

На правах рукописи



Аль-Музайкер Мохаммед Али Яхья Али

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ И
СТОКОВ ТЕПЛА НА ПЕРЕНОС МИКРОЧАСТИЦ И ФОРМИРОВАНИЕ
ПАТТЕРНОВ В ТОНКИХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ**

**Специальность 1.3.14 – Теплофизика
и теоретическая теплотехника**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Тюмень 2022

Работа выполнена на кафедре прикладной и технической физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет».

Научный руководитель: **Иванова Наталья Анатольевна**,
кандидат физико-математических наук,
профессор кафедры прикладной и технической
физики, заведующая научно-исследовательской
лабораторией фотоники и микрофлюидики
Тюменского государственного университета

Официальные оппоненты: **Кузнецов Владимир Васильевич**,
доктор физико-математических наук, главный
научный сотрудник лаборатории процессов
переноса в многофазных системах Института
теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Орлова Евгения Георгиевна,
кандидат физико-математических наук, доцент
Научно-образовательного центра И. Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики Национального
исследовательского Томского политехнического
университета

Ведущая организация: Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр РАН»

Защита диссертации состоится 8 июня 2022 г. в 11-00 на заседании диссертационного совета 24.2.418.02 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, ауд. 410.

Тел: +7 (999) 549-18-31

E-mail: m.al-muzajker@utmn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета и на сайте <https://diss.utmn.ru/sovet/diss-sovet-212-274-10/zashchita/1101951/>.

Автореферат разослан « » 2022 г.

*Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.274.10
доктор физико-математических наук*

С. Ю. Удовиченко

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Процессы переноса нано- и микрочастиц в тонких пленках жидкости и формирования паттернов, требуемой структуры и морфологии на твердых поверхностях, имеют решающее значение в науке, технологиях нанесения покрытий с заданными функциональными свойствами, технологиях очистки поверхностей в электронике и оптике, сохранении объектов культурного наследия, а также в биотехнологиях и медицине, включая микрофлюидную сортировку и выделение редких клеток, адресную доставку лекарственных средств и локальное повышение концентрации веществ в коллоидных растворах.

Существующие методы манипуляции микро- и наночастицами либо работают только с единичными частицами для достижения высокой точности позиционирования их в пространстве (в формируемом паттерне), либо используют сложные технологические процессы, дорогостоящее оборудование, дополнительные химические реагенты, что, в большинстве случаев, не позволяет менять характер воздействия и параметры системы в процессе формирования паттерна. В результате гибкость создания и разнообразие форм паттернов остаются в значительной мере ограниченными, тогда как для управления переноса больших ансамблей частиц и динамического преобразования агрегатов частиц требуются точные, простые, гибкие, и, желательно, малозатратные методы.

Степень разработанности темы. На сегодняшний день подходы к формированию требуемой морфологии (структуры) и переносу частиц, в испаряющихся коллоидных растворах, можно разделить на пассивные (Asbhi M. et. al., 2017; Wang D. et. al., 2004; Harris D. J. et. al., 2007; Chen Y. et. al., 2010) и активные (Caleap M. et. al., 2014; Zhao Y. et. al., 2008; Ashkin A. et. al., 1997; Chen K. et. al., 2010; Zheng Y. et. al., 2011, Li Y. et. al., 2015; Flores-Flores E. et. al., 2015). Пассивные методы реализуются, например, путем создания рельефа на поверхности с помощью травления или литографии (Asbhi M. et. al., 2017; Wang D. et. al., 2004), или использования испарительной литографии (в частности использования масок) (Harris D. J. et. al., 2007). Активные методы основаны на применении внешних воздействий, например, акустических волн (Caleap M. et. al., 2014), движения мениска (Chen K. et. al., 2010), электрических и магнитных полей (Edwards T. D. et. al., 2014; Wang M. et. al., 2013), использования оптического пинцета (Ashkin A. et. al., 1997).

Наиболее эффективными являются методы, основанные на действии эффекта Марангони, генерируемого в жидкостях путем приложения градиентов концентрации поверхностно-активного вещества (ПАВ) (Malinowski R. et. al., 2018; Lv C. et. al., 2018) или температуры (Zheng Y. et. al., 2011, Li Y. et. al., 2015; Flores-Flores E. et. al., 2015). Потoki Марангони подавляют эффект самопроизвольного образования кофейных колец, позволяя собирать частицы в зоне воздействия и создавать требуемые распределения на подложках. 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 осуществления манипуляции частицами

или нанесения паттерна. Тепловой механизм Марангони представляется более перспективным, поскольку локальное воздействие на коллоидную систему (Zheng Y. et. al., 2011; Flores-Flores E. et. al., 2015) позволяет улавливать частицы, расположенные на больших расстояниях, вплоть до сантиметров, от источника тепла. Кроме того, в ходе нагревания локальное повышение температуры невелико и сравнимо с нагревом при воздействии акустических полей (Ding X. et. al., 2012). 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 (Ivanova N. et. al., 2016; Du Frank. et. al., 2014).

Цель и задачи исследования. Развитие новых подходов к решению проблемы управления процессами переноса микрочастиц и создания на подложках упорядоченных структур (паттернов) требуемой морфологии в масштабах от микрометров до сантиметров. Для достижения цели необходимо решить следующие научные задачи:

- 1) Разработать экспериментальную установку и методику для изучения влияния тепловых источников и стоков на перенос микрочастиц в тонких слоях жидкости и морфологию результирующих паттернов;
- 2) Разработать методику изготовления ячеек с твердыми подложками с вмонтированным металлическим стержнем, соединённым с модулем электрического контроля температуры;
- 3) Экспериментально исследовать основные закономерности переноса микрочастиц термокапиллярным потоком и формирования паттернов на твёрдой подложке при локальном нагреве и охлаждении в зависимости от фракции частиц, свойств несущей жидкости и толщины её слоя;
- 4) Экспериментально исследовать влияние мощности источника и стока тепла на характер переноса микрочастиц в тонких слоях жидкости и морфологии паттернов на подложках при фиксированных параметрах эксперимента;
- 5) Предложить и продемонстрировать метод создания кольцевых паттернов различного масштаба и морфологии распределения частиц по ширине колец при динамическом управлении частицами в режиме «охлаждение-нагрев».
- 6) Разработать математическую модель, позволяющую спрогнозировать и понять, как такие ключевые параметры как плотность теплового потока, толщина пленки и испарение влияют на поведение системы.

Научная новизна результатов исследования.

- Изучен процесс переноса микрочастиц в слоях летучей и нелетучей жидкостей термокапиллярными течениями, индуцированными локальным нагревом и охлаждением и предложен метод его динамического контроля.
- Установлены закономерности формирования паттерна частиц требуемой морфологии при изменении таких параметров, как толщина слоя несущей жидкости, свойства жидкости, доля частиц и мощность источника и стока тепла.
- Разработана и апробирована методика создания кольцевых паттернов микрочастиц полистирола на поверхности стекла, основанная на динамическом управлении термокапиллярным потоком при изменении знака

температурного градиента в жидкости путем переключения режима «охлаждение-нагрев».

- Изучено влияние мощности теплового источника и стока и длительности теплового воздействия на скорость формирования кольцевого паттерна микрочастиц, его размеры и профиль распределения микрочастиц по ширине кольца.
- Разработана математическая модель в приближении тонкого слоя, позволяющая описать пространственно-временную эволюцию толщины жидкого слоя, концентрации частиц, температуры жидкости и подложки, а также скорости потока вблизи подложки.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Результаты экспериментального исследования закономерности процесса переноса микрочастиц полистирола в тонких слоях летучей жидкости и формирования паттернов при воздействии локального источника и стока тепла в зависимости от фракции частиц, толщины слоя и мощности источника и стока тепла.
- Результаты экспериментального исследования закономерности процесса переноса микрочастиц полиэтилена в тонких слоях летучей и нелетучей жидкости при воздействии локального источника и стока тепла в зависимости от свойств несущей жидкости и толщины слоя при заданном количестве частиц.
- Метод создания кольцевых паттернов микрочастиц различного масштаба и морфологии распределения частиц по ширине колец при динамическом управлении частицами в режиме «охлаждение-нагрев».

