Кольцевая оптотермическая ловушка

А.В.Коробцов, С.П.Котова, Н.Н.Лосевский, А.М.Майорова, С.А.Самагин

Экспериментально и методами численного моделирования исследовались возможности кольцевой оптотермической ловушки захватывать и манипулировать прозрачными объектами микронных размеров. По сравнению с точечными оптотермическими ловушками кольцевая ловушка позволяет более плавно управлять движением частиц за счет изменения мощности лазерного пучка.

Ключевые слова: *конвекционные потоки, кольцевая оптотермическая ловушка, вихревые световые поля.*

1. Введение

Оптотермические, или конвекционные, ловушки занимают особое место в ряду методов манипулирования микро- и нанообъектами. В таких ловушках остросфокусированный лазерный пучок используется не только для формирования оптической силы, но и для создания в среде градиента температуры и, соответственно, конвекционных потоков [1, 2 – 6]. Захват и перенос объектов осуществляется этими потоками, что позволяет использовать заведомо меньшие по сравнению с оптическими ловушками мощности лазерного излучения, перемещать поглощающие микрообъекты как относительно больших размеров (до сотен микрометров) [7], так и наноразмерные объекты (коллоидные частицы, одиночные клетки и молекулы [8, 9]), эффективно формировать области, свободные от микрочастиц, и области с их локальной повышенной концентрацией, захватывать одновременно несколько частиц [2] и осуществлять их сортировку по размеру [10].

Градиент температуры формируется различными способами. В работах [2, 5, 8, 9] описаны способы с использованием специальных тонких поглощающих пленок. Отметим, что специальные пленки можно использовать и для подавления фототермической конвекции [11]. Лазерное излучение может поглощаться жидкостью, в которой находятся объекты манипулирования [7, 10], а также непосредственно самими объектами [12]. Фокусировка лазерного пучка с гауссовым распределением интенсивности, используемого в большинстве упомянутых выше статей, приводит к формированию точечной оптотермической ловушки. В работе [6] нами предложен способ организации подобной ловушки за счет использования поглощающего светофильтра в качестве дна кюветы с микрообразцами. В этом случае конвекционные потоки образуются в относительно больших объемах жидкости, не ограниченных сверху стеклянной пластиной. Фокусировка световых полей с более сложным распределением интенсивности позволяет формировать оптотермические ловушки более сложных форм – кольцевые или в виде спирали Архимеда. Наличие у фокусируемого пучка топологического заряда приводит к формированию вихревых оптотермических ловушек [5, 6, 13].

В настоящей работе мы детально исследуем возможности и особенности оптотермической ловушки в форме кольца. Кольцевые оптические ловушки, формируемые вихревыми аксиконами, модами Лагерра – Гаусса, с использованием пучков Бесселя и Эйри, позволяют захватывать как непрозрачные объекты, так и объекты с меньшим, чем у окружающей среды, показателем преломления, а также минимизировать воздействие излучения на захватываемые объекты. Такие ловушки (без конвекционной составляющей) известны давно [14 – 18], они активно используются в настоящее время в методах оптического манипулирования [19 – 21], для их создания совершенствуются методы формирования оптических вихрей [22, 23]. С помощью кольцеобразных ловушек авторами [19] продемонстрировано оптическое управление движением металлических наночастиц по трехмерным траекториям, а авторами [21] – управляемый поворот поглощающих частиц в воздухе. Одновременный захват микрообъектов с показателем преломления ниже или выше, чем у окружающей среды, осуществлен с помощью оптической ловушки Бесселя [18].

Цель настоящей статьи – показать преимущества и особенности оптотермической кольцевой ловушки по сравнению с точечной оптотермической и кольцевой оптической (без конвекционной составляющей) ловушками.

2. Моделирование потока жидкости в конвекционной ловушке в форме кольца

Рассмотрим процесс перемещения потоков жидкости в конвекционной ловушке. При моделировании рассматривалась ситуация, близкая к экспериментальной. Геометрия исследуемой модели показана на рис.1. Лабораторный образец представляет собой кювету цилиндрической формы с жидкостью (водой). Форма и размеры кюветы определяют форму и размеры обоих слоев – пло-

А.В.Коробцов, С.П.Котова, Н.Н.Лосевский, А.М.Майорова, С.А.Самагин. Самарский филиал Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221;
e-mail: kotova@fian.smr.ru

Поступила в редакцию 21 июня 2022 г.

ской стеклянной пластины (подложки) толщиной 2 мм и диаметром 27 мм и слоя воды толщиной 0.75 мм и диаметром 27 мм. Кювета облучается лазерным пучком Лагерра – Гаусса $LG_{0,m}$ с положением перетяжки на границе раздела жидкость – подложка. Радиус кольца R_0 составлял либо 15 мкм (в этом случае мощность излучения пучка P_0 равна 30, 50 и 70 мВт), либо 30 мкм (при мощности пучка 60, 100 и 140 мВт). Радиус перетяжки гауссова пучка w_0 во всех рассмотренных случаях был 2.0 мкм. Граница раздела жидкость – подложка располагалась на уровне $z = 0$, ось z направлена вверх. Задача имеет осевую симметрию.

