

# ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Мохаммед Али Яхья Али АЛЬ-МУЗАЙКЕР<sup>1</sup>

Виктор Михайлович ФЛЯГИН<sup>2</sup>

Гардун Лукман ОБАИД ОБАИД<sup>3</sup>

Наталья Анатольевна ИВАНОВА<sup>4</sup>

УДК 532.68; 544.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МИКРОЧАСТИЦ В ТОНКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ\*

<sup>1</sup> аспирант, Физико-технический институт, инженер-исследователь,  
научно-исследовательская лаборатория фотоники и микрофлюидики, X-BIO,  
Тюменский государственный университет  
m.al-muzajker@utmn.ru

<sup>2</sup> кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
научно-исследовательская лаборатория фотоники и микрофлюидики, X-BIO,  
Тюменский государственный университет  
v.m.flyagin@utmn.ru

<sup>3</sup> магистр, Тюменский индустриальный университет, лаборант-исследователь,  
научно-исследовательская лаборатория фотоники и микрофлюидики, X-BIO,  
Тюменский государственный университет  
g.obaid@utmn.ru

<sup>4</sup> кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры  
прикладной и технической физики, Физико-технический институт, заведующий  
научно-исследовательской лабораторией фотоники и микрофлюидики, X-BIO,  
Тюменский государственный университет  
n.ivanova@utmn.ru

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-31-90099 и грант № 19-02-00937А).

---

**Цитирование:** Аль-Музайкер М. Я. Исследование переноса микрочастиц в тонком слое жидкости под воздействием градиента температуры / М. Я. Аль-Музайкер, В. М. Флягин, Г. Л. Обаид Обаид, Н. А. Иванова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 2 (26). С. 10-26. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-10-26

---

#### **Аннотация**

Исследованы основные закономерности процесса переноса микрочастиц полиэтилена в слое летучей и нелетучей жидкости термокапиллярными течениями при локальном нагреве и охлаждении. Показана возможность создания круговых и кольцевых сборок частиц (паттернов) путем индуцирования положительного и отрицательного радиально-направленных градиентов температуры. Разработана методика и компьютерная программа для количественной оценки исследуемого процесса переноса, которая заключается в измерении площади паттерна частиц, формируемого при нагреве и площади, освобождаемой от частиц (площадь очистки) при охлаждении на последовательности кадров видеозаписи, полученной с помощью оптического микроскопа. Методика основана на сравнении интенсивности пикселей изображения относительно порогового значения и подсчете общей площади пикселей, занятых или не занятых частицами.

Установлено влияние таких параметров эксперимента, как толщина слоя несущей жидкости при постоянном числе частиц, испарение жидкости и соотношение плотностей частиц и жидкости, на размер результирующего паттерна и время достижения стационарного состояния. Показано, что площадь результирующего паттерна при локальном нагреве и площадь очистки при локальном охлаждении имеет тенденцию к уменьшению с увеличением толщины слоя, при этом время достижения стационарного состояния не зависит от толщины слоя, но зависит от свойств жидкости и соотношения плотностей частиц и жидкости.

#### **Ключевые слова**

Сборка частиц, тепломассоперенос, тепловой эффект Марангони, источники и стоки тепла, градиент температуры.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-10-26

#### **Введение**

Манипулирование микрочастицами и биологическими объектами, находящимися в жидкости, или формирование сборки частиц желаемой структуры и морфологии на поверхностях имеют важное значение в различных химических и биомедицинских исследованиях [2, 20], изготовлении новых материалов [6], создании покрытий с заданными функциональными свойствами и технология очистки поверхностей [11, 13, 19] в электронике и оптике. В большинстве случаев механизм самоорганизации или агрегации частиц определяется действием капиллярных потоков, которые переносят частицы в области интенсивного

испарения в самопроизвольно испаряющихся жидкостях. Ярким примером самопроизвольной организации частиц в испаряющихся каплях является эффект кофейного кольца [1, 19], когда взвешенные частицы образуют кольцевую структуру после высыхания капли.

На сегодняшний день подходы к формированию требуемой морфологии (структуры) частиц в испаряющихся коллоидных растворах можно разделить на пассивные [1, 5, 7, 12, 14] и активные [6, 9, 11, 13]. Пассивные методы реализуются, например, путем создания рельефа на поверхности с помощью травления, или литографии [5], или испарительной литографии (в частности, использования масок для испарения в открытых системах) [7, 12, 14]. Однако эти методы обладают рядом недостатков:

- 1) невозможность манипулировать частицами, регулируя параметры управления в режиме реального времени,
- 2) необходимость предварительной подготовки поверхности с использованием сложных экспериментальных методов,
- 3) технические ограничения применимости масок.

Активные методы основаны на приложении к системе внешних воздействий, например, акустических волн [3, 6, 18], инерционного поля, электрических и магнитных полей [10]. Воздействие звуковыми волнами позволяет создать периодические поля давления (стоячие акустические волны), которые приводят к соответствующему распределению частиц в большом масштабе. Недавно был разработан точный акустический пинцет [8] для улавливания отдельных частиц. Центрифугирование менее эффективно, поскольку дает только одну конфигурацию распределения частиц по поверхности. Применимость методов, основанных на магнитных эффектах и диэлектрофорезе, ограничена конкретными свойствами (поляризуемость, восприимчивость, проводимость) частиц и/или среды.

Использование оптического пинцета хотя и обеспечивает высокоточное манипулирование отдельными частицами, но для управления группами частиц требуется сложная оптическая установка и дорогостоящие оптические приборы для временных и пространственных преобразований светового пучка, что не позволяет реализовать компактные инструменты. Наиболее перспективными являются методы основанные на действии течения Марангони, генерируемого в жидкостях путем приложения градиентов концентрации поверхностно-активного вещества (ПАВ) [11, 16, 17] или температуры [4, 15].