Личный вклад соискателя. Автор разработал экспериментальную установку, методику изготовления ячеек с твердыми подложками с смонтированным металлическим стержнем, соединённым с модулем электрического контроля и методику исследования процессов переноса микрочастиц и формирования паттернов в тонких пленках жидкости при локальном нагреве и охлаждении, непосредственно выполнял научные эксперименты, проводил обработку и интерпретацию полученных данных, участвовал в подготовке научных публикаций и представлял устные и стендовые доклады на международных и всероссийских конференциях по тематике диссертационных исследований

Практическая значимость работы. Понимание механизмов переноса частиц в жидкостях и формирования паттернов различной конфигурации на твердых поверхностях, а также роли внешних воздействий на эти процессы позволит не только усовершенствовать существующие методы управления этими процессами, но и разработать новые эффективные подходы. Примерами могут служить такие технологические применения, как создание поверхностей с улучшенными трибологическими свойствами, очистка хрупких и деликатных поверхностей полупроводниковых и оптических материалов от загрязняющих микро- и наночастиц, печать электронных схем высокого пространственного разрешения с использованием металлических и проводящих частиц на твердых и гибких материалах, микрофлюидная сортировка, разделение и выделение микро- и нанообъектов для биологических и медицинских исследований.

Кроме технологических аспектов, новые знания и методы помогут понять механизмы формирования вермикулитов (произвольных структур из частиц горных пород) на древних и наскальных рисунках в пещерах, которые приводят к стиранию частиц пигмента и уничтожению объектов культурного наследия.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методик исследования, качественным и количественным анализом экспериментальных результатов, анализом погрешностей, высокой воспроизводимостью экспериментальных результатов.

Апробация результатов исследования. Основные результаты научной работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях и семинарах:

1. IMA9-9th Conference of the International Marangoni Association, Interfacial Fluid Dynamics and Processes, August 31-September 5, 2018, Gullin, China.
2. III Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, с 09–16 сентября 2018, Ялта, Республика Крым, Россия.
3. XXXV Сибирский теплофизический семинар, посвящённый 75-летию заслуженного деятеля науки РФ Терехова В. И., 27–29 августа 2019, Новосибирск, Россия.
4. IV Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, 10–16 сентября 2019, Ялта, Крым, Россия.
5. VII Всероссийская конференция с участием зарубежных учёных «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения», 1–4 июля 2020 г., Красноярск, Россия.
6. Ежегодное заседание научного совета по физике конденсированных сред РАН и научно-практического семинара «Актуальные проблемы физики конденсированных сред», 23–26 ноября 2020 г, Черноголовка, Россия.
7. Международная научно-практическая конференция «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете конференция «ММБМ 2021» с применением дистанционных технологий», 26–31 мая г. Ростов-на-Дону, Россия, 2021.
8. 5th International Conference on Droplets, online event, 16–18 August 2021.
9. International Symposium Non-equilibrium processes in continuous media, 16-18 September, Perm, 2021.

Публикации по теме исследования.

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus, и 2 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (физико-математические науки), направление исследования: п. 1. Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твёрдом, жидком и газообразном состоянии для более

глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, из списка использованной литературы из 139 источников. Объем диссертации – 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы исследования, степени разработанности темы, сформулированы цель работы и основные задачи, показана научная новизна и научная и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора в получении результатов работы, приводятся сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований процессов переноса микро- и наночастиц в жидкой среде и создания упорядоченных паттернов частиц. Выполнена классификация методов управления переносом частиц и формированием паттернов на твёрдой поверхности.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки и методик измерений. Была изготовлена ячейка, дном которой служило сварочное стекло с вмонтированными в него заподлицо медным стержнем (радиус $R_h = 0.8 \pm 0.1$ мм). Отверстие в стекле для стержня сверлили с помощью гидроабразивного режущего станка для получения ровного (без сколов) среза. На подложку приклеивали ограничительное кольцо, изготовленное из полимера, радиусом $R_{in} = 10$ мм и $H_w = 3$ мм, так, что торец медного стержня находился в центре полученной ячейки, рисунок 1. С другого конца медный стержень путем пайки соединяли с медными шайбой и пластинкой и приклеивали последнюю на термопасту к поверхности элемента Пельтье (NEC1-00703 $10 \times 10 \times 4.9$ мм³, TEC-30-32-127; 33.4 W; $30 \times 30 \times 3.2$ мм³), который, в свою очередь, термически приклеивали к алюминиевому радиатору для пассивного теплоотвода, рисунок 1. Напряжение питания на элемент Пельтье подавали с регулируемого источника постоянного тока (QJ3005C, 0-30V/ 0-5A).

Запись процесса переноса частиц и формирования паттернов осуществляли с помощью оптического микроскопа Axio Zoom.V16 (объектив ZEISS APOZ 1.5x/0.37 FWD 30mm), оснащённого камерой ZEISS AxioCam 506 color (1920x1200px, 30 fps). Морфологию распределения частиц в паттерне исследовали с помощью ЭСМ (TESCAN MIRA 3 LMU, детектор SE на 3 кВ). Тепловые поля на поверхности жидкости измеряли ИК камерой (FLIR 655sc, 7.5–14 мкм). В качестве исследуемой системы использовали монодисперсные, сферические микрочастицы полистирола PS ($d = 50 \pm 2$ мкм) в изопропанол. Влияние толщины, h_0 , слоя несущей жидкости изучали при значениях h_0 в диапазоне от 215 до 392 мкм от 150 до 700 мкм в режиме охлаждения и нагрева, соответственно. Электрическую мощность, W , элемента Пельтье в режиме нагрева и охлаждения варьировали в диапазоне от 1.7 до 9.5 Вт и от 1.7 до 8.5 Вт, соответственно. Число частиц варьировали в диапазоне $N = 43 \cdot 10^3$, $1.3 N$, $2 N$, $3 N$ и $5 N$ штук, которое оценивали как $N = m_p/m_0$, где m_0 — масса одной

частицы, а необходимую массу, m_p , частиц взвешивали с помощью точных весов (OHAUS Adventurer AX124, разрешение ± 0.0001 г). Также использовали суспензии полидисперсных неферрических частиц полиэтилена PE ($d = 20\text{--}150$ мкм) в изопропаноле и низкотемпературном полиметилсилоксане (ПМС-10). Эксперименты проводили для h_0 от 320 до 690 мкм, при $m_p = 3$ мг и $W = 9.5$ Вт в режиме источника и стока тепла.

Эксперименты по созданию кольцевых паттернов проводили для времен охлаждения от 5 до 50 с, при значениях W от 1.2 до 32 Вт. Эксперименты повторяли 5 раз для каждого значения мощности и времени охлаждения.

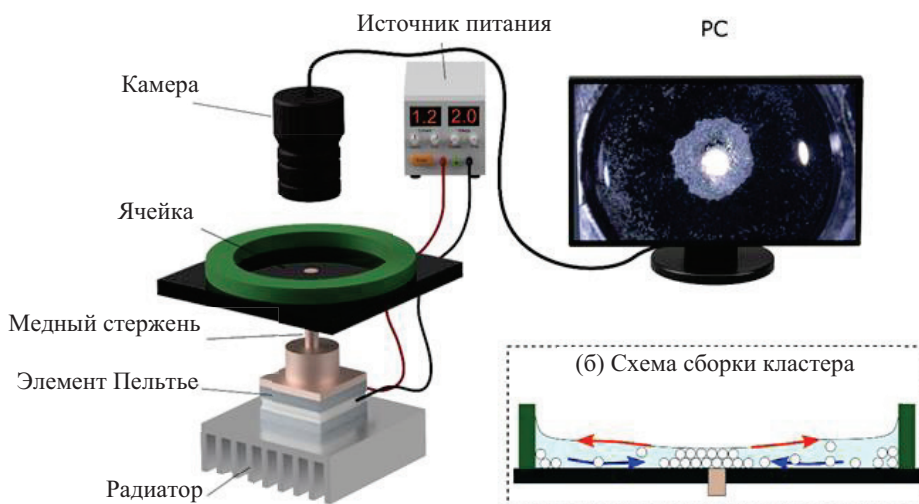


Рисунок 1. (а) Экспериментальная установка, (б) схема переноса частиц и формирования паттерна.

