

УДК 534.29

## ЛЕВИТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ УПОРЯДОЧЕННОЙ ГРУППОЙ ЧАСТИЦ И ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

© 2020 г. Д. Я. Суханов<sup>а</sup>, \*, С. Н. Росляков<sup>а</sup>, Ф. С. Емельянов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Томский государственный университет, пр. Ленина 36, Томск, 634050 Россия

\*e-mail: [sdy@mail.tsu.ru](mailto:sdy@mail.tsu.ru)

Поступила в редакцию 06.07.2019 г.

После доработки 04.10.2019 г.

Принята к публикации 29.10.2019 г.

Предлагается метод управления упорядоченной группой левитирующих в ультразвуковом поле частиц и структур из прямолинейных отрезков. Рассматривается ультразвуковое поле в воздухе на частоте 40 кГц и частицы размерами меньше четверти длины волны либо тонкие цилиндрические объекты диаметром меньше четверти длины волны. Ультразвуковое поле формируется с помощью 4-х фазированных решеток излучателей, которые размещены встречно по боковым граням прямоугольного параллелепипеда. Излучатели формируют распределение поля стоячих волн на плоскости, что обеспечивает левитацию частиц в прямоугольной сетке в плоском слое. Путем численного моделирования и экспериментально показано, что полученное распределение стабилизируется и частицы остаются неподвижными в локальных минимумах потенциала Горькова. Кроме того, путем регулирования разности фаз встречных излучателей обеспечивается контролируемое перемещение группы частиц в горизонтальной плоскости. А изменение плоскости фокусировки боковых излучателей обеспечивает контролируемое перемещение группы частиц по вертикали. Экспериментально показано, что в рассматриваемом распределении поля возможна левитация не только малоразмерных частиц, но и структур, собранных из прямолинейных отрезков длиной много больше длины волны.

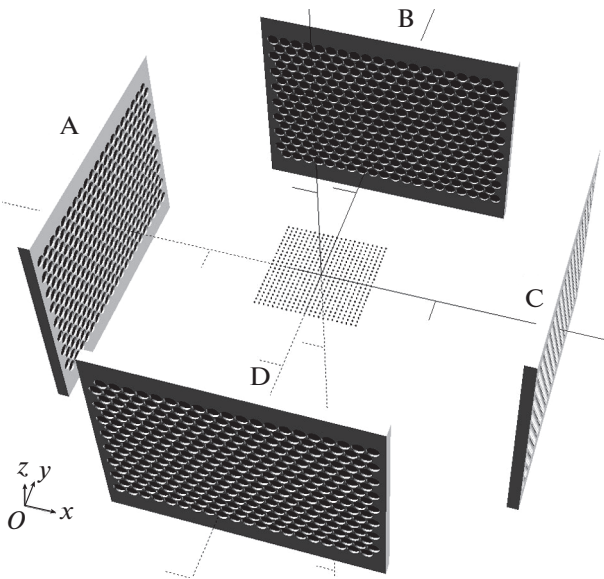
*Ключевые слова:* акустическая левитация, фазированные решетки, потенциал Горькова

**DOI:** 10.31857/S0320791920020112

### ВВЕДЕНИЕ

Акустическая левитация имеет перспективы применения в таких задачах как сортировка частиц, манипуляция химическими реактивами, акустический пинцет, трехмерная печать. Взаимодействие акустических волн с частицами по-прежнему привлекает внимание исследователей. В самых ранних работах [1–2] приведены выражения радиационного давления для случая сферических твердых и жидких частиц в поле бегущих и стоячих плоских акустических волн. В настоящее время уже предложены методы расчета радиационного давления с учетом рассеяния на включениях сложной формы [3]. Разработан способ численного моделирования и проведены эксперименты, позволившие измерить радиационное давление на твердотельный сферический рассеиватель размерами больше длины волны [4]. Аналитически и численно показано, что потери в частицах при их взаимодействии с квазистоячей плоской волной [5] приводят к увеличению воздействия бегущей волны относительно стоячей. Исследователи из Бристольского университета [6] предложили метод левитации объекта, размеры

которого в 1.86 раза больше длины волны. В данном случае левитация в воздухе достигается за счет вихревой конфигурации ультразвукового поля и специальной последовательности импульсов на частоте 40 кГц. Управление левитирующей частицей возможно не только с помощью фазированных решеток излучателей, в ряде случаев достаточно одиночного излучателя и рефлектора. В работе [7] исследуется двумерная манипуляция частицей за счет изменения частоты вибраций и колебательных мод асимметричного излучателя с возможностью наклона отражателя. Однако данный подход не является настолько универсальным, как управление поля фазированными решетками. В работе [8] предложен метод левитации группой частиц, в которой частицы поднимались и контролируемо перемещались с помощью локализованных ультразвуковых стоячих волн. Установка состоит из 4-х фазированных решеток, которые расположены по боковым граням куба. Применяется фокусировка решеток в одну точку, но при такой фокусировке область максимальных значений поля имеет крестообразный вид. В результате частицы группируются в две



**Рис. 1.** Размещение решеток ультразвуковых излучателей. В центре изображены левитирующие частицы, упорядоченные в прямоугольной сетке.

перпендикулярные линии. Данный метод рассчитан на манипуляцию отдельной частицей. Для одновременной манипуляции несколькими частицами необходимо фокусировать излучение в несколько точек, что было продемонстрировано в работе [9]. Однако, в данном случае, отдельные частицы невозможно размещать ближе размеров пятна фокусировки, размеры которого, как правило, больше длины волны. Данная особенность накладывает ограничения на максимальное количество левитируемых частиц. В работе [10] представлена технология поддержания левитации частиц в прямоугольной сетке с применением четырех фазированных решеток. Обеспечивается левитация множества частиц с шагом в половину длины волны. Показана возможность управления упорядоченной в сетке группой частиц в трехмерном пространстве. Однако не учитывается наличие многократно отраженных волн от поверхности излучающих решеток, и из-за применения большого количества параллельных каналов шаг регулировки фазы ограничен величиной  $2\pi/16$ .