В эксперименте в качестве подложки использовался цветной светофильтр ОС 13, физические характеристики материала которого, такие как плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности, были приняты равными таковым для стекла марки К8 [24]. Коэффициент поглощения α падающего на подложку света с длиной волны $\lambda = 532$ нм составлял 1340 м$^{-1}$, удельная теплопроводность $k = 1.114$ Вт/(м · К).

Задача нахождения распределения температур и скоростей потоков жидкости в исследуемой ловушке решалась для стационарного случая численными методами. Аналогичная задача рассмотрена нами в работе [6] для точечного сфокусированного источника. Распределение температуры определялось совместным решением уравнения теплопереноса для слоя жидкости (1) и поглощающей подложки (2):

$$\rho c_p \boldsymbol{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{H_2O} \nabla T), \tag{1}$$

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + Q = 0, \tag{2}$$

где ρ – плотность воды; c_p – удельная теплоемкость воды; $\boldsymbol{u}$ – скорость потока жидкости; k_{H_2O}, k – коэффициенты теплопроводности для воды и стекла К8 соответственно; Q – объемная плотность теплового источника. Роль теплового источника Q играет лазерное излучение, поглощаемое подложкой:

$$Q = \alpha I(r, z). \tag{3}$$

Здесь I – распределение интенсивности лазерного излучения,

$$I(r,z) = P_0 e^{-\alpha|z|} \frac{2^{m+1}}{\pi m! w^2(z)} \left(\frac{r}{w(z)}\right)^{2m} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2(z)}\right), \tag{4}$$

определяемое выходной мощностью лазерного излучения P_0 и шириной лазерного пучка $w(z)$:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left[\frac{\lambda(z - z_0)}{n\pi w_0^2}\right]^2}, \tag{5}$$

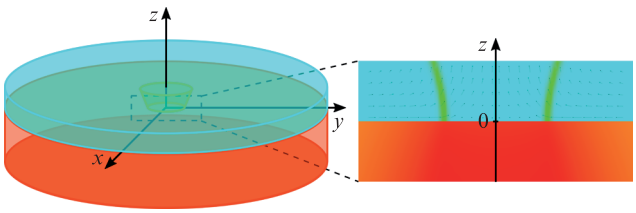

Рис.1. Геометрия модели.

где z_0 – координата плоскости перетяжки; m – топологический заряд оптического вихря.

Для описания движения жидкости решалось стационарное уравнение Навье – Стокса и непрерывности (6) в приближении Буссинеска – Обербека (7):

$$\rho(\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu\left(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}\right)\right) + \boldsymbol{F}(r,z),$$
$$\rho \nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0, \tag{6}$$

$$\boldsymbol{F}(r,z) = \boldsymbol{g}\rho_0(1 - \beta(T - T_0)). \tag{7}$$

Здесь μ, p – динамическая вязкость и давление жидкости; $\boldsymbol{F}(r, z)$ – равнодействующая объемных сил; T_0 – начальная температура воды, равная комнатной (293.15 К); ρ_0 – плотность воды при температуре T_0; $\boldsymbol{g}$ – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного теплового расширения воды, который считался постоянным и равным 0.0002 К$^{-1}$. При расчетах учитывалась температурная зависимость динамической вязкости воды [25].

Температура на внешних поверхностях жидкости и светофильтра полагалась равной комнатной, а поверхность воды – неподвижной (условие прилипания). Предполагалось, что на поверхности подложки в присутствии градиента температуры проявляется эффект теплового скольжения. В этом случае для поперечной составляющей скорости жидкости должно выполняться следующее граничное условие:

$$u_\tau = K_{TS} \frac{\mu}{\rho T} \nabla_\tau T. \tag{8}$$

Коэффициент теплового скольжения K_{TS} полагался равным 0.25.

Уравнения (1), (2), (6) с соответствующими граничными условиями решались численно в пакетах Elmer и Scilab. Результаты моделирования представлены ниже.