Измерение площади искомой области выполняли путем суммирования пикселей, соответствующих площади, занятой частицами или площади, освобожденной от частиц. Границу положения частиц определяли по градиенту интенсивности пикселей на последовательности изображений, рисунок 2. Для режима «нагрев» строили зависимости конечной площади паттерна от толщины слоя, $S_\infty(h)$, и временные зависимости нормированной площади паттерна $\bar{S}(t) = S(t)/S_\infty$, где $S(t)$ — текущая площадь. В режиме «охлаждение» нормировку выполняли на площадь ячейки S_0 как максимально возможную при очистке поверхности. Аналогично измеряли площадь кольцевого паттерна $S_r = S_{out} - S_{in}$, где S_{in} — площадь, ограниченная внутренним контуром кольцевого паттерна, S_{out} — площадь, ограниченная внешним контуром кольцевого паттерна. Общая погрешность определения итоговой площади паттерна/зоны очистки не превышает $\pm 4.5\%$ при нагреве и $\pm 4.1\%$ при охлаждении соответственно, а погрешность определения итоговой площади кольцевых паттернов менее 6%.

Для определения поля скорости кадры видеозаписи анализировали с помощью программного пакета с открытым кодом Open PIV (Ben-Gide H. et. al., 2020), а затем значения скорости частиц, находящихся на одном расстоянии от центра нагревателя, полученные в каждый момент времени, усредняли и строили зависимости средней скорости от r .

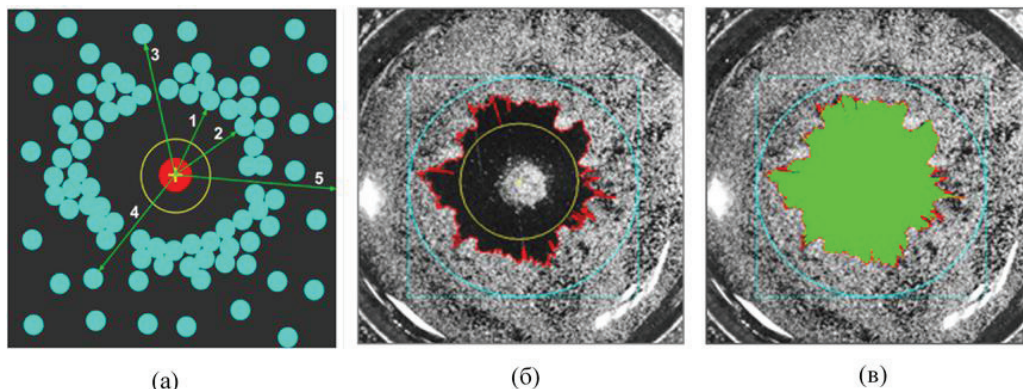


Рисунок 2. (а) Схема метода определения границ интересующей области. Цифрами 1–5 обозначены стрелки между опорной точкой (крестик) и ближайшей частицей, красное пятно в центре показывает нагреватель, окружность ограничивает зону неявного суммирования. (б) Закрытие промежутков между частицами сегментами формирования контура площади. (в) Вычисление площади интересующей зоны.

В третьей главе проведены основные результаты динамического управления переносом микрочастиц в тонком слое жидкости при локальном нагреве и охлаждении.

Режим нагрева (отрицательный градиент температуры). При локальном нагреве в слое жидкости возникает ТК конвекция, $\partial\gamma/\partial r = \partial\gamma/\partial T \cdot \partial T/\partial r > 0$, где γ — поверхностное натяжение жидкости, $\partial\gamma/\partial T < 0$ — температурный коэффициент поверхностного натяжения, $\partial T/\partial r < 0$ — градиент температуры, приводящий к утончению слоя в зоне нагрева за счёт переноса нагретой жидкости на холодную периферию, рисунок 3 (а). При этом частицы увлекаются вихревым ТК движением, перемещаясь вдоль свободной поверхности от центра, а в придонном возвратном течении к зоне нагрева. Некоторые частицы, переносимые в зону нагрева, попадают в область стагнации (область с нулевой скоростью потока) над нагревателем, теряют скорость и оседают на подложку. В результате в области нагревателя образуется скопление частиц (паттерн), имеющее звездчатую форму, рисунок 4 (б). Площадь паттерна со временем увеличивается и достигает постоянного значения, когда большая часть частиц собирается в центральной части ячейки, рисунок 4 (г). В итоге контур конечного паттерна становится более плавным. Можно видеть на рисунке 4 (г), что некоторые частицы продолжают циркулировать в ТК вихре в области мениска до полного испарения изопропанола. Интересной особенностью процесса переноса частиц является их движение в центр струйками, рисунок 4.

На рисунке 5 (а, б) показаны временные зависимости площади паттерна, $S(\Delta t)$, для двух значений h_0 слоя 320 и 450 мкм и разных N , при $W = 9.5$ В. На рисунке 5 (в) показана зависимость площади конечной сборки, S_∞ от N для различных значений h_0 слоя жидкости. Видны две противоположные тенденции:

с увеличением N в слое при $h_0 = \text{const}$, S_∞ ожидается увеличивается, но с увеличением h_0 слоя при $N = \text{const}$, S_∞ уменьшается.

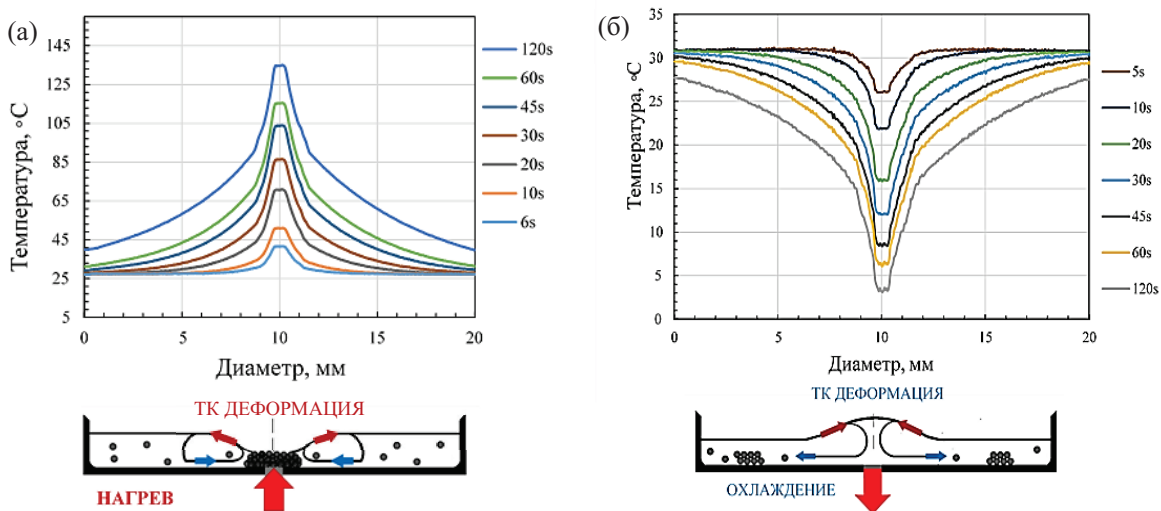


Рисунок 3. (а) Сверху: радиальные распределения температуры при нагреве сухой подложки, $W = 9.5$ Вт. Снизу: вогнутая деформация поверхности слоя, ТК вихрь и формирование паттерна частиц в зоне нагрева. (б) Сверху: радиальные распределения температуры при локальном охлаждении сухой подложки. Снизу: выпуклая деформация слоя жидкости, ТК вихрь и группирование частиц на периферии

