу підвішені між звуко генераторами, між сусідніми з них приблизно однакова відстань, що приблизно дорівнює розрахунковій довжині на півхвилі. Це узгоджується з проведеними теоретичними розрахунками.
3) Частота виконавців приблизно 21,46 КГц та інші колекції в діапазоні (1900-2000) КГц відповідно. Це пов'язано з коливаннями, викликаними напрямками харчування.

4) Приблизне розставлення між двома реформаторами для освіти стоячих хвиль складає (1,7 ± 0,2) см Визначено ручним способом, що описується на значенні отриманої формули
5) Існує кілька сингулярних точок вихри, які заставляють об'єкти повертати вдосконалення напрямків вовни, а інші є загальними точками, не визиваючи ніяких вражень за причиною, вказаною в теоріях.



Рис. 2.8. Левітуючий шматок поліетилену в розробленій установці.

РОЗДІЛ 3. Результати експерименту і теоретичний аналіз.

3.1.Вимірювання тиску в звуковій хвилі.

Для дослідження акустичної левітації ми поміщали один шматочок пінопласту між включеними звуко генераторами. Звуко генератори фіксували один над одним на дистанції кратному половині довжини хвилі, цю відстань розраховували за формулою:

$$l = n \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{v}{f} \, (n \text{ - ціле число})$$

Швидкість звуку ≈ 340 м / с, частота звуко генераторів = 40 кГц. Таким чином, в нашому випадку

$$l = 8{,}5 \cdot \frac{n}{2}$$

В ході дослідження були зафіксовані наступні висновки:

1. Тіло дійсно левітує, тобто знаходяться в повітрі в стійкому положенні між двома динаміками.
2. Коли між генераторами підвішені 2-3 шматочки пінопласту, між сусідніми приблизно однакова дистанція, яка приблизно дорівнює обчисленої половині довжини хвилі. Це цілком узгоджується з проведеною теоретичною інформацією.

Вимірювання тиску в звуковій хвилі. Для цього оцінимо масу левітуючих шматків. Середній діаметр шматочків пінопласту, використаних в експерименті $d = 1{,}5$ мм. Щільність пінопласту ρ складає $\rho = 16{,}3 \ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Таким чином, приблизна маса одного шматочка пінопласту дорівнює:

$$\text{m} = \rho \text{V} = \rho \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3 = \ 0{,}00029 \text{ г.}$$

Тоді мінімальний тиск, для фіксації такої кульки в повітрі вимірюється: $\mathrm{pmin} = \mathrm{m} \cdot \mathrm{g} = 0{,}0029$ Па. На основі цього, ми можемо зробити висновок, про те, що мінімальний тиск звуку в нашій установці не менше обчисленого p_{min}.

3.2. Залежність тиску акустичного випромінювання від затухання хвилі.

Послаблення левітації внаслідок звукопоглинання (тобто перетворення звукової енергії в теплову) полягає в тому, що на помірних частотах поглинання звуку в повітрі або воді є дуже низьким.

У цьому експерименті ми вивчали здатність поліетиленового шматку левітувати в стоячій звуковій хвилі залежно від відстані між випромінювачами звуку. Для цього ми повісили шматок в звукову хвилю, а потім повільно збільшували відстань між випромінювачами, що в якийсь момент призвело до того, що шматок перестав левітувати і впав вниз.

В іншій частині цього експерименту ми спочатку зафіксували відстань між джерелами звукових хвиль, а потім повісили шматок у вузли звукової хвилі.

Протягом експерименту були записані наступні результати:

1. Якщо відстань між випромінювачами досить мала (приблизно 3,5 см), тоді кулька левітує майже в будь-якому вузлу стоячої акустичної хвилі. Якщо відстань велика (близько 5-7 см), куля може левітувати в нижніх вузлах звукової хвилі.

2. Якщо відстань між випромінювачами звуку занадто велика (приблизно 11 см), куля взагалі не левітує.

Результати підтвердили той факт, що звукова хвиля насправді піддається процесу затухання.