Моделирование потока жидкости в конвекционной ловушке с преградой. Дополнительно был рассмотрен случай, когда на поверхности подложки по контуру светового кольца расположена преграда (ступенька), которая представляет собой кольцо полиметилметакрилата квадратного сечения. Сторона квадрата (высота ступеньки) составляет 4 мкм. Выбор размера и материала ступеньки определялись размерами и материалом микрообъектов, используемых в экспериментах по манипулированию. В расчетах предполагалось, что излучение проходит через данную преграду без какого-либо изменения. Таким образом, рассматривалось влияние ступеньки только на движение потока жидкости в конвекционной ловушке. Эта ситуация в нулевом приближении имитирует случай кольцевой конвекционной ловушки с захваченными микрообъектами в области освещения. Задача также имеет осевую симметрию. Решение определялось для стационарного случая численными методами. Описание задачи соответствует рассмотренной выше, при этом распределение температуры в пределах преграды будет описываться уравнением теплопереноса (2) с коэффициентом теплопроводности соответствующего материала преграды и с учетом того, что объемная плотность теплового источника равна нулю. Граничные условия определялись стандартными условиями прилипания для поверхности жидкости и поверхности ступеньки и эффектом теплово-

го скольжения из-за присутствия градиента температуры на поверхности подложки.

3. Основные свойства кольцевой конвекционной ловушки

Полученные в результате моделирования пространственные распределения температуры относительно поверхности кюветы при освещении ее пучком лазерного излучения с распределением интенсивности в форме кольца представлены на рис.2,*а*. При этом, как видно из рис.2,*б*, при радиусе кольца R_0 = 15 мкм распределения температуры качественно одинаковы для всех мощностей излучения (30, 50 и 70 мВт), изменяются только ее количественные значения. На рис.2,*б* приведена также зависимость $T(r)$ для R_0 = 30 мкм при мощности излучения 100 мВт (последняя была увеличена в два раза, чтобы плотность мощности не изменялась при увеличении размера кольца). Из рисунка видно, что, как и следовало ожидать, температура максимальна на линии кольца, плавно уменьшается при удалении от его внешней границы и практически не меняется внутри кольца.

Результаты расчета распределения скорости движения потока жидкости при освещении образца лазерным пучком мощностью 50 мВт с тем же распределением интенсивности и радиусом 15 мкм представлены на рис.3,*а*. На рис.3,*б* и *в* показаны изменения радиальной и вертикальной проекций скорости перемещения слоя жидкости на высоте 2 мкм от дна кюветы для радиусов кольца 15 и 30 мкм при мощности излучения 50, 70, 100 и 140 мВт соответственно. Как и в рассмотренном выше случае (см. рис.2,*б*), увеличение мощности падающего излучения с

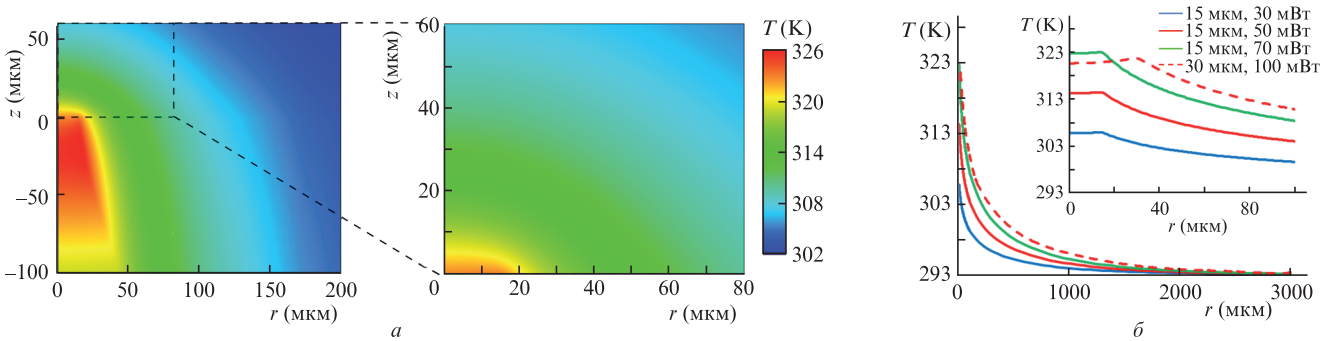

Рис.2. Полученные численным моделированием пространственные распределения температуры относительно центра поверхности кюветы при освещении ее лазерным пучком мощностью P_0 = 70 мВт в форме кольца радиусом R_0 = 15 мкм (*а*), а также распределения температуры по поверхности кюветы (z = 0) при R_0 = 15 мкм, P_0 = 30, 50, 70 мВт и R_0 = 30 мкм, P_0 = 100 мВт (*б*).