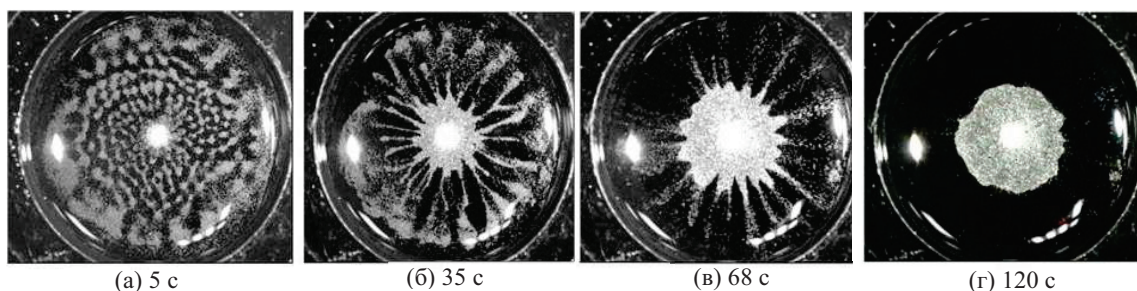


Рисунок 4. Кадры формирования паттерна частиц PS при локальном нагреве (вид сверху). Слой изопропанола 450 мкм, $N = 43 \cdot 10^3$.

Используя среднее значение ΔT вдоль радиуса ячейки в моменты времени τ для обоих слоев, оцененное на рисунке 5 (г), оценки числа Стокса дают значения $St \sim 10^{-4}$ для обеих толщин. Значения $St \ll 1$ указывают на то, что частицы движутся вместе с потоком жидкости как трассеры. Таким образом, можно утверждать, что скорость формирования паттерна определяется скоростью ТК потока вдоль подложки.

Установлено, что для частиц PE в диапазоне исследованных h_0 слоя 320–690 мкм, время формирования конечного паттерна (холмика) не зависит от толщины, в отличие от частиц PS. Отсутствие влияния h_0 слоя для частиц PE обусловлено их большим размером и слабой адгезией с подложкой (Аль-Музейкер М. А. et. al., 2021). Как видно на рисунке 6 (а, б) время сборки частиц уменьшается от 130 с для изопропанола до 60 с для ПМС-10. Это различие может быть обусловлено близкими значениями плотностей ПМС-10 и PE. В

экспериментах обнаружили, что частицы РЕ взвешены в придонной части слоев ПМС-10, а не оседают на подложке как в изопропаноле.

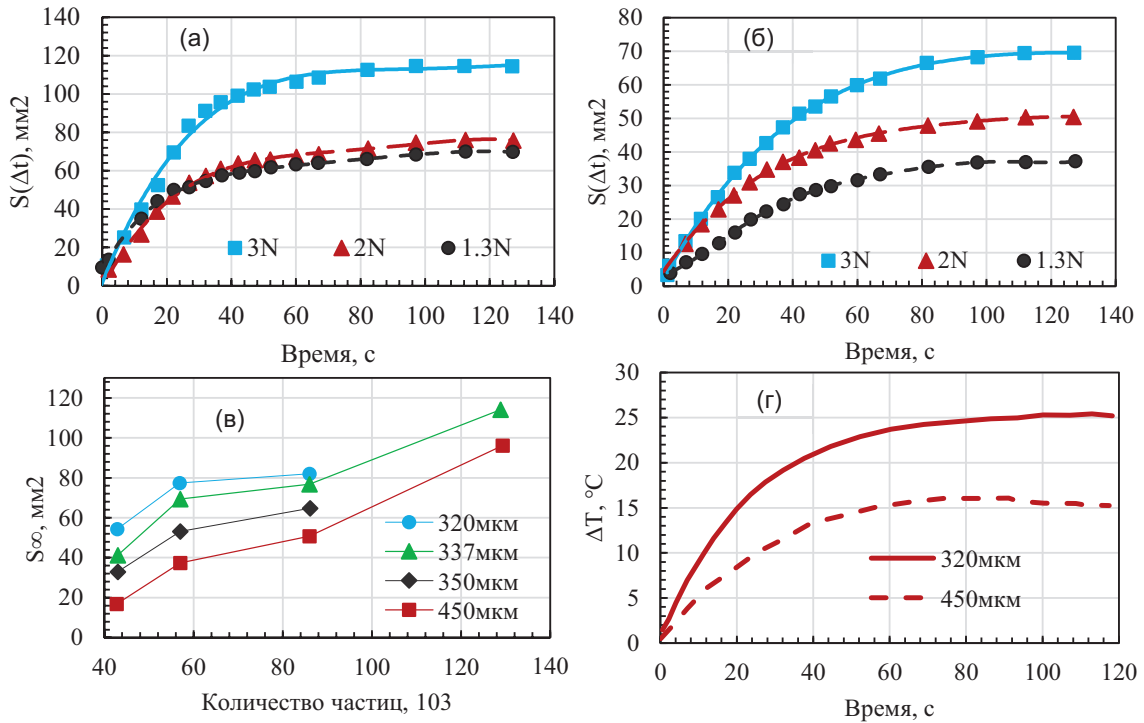


Рисунок 5. (а) Временные зависимости площади паттерна в режиме нагрева для разных N частиц PS в слое изопропанола: 320 мкм (б) и 450 мкм. (в) Конечная площадь паттерна в зависимости от N частиц для слоев разной толщины в режиме нагрева. (г) Эволюция во времени разности температур (ΔT) между нагревателем и бортиком ячейки при нагреве слоев 320 и 450 мкм.

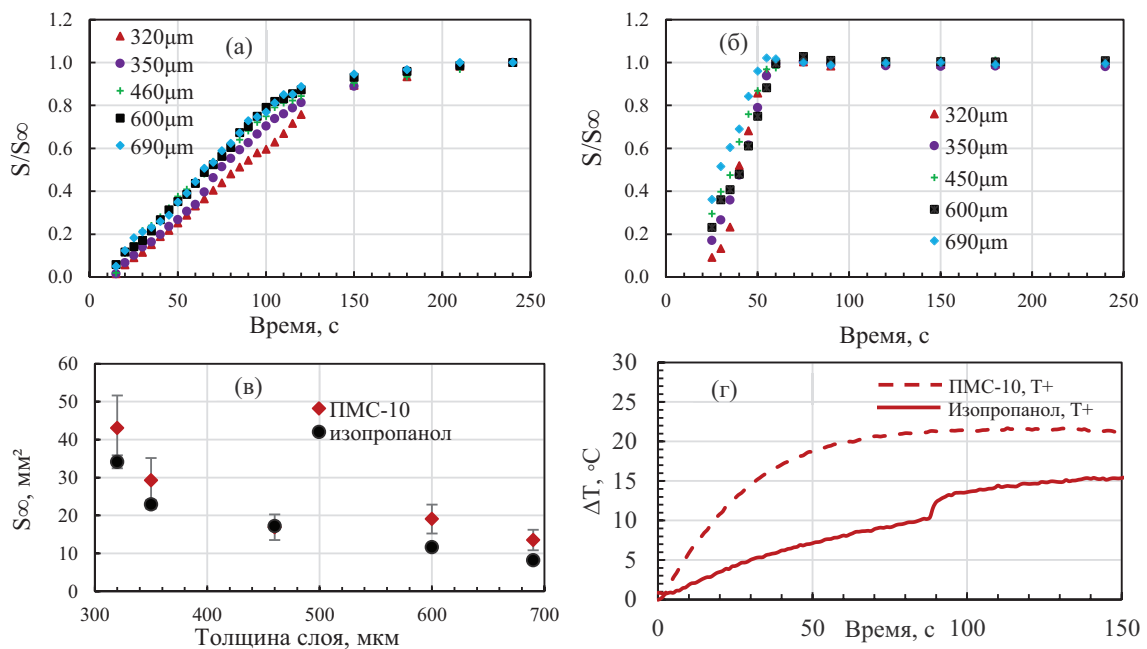


Рисунок 6. Эволюция нормированной площади паттерна для различных значений толщины слоя (300–690 мкм), (а) изопропанол и (б) ПМС-10. (в) Зависимость площади конечного паттерна от толщины слоя изопропанола и ПМС-10. (г) Эволюция разности температуры между нагревателем и бортиком ячейки при нагреве слоя суспензии толщиной 600 мкм, $W = 9.5$ Вт.

