

УДК 534.2

ЛАБОРАТОРНИЙ МАКЕТ ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦІЇ ЯВИЩА УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ЛЕВІТАЦІЇ ЧАСТИНОК РІЗНОГО РОЗМІРНОГО ДІАПАЗОНУ

Дубко¹ Андрій Григорович
andreyies17@gmail.com

Калашнікова² Лариса Євгеніївна
doc_hom2000@yahoo.com

1 «Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона»,

2 Кафедра біомедичної інженерії

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

м. Київ, Україна

Анотація - В роботі показано функціонування лабораторного макету для демонстрації явища акустичної левітації на основі ультразвуку з характеристичною частотою 40 кГц. Метод ультразвукової левітації був реалізований з використанням мікроконтролера Arduino UNO та двох пьезокерамічних випромінювачів. Такий метод дозволяє одночасно маніпулювати кількома частинками міліметрового діапазону. Відзначено, що при розгляді в масштабі довжини хвилі 8,5 мм, акустична маніпуляція забезпечує можливості управління як мілі- так мікрооб'єктами. Результати дослідження демонструють можливість застосування акустичної левітації для позиціонування та орієнтації декількох об'єктів у просторі. Таку технологію відрізняють унікальні характеристики порівняно з раніше застосовуваними подібними технологіями. Головною відмінністю акустичного методу відрізняють такі особливості, як велика сила захоплення на одиницю вхідної потужності та здатність маніпулювати об'єктами від міліметрового до сантиметрового діапазону.

Ключові слова: акустична левітація, ультразвук, робоча частота 40 кГц, маніпуляції мікрочастинками.

I. ВСТУП

Розроблення методу акустичного безконтактного захоплення і маніпулювання окремими різномірними мікрочастинками засновано на використанні ультразвуку. Цей метод має назву акустична левітація, або «акустичний пінцет» [2, 3, 4].

Суть ультразвукової левітації полягає у тому, що два випромінювачі низькочастотного ультразвуку розміщені один навпроти одного на відстані кратній цілому значенню довжини хвилі. Видаючи

однакову частоту коливань, випромінювачі створюють в просторі між ними стоячі хвилі в вузлах, у яких утворюється тиск на рівні атмосферного [2, 4, 5].

Стояча хвиля – це хвиля, яка при будь-якій фазі коливань, не поширюється в просторі. Простіше кажучи, стояча хвиля створює напруженість у малому об'ємі простору із заданими наперед параметрами. Частинка, яка знаходиться між, випромінювачами перебуває ніби в стані левітації [2, 3].

Таку технологію відрізняють унікальні характеристики порівняно з раніше застосовуваними подібними технологіями, що ґрунтуються на таких фізичних явищах як оптичні, магнітні, електричні. Головною відмінністю акустичного ультразвукового методу є такі особливості, як велика сила захоплення на одиницю вхідної потужності та здатність маніпулювати об'єктами від мікрметра до сантиметрової шкали [2, 4, 5]. Крім того, акустичний пінцет дозволяє охопити ширший спектр зразків матеріалів у різних середовищах. Особливо важливо, що така технологія дозволяє здійснювати незалежні маніпуляції мікрочастинками без їх пошкодження або зміни їх властивостей, які дають можливості організовувати клітини та мікрочастинки в бажані схеми, що має важливе значення для чисельних біологічних розробок таких як тканинна інженерія, фармакологія та регенеративна медицина [4, 7].

Інтерес біомедицинської інженерії до досліджень маніпулювання клітинами у шарі тканин пов'язаний з можливостями відтворення шкіри або м'язів [7]. У цьому випадку пристрій акустичної левітації використовується для розташування клітин в певні візерунки [2, 4, 6]. В даний час, проводяться дослідження використання акустичною левітації для створення простих тканин, таких як м'язи. Наступним кроком буде використання цієї технології для збирання більш складних структур, таких як штучні серця [5, 6].

Технологія акустичного пінцету передбачає, що така система в кінцевому підсумку буде використовуватися для акустичного зшивання внутрішніх пошкоджень або цільової доставки ліків у ті чи інші органи тіла людини [2, 4].

II. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є створення лабораторного макету для демонстрації акустичної левітації на базі мікроконтролера Arduino UNO та двох п'єзокерамічних випромінювачів для маніпулювання частинками міліметрового діапазону у просторі без дії зовнішніх сил.

III. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Фізичний ефект ультразвукової левітації засновано на явищі стоячої хвилі. Стояча хвиля – це хвиля, яка утворюється при накладенні двох зустрічних звукових хвиль, які збігаються по фазах і мають однакову частоту хвилі [2]. Якщо звичайна хвиля втрачає свою потужність у процесі поширення у просторі, то стоячі хвилі на невеликих відстанях утворюють вузли з приблизно рівною потужністю (рис. 1). Досягається це за допомогою складання різноспрямованих хвиль.

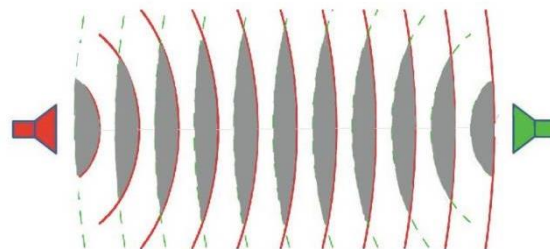


Рисунок 1 – Схема стоячої хвилі: сірим кольором виділені вузли стоячих хвиль, у яких утримуються предмети [1].

Для демонстрації ефекту ультразвукової левітації було використано наступні комплектуючі: мікроконтролер Arduino UNO, ультразвуковий дальномір HC-SR04, драйвер електродвигунів LN298N. Плата Arduino Uno UNO R3 на базі мікроконтролера ATmega328P має відкритий код для її програмування.

Під час розробки лабораторного макету було використано п'єзокерамічні випромінювачі з ультразвукового датчику

відстані HC-SR04 (рис. 2). Основні технічні характеристики ультразвукового датчику відстані наведено в таблиці 1.



Рисунок 2 – Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04.

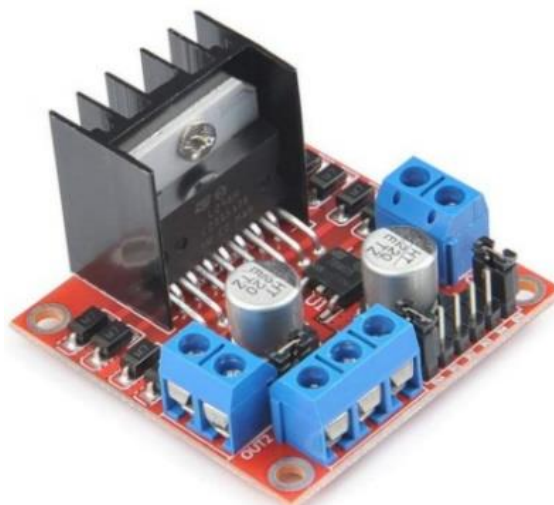


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд драйверу LN298N.

Таблиця 1 – Характеристики HC-SR04

Робоча напруга	3.8 - 5.5В
Струм	8 мА
Частота	40 кГц
Максимальна дистанція	1500 мм
Мінімальна дистанція	0 см
Роздільна здатність	3 мм
Ширина імпульсів	10 мкс
Кут	15 градусів
Зовнішні габарити	37x20x15 мм

Керування роботою випромінювачів і датчиків здійснювалось за допомогою мікроконтролера Arduino Uno UNO R3 (CH340) та драйвера LN298N (рис. 3). Драйвер зібрано на інтегрованій монолітній мікросхемі L298N в 15-вивідному корпусі Multiwatt. Мікросхема LN298N це подвійний мостовий драйвер, призначений для роботи зі стандартними рівнями логіки TTL і керування індуктивними навантаженнями, такими як реле, соленоїди, двигуни постійного струму та крокові двигуни. У нашому випадку драйвер керує п'єзокерамічними випромінювачами.

Основні характеристики драйверу LN298N наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики LN298N

Напруга живлення вбудованої логіки	5В
Споживаний струм вбудованої логіки	0 - 36мА
Напруга живлення драйвера	5 - 35В (максимально 46В)
Робочий струм драйвера	2А (піковий струм 3А)
Максимальне споживання енергії	25 Вт
Робоча температура	-20 °С - + 135 °С
Габарити	43,5 x 43,2 x 29,4 мм

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробка лабораторного макету для демонстрації ефекту ультразвукової левітації здійснювалася за допомогою програми Fritzing, яка є у вільному доступі в мережі Інтернет.