Потоки Марангони подавляют эффект самопроизвольного образования кофейных колец, позволяя собирать частицы в зоне воздействия и создавать требуемые распределения на подложках. Воздействие потоком паров ПАВ [9] или облучение светом определенной длины волны коллоидных растворов, содержащих светочувствительные ПАВ [11, 16], позволяют создавать положительные или отрицательные градиенты поверхностного натяжения, которые, в свою очередь, позволяют контролировать направление потоков жидкости, переносящих частицы, и, следовательно, позволяют контролировать процесс осаждения частиц. Однако использование ПАВ ограничивает применимость способа, поскольку

молекулы вещества остаются в агрегатах частиц и могут изменить функциональные свойства полученного материала. Кроме того, применение таких способов требует поддержание расхода ПАВ для нанесения паттерна.

Тепловой механизм Марангони представляется более перспективным, поскольку локальное (минимальное) воздействие на коллоидную систему [15, 16] позволяет улавливать частицы, расположенные на больших расстояниях, вплоть до единиц сантиметров, от источника тепла. Кроме того, локальное повышение температуры не превышает 15 °С, что сравнимо с нагревом при воздействии акустических полей [8]. Однако эффективность и гибкость метода ограничена тем, что силы Марангони действуют только в одном направлении (от источника тепла), не позволяя осуществлять динамическое управление процессами осаждения частиц аналогично фотохимическому эффекту Марангони [9, 13].

В работе предполагается применение термокапиллярного эффекта Марангони, управляемого источниками и стоками тепла, для создания заданной морфологии частиц на твердых подложках. Уникальность исследования заключается в том, что предлагается эффективная методика динамического управления процессом самосборки частиц, позволяющая контролировать процесс в режиме реального времени путем подстройки направления и величины термокапиллярной силы, а также создавать кластеры любой конфигурации с высоким пространственным разрешением. Кроме того, манипуляция частицами в режиме теплостока представляется наиболее перспективной для биологических применений, поскольку не вызывает термического разрушения живых микроорганизмов.

### Экспериментальные методы

Для экспериментов была изготовлена специальная ячейка (рис. 1). Подложкой служило сварочное стекло с вмонтированным в нее нагревателем (медный стержень диаметром 1,6 мм), соединенным с элементом Пельтье. На стекло эпоксидным клеем приклеено кольцо из полиметилметакрилата с внутренним диаметром 20 мм так, чтобы нагреватель располагался в центре ячейки.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of the experimental setup

В экспериментах использовали полидисперсные частицы полиэтилена неправильной формы (характерный размер от 50 до 200 мкм, плотность  $\rho_p = 925 \text{ кг/м}^3$ ) и жидкости изопропанол ( $\rho_l = 786 \text{ кг/м}^3$ ) и полиметилсилоксан ПМС-10 ( $\rho_l = 935 \text{ кг/м}^3$ ) (рис. 2). Эксперименты проводили в слоях толщиной от 320 до 690 мкм, при неизменной массе взвешенных частиц (3 мг либо 15 мг). Методика эксперимента зависела от используемой жидкости. В случае с изопропиловым спиртом микрочастицы помещали на дно ячейки (подложку), добавляли спирт и перемешивали частицы наконечником пипетки для получения равномерного распределения частиц на поверхности подложки. Затем проводили эксперимент с нагревом или с охлаждением, по завершении которого суспензию оставляли до полного высыхания спирта. При нагреве и высыхании спирта коалесценции и коагуляции не наблюдалось, а температура нагревателя была недостаточна для спекания частиц между собой, поэтому для повторения эксперимента достаточно было заново залить нужный объем спирта, и размещать частицы для равномерного их распределения по слою.

В случае с ПМС-10 частицы помещали в ячейку, затем наносили слой масла минимальной толщиной 320 мкм, перемешивали частицы наконечником пипетки и после достижения равновесного состояния включали нагреватель. После проведения опыта нагреватель отключали и оставляли систему до достижения полного теплового равновесия с окружающей средой. Эксперименты при установленной толщине слоя проводились несколько раз в режиме нагрева и в режиме охлаждения. Затем в ячейку добавляли ПМС-10 для увеличения толщины слоя и повторяли опыты.

Для исследования геометрии/морфологии получаемых на поверхности подложек распределений частиц — кластеров — осуществляли запись процесса с помощью оптического микроскопа Axio Zoom.V16 (объектив Apo Z 1.5×/0.37 FWD 30 mm), оснащенного камерой ZEISS AxioCam 506 color.

Для количественной оценки по последовательности кадров измеряли площадь, занятую частицами при нагревании, и площадь, освобождаемую от частиц при охлаждении, для разных начальных толщин слоев. Методика расчета была следующая (рис. 3). Поскольку подложка изготовлена из черного стекла,

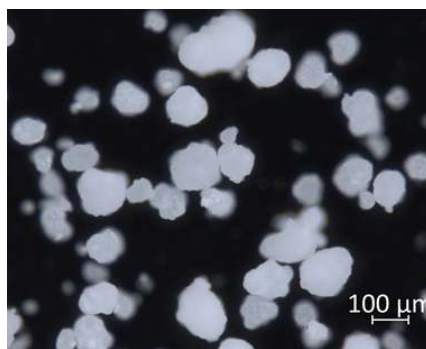


Рис. 2. Фото частиц, использованных в экспериментах

Fig. 2. Photo of particles that were used in experiments

интенсивность пикселей в изображении подложки в цифровом представлении довольно мала и лежит в диапазоне 0...40 (здесь и далее интенсивность пикселей — одна из величин цветовой модели HSI, отвечающая за яркость свечения пикселя). Белые частицы полистирола, наоборот, имеют в своем изображении пиксели интенсивностью 130...255. Таким образом, задавая порог интенсивности равным 90, можно судить о наличии или отсутствии частицы в отдельных пикселях изображения. Для анализа каждый кадр масштабировали до размера  $800 \times 600$  точек, обрезали боковые полосы по 100 точек с каждой стороны для получения квадратного снимка  $600 \times 600$  точек, задавали порог интенсивности равным 90 и формировали массив из  $600 \times 600$  целочисленных элементов, в каждом из которых хранилась информация о наличии (значение, равное 1) или отсутствии (значение, равное 0) частицы. Затем, зная положение нагревателя, рассчитывали количество одинаковых (содержащих одинаковые значения) элементов, граничащих между собой по одному из 4 направлений (верх, низ, право, лево), начиная с элемента в центре нагревателя. Так, например, при обработке ячейки 3:3 в суммарную площадь будут учтены ячейки 4:3 и 3:4 (рис. 3). Через них добавляются ячейки 4:2, 4:4, 5:3, 2:4 и т. д. Ячейки 2:2 и 1:1 не будут добавлены, т. к. не имеют общей границы с другими ячейками. Добавление по диагональной границе не было реализовано из тех соображений, что частицы, находящиеся в ячейках 4:2, 4:4, 2:4, будут добавлены через другие граничащие с ними ячейки, а частицы в ячейках 1:1 и 2:2 на рассматриваемом кадре находятся в движении и еще не вошли в кластер. По масштабу кадра рассчитывали площадь одного элемента, а затем по сумме однотипных граничащих между собой элементов — общую площадь.