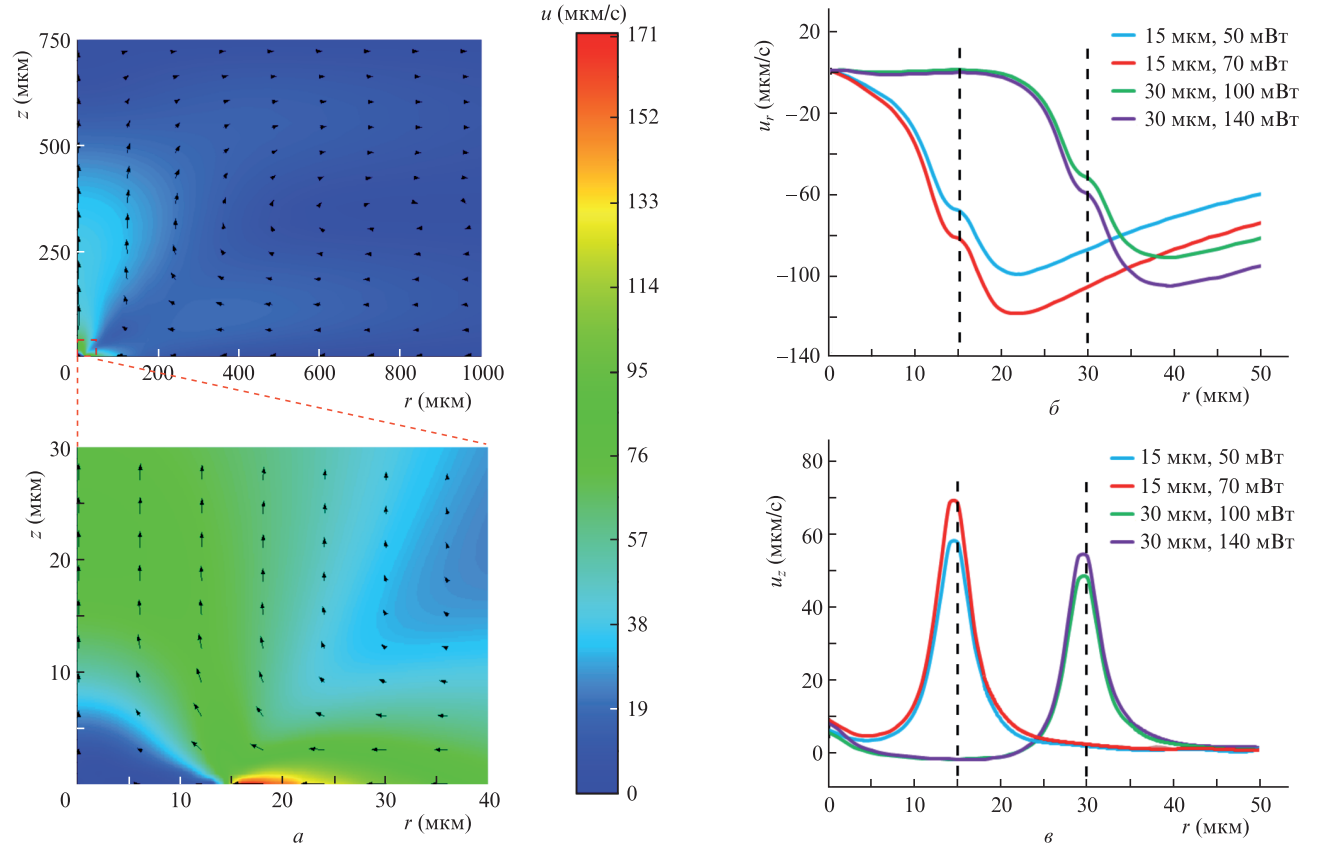

Рис.3. Полученные численным моделированием пространственные распределения скорости конвекционного потока при R_0 = 15 мкм и P_0 = 50 мВт (*а*), а также зависимости радиальной (*б*) и вертикальной (*в*) проекций скорости потока от радиальной координаты на высоте 2 мкм от дна кюветы при различных значениях радиуса и мощности излучения кольцевого пучка.

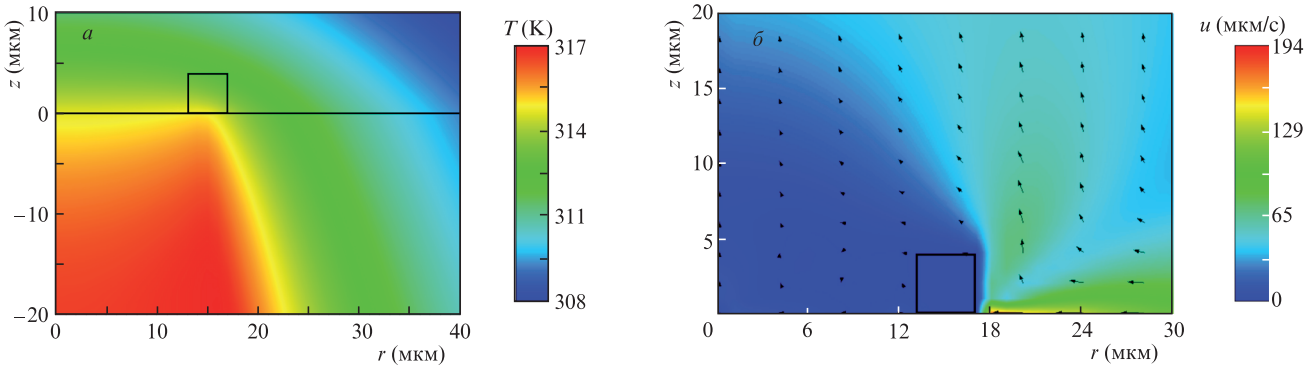

Рис.4. Пространственные распределения температуры (*а*) и скорости движения потока жидкости (*б*) в конвекционной ловушке с квадратной преградой при мощности излучения P_0 = 50 мВт, радиусе светового кольца R_0 = 15 мкм и высоте преграды 4 мкм.