Для збільшення коефіцієнту корисної дії ультразвукові випромінювачі HC-SR04 було розібрано та підключено згідно електричної схеми, що наведено на рисунку

4 та монтажної плати яка наведена на рисунку 5.

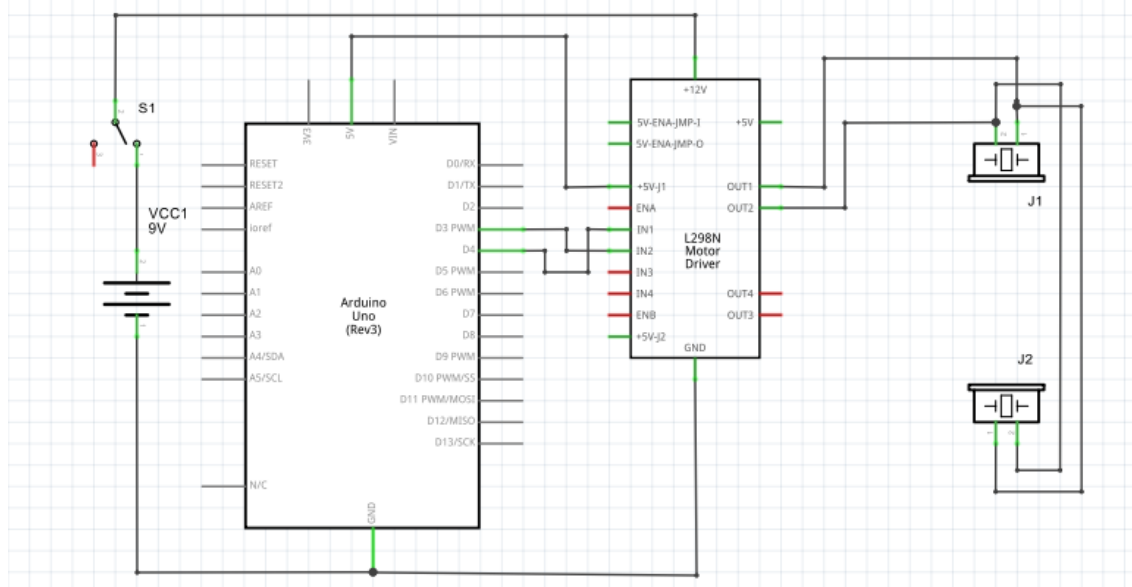


Рисунок 4 – Електрична схема макету (розроблена в програмі Fritzing).

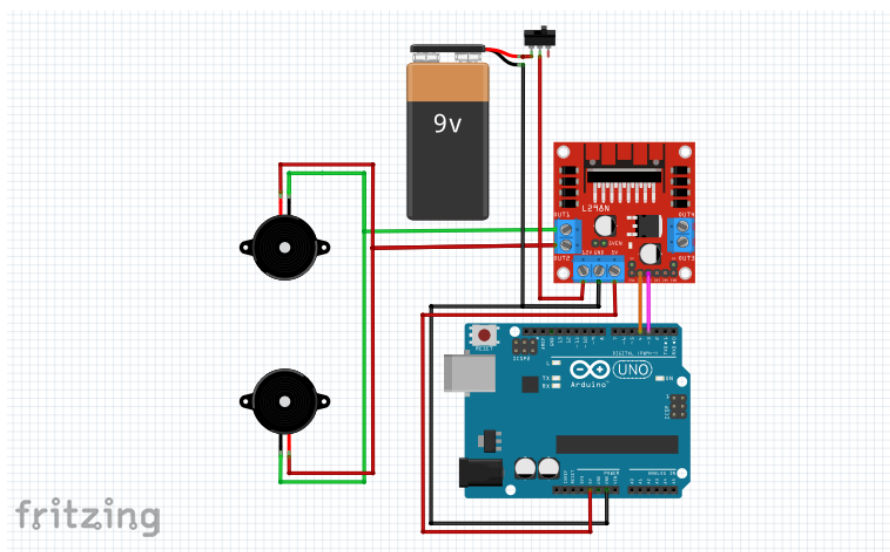


Рисунок 5 – Монтажна плата макету (розроблена в програмі Fritzing).