Для режима «нагрев» строили зависимости конечной площади паттерна от толщины слоя и временные зависимости нормированной площади паттерна  $\bar{S}(t) = S(t)/S_\infty$  (где  $S(t)$  — текущая площадь,  $S_\infty$  — финальная площадь). В режиме «охлаждение» нормировку выполняли на площадь ячейки  $S_0$  как максимально возможную при очистке поверхности. Измерение тепловых полей жидкости выполняли с помощью ИК камеры (FLIR 655sc, 7,5-14 мкм).



Рис. 3. Пояснение расчета суммарной площади паттерна. Светлые квадраты — ячейки, содержащие частицы

Fig. 3. The explanation of calculating the cluster's total area. The light squares are the cells containing the particles



## Результаты экспериментов и их обсуждение

### *1. Режим нагрева (положительный градиент поверхностного натяжения)*

В режиме нагрева на поверхности слоя возникает положительный градиент поверхностного натяжения  $\partial\gamma/\partial r = \partial\gamma/\partial T \cdot \partial T/\partial r > 0$ , где  $\gamma$  — поверхностное натяжение жидкости,  $\partial\gamma/\partial T < 0$  — температурный коэффициент поверхностного натяжения,  $\partial T/\partial r < 0$  — градиент температуры, который приводит к возникновению в слое термокапиллярной (ТК) конвекции. В результате происходит перенос нагретой жидкости на холодную периферию и утончение слоя в области нагревателя (рис. 4). Вихревой поток переносит частицы вблизи подложки в сторону нагревателя, где они накапливаются, собираясь в кластер в виде холмика. Со временем площадь кластера увеличивается и достигает постоянного значения,  $S_\infty$ , когда максимально возможное количество частиц собирается в центральной части ячейки (рис. 5). Частицы собираются в зоне нагревателя хаотично, не формируя плотную гексагональную упаковку. Причиной такого поведения является слабое вандерваальсово взаимодействие между частицами из-за их неправильной формы и значительного разброса размера частиц. При этом концентрация частиц в суспензии не влияет на характер упаковки (рис. 5a, 5b).

В ходе экспериментов с точечным нагревом установлено что финальная площадь кластера  $S_\infty$  уменьшается с ростом толщины слоя и не зависит от свойств несущей жидкости (рис. 6a).

Уменьшение площади кластера при изменении начальной толщины слоя обусловлено следующим. Из-за большей плотности частицы находятся в придонном слое, поэтому при возникновении ТК вихря они увлекаются придонным возвратным потоком к нагревателю. С ростом температуры нагрева и увеличением градиента поверхностного натяжения, а также интенсификацией испарения (при использовании спирта) растет ТК углубление, что уменьшает толщину слоя в окрестности нагревателя (изменение тем больше, чем ниже начальная толщина слоя). В результате локальная толщина слоя становится меньше размера частиц, и они фиксируются капиллярными силами на подложке. Рост сформированной части кластера в высоту становится невозможен, а частицы, которые придонный поток продолжает приносить к кластеру, осаждаются и удерживаются капиллярными силами по его периметру. Как результат частицы оказываются распределенными по большой площади с меньшей плотностью упаковки и появлением пустых, незаполненных участков. Отметим, что в случае масла центральная часть кластера покрыта тонкой смачивающей пленкой, а в случае изопропанола за счет испарения происходит формирование сухого пятна, покрытого частицами.

В более толстых слоях первичная сборка частиц начинается в зоне стагнации ТК вихря, так как локальная толщина слоя в зоне нагрева остается существенно больше диаметра частицы. В этом случае на частицы, переносимые возвратным течением, действует максимальная подъемная сила за счет восходящих ТК потоков жидкости в зоне нагрева, которая вызывает эффект набрасывания

новых частиц на начальную сборку. В результате в зоне нагрева формируется многослойный кластер. К моменту разрыва или существенному утончению слоя практически все частицы оказываются собранными в зоне нагревателя.

Установлено, что время полной сборки кластера не зависит от толщины слоя, но достигает разных значений для исследованных жидкостей (130 с для изопропанола, 60 с для масла) (рис. 6b, 6c). Различие в скоростях сборки может быть обусловлено соотношением плотностей  $\bar{\rho} = \rho_p / \rho_l$ , а также меньшей скоростью потоков ТК вихря из-за большей вязкости масла (2,43 мПа · с — у изопропанола и 10 мПа · с — у масла).

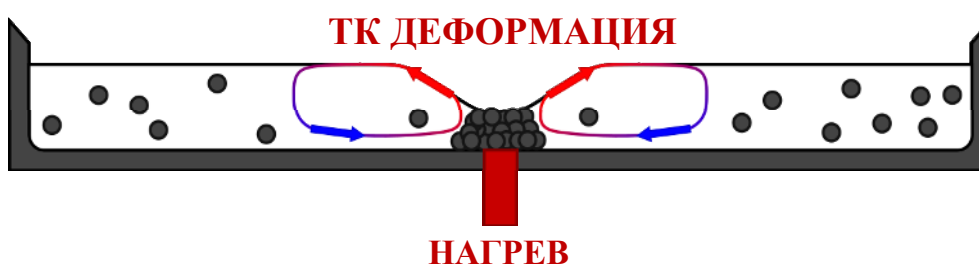


Рис. 4. Схематичное изображение процесса сборки кластера при локальном нагреве слоя суспензии