увеличением радиуса кольца обеспечивало неизменность плотности мощности вдоль светового контура. Из рис.3,*б* и *в* видно, что величина радиальной составляющей скорости при приближении к световому кольцу сначала растет, а затем начинает уменьшаться, достигая нуля уже в пределах кольца, при этом вертикальная составляющая достигает максимального значения на расстояниях, совпадающих с радиусом кольца. Такое поведение характерно для всех значений мощности лазерного излучения.

На рис.4 приведены результаты моделирования распределения температуры и скорости потока жидкости в кювете при наличии ступеньки, размеры и материал которой соответствуют таковым для захватываемых микрообъектов. Можно считать, что рассматриваемая ситуация в некотором приближении моделирует изменения распределения температуры и скорости потока жидкости после захвата микрочастиц световым кольцом.

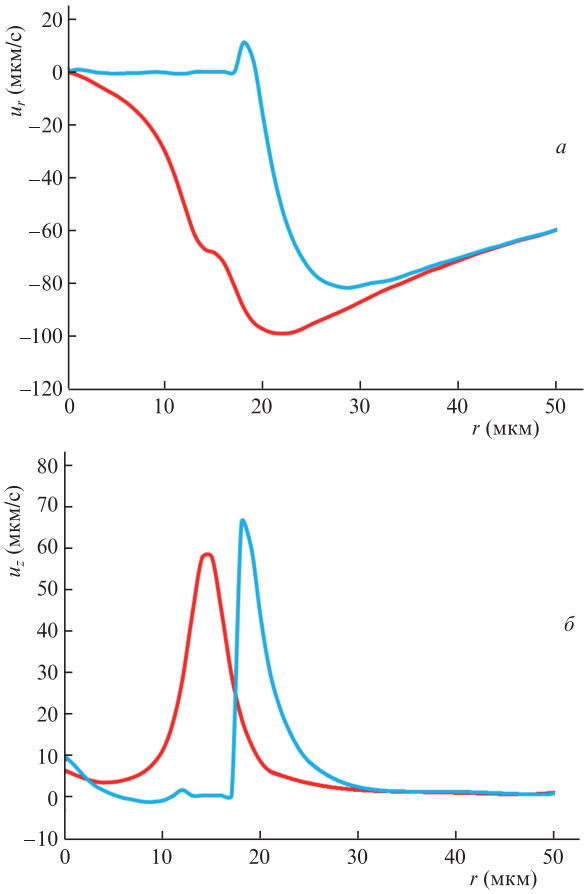

Рис.5. Зависимости радиальной (*а*) и вертикальной (*б*) проекций скорости потока от радиальной координаты на высоте 2 мкм от дна кюветы при наличии (голубая кривая) и в отсутствие квадратной ступеньки из полиметилметакрилата (красная кривая).

Сравнение результатов распределения радиальной и вертикальной проекций скорости потока жидкости при наличии и в отсутствие полимерной преграды вдоль линии интенсивности светового поля показано на рис.5. Как следует из приведенных зависимостей, наличие преграды приводит к более раннему изменению направления потока, большему увеличению вертикальной составляющей и уменьшению до нуля радиальной компоненты скорости потока до достижения светового кольца. Результаты численного моделирования показали, что независимо от мощности излучения радиальная компонента скорости потока достигает как максимального, так и нулевого своего значения практически на одних и тех же расстояниях от центра светового кольца. При этом повышение мощности приводит к увеличению вертикальной компоненты скорости (восходящего потока).

Таким образом, результаты численного моделирования позволили выявить основные свойства конвекционной ловушки в форме кольца. Установленные закономерности были подтверждены экспериментально.

4. Эксперимент

Схема установки для проведения экспериментов с вихревой конвекционной оптической ловушкой [6] показана на рис.6.