Конечная площадь S_∞ уменьшается с ростом h_0 слоя, и не зависит от свойств несущей жидкости, рисунок 6 (в). Скорость сборки частиц определяется скоростью распространения границы ТК вихря, внутри которой частицы захватываются возвратным потоком и переносятся к формируемому кластеру. На рисунке 6 (г) приведена эволюция $\Delta T(t)$ в слое 600 мкм для изопропанола и ПМС-10. Видно, что в слое изопропанола температура ниже по сравнению с маслом, что, возможно, связано с охлаждением поверхности слоя при интенсивном испарении спирта. Ступенька на кривой $\Delta T(t)$ для изопропанола соответствует моменту пересыхания слоя в зоне нагревателя.

Режим охлаждения (положительный градиент температуры). Когда на поверхности жидкого слоя создается отрицательный градиент поверхностного натяжения (положительный градиент температуры $dT/dr > 0$), рисунок 1 (б), частицы увлекаются ТК течением по поверхности к центру ячейки, а в придонном течении от центра, рисунок 7. В результате зона вблизи теплостока освобождается от частиц, а вдали от стока тепла формируется паттерн в виде кольца, рисунок 7. Как и в режиме нагрева, эта область увеличивается со временем охлаждения, достигая постоянного значения. В идеале конечная площадь, очищенная от частиц, должна стремиться к площади подложки, другими словами, ожидалось, что ТК поток перенесет все частицы к стенке ячейки. Однако оказалось, что очищенная область меньше, а ее периметр имеет несовершенную форму. В случае охлаждения можно заметить, слабо выраженную ячеистую структуру распределения частиц. В определенной степени появление ячеистой структуры может привести к тому, что контур, очищенный от частиц области, становится неровным.

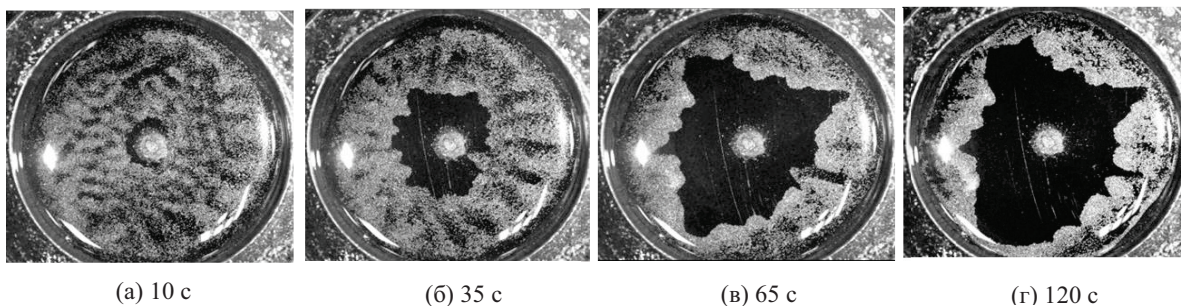


Рисунок 7. Кадры перемещения частиц полистирола ($2N = 86 \cdot 10^3$) из центра ячейки при локальном охлаждении слоя суспензии 450 мкм ($2N = 86 \cdot 10^3$ $W = 9.5$ Вт).

Кроме того, в процессе роста жидкого холмика возникает вращательно-колебательная неустойчивость, вызванная, по-видимому, конкуренцией ТК и гравитационных сил в зоне теплоотвода. Эта неустойчивость разрушает осевую симметрию радиального ТК потока, что, в свою очередь, приводит к изменению направления движения частиц и, следовательно, к искажению границы.

Временные зависимости площади, освобождённой от частиц полистирола PS, $S(\Delta t)$ при различных фракциях частиц для двух значений h_0 слоя 215 и 392 мкм, соответственно, показаны на рисунке 8 (а, б). Здесь $\Delta t = t - t_d = 5$ с - момент времени после подачи напряжения на элемент Пельтье. Конечная площадь, освобождённая от частиц, уменьшается с увеличением количества частиц, как показано на рисунке 8 (в).

Очевидно, что увеличение количества частиц в слое ускоряет формирование края частиц с более плотной упаковкой по периметру площади очистки, что в итоге блокирует дальнейшее ее расширение. В результате конечная площадь, освобожденная от частиц, уменьшается с увеличением количества частиц, как показано на рисунке 8 (в). Небольшое увеличение времени расширения площади, освобожденной от частиц с увеличением толщины слоя обусловлено, с одной стороны, уменьшением гидродинамического сопротивления обратному придонному потоку на периферии, а с другой - снижением скорости потока из-за уменьшения радиальной ΔT в толстых слоях, рисунок 8 (г). В результате расстояние переноса частиц от теплоотвода увеличивается, а скорость частиц уменьшается, что в итоге приводит к увеличению времени процесса.

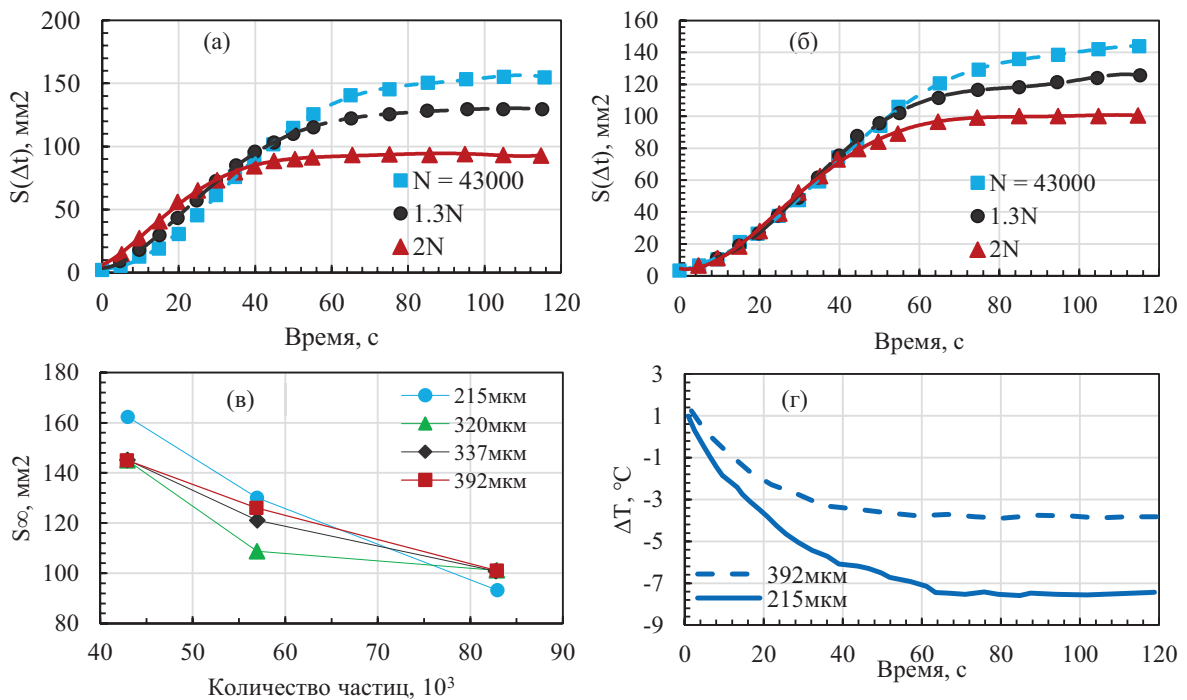


Рисунок 8. Временные зависимости площади, освобожденной от частиц PS в режиме охлаждения для разных N частиц в слое изопропанола 215 мкм (а) и 392 мкм (б). (в) Зависимость конечной площади, очищенной от частиц, от N частиц в слоях разной начальной толщины слоя. (г) Эволюция разности температур (ΔT) между нагревателем и бортиком ячейки при охлаждении слоев толщиной 215 и 395 мкм.