Fig. 4. Schematic of the cluster assembly under local heating of suspension layer

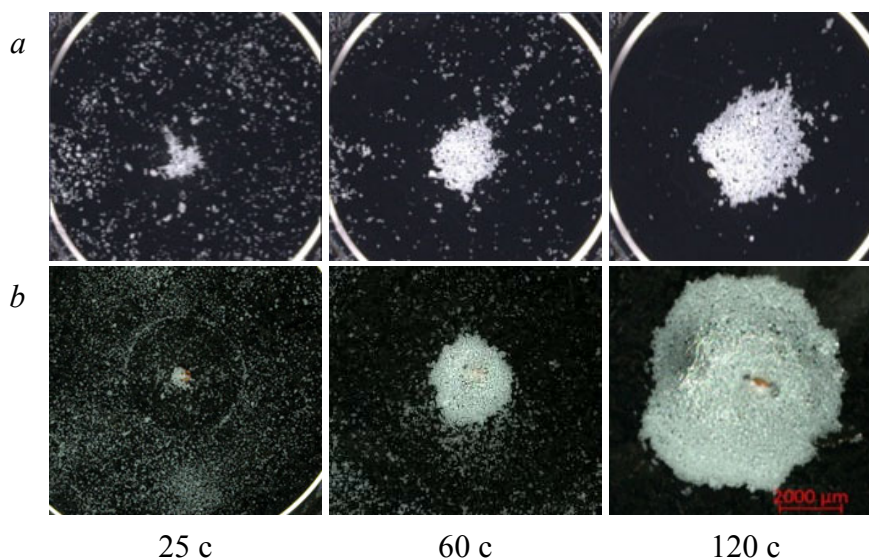


Рис. 5. Кадры формирования кластера при локальном нагреве слоя суспензии изопропанола толщиной 450 мкм. Масса частиц 3 мг (a) и 15 мг (b) соответственно

Fig. 5. Frames of the cluster formation of under local heating of the isopropanol suspension layer 450 μm thick. Particles mass is 3 mg (a) and 15 mg (b) respectively



В случае изопропанола ( $\rho_p/\rho_l = 1,3$ ) в начале процесса частицы расположены на поверхности подложки и подвержены воздействию сил адгезии. При возникновении ТК конвекции на частицы действуют сила Стокса, вызываемая вязким трением жидкости, движение которой описывается линейным профилем скорости. В результате частицы перемещаются к зоне сборки кластера, совершая вращательно-поступательное движение вдоль подложки. В этом случае движению частиц препятствует действие сил адгезии и трения с подложкой. Разные размеры частиц и, как следствие, разные скорости частиц приводят к частым столкновениям, агрегации и частичному блокированию возвратного течения.

В случае силиконового масла ( $\bar{\rho} \approx 1$ ) частицы в начале процесса остаются взвешенными, силы трения и адгезии с подложкой не влияют на их движение. Частицы плавают в жидкости и могут быть легко увлечены восходящим потоком, не препятствуя ему. Поэтому сборка кластера происходит быстрее.

Установлено, что время полной сборки кластера определяет время установления градиента температуры, т. к. наличие частиц приводит к затягиванию этого процесса по сравнению с чистой жидкостью (рис. 7). До тех пор, пока

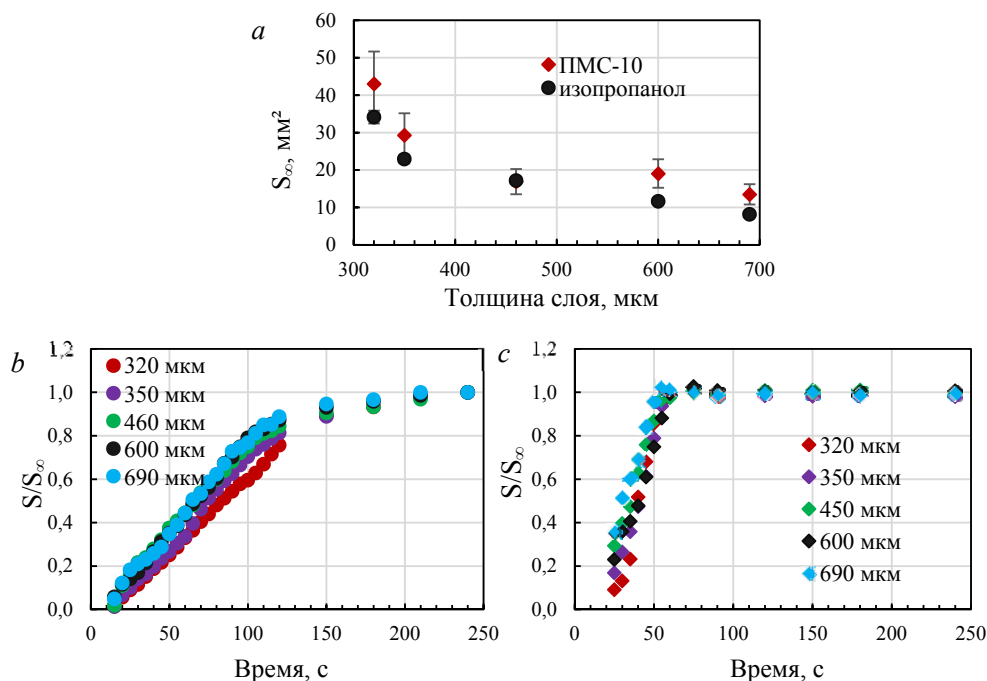


Рис. 6. Зависимость финальной площади кластера от толщины слоя изопропанола и ПМС-10 (a). Нормированная площадь кластера для различных значений толщины слоя суспензии изопропанола (b) и ПМС-10 (c)

Fig. 6. The dependence of the final area of the cluster on the thickness of the layer of isopropanol and PMS-10 (a). Nondimensional area of the cluster for different layer thickness values of suspensions of isopropanol (b) and PMS-10 (c)