В настоящей работе предлагается метод левитации частиц в воздухе на плоской прямоуголь-

ной области с шагом в половину длины волны, с возможностью формирования и управления упорядоченной группой частиц в трехмерном пространстве. При этом применен метод уменьшения амплитуды отраженных волн от поверхности фазированных решеток за счет углубления корпуса излучателей на четверть длины волны в удерживающей пластине. Благодаря параллельному подключению излучателей одной строки в решетке обеспечивается возможность увеличения количества излучателей в горизонтальном направлении при том же количестве параллельных каналов управления. Это позволяет увеличивать область левитации без усложнения системы управления, при этом достигнут шаг задания фазы в  $2\pi/64$ . Расчет поля акустического давления и потенциала Горькова проведен с учетом гексагонального размещения элементов в излучающих решетках. Показано, что в рассматриваемой системе возможна левитация не только малоразмерных частиц, но и прямых отрезков размерами много больше длины волны, а также плоских структур, собранных из прямолинейных отрезков, соединенных либо под прямым углом, либо под углом 45 градусов.

#### СХЕМА РАССМАТРИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЛЕВИТАЦИИ

Предлагается обеспечить стабилизацию положения левитирующих частиц в воздухе за счет формирования сетки точек локальных минимумов потенциала Горькова, распределенных на плоскости. Соответствующее распределение акустического поля обеспечивается интерференцией полей встречно направленных решеток излучателей при фокусировке поля вблизи плоскости левитации. Решетки ультразвуковых излучателей размещаются согласно схеме, изображенной на рис. 1, и обозначены буквами А, В, С, D. В каждой решетке 320 элементов, размещенных в гексагональной сетке из 16 рядов по 20 штук в каждом. Встречные решетки фокусируются на общую линию на заданной высоте  $z_0$ , параллельную решеткам и проходящую посередине между ними.

Поле акустического давления, создаваемое сфокусированными решетками, зададим выражением:

$$P(\mathbf{r}) = \sum_n \frac{p_0 \exp\left(ik \left[ |\mathbf{r} - \mathbf{R}_n| - \sqrt{(x_0 - X_n)^2 + (z_0 - Z_n)^2} \right]\right)}{|\mathbf{r} - \mathbf{R}_n|} + \sum_m \frac{p_0 \exp\left(ik \left[ |\mathbf{r} - \mathbf{R}'_m| - \sqrt{(y_0 - Y'_m)^2 + (z_0 - Z'_m)^2} \right]\right)}{|\mathbf{r} - \mathbf{R}'_m|}, \quad (1)$$

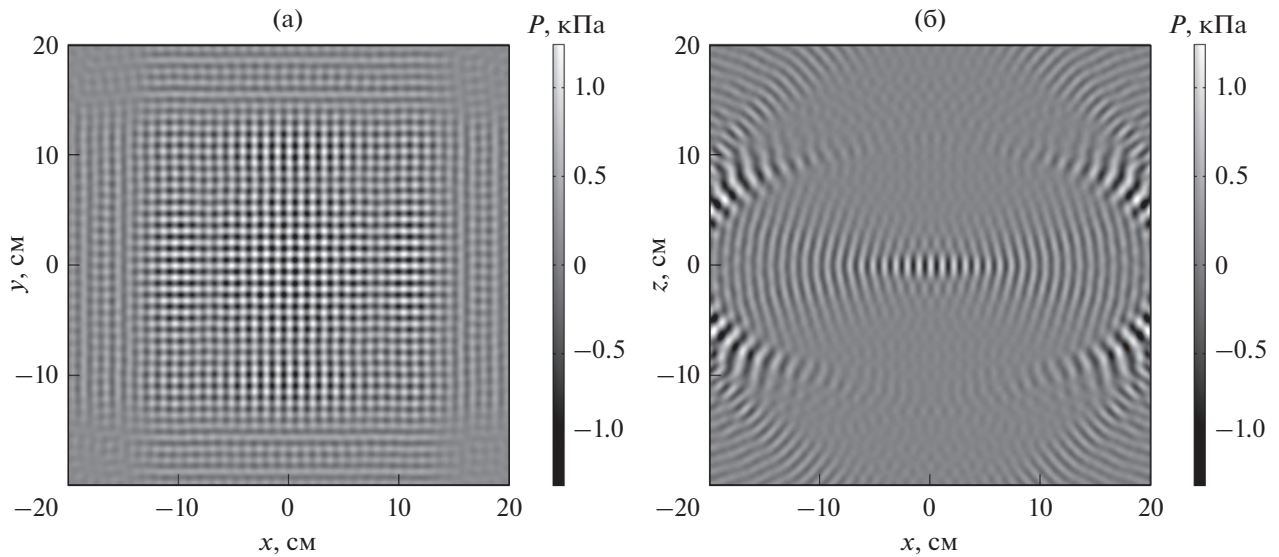


Рис. 2. Распределение поля акустического давления, формируемое 4-мя решетками (а) – в плоскости  $xOy$ , (б) – в плоскости  $xOz$ .