В ходе экспериментов с локальным охлаждением слоя жидкости частиц полиэтилена (PE) выявлено, что, площадь поверхности, освобожденная от частиц, S_∞ , незначительно изменяется с толщиной слоя для обеих жидкостей, но зависит от свойств жидкости, рисунок 9 (в). В силиконовом масле площадь, очищенная от частиц больше, по сравнению с такой в изопропаноле. Также установлено, что время формирования конечной площади свободной от частиц области $\bar{S} = S(t)/S_0$ не зависит от толщины слоя, но также как при нагреве зависит от свойств жидкости, рисунок 9 (а, б).

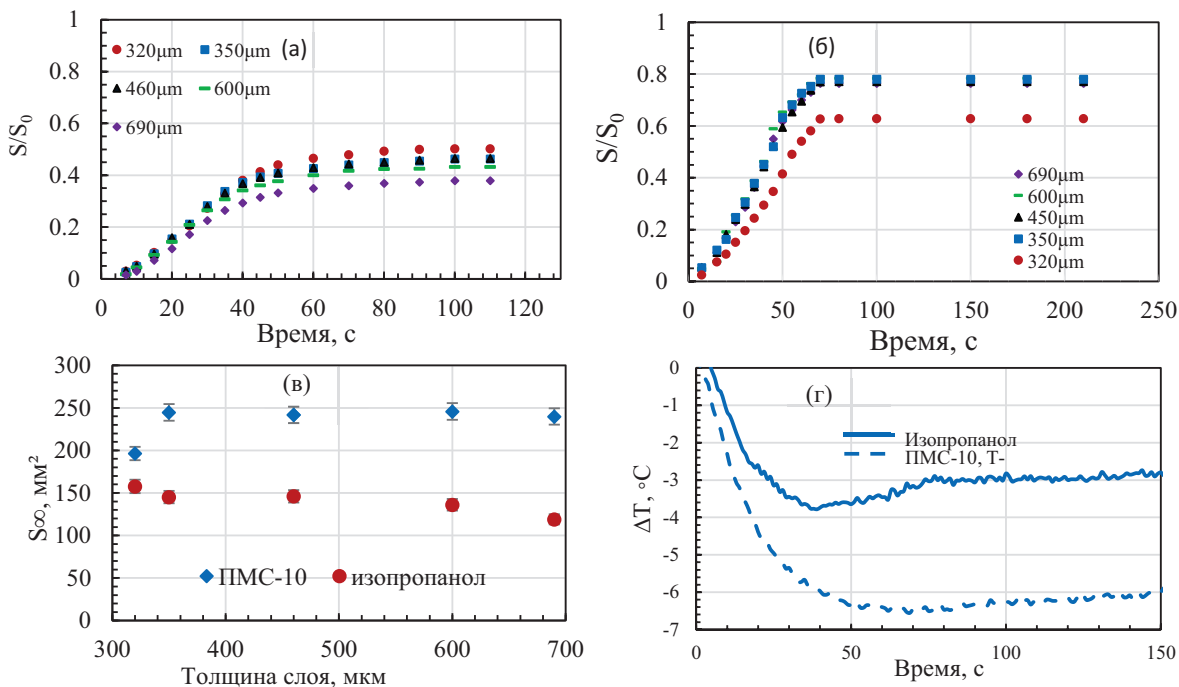


Рисунок 9. Нормированная площадь поверхности, освобожденная от частиц полиэтилена при охлаждении слоя изопропанола (а) и ПМС-10 (б). (в) Зависимость площади очищенной поверхности от толщины слоя. (г) Эволюция разности температуры между нагревателем и бортиком ячейки при охлаждении слоя суспензии толщиной 600 мкм.

Наименьшая площадь подложки, освобожденная от частиц ТК потоками, в изопропаноле и, как следствие, наименьшее время достижения стационарного состояния, рисунок 9 (г), обусловлены следующим: в случае охлаждения частицы переносятся из области с большей толщиной в область с меньшей толщиной, 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.

Физико-математическая модель тепломассопереноса в тонком слое жидкости при локальном нагреве и охлаждении

Разработана математическая модель в приближении тонкого слоя,

$$u = \frac{h}{2\mu_0} \frac{\partial \gamma}{\partial r} - \frac{h^2}{3\mu_0} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (1)$$

где $h(r, t)$ — толщина пленки, $u(r, t)$ — скорость радиального потока, усреднённая по толщине слоя, μ_0 — динамическая вязкость чистой жидкости, $\gamma(r, t)$ — коэффициент поверхностного натяжения, $P(r, t)$ — капиллярное давление, r и t — пространственная координата и время, соответственно.

Скорость частиц, U_w , в подобласти w увлеченных придонным потоком жидкости в сторону нагревателя,

$$U_w = \frac{z_0}{\mu_w} \frac{\partial \gamma}{\partial r} + \frac{(z_0)^2}{2\mu_w} \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{z_0 h}{\mu_w} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (2)$$

Зависимость вязкости от концентрации раствора описывать с помощью формулы Муни:

$$\mu_w = \mu_0 \exp\left(\frac{2.5\phi_w}{1 - K\phi_w}\right),$$

где $\varphi_w(r, t)$ — объёмная доля частиц в подобласти w и параметр $K = 1/\varphi_{max}$ (φ_{max} — максимальная объёмная доля частиц).

Коллоидная жидкость, находится в стеклянной ячейке, в центре дна смонтирован нагреватель. Внутренний радиус ячейки — R_{in} , радиус смонтированного нагревателя — R_h и начальная толщина коллоидной пленки — h_0 . Пленка тонкая ($h_0 \ll R_{in}$), поэтому вертикальным переносом массы и тепла можно пренебречь.

Результаты численных расчетов показывают, что в начальный момент времени свободная поверхность жидкости плоская, но с течением времени нагрева в области нагревателя формируется ТК прогиб, рисунок 10 (а). Это происходит вследствие уменьшения поверхностного натяжения в центре нагрева и увеличения интенсивности испарения с ростом температуры.

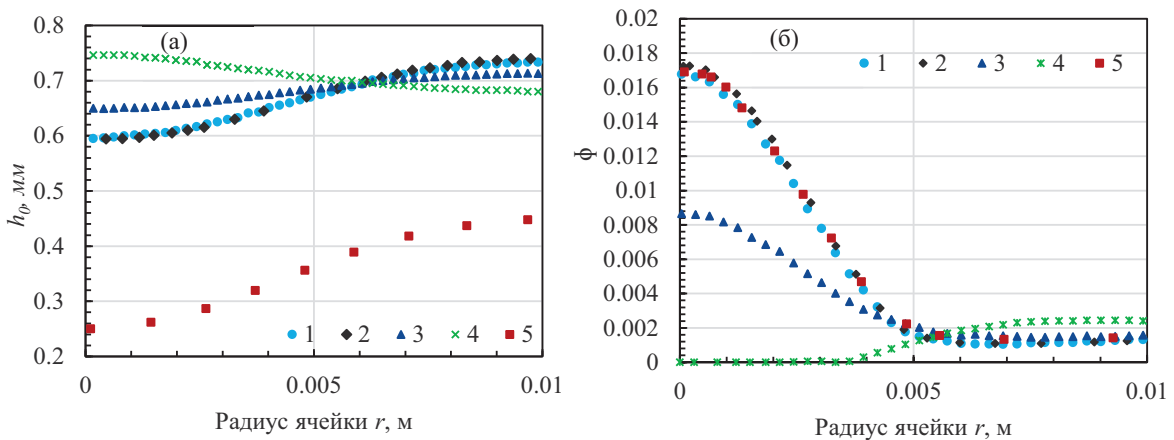


Рисунок 10. Результаты моделирования изменения формы свободной поверхности жидкости (а) и изменения объёмной доли частиц в паттерне (б) в момент $t = 25$ с для разных параметров (1) $h_0 = 700$ мкм, $q = 10$ кВт/м²; (2) $h_0 = 700$ мкм, $q = 10$ кВт/м², без испарения; (3) $h_0 = 700$ мкм, $q = 5$ кВт/м²; (4) $h_0 = 700$ мкм, $q = -5$ кВт/м²; (5) $h_0 = 400$ мкм, $q = 5$ кВт/м²Вт/м².