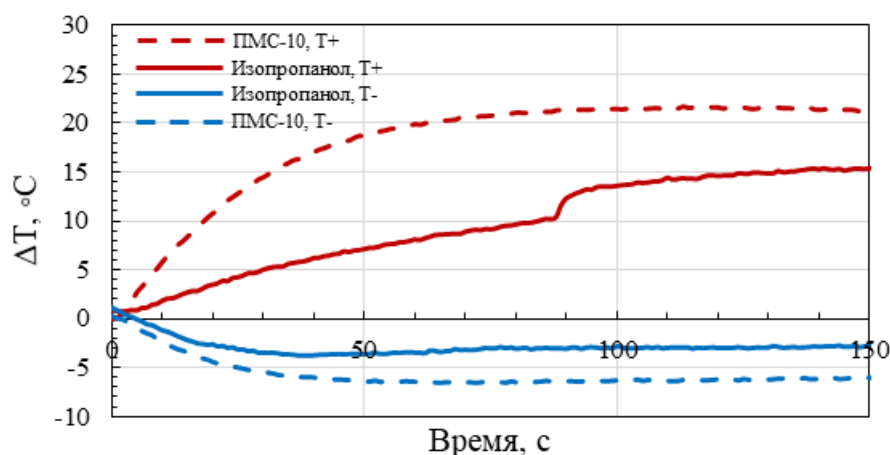


Рис. 7. Эволюция разности температуры между нагревателем и бортиком ячейки при нагреве (красные линии) и охлаждении (синие линии) слоя суспензии толщиной 600 мкм

Fig. 7. The evolution of the temperature difference between the heater and the edge of the cell during heating (red lines) and cooling (blue lines) of the suspension layer of thickness 600  $\mu\text{m}$

частицы двигаются, они за счет своих размеров и формы меняют поле скорости ТК вихря, которое, в свою очередь, связано с тепловым полем в слое. По мере роста кластера все большее количество частиц собирается в центре ячейки и становится неподвижным, а количество частиц, циркулирующих с потоком в ТК вихре, уменьшается. Из-за этого поля скоростей и температур все более приближаются к случаю ТК конвекции в слое чистой жидкости (без взвешенных частиц) и с течением времени выходят на стационар. Скорость сборки частиц, в свою очередь, определяется скоростью распространения границы ТК вихря, внутри которой частицы захватываются возвратным потоком и переносятся к формируемому кластеру.

Кроме того, на рис. 7 видно, что в слое изопропанола температура ниже по сравнению с маслом, что возможно связано с охлаждением поверхности слоя при интенсивном испарении спирта. Ступенька на эволюционной кривой  $\Delta T(t)$  для спирта (при нагреве) соответствует моменту пересыхания слоя в зоне нагревателя.

## II. Режим охлаждения (отрицательный градиент поверхностного натяжения)

При смене полярности напряжения на элементе Пельтье происходит локальное охлаждение слоя (рис. 8a). Возникает обратный ТК эффект — перенос жидкости к холодной зоне с формированием холмика и утончением слоя на периферии. В этом случае частицы увлекаются придонным ТК течением от центра к бортику (рис. 8b). Зона вблизи теплостока освобождается от частиц, вдали от стока тепла формируется кластер в виде кольца (рис. 9).

В ходе экспериментов с локальным охлаждением слоя выявлено что площадь поверхности, освобожденная от частиц,  $S_{\infty}$ , незначительно изменяется с толщиной слоя для обеих жидкостей, но зависит от свойств жидкости (рис. 10a). В силиконовом масле площадь очистки больше по сравнению с изопропанолом. Также установлено, что время формирования финальной площади свободной от частиц области  $\bar{S} = S(t)/S_0$  не зависит от толщины слоя, но зависит от свойств жидкости (рис. 10b, 10c).

Меньшая площадь подложки, освобожденная от частиц ТК потоками, в изопропанол и, как следствие, меньшее время достижения стационарного состояния обусловлены следующим. В случае охлаждения частицы переносятся из области с большей толщиной в область с меньшей толщиной (рис. 10), где их движение замедляется. В случае изопропанола слой на периферии истончается за счет неизбежного испарения, в результате частицы оказываются иммобилизованы в тонкой пленке смачивания и формируют «вал», препятствующий их дальнейшему продвижению.

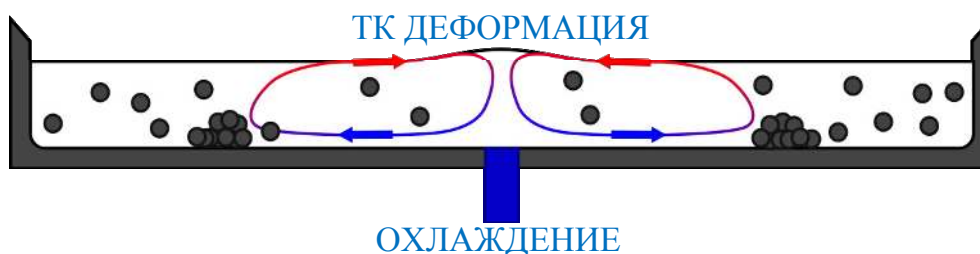


Рис. 8. Схематичное изображение процесса сборки кластера при локальном охлаждении слоя суспензии

Fig. 8. Schematic of the cluster assembly under local cooling of suspension layer

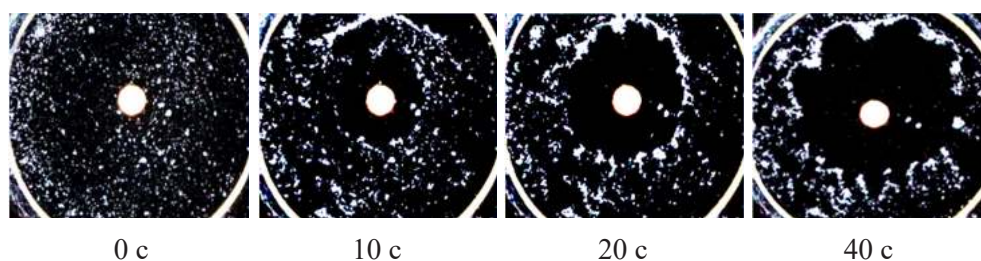


Рис. 9. Кадры очистки поверхности подложки (или, что то же самое — формирования кольцевого паттерна) от частиц полиэтилена при локальном охлаждении слоя изопропанола толщиной 450 мкм