Для налаштування і синхронної роботи ультразвукових випромінювачів HC-SR04 було застосовано код (sketch) на мові програмування C++ [1]:

```
volatile uint8_t portD3_D4 = 8; // одиниця на D3 та нуль на D4
void setup ()
```

```
{
pinMode (3, OUTPUT);
pinMode (4, OUTPUT);
// Ініціалізація Timer1
TCNT1 = 0;
TCCR1A = 0;
TCCR1B = 0;
OCR1A = 199; // Встановити регістр
порівняння 16 МГц / 80 кГц = 200
TCCR1B = (1 << WGM12)|(1 << CS10);
//Встановлюємо режим CTC, без дільника
TIMSK1 |= (1 << OCIE1A); // Включити
преривання таймера
}
ISR (TIMER1_COMPA_vect) // Обробник
преривання по таймеру
{
PORTD = portD3_D4; // Вивід значення в
порт
portD3_D4 = 255-portD3_D4; //
Інвертування значень порту
}
Для утворення стоячої звукової хвилі
випромінювачі HC-SR04 було розміщено
один навпроти одного за допомогою
розробленого для цього макету
```

лабораторної стійки (рис. 6). Резонансна частота дальноміра HC-SR04 дорівнює 40 кГц. При температурі 20°C і відносній вологості повітря 50% звук поширюється в такому середовищі зі швидкістю 340 м/с (або 340000 мм/с). В результаті отримуємо довжину хвилі:

$$340000 \text{ мм} / 40000 \text{ Гц} = 8,5 \text{ мм.}$$

Тому розміщувати випромінювачі необхідно на відстані кратній 8,5 мм один від одного.

На рисунку 7 показано ефект ультразвукової левітації предмету. Ефект стоячої хвилі можливо отримати при відбитті ультразвукової хвилі від поверхні і застосувати його для формування явища левітації частинок. Демонстрацію ефекту ультразвукової левітації предметів при відбитті ультразвукової хвилі від поверхні представлено на рисунку 9.

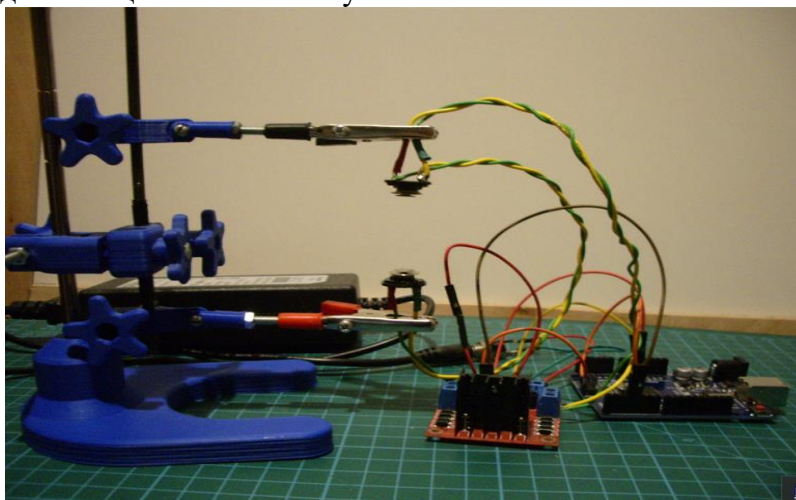


Рисунок 6 – Лабораторний макет для демонстрації ефекту ультразвукового левітації.