В качестве источника излучения использовался DPSS-лазер с длиной волны излучения 0.53 мкм (суммарная мощность излучения в рабочей зоне варьировалась от 10 до 100 мВт). Желаемое распределение светового поля (кольца) формировалось с помощью пространственно-временного модулятора света (ПВМС) HOLOEYE PLUTO-2-NIR-011 и фокусировалось микрообъективом (40$^{\times}$) на заданную плоскость – дно размещенной на столике микроскопа кюветы с образцами. Кювета диаметром 27 мм с высотой пластиковых стенок 2 мм заполнялась водой, в которую был погружен нижний торец микрообъектива. Толщина слоя воды между нижней поверхностью микрообъектива и дном кюветы составляла 0.75 мм. Оранжевый светофильтр ОС 13 толщиной 2 мм, поглощающий излучение с длиной волны 0.53 мкм, служил дном кюветы. Образцы представляли собой взвешенные в дистиллированной воде микрочастицы латекса разного диаметра. Поглощение лазерного излучения светофильтром

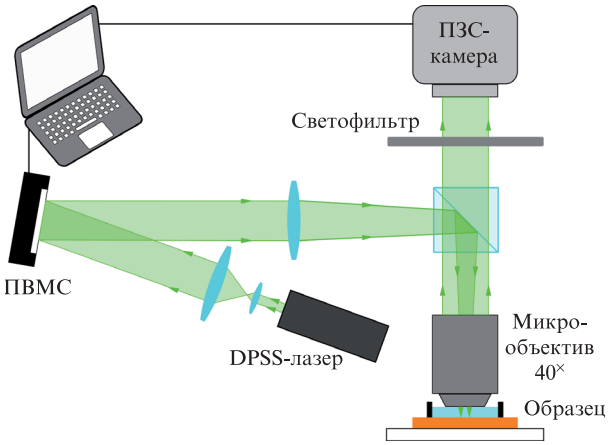

Рис.6. Схема вихревой оптоконвекционной ловушки.

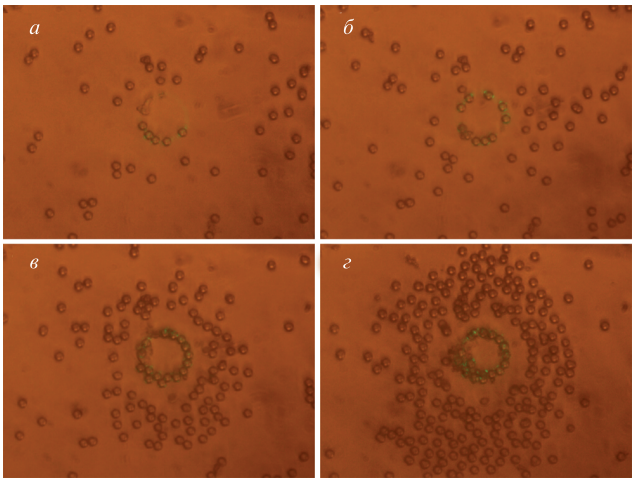

Рис.7. Видеокадры, иллюстрирующие захват микросфер латекса диаметром 4 мкм при суммарной мощности излучения оптотермической ловушки 33 мВт.

приводило к возникновению градиента температур в стеклянной подложке и жидкости, в результате чего образовывались конвекционные потоки.

Вихревые кольца формировались с помощью вихревых аксиконов, фазовая задержка которых определяется как

$$\Phi(r,\theta) = \alpha r + m\theta,\ m = 0,\ \pm 1,\ \pm 2, \ldots, \qquad (9)$$

где α – параметр аксикона; m – топологический заряд. Для работы с пространственным модулятором света была разработана специальная программа, одной из возможностей которой является формирование в рабочей плоскости микроскопа распределений интенсивности излучения в виде колец. В качестве фазовых распределений использовались распределения (9). Диаметр кольца, знак и величину топологического заряда можно было менять в реальном времени во время проведения эксперимента непосредственно из окна программы. Таким образом, данная установка позволяла формировать оптоконвекционные ловушки в виде вихревых колец разного диаметра и с разным топологическим зарядом.

5. Результаты эксперимента и их обсуждение

Во всех экспериментах, как и в случае точечной тепловой ловушки [6], независимо от величины и знака топологического заряда светового пучка наблюдалось довольно быстрое движение достаточно сильно удаленных микрочастиц к световому кольцу за счет конвекции. При этом важно было подобрать такой уровень мощности лазерного излучения, чтобы частицы захватывались кольцом – выстраивались вдоль его границы, а не выносились вверх восходящими конвективными потоками жидкости. Возможность захвата микрочастиц в радиальном направлении и необходимость их удержания в вертикальном направлении путем контроля вертикальной составляющей скорости потока жидкости, добиваясь баланса между силой тяжести, архимедовой силой, подъемной силой потока жидкости и силой светового давления, следует из результатов моделирования, представленных на рис.3. Приведенные зависимости показывают, что радиальная составляющая скорости потока уменьшается внутри кольца, а вертикальная составляющая достигает максимума на расстояниях, совпадающих с его радиусом (это подробно обсуждалось в работе [6] в случае точечной тепловой ловушки). Как отмечалось в разд.3, результаты моделирования показали, что для кольцевой конвекционной ловушки по мере приближения к освещенной области характерно менее резкое увеличение вертикальной составляющей скорости потока, чем в случае точечной ловушки. В экспериментах это позволило осуществлять эффективный захват в более широком, чем у точечной тепловой ловушки, диапазоне мощностей излучения и плавно управлять процессом манипуляции, изменяя мощность. Так, для частиц диаметром 4 мкм эффективный захват световым кольцом наблюдался при суммарной мощности излучения в рабочей зоне в диапазоне от 27 до 100 мВт. В качестве примера на рис.7 приведены видеокадры, иллюстрирующие захват микросфер латекса диаметром 4 мкм при суммарной мощности излучения оптотермической ловушки 33 мВт. Видно, что по мере заполнения светового кольца микросферами вокруг него формируется зона, свободная от микрочастиц (рис.7,*в* и *г*).