Fig. 9. Frames of cleaning of the substrate surface (or, equivalently — forming an annular pattern) from polyethylene particles under a local cooling of isopropanol layer 450  $\mu\text{m}$  thick

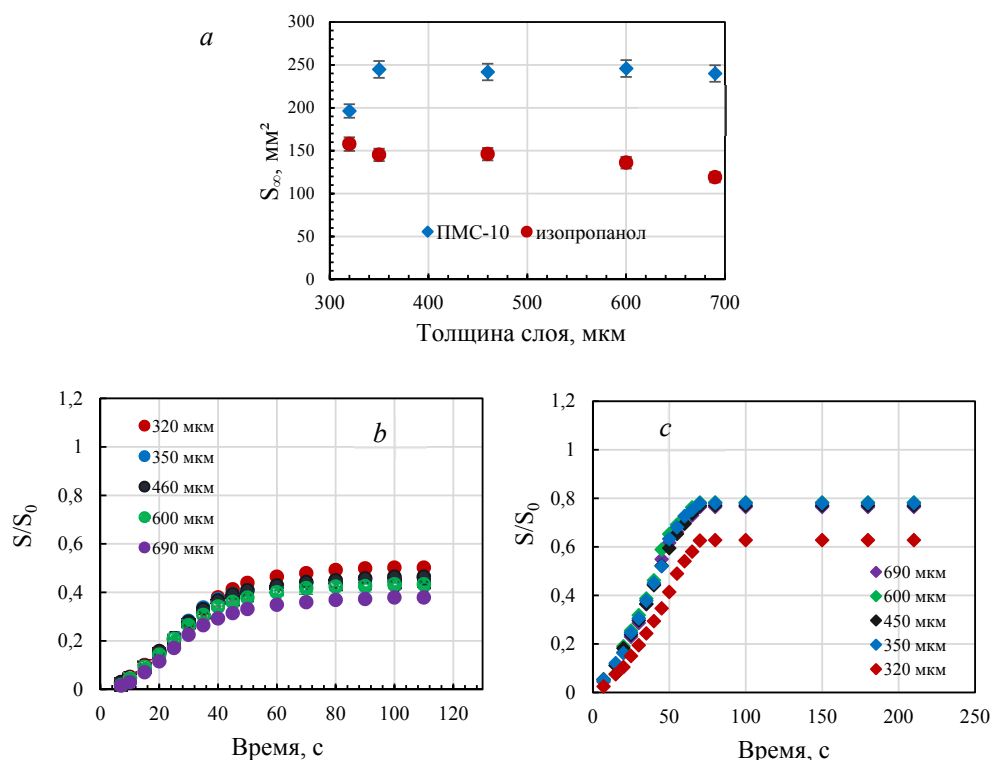


Рис. 10. Зависимость площади очищенной поверхности от толщины слоя (а). Нормированная площадь освобожденной от частиц поверхности при локальном охлаждении слоя изопропанола (b) и ПМС-10 (c)

Fig. 10. Dependence of the resulting surface cleaning area on the layer thickness (a). Nondimensional surface area released from particles during local cooling of layer of isopropanol (b) and PMS-10 (c)

### Заключение

Исследовано поведение микрочастиц сложной формы с характерным размером 50-200 мкм в процессе сборки кластера в тонком слое жидкости при локальном тепловом воздействии.

При нагреве (положительный градиент поверхностного натяжения) выявлены следующие закономерности:

- 1) площадь поверхности подложки, занятая частицами по завершении сборки, уменьшается с ростом толщины слоя и не зависит от типа несущей жидкости;
- 2) время полной сборки частиц не зависит от толщины слоя, но зависит от свойств жидкости.

При охлаждении (положительный градиент поверхностного натяжения):

- 1) площадь поверхности, освобожденная от частиц, незначительно изменяется с толщиной слоя для обеих жидкостей, но зависит от свойств жидкости, в силиконовом масле площадь очистки больше по сравнению с изопропанолом;

2) время формирования конечной площади, свободной от частиц, не зависит от толщины слоя, но зависит от свойств жидкости.

Установлено, что время сборки кластера скоростью распространения границы ТК вихря, внутри которой частицы захватываются возвратным потоком и переносятся к формируемому кластеру.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аль-Музайкер М. Я. Влияние смачиваемости подложки и влажности воздуха на самосборку наночастиц при испарении капель коллоидных растворов / М. Я. Аль-Музайкер, Т. Е. Есенбаев, Н. С. Кубочкин, М. Д. Горева, Н. А. Иванова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 3. С. 83-96. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-83-96
2. Abdel Fatah T. A nanofilter for fluidic devices by pillar-assisted self-assembly microparticles / T. Abdel Fatah, M. Jalali, S. Mahshid // *Biomicrofluidics*. 2018. Vol. 12. No. 6. Art. 064103. DOI: 10.1063/1.5048623
3. Akella M. High-Throughput Acoustofluidic Self-Assembly of Colloidal Crystals / M. Akella, J. J. Juarez // *ACS Omega*. 2018. Vol. 3. No. 2. Pp. 1425-1436. DOI: 10.1021/acsomega.7b01862
4. Angelsky O. V. Controllable generation and manipulation of micro-bubbles in water with absorptive colloid particles by CW laser radiation / O. V. Angelsky, A. Ya. Bekshaev, P. P. Maksimyak, et al. // *Optics Express*. 2017. Vol. 25. No. 5. Pp. 5232-5243. DOI: 10.1364/OE.25.005232.
5. Asbahi M. Second order directed positioning of nanoparticles induced by the main terminal meniscus shape in irregular template cavities / M. Asbahi, Z. Dong, F. Wang et al. // *Nanoscale*. 2017. Vol. 9. No. 28. Pp. 9886-9892. DOI: 10.1039/c7nr02455j
6. Caleap M. Acoustically trapped colloidal crystals that are reconfigurable in real time / M. Caleap, B. W. Drinkwater // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2014. Vol. 111. No. 17. Pp. 6226-6230. DOI:10.1073/pnas.1323048111
7. Chen Y. L. Single Dirac Cone Topological Surface State and Unusual Thermoelectric Property of Compounds from a New Topological Insulator Family / Y. L. Chen, Z. K. Liu, J. G. Analytis, et al. // *Physical Review Letters*. 2010. Vol. 105. No. 26. Art. 266103. DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.266401
8. Ding X. On-chip manipulation of single microparticles, cells, and organisms using surface acoustic waves / X. Ding, S. S. Lin, B. Kiraly et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012. Vol. 109. No. 109. Pp. 11105-11109. DOI: 10.1073/pnas.1209288109
9. Du F. Laser-induced nanoscale thermocapillary flow for purification of aligned arrays of single-walled carbon nanotubes / F. Du, J. R. Felts, X. Xu et al. // *ACS Nano*. 2014. Vol. 8. No. 12. Pp. 12641-12649 (2014). DOI: 10.1021/nn505566r
10. Edwards T. D. Controlling Colloidal Particles with Electric Fields / T. D. Edwards, M. A. Bevan // *Langmuir*. 2014. Vol. 30. No. 36. Pp. 10793-10803. DOI:10.1021/la500178b