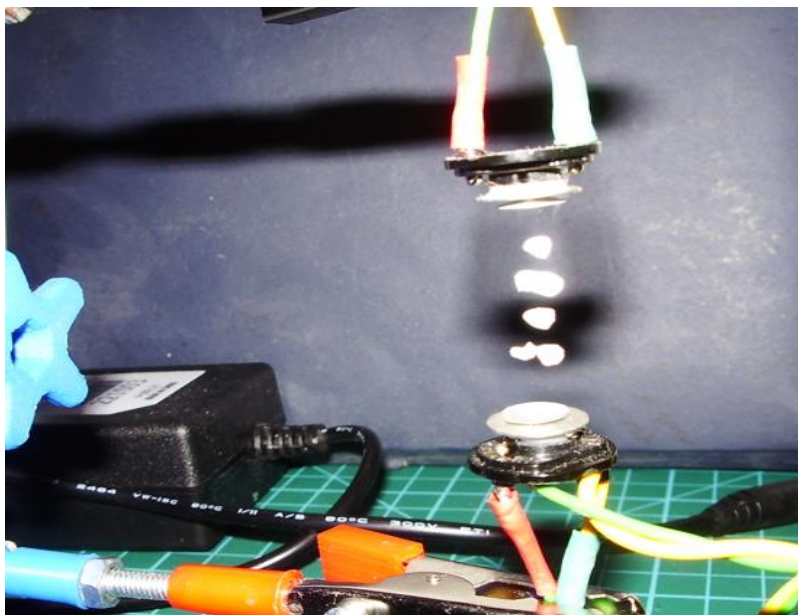


Рисунок 7 – Демонстрація ефекту ультразвукової левітації предметів.

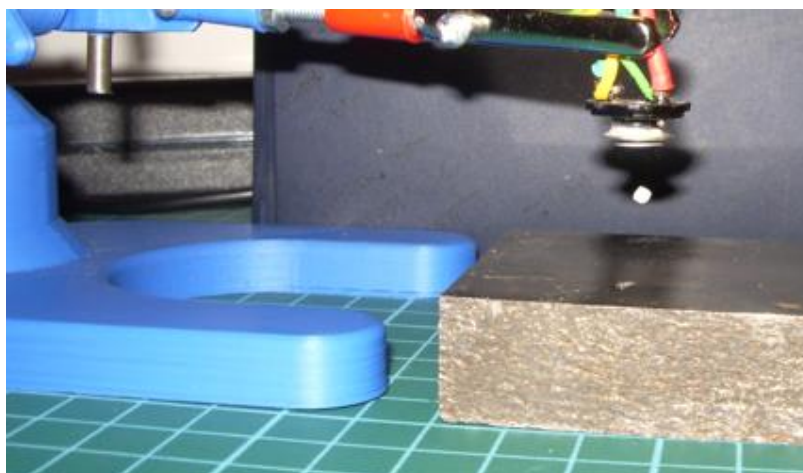


Рисунок 8 – Демонстрація ефекту ультразвукової левітації предметів при відбитті ультразвукової хвилі від поверхні.

V. ОБГОВОРЕННЯ

Необхідно відзначити, що при розгляді ефекту ультразвукової левітації в масштабі довжини хвилі акустична маніпуляція забезпечує можливості управління не тільки

мілі-, а також мікрооб'єктами, аналогічно подібним методам, які засновані на інших фізичних явищах – магнітні, оптичні та електричні. Акустична левітація дозволяє зберігати унікальні характеристики частки, що особливо важливо в біомедичних

дослідженнях. Результати, отримані при використанні лабораторного макету для демонстрації явища ультразвукової левітації демонструють можливість використання мікроконтролера Arduino UNO з двома пьезокерамічними випромінювачами HC-SR04, застосування яких реалізовано за допомогою програми Fritzing, що дає можливість створити умови для безконтактного маніпулювання частинками міліметрового діапазону. Це дало змогу створити так званій «акустичний пінцет» із використанням структурних елементів макету та забезпечило можливість для реалізації складання мікрочастинок у міліметровому масштабі, а також позиціонування та орієнтацію декількох об'єктів у просторі.

VI. ВИСНОВКИ

Дослідження виконані за допомогою розробленого лабораторного макету для акустичного безконтактного захоплення і маніпулювання окремими різномірними мікрочастинками дають змогу зробити наступні висновки:

1. Механізмом ультразвукової левітації є стояча хвиля, довжина якої складає 8,5 мм.

2. Розрахований прилад, який працює на частоті 40 кГц може маніпулювати частинками, розміри яких не перевищують 3 мм і мають вагу до 100 мг і менше.