где  $\mathbf{R}_n$  – координаты излучателей в решетках, ориентированных параллельно плоскости  $yOz$  (решетки А и С);  $\mathbf{R}'_m$  – координаты излучателей в решетках, ориентированных параллельно плоскости  $xOz$  (решетки В и D);  $n$  – номер излучателя от 1 до 640 в решетках А и С,  $m$  – номер излучателя от 1 до 640 в решетках В и D;  $p_0$  – акустическое давление, создаваемое отдельным излучателем на единичной дальности;  $x_0$  – координата линии фокусировки решеток  $yOz$  по оси  $x$ ;  $y_0$  – координата линии фокусировки решеток  $xOz$  по оси  $y$ ;  $z_0$  – высота фокусировки для всех решеток. Назовем данный способ фокусировки встречных решеток цилиндрической фокусировкой.

Согласно формуле (1) было рассчитано поле акустического давления (рис. 2) на частоте 40 кГц при расстоянии между парными встречно направленными решетками 40 см, апертуре решеток  $215 \times 143$  мм, размещении элементов в решетке с шагом 11 мм. Можно видеть, что поле локализовано по оси  $z$ , а в плоскости  $xOy$  сформирована прямоугольная сетка минимумов и максимумов стоячих волн акустического давления.

Наблюдаются боковые лепестки, связанные с тем, что решетка разрежена. Для минимизации боковых лепестков необходимо размещать излучатели с шагом менее половины длины волны (в данном случае  $\lambda/2 = 4.25$  мм, а излучатели размещены с шагом 11 мм). Следует учитывать, что применяемые в экспериментальных исследованиях ультразвуковые излучатели имеют узкую диаграмму направленности, что уменьшит уровень боковых лепестков. На основе полученного

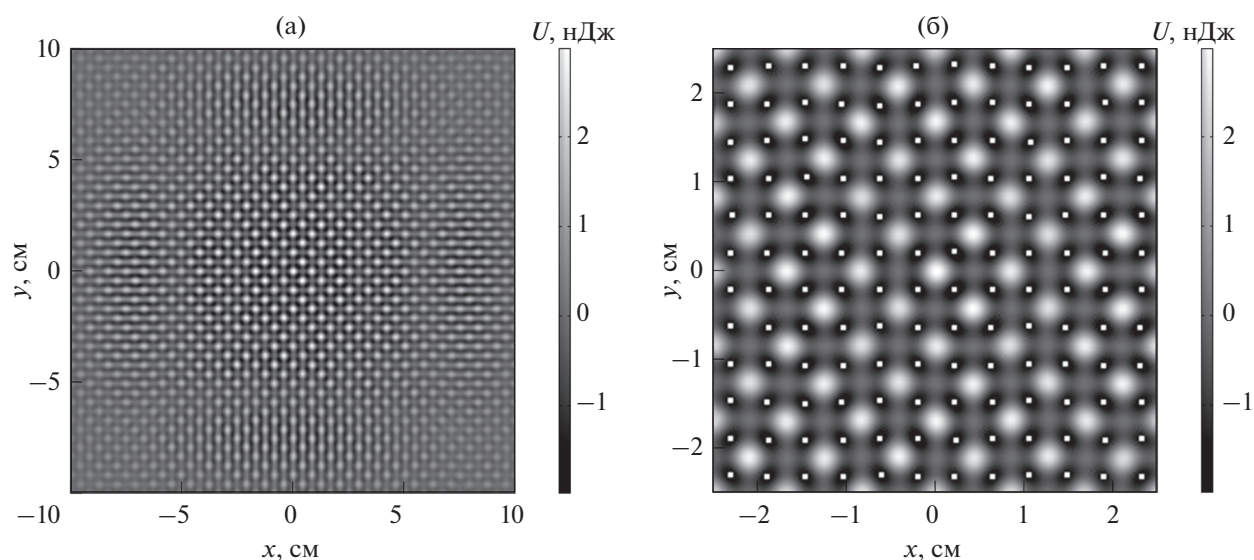
распределения поля был рассчитан потенциал Горькова [2] согласно формуле:

$$U(\mathbf{r}) = 2\pi R^3 \rho \left[ \frac{\overline{p^2}}{3\rho^2 c^2} f_1 - \frac{\overline{v^2}}{2} f_2 \right], \quad (2)$$

где  $\overline{p^2}$  – среднее значение квадрата акустического давления в точке  $\mathbf{r}$ ;  $\overline{v^2}$  – среднее значение квадрата скорости в акустической волне в точке  $\mathbf{r}$ ;  $R$  – радиус частицы;  $f_1 = 1 - \frac{c^2 \rho}{c_0^2 \rho_0}$ ;  $f_2 = 2 \frac{\rho_0 - \rho}{2\rho_0 + \rho}$ ;  $\rho$  – плотность воздуха;  $\rho_0$  – плотность материала частицы;  $c$  – скорость звука в воздухе;  $c_0$  – скорость звука в материале частицы.

В результате расчета потенциала Горькова (рис. 3) было выяснено, что его минимумы расположены на прямоугольной сетке с шагом в половину длины волны. Расчет проводился для частоты излучения 40 кГц, плотности воздуха  $1.2 \text{ кг/м}^3$ , плотности частиц  $15 \text{ кг/м}^3$ , радиуса частиц  $500 \text{ мкм}$ , скорости звука в частице  $500 \text{ м/с}$ . На рис. 3б локальные минимумы потенциала обозначены белыми квадратиками.

Поскольку сила, действующая на частицы, вычисляется как  $\mathbf{F} = -\nabla U$ , то можно считать, что левитирующие частицы будут стремиться в локальные минимумы потенциала и выстраиваться в узлах прямоугольной сетки с шагом в половину длины волны. Кроме того, если рассматривать возможность левитации прямого отрезка длиной много больше длины волны, то можно предположить, что прямой отрезок будет ориентирован либо вдоль оси  $x$ , либо вдоль оси  $y$ , либо под углом



**Рис. 3.** Потенциал Горькова в области левитации частиц: (а) – потенциал Горькова на плоскости  $xOy$ , (б) – расположение локальных минимумов на потенциале Горькова.