11. Feldmann D. Manipulation of small particles at solid liquid interface: light driven diffusioosmosis / D. Feldmann, S. Maduar, M. Santer et al. // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. Art. 36443. DOI: 10.1038/srep36443
12. Harris D. J. Marangoni effects on evaporative lithographic patterning of colloidal films / D. J. Harris, J. A. Lewis // *Langmuir*. 2008. Vol. 24. No. 8. Pp. 3681-3685. DOI: 10.1021/la8000637
13. Ivanova N. Removal of micrometer size particles from surfaces using laser-induced thermocapillary flow: experimental results / N. Ivanova, V. M. Starov, A. Trybala, V. M. Flyagin // *Journal of Colloids and Interface Science*. 2016. Vol. 473. Pp. 120-125. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.04.001
14. Li J. Drying Dip-Coated Colloidal Films / J. Li, B. Cabane, M. Sztucki et al. // *Langmuir*. 2012. Vol. 28. No. 1. Pp. 200-208. DOI: 10.1021/la203549g
15. Li Y. From coffee rings to coffee eyes / Y. Li, C. Lv, Z. Li, D. Quere, Q. Zheng // *Soft Matter*. 2015. Vol. 11. No. 23. Pp. 4669-4673. DOI: 10.1039/C5SM00654F
16. Lv C. Controlling the Trajectories of Nano/Micro Particles Using Light-Actuated Marangoni Flow / C. Lv, S. N. Varanakkottu, T. Baier, S. Hardt // *Nano Letters*. 2018. Vol. 18. No. 11. Pp. 6924-6930. DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b02814
17. Malinowski R. Dynamic Control of Particle Deposition in Evaporating Droplets by an External Point Source of Vapor / R. Malinowski, G. Volpe, I. P. Parkin, G. Volpe // *Journal of Physical Chemistry Letters*. 2018. Vol. 9. No. 3. Pp. 659-664. DOI: 10.1021/acs.jpclett.7b02831
18. Owens C. E. Highly parallel acoustic assembly of microparticles into well-ordered colloidal crystallites / C. E. Owens, C. Wyatt Shields IV, D. F. Cruz et al. // *Soft Matter*. 2016. Vol. 12. No. 3. Pp. 717-728. DOI: 10.1039/c5sm02348c
19. Shimoni A. Inkjet printing of flexible high-performance carbon nanotube transparent conductive films by “coffee ring effect” / A. Shimoni, S. Azoubel, S. Magdassi // *Nanoscale*. 2014. Vol. 6. No. 19. Pp. 11084-11089 (2014). DOI: 10.1039/c4nr02133a
20. Wyatt Shields IV C. Microfluidic cell sorting: a review of the advances in the separation of cells from debulking to rare cell isolation / C. Wyatt Shields IV, C. D. Reyes, G. P. López // *Lab on a Chip*. 2015. No. 5. Pp. 1230-1249. DOI: 10.1039/c4lc01246a



**Mohammed Ali Yahya Ali AL-MUZAIQER<sup>1</sup>**

**Victor M. FLYAGIN<sup>2</sup>**

**Gardoona Luqman OBAID OBAID<sup>3</sup>**

**Natalya A. IVANOVA<sup>4</sup>**

**UDC 532.68; 544.7**

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE TRANSFER OF MICROPARTICLES  
IN A THIN LIQUID LAYER UNDER THE INFLUENCE  
OF A TEMPERATURE GRADIENT\***

<sup>1</sup> Postgraduate Student, Institute of Physics and Technology;  
Junior Researcher, Photonics and Microfluidics Research Laboratory,  
X-BIO Institute, University of Tyumen  
m.al-muzajker@utmn.ru

<sup>2</sup> Cand. Sci. (Phys.-Math.),  
Senior Researcher, Photonics and Microfluidics Research Laboratory,  
X-BIO Institute, University of Tyumen  
v.m.flyagin@utmn.ru

<sup>3</sup> Master Student, Tyumen Industrial University;  
Junior Researcher, Photonics and Microfluidics Research Laboratory,  
X-BIO Institute, University of Tyumen  
g.obaid@utmn.ru

<sup>4</sup> Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,  
Department of Applied and Technical Physics, Institute of Physics and Technology,  
Head of Photonics and Microfluidics Research Laboratory,  
X-BIO Institute, University of Tyumen  
n.ivanova@utmn.ru

\* The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 19-31-90099 and grant No. 19-02-00937A).

---

**Citation:** Al-Muzaiqer M. Y., Flyagin V. M., Obaid Obaid G. L., Ivanova N. A. 2021. "Experimental study of the transfer of microparticles in a thin liquid layer under the influence of a temperature gradient". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 7, no. 2 (26), pp. 10-26.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-10-26

---

**Abstract**

This article studies the main regularities of polyethylene microparticles transfer process in a layer of volatile and non-volatile fluid by thermocapillary currents under local heating and cooling. The authors show the possibility of creating circular and ring-shaped patterns by inducing positive and negative radial-directional temperature gradients.