Уменьшение объема жидкости в зоне нагрева и перенос потоком приводит к росту объёмной доли частиц φ , рисунок 10 (б). За относительно короткий промежуток времени значение φ выросло почти на порядок, по сравнению с φ_0 в центральной области ячейки, рисунок 10 (б). Оценка концентрационного числа Пекле $Pe_D = U_{max}R_{in}/D \approx 10^9$ (характерная скорость, согласно экспериментам, порядок 1 мм/с), показывает, что конвективный перенос масс преобладает над диффузией.

На рисунке 11(а) показана скорость частиц, U_w , увлеченных обратным придонным потоком жидкости в сторону нагревателя и от нагревателя, рисунок 12 (а), для эксперимента и расчета, можно заметить качественную и количественную корреляцию между ними. Также наблюдается согласие между экспериментом и расчетом для радиальных распределений температуры подложки, рисунок 11 (б) и 12 (б).

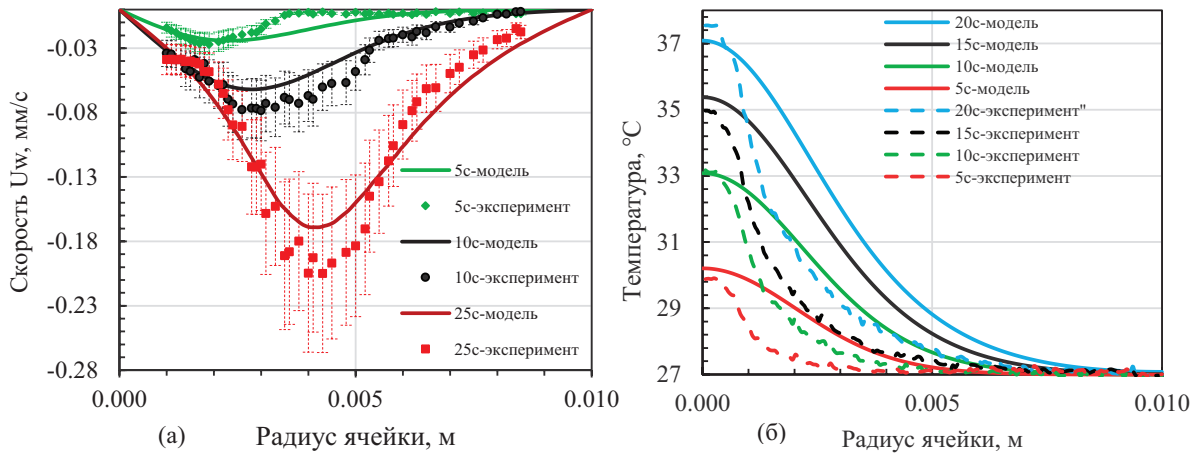


Рисунок 11. (а) Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных (линии) скоростей частиц U_w , увлеченных придонным потоком жидкости в сторону нагревателя в слое 700 мкм. (б) Сравнение экспериментальных (пунктирные линии) и расчетных (линии) радиальных распределений температуры подложки T_s при локальном нагреве.

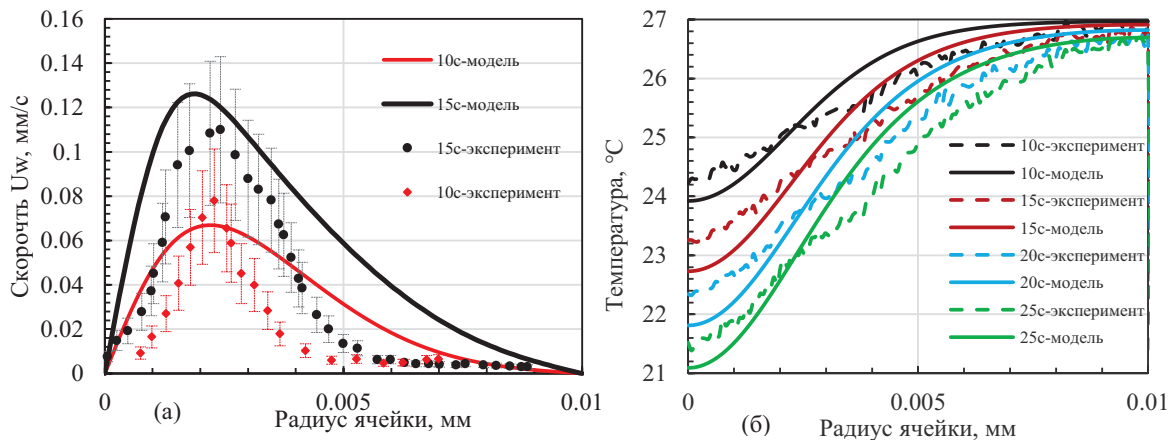


Рисунок 12. (а) Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных (линии) скоростей частиц U_w , увлеченных придонным потоком жидкости в сторону нагревателя в слое 700 мкм для модели и в слое 600 мкм для эксперимента. (б) Сравнение экспериментальных (пунктирные линии) и расчетных (линии) радиальных распределений температуры T_s при локальном охлаждении.

Четвертая глава посвящена методу создания кольцевых паттернов различного масштаба и морфологии распределения частиц по ширине колец при динамическом управлении частицами в режиме «охлаждение-нагрев».

Механизм основан на действии ТК течения, создаваемого в слое локальным нагревом или охлаждением в геометрическом центре поверхности ячейки, рисунок 16. Управление скоростью и направлением ТК течения и, следовательно, микрочастицами, находящимися в данном потоке, регулируется изменением знака и величины градиента температуры в жидкости путем переключения источника между режимами нагрева и охлаждения в определенной последовательности, рисунки 13 и 14.

Экспериментально показано, что скорость формирования кольцевых паттернов, размер кольца и расположение частиц по ширине кольца зависит от мощности, подаваемой на источник/сток тепла, рисунки 7 и 18 (б), и продолжительности приложенного теплового потока, рисунки 16 и 18 (а).

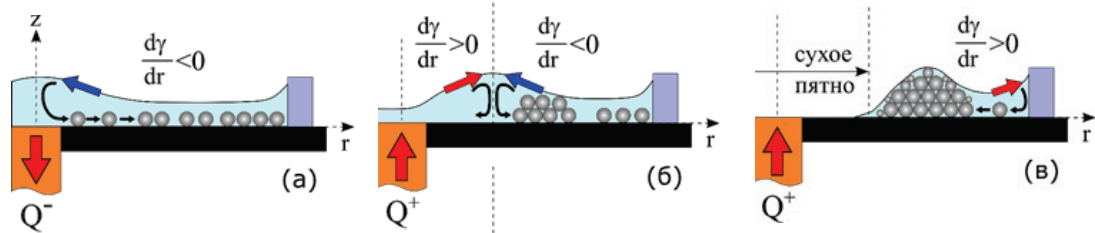


Рисунок 13. Схематическое изображение образования кольцевых паттернов (вид сбоку). (а) Охлаждение (тепло откачивается через медный стержень) - отрицательный градиент поверхностного натяжения перемещает жидкость к центру, частицы движутся от центра к стенке. (б) Нагрев - конкуренция между отрицательным и положительным градиентами поверхностного натяжения, что создает противовращающиеся ТК вихри. (в) Появление сухого пятна в центральной области ячейки вследствие ТК растекания и испарения жидкости, и формирование внешней границы кольцевого осадка вследствие положительного градиента поверхностного натяжения.