Висновки

В рамках кваліфікаційної було повноцінно розглянуто теорію про те, як керуючі рівняння динаміки рідини можуть об’єднуватись для отримання лінійного хвильового рівняння і акустичного тиску випромінювання. Щоб отримати силу акустичного випромінювання, що діє на цей об'єкт, необхідно тиск випромінювання про інтегрувати по поверхні об'єкта.

Конкретний випадок, коли об'єкт набагато менше довжини акустичної хвилі, тоді акустична сила випромінювання розраховується за допомогою виразу Горькова (що значно спрощує завдання знаходження сили акустичного випромінювання). Також в цьому розділі було представлено простий вираз для сили акустичного випромінювання на маленьку тверду сферу в полі стоячої хвилі. Лінійне акустичне моделювання може бути використано для отримання сили акустичного випромінювання, що діє на об'єкти різних форм і розмірів.

Зокрема, представлений перелік і опис методів акустичної левітації, які дозволяють підвішувати об'єкти в повітрі. Історично акустичну левітацію можна класифікувати на левітацію в стоячій хвилі і левітацію в ближньому полі. Однак, останні досягнення в області акустичної левітації дозволяють розширити класифікацію до п'яти типів: стояча хвиля, ближнє поле, зворотна левітація ближнього поля, дальнє поле і однопроменевий методи акустичної левітації.

Також було сказано, що методи стоячої хвилі, ближнього поля і однопроменевої акустичної левітації можуть використовуватися для маніпулювання та підвішування об'єктами.

Згідно з отриманими результатами експериментів була визначена залежність левітування від відстані між випромінювачами звукових хвиль: коли відстань між джерелами звуку велика – досліджуваний об’єкт може бути підвішений нижче вузлів стоячої хвилі; коли відстань між випромінювачами мала – досліджуваний об’єкт може бути підвішений в що проведенні експериментів.

Список використаних джерел:

1. E. H. Brandt, Science 243, 349 (1989).

2. E. H. Brandt, Nature 413, 474 (2001).

3. A. R. Hanson, E. G. Domich, and H. S. Adams, Rev. Sci. Instrum. 35, 1031 (1964).

4. Samuel Earnshaw, "On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether," Trans. Camb. Phil. Soc., V7, pp. 97-112 (1842).

5. Glorieux, B.; Saboungi, M.-L.; Millot, F.; Enderby, J. & Rifflet, J.-C. December 5, 2000 AERO

6. Review of Scientific Instruments, Volume 53, Issue 9, September 1982, pp.1456-1464 Aerodynamic levitation of laser-heated solids in gas jets Nordine, Paul C.; Atkins, Robert M.

7. King L.V. On the acoustic radiation pressure on spheres // Proc. R. Soc. Lond., Ser. A. — 1934. — T. 147. — C. 212–240.

8. Горьков Л.П. О силах, действующих на малую частицу в акустическом поле в идеальной жидкости // Доклады АН СССР. — 1961. — Т. 140, № 1. — С. 88-91.