A methodology and computer program have been developed to quantify the transfer process, consisting in measuring the area of the particle pattern (assembly) formed during heating and the area freed from the particles (cleaning area) during cooling on a sequence of video recording frames obtained with an optical microscope. This technique is based on comparing the intensity of image pixels with respect to a threshold value and counting the total area of pixels occupied or not occupied by particles.

The influence of such experiment parameters as the volume of the carrier fluid (layer thickness), at a constant number of particles, fluid evaporation and the ratio of particle and fluid densities on the size of the resulting pattern and the time of reaching the steady state has been established. The results show that the area of the final pattern during local heating and the clearing area, during local cooling, tends to decrease with increasing layer thickness, while the time of reaching the steady state does not depend on the layer thickness, but depends on the properties of the liquid and the ratio of particle and liquid densities.

**Keywords**

Assembly of particles, heat and mass transfer, thermal Marangoni effect, sources and sinks of heat, gradient of temperature.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-10-26**

**REFERENCES**

1. Al-Muzaiqer M. Y., Esenbaev T. E., Kubochkin N. S., Goreva M. D., Ivanova N. A. 2019. "Influence of substrate wettability and air humidity on self-assembly of nanoparticles in evaporating droplets of colloidal solutions". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 3, pp. 83-96. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-83-96 [In Russian]
2. Abdel Fatah T., Jalali M., Mahshid S. 2018. "A nanofilter for fluidic devices by pillar-assisted self-assembly microparticles". Biomicrofluidics, vol. 12, no. 6, art. 064103. DOI: 10.1063/1.5048623
3. Akella M., Juarez J. J. 2018. "High-throughput acoustofluidic self-assembly of colloidal crystals". ACS Omega, vol. 3, no. 2, pp. 1425-1436. DOI:10.1021/acsomega.7b01862
4. Angelsky O. V., Bekshaev A. Ya., Maksimyak P. P. et al. 2017. "Controllable generation and manipulation of micro-bubbles in water with absorptive colloid particles by CW laser radiation". Optics Express, vol. 25, no. 5, pp. 5232-5243. DOI: 10.1364/OE.25.005232
5. Asbahi M., Dong Z., Wang F. et al. 2017. "Second order directed positioning of nanoparticles induced by the main terminal meniscus shape in irregular template cavities". Nanoscale, vol. 9, no. 28, pp. 9886-9892. DOI: 10.1039/c7nr02455j

6. Caleap M., Drinkwater B. W. 2014. "Acoustically trapped colloidal crystals that are reconfigurable in real time". PNAS, vol. 111, no. 17, pp. 6226-6230. DOI:10.1073/pnas.1323048111
7. Chen Y. L., Liu Z. K., Analytis J. G. et al. 2010. "Single dirac cone topological surface state and unusual thermoelectric property of compounds from a new topological insulator family". Physical Review Letters, vol. 105, no. 26, art. 266103. DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.266401
8. Ding X., Lin S. S., Kiraly B. et al. 2012. "On-chip manipulation of single microparticles, cells, and organisms using surface acoustic waves". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 109, no. 28, pp. 11105-11109. DOI: 10.1073/pnas.1209288109
9. Du F., Felts J. R., Xu X. et al. 2014. "Laser-induced nanoscale thermocapillary flow for purification of aligned arrays of single-walled carbon nanotubes". ACS Nano, vol. 8, no. 12, pp. 12641-12649. DOI: 10.1021/nn505566r
10. Edwards T. D., Bevan M. A. 2014. "Controlling colloidal particles with electric fields". Langmuir, vol. 30, no. 36, pp. 10793-10803. DOI:10.1021/la500178b
11. Feldmann D., Maduar S., Santer M. et al. 2016. "Manipulation of small particles at solid liquid interface: light driven diffusioosmosis". Scientific Reports, vol. 6, art. 36443. DOI:10.1038/srep36443
12. Harris D. J., Lewis J. A. 2008. "Marangoni effects on evaporative lithographic patterning of colloidal films". Langmuir, vol. 24 (8), pp. 3681-3685. DOI:10.1021/la8000637
13. Ivanova N., Starov V. M., Trybala A., Flyagin V. M. 2016. "Removal of micrometer size particles from surfaces using laser-induced thermocapillary flow: experimental results". Journal of Colloids and Interface Science, vol. 473, pp. 120-125. DOI:10.1016/j.jcis.2016.04.001
14. Li J., Cabane B., Sztucki M. et al. 2012. "Drying dip-coated colloidal films". Langmuir, vol. 28, no. 1, pp. 200-208. DOI:10.1021/la203549g
15. Li Y., Lv C., Li Z., Quere D., Zheng Q. 2015. "From coffee rings to coffee eyes". Soft Matter, vol. 11, pp. 4669-4673. DOI: 10.1039/C5SM00654F
16. Lv C., Varanakkottu S. N., Baier T., Hardt S. 2018. Controlling the trajectories of nano/micro particles using light-actuated marangoni flow". Nano Letters, vol. 18, no. 11, pp. 6924-6930. DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b02814
17. Malinowski R., Volpe G., Parkin I. P., Volpe G. 2018. dynamic control of particle deposition in evaporating droplets by an external point source of vapor". Journal of Physical Chemistry. Letters, vol 9, no. 3, pp. 659-664. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.7b02831
18. Owens C. E., Wyatt Shields IV C., Cruz D. F. et al. 2016. "Highly parallel acoustic assembly of microparticles into well-ordered colloidal crystallites". Soft Matter, vol. 12, no. 3, pp. 717-728. DOI: 10.1039/c5sm02348c
19. Shimon A., Azoubel S., Magdassi S. 2014. "Inkjet printing of flexible high-performance carbon nanotube transparent conductive films by 'coffee ring effect'". Nanoscale, vol. 6, no. 19, pp. 11084-11089. DOI: 10.1039/c4nr02133a
20. Wyatt Shields IV C., Reyes C. D., López G. P. 2015. "Microfluidic cell sorting: a review of the advances in the separation of cells from debulking to rare cell isolation". Lab on a Chip, no. 5, pp. 1230-1249. DOI: 10.1039/c4lc01246a