$\pm 45^\circ$  к оси  $x$  в плоскости  $xOy$ . Это предположение следует из того, что локальные минимумы потенциала Горькова упорядочены в прямоугольной сетке. Но следует учитывать, что потенциал рассчитан для малоразмерных сферических частиц и данное предположение должно быть экспериментально проверено.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование производилось с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Сила, действующая на левитирующую частицу, рассчитывалась на основе потенциала Горькова (2). Для минимизации времени численного счета рассматривалась небольшая область пространства размерами  $6 \times 6 \times 3$  см с воздухом при нормальных условиях (скорость звука 340 м/с). На сторонах параллелепипеда установлены излучатели на частоте 40 кГц, сфокусированные согласно выражению (1). Моделирование проводилось на основе решения уравнения Гельмгольца методом конечных элементов с шагом сетки 0.8 мм. Амплитуда колебаний звукового давления в области фокусировки достигает 1200 Па. Рассматривалась левитация частиц из материала плотностью  $15 \text{ кг/м}^3$  и диаметром 500 мкм. В результате численного моделирования было получено распределение поля акустического давления в области левитации (рис. 4). На рис. 4 изображено распределение поля акустического давления в фиксированный момент времени, где черные области соответствуют акустическому давлению  $-1200$  Па, а белые  $+1200$  Па. Результаты численного моделирования в целом согласуются с анали-

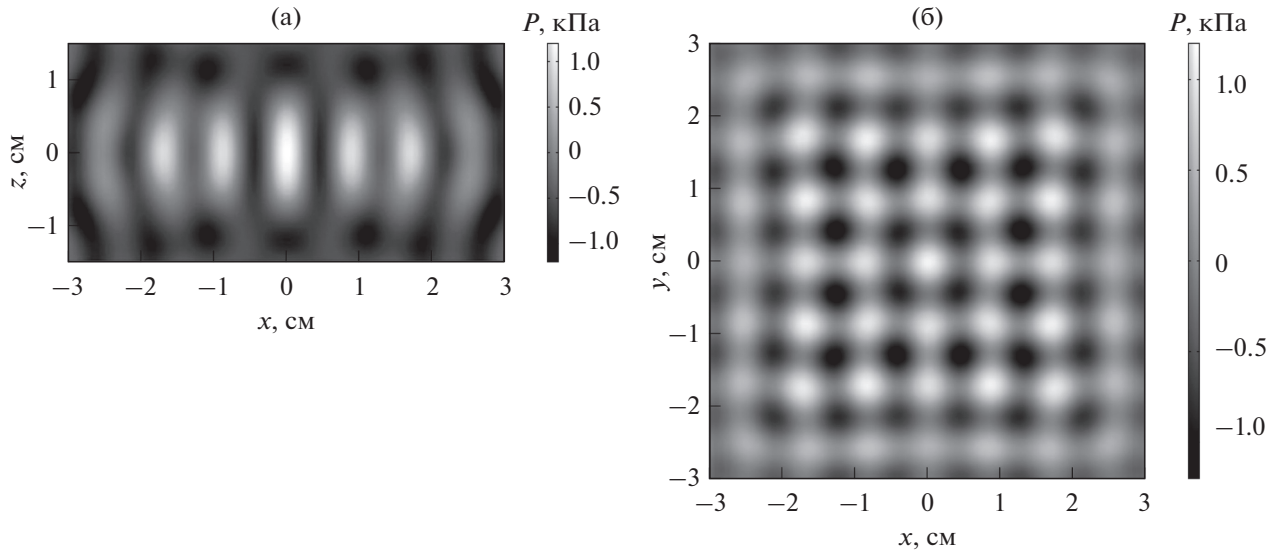
тическим решением, представленным на рис. 3. Видно, что частицы группируются в прямоугольной сетке с шагом в половину длины волны в узлах акустического давления. Под действием силы тяжести частицы смещаются вниз, на краях в большей степени, поскольку локализация поля там ухудшается (рис. 5).

Результаты численного моделирования в среде COMSOL Multiphysics показали возможность обеспечения левитации частиц в прямоугольной сетке на плоскости на основе полей 4-х монохроматических цилиндрически сфокусированных излучателей. Положение левитирующих частиц, полученное при численном моделировании, соответствует теоретически предсказанному.

Следует отметить, что при размещении излучающих решеток так, как показано на рис. 1, будут возникать многократные отражения от плоскостей решеток, что исказит поле первичных волн. Для минимизации поля, рассеянного на решетках, предлагается разместить излучатели на глубине в четверть длины волны в удерживающей пластине. Тогда поле, рассеянное от корпуса датчика, будет складываться в противофазе с полем, рассеянным на поверхности удерживающей пластины, что минимизирует амплитуду волны, рассеянной на решетке в области левитации.