Наблюдаемое в эксперименте образование свободного пространства вокруг светового кольца с уже захваченными микрообъектами хорошо объясняют результаты моделирования поведения скорости потока жидкости при наличии преграды. В этом случае изменение направления потока происходит раньше, чем в отсутствие преграды (см. рис.4,*б*), радиальная компонента скорости потока жидкости уменьшается до нуля, не достигая границы кольца (рис.5,*а*), а вертикальная составляющая увеличивается сильнее (рис.5,*б*).

При ненулевом орбитальном моменте (наличии топологического заряда) используемого светового пучка захваченные им частицы движутся вдоль его контура (по линии поперечного распределения интенсивности). Направление движения частиц определяется знаком топологического заряда, а их угловая скорость – его величиной. Подобные эксперименты мы проводили ранее для чисто оптических ловушек различных форм [14, 26, 27], в том числе в виде двух коаксиальных колец [14], и для оптотермической ловушки в виде спирали Архимеда [6]. Зависимость угловой скорости микрочастиц диаметром 4 мкм от величины топологического заряда при суммарной мощности излучения 36 мВт представлена на рис.8. Увеличение либо уменьшение мощности лазерного излу-

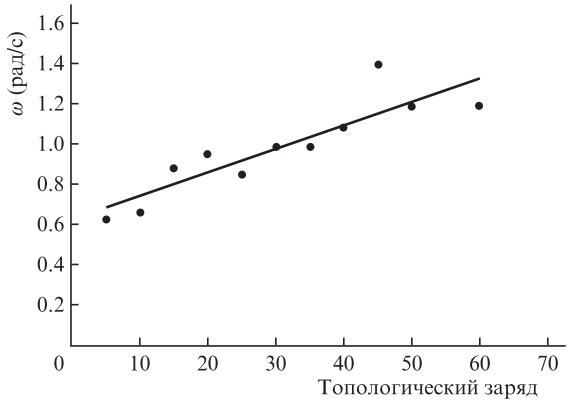

Рис.8. Зависимость угловой скорости движения микрочастиц латекса диаметром 4 мкм от топологического заряда пучка при мощности пучка P_0 = 36 мВт.

чения приводит соответственно к увеличению либо уменьшению угловой скорости микрочастиц. Особенности приведенной на рис.8 зависимости требуют дальнейшего исследования.

Также были выполнены эксперименты, в которых диаметр светового кольца менялся в реальном времени при постоянных значениях топологического заряда и суммарной мощности светового пучка. Увеличение диаметра кольца приводит к уменьшению угловой скорости частиц, и наоборот. Эксперименты, выполненные с микросферами различного диаметра, подтвердили еще один эффект, наблюдавшийся ранее для чисто оптической ловушки: захват частиц наиболее эффективен, когда их размеры сопоставимы с толщиной светового кольца.

6. Заключение

Натурные и численные эксперименты продемонстрировали возможности вихревой кольцевой оптотермической ловушки для захвата и манипулирования прозрачными микрочастицами. Благодаря конвекционным потокам удается реализовать захват частиц из относительно далеких областей и быстро их перемещать, используя относительно невысокие мощности излучения. Основное преимущество оптотермической ловушки над чисто оптической заключается в возможности эффективно группировать микрообъекты в заданных конфигурациях. Кольцевая ловушка позволяет более плавно, чем точечная оптотермическая ловушка, управлять движением частиц за счет изменения мощности излучения. При этом наличие углового орбитального момента вызывает движение захваченных частиц по кольцу с угловыми скоростями, определяемыми величиной и знаком топологического заряда (как и в случае вихревой чисто оптической ловушки). Использование пространственного модулятора света PLUTO-2-NIR-011 позволило в реальном времени изменять топологический заряд вихря и диаметр светового кольца. Рассмотренная модель кольцевой конвекционной ловушки с преградой в области освещения объясняет наблюдаемую в экспериментах свободную область вокруг кольца с уже захваченными микрообъектами.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 20-02-00671).