3. Основними компонентами розробленого приладу для акустичної левітації є мікроконтролер Arduino UNO і драйвер L298N.

4. Метод акустичної левітації має відносну простоту для реалізації конструкції приладу з безконтактним маніпулюванням мікрочастинками, і не змінює фізико-хімічні характеристики досліджуваного об'єкту.

Запропонований метод акустичної левітації має значні перспективи

застосування у експериментальній біології та фармакології.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ORCID ID та внесок авторів.

0000-0001-5816-134X (A, D) Larysa Kalashnikova

0000-0001-6070-3945 (C, E, F) Andrii Dubko

A – Концепція роботи та дизайн; C – Проектування алгоритмів; D – Написання статті; E - Критичний огляд; F – Остаточне схвалення статті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ультразвукова левітація [Електронний ресурс], 2019. Режим доступу: <https://arduino.ua/art166-yltrazvykova-levitaciya>.
2. Andrade M.A.B., Okina F.T.A., Bernassau A.L., Adamowski J.C. "Acoustic levitation of an object larger than the acoustic wavelength" (2017) Journal of the Acoustical Society of America, 141 (6), 2017, Pages 4148-4154. Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1121/1.4984286>
3. Chen C., Wang J., Jia B., Li F. "Design of a noncontact spherical bearing based on near-field acoustic levitation" (2014) Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 25(6) (2014), 755-767. Режим доступу до ресурсу: DOI:10.1177/1045389X13512903
4. A.G. Guex , N. Di Marzio, D. Eglin, M. Alini, T. Serra (2021) The waves that make the pattern: a review on acoustic manipulation in biomedical research Materials Today Bio 10 1001-10 [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100110>
5. Fuhrmann A., Marshall J.S., Wu J. "Effect of acoustic levitation force on aerodynamic particle removal from a surface" (2013) Applied Acoustics, 74,(4), 2013, 535-543. Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.10.009>
6. Mehmet Hakan KANDEMİR1, Mehmet ÇALIŞKAN Acoustic Levitation of Hollow Spheres

with Openings. Corpus ID. Режим доступа до ресурсу:
https://www.researchgate.net/profile/Hakan-Kandemir-2/publication/301542948_INTERNOISE2016620_Acoustic_Levitation_of_Hollow_Spheres_with_Openings/links/57c1698b08aeb95224d721ad/INTERNOISE2016-620-Acoustic-Levitation-of-Hollow-Spheres-with-Openings.pdf

7. Nathan Jeger-Madiot, Lousineh Arakelian, Niclas Setterblad, Patrick Bruneval, Mauricio Hoyos,

Jérôme & Larghero, Jean-Luc Aider (2021) Self-organization and culture of Mesenchymal Stem Cell spheroids in acoustic levitation. *Scientific Reports* 11:8355. Режим доступа до ресурсу:
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-87459-6>

UDC 534.2

LABORATORY MODEL FOR DEMONSTRATION OF THE PHENOMENON OF ULTRASONIC LEVITATION OF PARTICLES OF DIFFERENT SIZE RANGES

Andrii Dubko

andreyies17@gmail.com

Larysa Kalashnikova

doc_hom2000@yahoo.com

State scientific institution

"E.O. Paton Institute of Electric Welding"

Kyiv, Ukraine

Department of Biomedical Engineering

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Kyiv, Ukraine

Abstract - *The work shows the operation of a laboratory model for demonstrating the phenomenon of acoustic levitation based on ultrasound with a characteristic frequency of 40 kHz. The ultrasonic levitation method was implemented using an Arduino UNO microcontroller and two HC-SR04 piezoceramic emitters. This method allows simultaneous manipulation of several millimeter-sized particles. It is noted that when considered on the scale of a wavelength of 8.5 mm, acoustic manipulation provides the ability to control both military and micro-objects. The results of the study demonstrate the possibility of using acoustic levitation for positioning and orientation of several objects in space. This technology is distinguished by unique characteristics compared to previously used similar technologies. The main difference of the acoustic method is distinguished by such features as a large gripping force per unit of input power and the ability to manipulate objects from a millimeter to a centimeter range.*

Key words: *acoustic levitation, ultrasound, operating frequency of 40 kHz, manipulation of microparticles.*