Оценим влияние отраженных от решеток волн в приближении фазового экрана. Поле, создаваемое решеткой излучателей в центре области левитации, опишем с помощью разложения в спектр плоских волн:





**Рис. 4.** Акустическое давление и распределение частиц, рассчитанное в программе COMSOL Multiphysics методом конечных элементов. (а) – Поле в плоскости  $xOz$ , (б) – поле в плоскости  $xOy$ , и изображение левитирующих частиц в виде белых кружков.

$$P_0(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}(k_x, k_z) \exp(ik_x x + ik_z z + ik_y h) dk_x dk_z, \quad (3)$$

где  $k_y = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_z^2}$ ;  $h = 200$  мм – расстояние от решетки излучателей до центра области левитации;

$$\tilde{S}(k_x, k_z) = \frac{1}{4\pi^2} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(x, z) \exp(-ik_x x - ik_z z) dx dz;$$

$S(x, z) = S_0 M(x, z) \exp(-ik\sqrt{Z^2 + h^2})$  – поле излучения решетки;  $Z = b \left[ \frac{z}{b} \right]$  ( $[ ]$  – обозначает округление до ближайшего целого);  $b = 11 \frac{\sqrt{3}}{2}$  мм – шаг размещения рядов излучателей по оси  $z$ ; функция  $M(x, z)$  описывает области излучения на поверхности решетки и описывается выражением:

$$M(x, z) = \sum_n \begin{cases} 1, & \text{если } (x - X_n)^2 + (z - Z_n)^2 < s^2, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

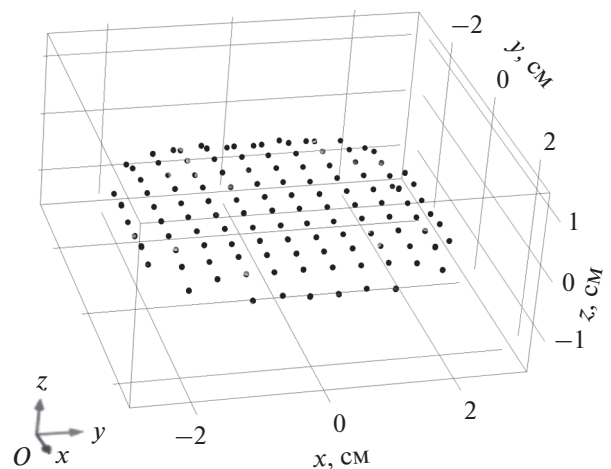
где  $s$  – радиус апертуры излучателя;  $X_n = a((n \bmod 20 + 0.5(n \operatorname{div} 20) \bmod 2) - 10)$ ;  $Z_n = b((n \operatorname{div} 20) - 9.5)$ ;  $a = 11$  мм – расстояние между излучателями;  $\bmod$  – операция извлечения остатка целочисленного деления;  $\operatorname{div}$  – операция

целочисленного деления;  $n$  – номер излучателя в решетке от 0 до 319.

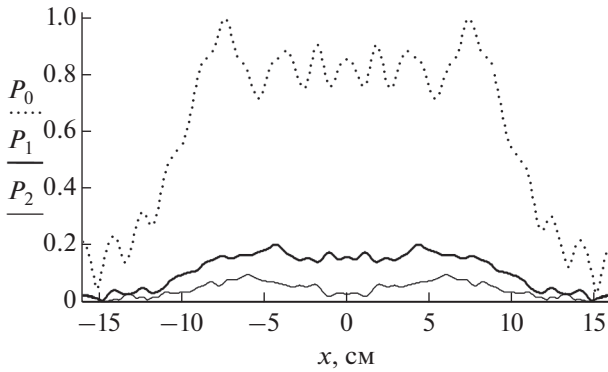
Поле, падающее на встречную решетку, запишется в виде:

$$P(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}(k_x, k_z) \exp(ik_x x + ik_z z + ik_y 2h) dk_x dk_z,$$

а поле, рассеянное на встречной решетке излучателей, с учетом заглубления излучателей на четверть длины волны вычислим в приближении фазового экрана:



**Рис. 5.** Трехмерное распределение левитирующих частиц по результатам численного моделирования.



**Рис. 6.** Распределение амплитуды поля акустического давления в центре области левитации при  $y = 0, z = 0$ .  $P_0$  – первичное поле решетки излучателей, сфокусированное в центре (пунктир);  $P_1$  – поле, рассеянное на решетке без заглабления излучателей (широкая линия);  $P_2$  – поле, рассеянное на решетке при заглаблении излучателей на четверть длины волны (тонкая линия).

$$P_2(x, z) =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P'(k_x, k_z) \exp(ik_x x + ik_z z + ik_y h) dk_x dk_z, \quad (4)$$

где

$$P'(k_x, k_z) = \frac{1}{4\pi^2} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, z) \exp\left(i\frac{\pi}{2} M(x, z)\right) \times \exp(-ik_x x - ik_z z) dx dz.$$

Множитель  $\exp\left(i\frac{\pi}{2} M(x, z)\right)$  описывает фазовый набег, приобретаемый волной при прохождении заглабления от поверхности удерживающей пластины до поверхности излучателя и обратно.

На рис. 6 представлены результаты вычислений амплитуды прямого сфокусированного поля акустического давления от решетки излучателей согласно формуле (3) и поля, рассеянного на решетке при заглаблении излучателей, рассчитанного по формуле (4). Видно, что прямое поле в среднем в 15 раз по амплитуде превосходит поле, рассеянное на встречной решетке. Для оценки эффекта от заглабления датчиков на четверть длины волны был проведен расчет для случая, когда датчики не заглаблялись, полагая в формуле (4)  $M(x, z) = 0$ . Это приводит к увеличению амплитуды рассеянного поля в 2–3 раза, что показывает график  $P_1$  на рис. 6.