1. Zemánek P., Volpe G., Jonáš A., Brzobohatý O. *Adv. Opt. Photon.*, **11**, 577 (2019); https://doi.org/10.1364/AOP.11.000577.
2. Zenteno-Hernandez J.A., Vázquez Lozano J., Sarabia-Alonso J.A., Ramírez-Ramírez J., Ramos-García R. *Opt. Lett.*, **45**, 3961 (2020); https://doi.org/10.1364/OL.394647.
3. Lin L., Hill E.H., Peng X., Zheng Y. *Acc. Chem. Res.*, **51** (6), 1465 (2018). DOI: 10.1021/acs.accounts.8b00102.
4. Hosokawa Ch., Tsuji T., Kishimoto T., Okubo T., Kudoh S.N., Kawano S. *J. Phys. Chem. C*, **124** (15), 8323 (2020). DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b11663.
5. Flores-Flores E., Torres-Hurtado S.A., Páez R., Ruiz U., Beltrán-Pérez G., Neale S.L., Ramirez-San-Juan J.C., Ramos-García R. Biomed. *Opt. Express*, **6** (10), 4079 (2015). DOI: 10.1364/BOE.6.004079.
6. Kotova S.P., Korobtsov A.V., Losevsky N.N., Mayorova A.M., Samagin S.A. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **268**, 107641 (2021); https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107641.
7. Zhan W., Wu R., Gao K., Zheng J., Song W. *Lab Chip*, **20**, 4063 (2020). DOI: 10.1039/d0lc00787k.
8. Braun M., Thalheim T., Günther K., Mertig M., Cichos F. *Proc. SPIE*, **9922**, 9922OZ (2016); https://doi.org/10.1117/12.2239481.
9. Kumar S., Gunaseelan M., Vaippully R., Kumar A., Ajith M., Vaidya G., Dutta S., Roy B. *Biomed. Opt. Express*, **11**, 3555 (2020); https://doi.org/10.1364/BOE.392901.
10. Liu Z., Lei J., Zhang Yu., Tang X., Zhang Y., Zhao E., Yang J., Yuan L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **33**, 1881 (2016); https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.001881.
11. Yang Y.T., Namura K., Tsai M.C., Suzuki M. *Results Eng.*, **6**, 100097 (2020).
12. Ortega-Mendoza J.G., Chávez F., Zaca-Morán P., Felipe C., Pérez-Sánchez G.F., Beltran-Pérez G., Goiz O., Ramos-Garcia R. *Opt. Express*, **21**, 6509 (2013); https://doi.org/10.1364/OE.21.006509.
13. Korobtsov A.V., Kotova S.P., Losevsky N.N., Mayorova A.M., Prokopova D.V. *Proc. 2020 IEEE Inter. Conf. Laser Optics (ICLO)*. DOI:10.1109/ICLO48556.2020.9285704.
14. Afanasiev K., Korobtsov A., Kotova S., Losevsky N., Mayorova A., Patlan V., Volostnikov V. *J. Phys. Conf. Ser.*, **414**, 012017 (2013). DOI:10.1088/1742-6596/414/1/012017/.
15. Šiler M., Jákl P., Brzobohatý O., Zemánek P. *Opt. Express*, **20** (22), 24304 (2012).
16. Porfirev A.P., Skidanov R.V. *Appl. Opt.*, **52** (25), 6230 (2013).
17. Коробцов А.В., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М., Самагин С.А. *Квантовая электроника*, **44**, 1157 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 1157 (2014)].
18. Liu Z., Tang X., Zhang Y., Zhang Y., Ma L., Zhang M., Yuan L. *Opt. Lasers Eng.*, **131**, 106119 (2020).
19. Rodrigo J.A., Angulo M., Alieva T. *Photonics Res.*, **9** (1), 1 (2021).
20. Chen Z., Jiang Y. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **244**, 106851 (2020).
21. Porfirev A.P., Dubman A.B., Porfiriev D.P. *Opt. Lett.*, **45** (6), 1475 (2020).
22. Kotova S.P., Mayorova A.M., Samagin S.A. *J. Opt.*, **20** (5), 055604 (2018).
23. Yu J., Miao C., Wu J., Zhou C. *Photonics Res.*, **8** (5), 648 (2020).
24. http://lzos.ru/upload/iblock/818/818322c0e82195aba7b3c9b1441649b9.pdf.
25. *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th Edition.* Ed. by David R.Lide (CRC Press, 2003).
26. Abramochkin E.G., Kotova S.P., Korobtsov A.V., Losevsky N.N., Mayorova A.M., Rakhmatulin M.A., Volostnikov V.G. *Laser Phys.*, **16** (5), 842 (2006).
27. Абрамочкин Е.Г., Афанасьев К.Н., Волостников В.Г., Коробцов А.В., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М., Разуева Е.В. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **72**, 76 (2008).