9. E. H. Trinh and J. L. Robey, Phys. Fluids 6, 3567 (1994).

10. M. A. B. Andrade, T. S. Ramos, F. T. A. Okina, and J. C. Adamowski, Rev. Sci. Instrum. 85, 45125 (2014).

11. X. Zheng and R. E. Apfel, J. Acoust. Soc. Am. 97, 2218 (1995).

12. H. Bruus, Theoretical Microfluidics (Oxford University Press, New York, 2008).

13. L. V. King, Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 147, 212 (1934).

14. M. Barmatz and P. Collas, Acoust. Soc. Am. 77, 928 (1985).

15. N. Perez, M. A. B. Andrade, R. Canetti, and J. C. Adamowski, J. Appl. Phys. 116, 184903 (2014).

16. W. J. Xie and B. Wei, Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys. 66, 26605 (2002).

17. Z. Y. Hong, W. Zhai, N. Yan, and B. Wei, J. Acoust. Soc. Am. 135, 2553 (2014).
18. Wang, J.-S., Chen C., Chen G.-C., Yan X.-J. “Research on a new type of ultrasonic bearing based on near field acoustic levitation” // Proceedings of the 2013 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications, SPAWDA 2013 No. 6841135.
19. Красильников В.А. , Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403с
20. A. Kundt, Ann. Phys. 203, 497 (1866).
21. K. Bücks and H. Müller, Zeitschrift Für Phys. 84, 75 (1933).
22. M. A. B. Andrade, F. C. Buiochi, and J. Adamowski, IEEE Trans.Ultrason
23. A. L. Yarin, M. Pfaffenlehner, and C. Tropea, J. Fluid Mech. 356, 65 (1998).
24. C. J. Benmore and J. K. R. Weber, Phys. Rev. X 1, 11004 (2011).
25. D. Zang, K. Lin, L. Li, Z. Chen, X. Li, and X. Geng, Appl. Phys. Lett. 110, 121602 (2017).
26. W. J. Xie, C. D. Cao, Y. J. Lü, Z. Y. Hong, and B. Wei, Appl. Phys. Lett. 89, 214102 (2006).
27. A. Marzo, A. Barnes, and B. W. Drinkwater, Rev. Sci. Instrum. 88, 85105 (2017).
28. Y. Hashimoto, Y. Koike, and S. Ueha, J. Acoust. Soc. Japan 16, 189 (1995)
29. C. Chen, J. Wang, B. Jia, and F. Li, J. Intell. Mater. Syst. Struct. 25, 755 (2014).
30. S. Zhao, S. Mojrzisch, and J. Wallaschek, Mech. Syst. Signal Process. 36, 168 (2013).
31. T. Ide, J. R. Friend, K. Nakamura, and S. Ueha, Jpn. J. Appl. Phys. 44, 4662 (2005).
32. T. Watanabe and S. Fukui, Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 1, 1134 (1995)
31. T. Ide, J. R. Friend, K. Nakamura, and S. Ueha, Jpn. J. Appl. Phys. 44, 4662 (2005).
32. T. Sednaoui, E. Vezzoli, B. Dzidek, B. Lemaire-Semail, C. Chappaz, and M. Adams, in IEEE World Haptics Conf. WHC 2015 (2015), pp. 37–42.

33. T. Sednaoui, E. Vezzoli, B. Dzidek, B. Lemaire-Semail, C. Chappaz, and M. Adams, in IEEE World Haptics Conf. WHC 2015 (2015), pp. 37–42.
34. M. Takasaki, D. Terada, Y. Kato, Y. Ishino, and T. Mizuno, Phys. Procedia 3, 1059 (2010).
35. R. R. Whymark, Ultrasonics 13, 251 (1975).
36. D. Baresch, J. L. Thomas, and R. Marchiano, Phys. Rev. Lett. 116, 24301 (2016)
37. G. Memoli, M. Caleap, M. Asakawa, D. R. Sahoo, B. W. Drinkwater, and S. Subramanian, Nat. Commun. 8, 14608 (2017).
38. J. C. Fletcher, T. G. Wang, M. M. Saffren, and D. D. Elleman, U.S. Patent 3,882,732 (1975).
39. E. Trinh, J. Robey, N. Jacobi, and T. Wang, J. Acoust. Soc. Am. 79, 604 (1986).
40. Y. Ochiai, T. Hoshi, and J. Rekimoto, PLoS One 9, e97590 (2014).
41. Y. Hashimoto, Y. Koike, and S. Ueha, J. Acoust. Soc. Am. 103, 3230 (1998)
42. A. Marzo, S. A. Seah, B. W. Drinkwater, D. R. Sahoo, B. Long, and S. Subramanian, Nat. Commun. 6, 8661 (2015).
43. Т.И. Трофимова Курс физики: Уч.пособие. – – М.: Издательский центр «Академия»,2008. – 560с
44. Zhao S. Investigation of non-contact bearing systems based on ultrasonic levitation. Ph.D. Thesis. University of Paderborn: Germany. (2010)