Первичное поле сфокусировано в центре области левитации, а рассеянное на решетке поле уже не сфокусировано, и вследствие этого имеет

намного меньшую амплитуду. Применение четверть волнового заглабления излучателей еще уменьшает амплитуду рассеянного поля. Таким образом, численная оценка показывает, что первичное поле превышает рассеянное на решетках поле в среднем в 15 раз. Следовательно, можно пренебречь полем, рассеянным на встречной решетке излучателей.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментальной проверки возможности левитации и управления упорядоченной группой частиц была разработана установка из 4-х решеток ультразвуковых излучателей (в каждой решетке 320 элементов) согласно схеме, изображенной на рис. 1. Элементы в решетках размещены в гексагональной сетке с шагом  $d = 11$  мм в 16-и рядах, и в каждом ряду по 20 излучающих элементов. Излучающие элементы в одном ряду подключены параллельно и присоединены к выходу усилителя гармонического сигнала. Для управления всей системой решеток применяется микроконтроллер STM32F407, реализующий 64-х канальный 1-битный цифро-аналоговый преобразователь. Двоичные сигналы поступают на усилители TDA7297 (напряжение питания 12 вольт), выходы которых подключены к рядам излучающих решеток (по 16 выходов на 4 решетки). В качестве излучателей применялись пьезоизлучатели MA40S4/S, которые устанавливались в пластину из вспененного поливинилхлорида на глубину 2 мм (что соответствует четверти длины волны в воздухе). Глубина установки датчиков на четверть длины волны позволяет уменьшить амплитуду отраженных волн от решетки падающих со стороны встречных излучателей (рис. 6).

Амплитуда и фаза монохроматического сигнала, подаваемого на  $n$ -тый ряд, описывается в виде комплексной амплитуды:

$$S_n = \exp\left(-ik\sqrt{L^2 + (z_0 - H_n)^2}\right), \quad (5)$$

где  $z_0$  – высота плоскости левитации частиц;  $L$  – дальность до оси фокусировки от излучающей решетки;  $H_n = nd\sqrt{3}/2$  – высота размещения  $n$ -того ряда излучателей в решетке;  $k = 2\pi f/c$  – волновое число;  $f = 40$  кГц – частота излучения;  $d = 11$  мм – расстояние между соседними излучателями;  $c = 340$  м/с – скорость звука в воздухе. Однако разработанная система излучателей не позволяет регулировать амплитуду, а фаза регулируется с шагом  $2\pi/64$ . Таким образом, задается только сдвиг фазы для излучателей, размещенных в  $n$ -том ряду. Для всех решеток сдвиг фазы определяется выра-

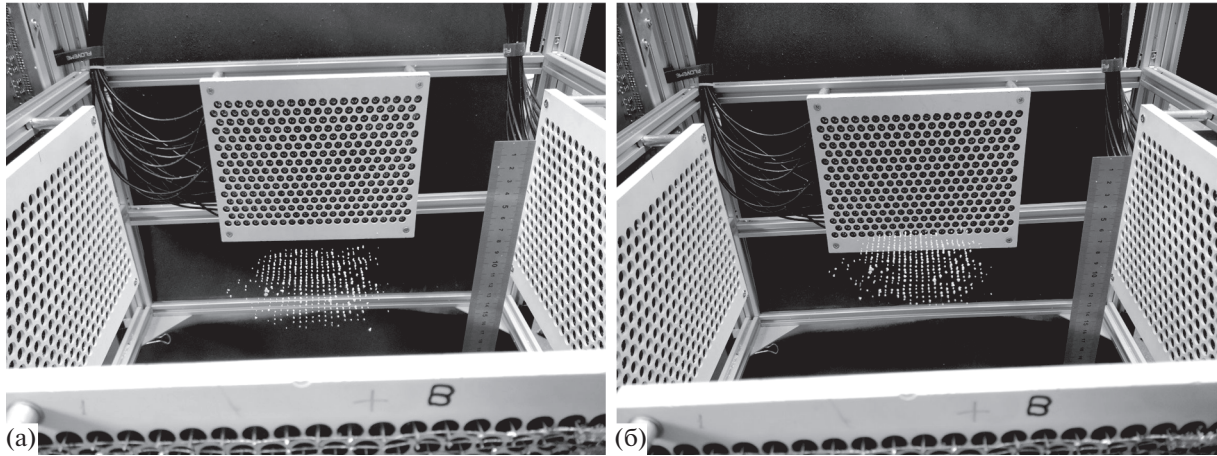


Рис. 7. Фотографии экспериментальной установки, обеспечивающей левитацию и управление упорядоченной группы частиц пенопласта: (а) – ниже центра на 15 мм, (б) – выше центра на 15 мм.

жением:  $\varphi_n = \left[ -ik\sqrt{L^2 + (z_0 - H_n)^2} \frac{64}{2\pi} \right] \frac{2\pi}{64}$ . С целью управления частицами в горизонтальной плоскости предлагается сдвигать фазы встречных решеток излучателей, что обеспечит смещение узлов стоячих волн, образованных встречными бегущими волнами от излучающих решеток. Тогда фазы в решетке А задаются выражением:  $\alpha_n = \varphi_n$ , в решетке В:  $\beta_n = \varphi_n$ , в решетке С:  $\gamma_n = \varphi_n + 2kx_0$ , в решетке D:  $\delta_n = \varphi_n + 2ky_0$ , где  $(x_0, y_0)$  – требуемый сдвиг частиц в горизонтальной плоскости,  $k = 2\pi f/c$  – волновое число. При перемещении частиц и перестройке сигналов решеток излучателей необходимо учитывать, что резкие скачки фазы излучения могут привести к нарушению левитации, поэтому перемещение в заданное положение осуществляется путем линейного изменения координат  $(x_0, y_0, z_0)$  таким образом, чтобы скорость частиц не превышала 100 мм/с.

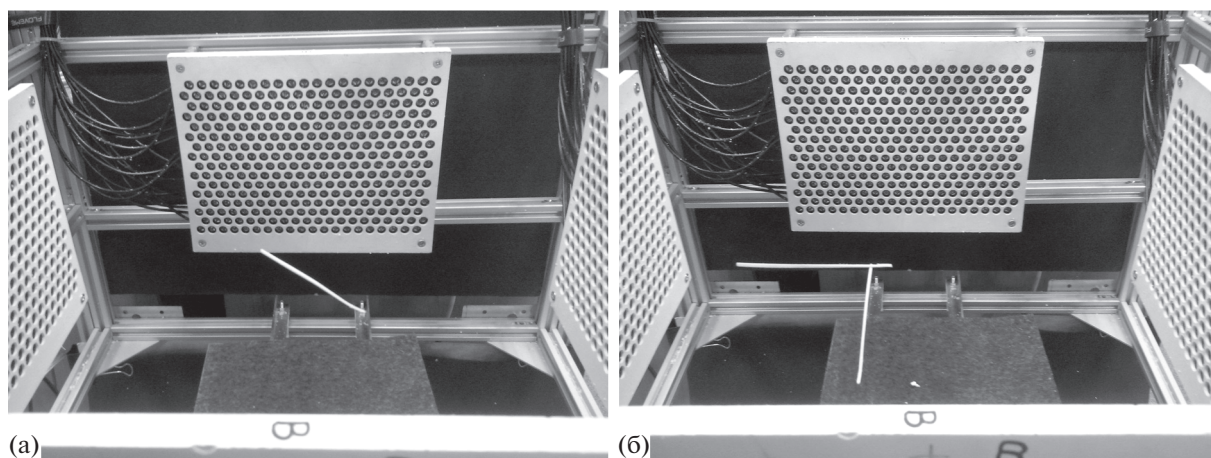
В каждой решетке излучатели, размещенные в одном ряду, должны быть синфазными, однако из-за погрешностей при производстве излучателей каждый из них излучает сигнал с разным отклонением по фазе. Для устранения влияния разброса по фазе, перед установкой в решетку излучатели были прокалиброваны и отсортированы по вносимому ими фазовому сдвигу с шагом 7 градусов. Для калибровки излучателей применялся эталонный приемник, устанавливаемый на фиксированном расстоянии. Сигнал с приемника оцифровывался, после чего вычислялся его фазовый сдвиг относительно сигнала генератора. В один ряд устанавливались параллельно подключенные излучатели с различием фазы не более 7 градусов, но на соотношение фаз между соседними рядами ограничения не накладывались. Поскольку фаза сигнала в каждом ряду управля-

ется цифровым способом (с шагом 5.6 градуса), то любые различия фаз между рядами излучаемых сигналов могут быть компенсированы после калибровки решеток. Калибровка решеток производилась с помощью приемного датчика, размещенного в центре системы. Фазы в каждом ряду решетки варьировались для достижения максимума поля в приемном датчике, что означало синфазное сложение волн в центре системы, это позволило установить начальные фазовые сдвиги для всех рядов излучателей. Специально разработанное программное обеспечение позволяло регулировать фазу сигналов и фокусировать поле решеток в соответствии с формулой (5). За счет регулировки разности фаз между встречными решетками обеспечивается перемещение левитирующих частиц по осям  $x$  и  $y$ , поскольку минимумы стоячих волн смещаются, если меняется разность фаз сигналов встречных решеток излучателей. Перемещение по оси  $z$  обеспечивается за счет изменения величины  $z_0$  в формуле (5) и задания соответствующих фаз сигналов на все решетки.

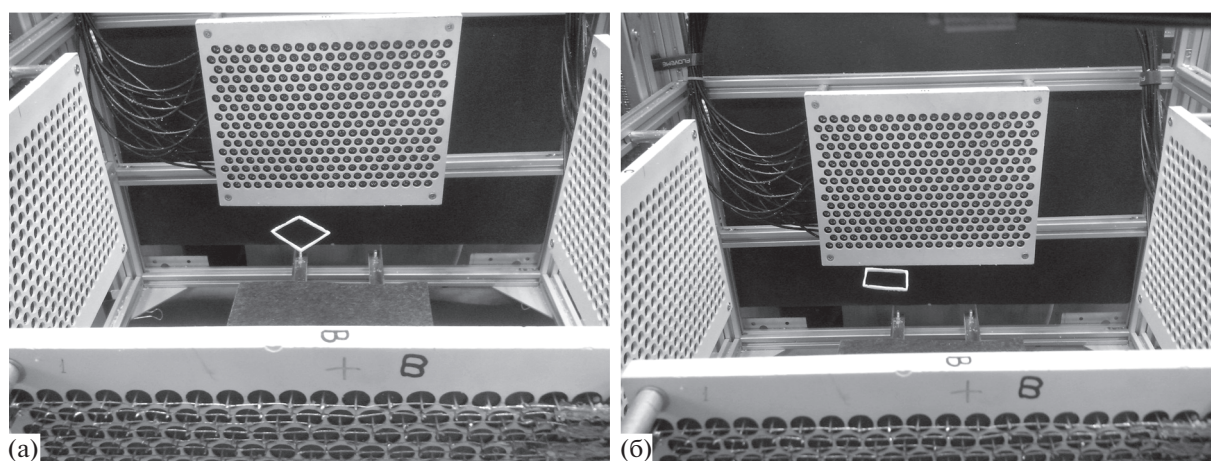
В ходе эксперимента, после включения излучателей, в область левитации сверху засыпались частицы пенопласта неправильной формы с поперечными размерами не более 2 мм. Падающие частицы захватывались акустическим полем и начинали левитировать в прямоугольной сетке с шагом в половину длины волны (рис. 7). При изменении разности фаз излучателей встречных решеток наблюдалось движение всей упорядоченной структуры левитирующих частиц по горизонтали. За счет перефокусировки решеток по высоте  $z_0$  обеспечивалось перемещение всей структуры по оси  $z$ .

Эксперименты показали, что при плавной перестройке фаз излучателей возможно сохранение порядка размещения частиц в прямоугольной





**Рис. 8.** Фотографии экспериментов по левитации продолговатых объектов из вспененного полистирола. (а) – Ориентация отрезка под углом 45 градусов, (б) – ориентация двух отрезков вдоль плоскостей решеток.



**Рис. 9.** Фотографии экспериментов по левитации прямоугольника из вспененного полистирола. (а) – Ориентация сторон под углом 45 градусов, (б) – ориентация сторон вдоль плоскостей решеток.

сетке. Следовательно, если изначально частицы установлены в заданные узлы стоячих волн, то перемещение по высоте и горизонтали не приводит к разрушению структуры. Относительное положение частиц не изменяется в процессе перемещения в трехмерном пространстве.

Дополнительно был проведен эксперимент по проверке возможности левитации прямолинейных отрезков длиной много больше длины волны. В качестве исследуемых объектов для левитации были изготовлены отрезки из вспененного полистирола диаметром 2 мм и длиной 100 мм (при этом длина волны излучения составляет 8.5 мм), что составляет почти 12 длин волн. В результате наблюдалась левитация отрезков в ультразвуковом поле, сформированном встречно направленными сфокусированными решетками на частоте 40 кГц (рис. 8). Устойчивая левитация на-

блюдалась при ориентации отрезка под углом 45 градусов к плоскости излучающих решеток (рис. 8а) и при ориентации отрезков параллельно или перпендикулярно плоскостям излучающих решеток (рис. 8б), что соответствует распределению локальных минимумов потенциала Горькова. Несмотря на то, что потенциал рассчитан для сферических частиц, его распределение позволило предсказать поведение прямолинейных отрезков.

Поскольку возможна левитация прямолинейных отрезков, то, скорее всего, возможна левитация объектов, составленных из прямых отрезков, которые соединены под углами 90 или 45 градусов. Для проверки этого предположения были проведены эксперименты по левитации прямоугольной рамки размерами 30 на 26 мм и толщиной 2 мм. На рис. 9 представлены фотографии левитирующих в ультразвуковом поле прямоугольных



рамок. Результаты эксперимента подтверждают возможность левитации плоских объектов, собранных из прямых линий, в созданном распределении поля. Кроме того, в ходе эксперимента обеспечивалась возможность перемещения рамки в трехмерном пространстве без ее вращения за счет изменения фаз сигналов в излучающих решетках. Следует отметить, что для устойчивой левитации таких структур необходимо, чтобы каждая прямолинейная сторона попадала в область локального минимума потенциала Горькова.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ обеспечения ультразвуковой левитации и управления упорядоченной в прямоугольной сетке группой частиц. Результаты аналитических расчетов и численного моделирования показали возможность выстраивания левитирующих частиц в прямоугольную плоскую сетку с шагом в половину длины волны в ультразвуковом поле встречных цилиндрически сфокусированных плоских решеток. Экспериментально подтверждено теоретически предсказанное поведение левитирующих частиц. Созданная экспериментальная установка позволяет перемещать упорядоченную группу частиц в трехмерном пространстве, сохраняя их относительное положение. Экспериментально показана возможность левитации прямолинейных отрезков размерами много больше длины волны, а также объектов, составленных из прямолинейных отрезков. Предложенный способ управления левитирующими частицами и прямолинейными структурами имеет перспективы применения для нанесения заданного рисунка на поверхности в ряде технологических процессов, например, в трехмерной печати.

Исследование выполнено при поддержке гранта № 17-79-20051 Российского Научного Фонда.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. King L.V. On the acoustic radiation pressure on spheres // Proc. Roy. Soc. 1934. A 147. P. 212–240.
2. Горьков Л.П. О силах, действующих на малую частицу в акустическом поле в идеальной жидкости // Докл. АН СССР. 1961. Т. 140. № 1. С. 88–91.
3. Шарфарец Б.П. Радиационное давление при рассеянии произвольного поля на включении сложной формы // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 6. С. 767–772.
4. Николаева А.В., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Измерение радиационной силы мегагерцевого ультразвука, действующей на твердотельный сферический рассеиватель // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 1. С. 20–37.
5. Шарфарец Б.П., Князьков Н.Н., Курочкин В.Е. Радиационное давление на сферу с потерями в квазистоячей плоской волне // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 2. С. 179–183.
6. Marzo A., Caleap M., Drinkwater B.W. Acoustic virtual vortices with tunable orbital angular momentum for trapping of Mie particles // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120(4). Article number 044301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.044301>
7. Wijaya H., Latifi K., Zhou Q. Two-dimensional manipulation in mid-air using a single transducer acoustic levitator // Micromachines. 2019. V. 10(4). P. 257. <https://doi.org/10.3390/mi10040257>
8. Ochiai Y., Hoshi T., Rekimoto J. Three-dimensional mid-air acoustic manipulation by ultrasonic phased arrays // PLOS ONE. 2014. V. 9(5). e97590. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097590>
9. Marzo A., Drinkwater B.W. Holographic acoustic tweezers // Proc. National Acad. Sciences USA (PNAS). 2019. V. 116(1). P. 84–89. <https://doi.org/10.1073/pnas.1813047115>
10. Ochiai Y., Hoshi T., Rekimoto J. Pixie dust: graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field // ACM Trans. Graph. 2014. V. 33 (4). Article 85. P. 13. <https://doi.org/10.1145/2601097.2601118> <http://doi.acm.org/10.1145/2601097.2601118>