Для демонстрации формирования внутренней границы кольцевого паттерна на рисунке 14 (а) показаны эволюции $S_{in}(t)$ и перепада температуры $\Delta T(t) = T(t) - T_0$, полученные при мощности элемента Пельтье $W = 5$ Вт (в режиме охлаждения) и времени охлаждения $\tau = 10$ с. Через 10 с охлаждения элемент Пельтье переключали в режим нагрева. Как видно из рисунка 14, внутренняя область растет не только на стадии охлаждения, но и в течение первых нескольких секунд нагрева. Причина этого эффекта заключается в следующем. После завершения стадии охлаждения полярность напряжения на элементе Пельтье меняется, но из-за инерционности процесса теплообмена температура стержня продолжает незначительно снижаться еще 2–3 с и достигает минимального значения $\Delta T \approx -7^\circ\text{C}$ для заданной мощности $W = 5$ Вт (рисунок 14 (б), точка А).

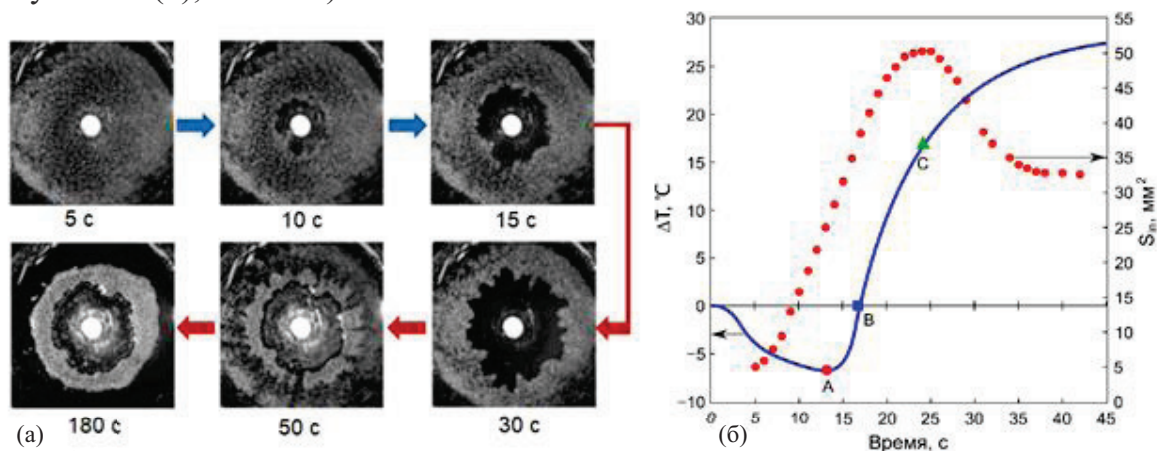


Рисунок 14. (а) Динамическое управление частицами путем последовательного охлаждения и нагрева слоя жидкости (частицы PS диаметром 50 мкм в изопропанолe, $h = 200$ мкм, $N = 43 \cdot 10^3$). Кадры (5–15 с) – стадия охлаждения; (30–180 с) – стадия нагрева. Стрелки показывают направление процесса. (б) Эволюция внутренней области кольцевого паттерна (символы круга). Изменение температуры на медном стержне относительно температуры окружающей среды (сплошная линия).

Формирование внешней границы кольцевого осадка происходит благодаря действию $dy/dr > 0$, которое создает поток, переносящий оставшиеся частицы

с периферии подложки к паттерну. После полного испарения изопропанола на стеклянной подложке образуется окончательный сухой кольцевой паттерн (осадок), рисунок 14.

На рисунке 16 (а) показана площадь кольцевого паттерна, S_r , и перепад температуры на теплостоке, $\Delta T = T(\tau) - T_0$, в зависимости от времени охлаждения при постоянной мощности охлаждения $W = 1.2$ Вт. На рисунке 16 (б) показана эволюция внутренней площади, S_{in} , кольцевого паттерна для нескольких значений времени охлаждения при $W = 1.2$ Вт.

С увеличением времени охлаждения площадь кольцевого паттерна, $S_r(\tau)$, уменьшается, но увеличивается его конечная внутренняя площадь, $S_{in}(\tau)$, что свидетельствует о формировании многослойной структуры осаждения частиц. Изображения кольцевых паттернов, иллюстрирующие влияние длительности процесса охлаждения на геометрические параметры кольца, приведены на рисунке 15.

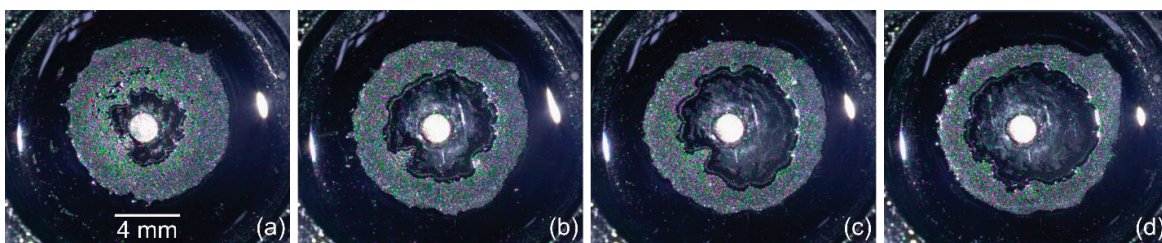


Рисунок 15. Изображения (вид сверху) кольцевых паттернов микрочастиц, полученных при разных временах охлаждения, и соответствующие значения ΔT на стержне для $W = 1.2$ Вт: (а) 5 с, -3.1°C ; (б) 10 с, -4.7°C ; (с) 15 с, -6.1°C ; (д) 50 с, -9°C . Масштаб, 4 мм.

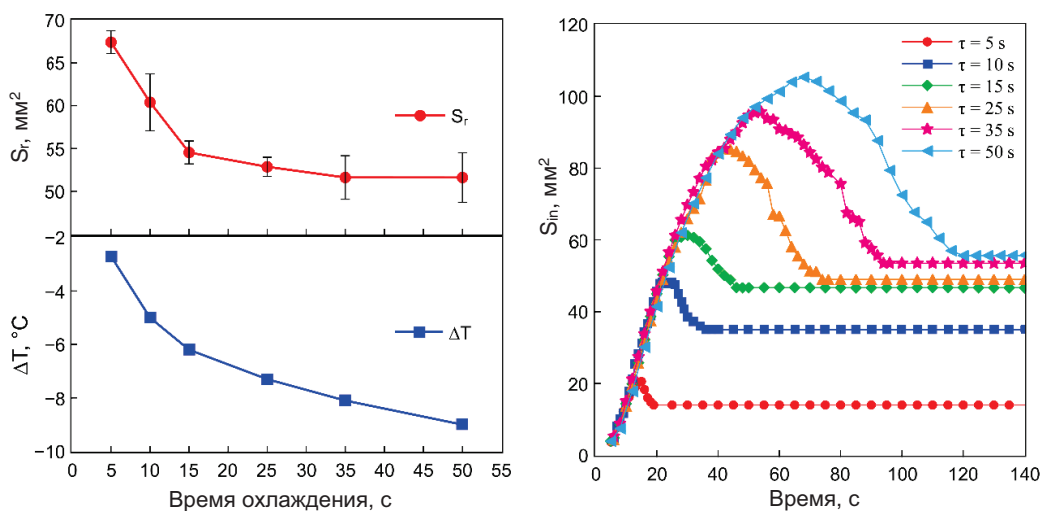


Рисунок 16. (а) Площадь кольцевого паттерна и снижение перепада температуры. (б) Эволюция формирования внутренней площади (области, очищенной от частиц) при различных значениях τ : 5, 10, 15, 25, 35 и 50 сек.

На рисунке 17 (а) показаны S_r и ΔT на теплостоке в зависимости от мощности охлаждения при $\tau = 10$ с, а на рисунке 17 (б) - эволюция S_{in} для различных мощностей при $\tau = 10$ с. В отличие от предыдущего случая, показанного на рисунке 17, увеличение мощности охлаждения не приводит к уменьшению S_r , вместо этого площадь изменяется в диапазоне $\Delta S_r \approx 10 \text{ mm}^2$.

Интересно, что увеличение мощности охлаждения почти в 3 раза (с 12 до 32 Вт) позволяет снизить температуру всего лишь на 1.5°C.

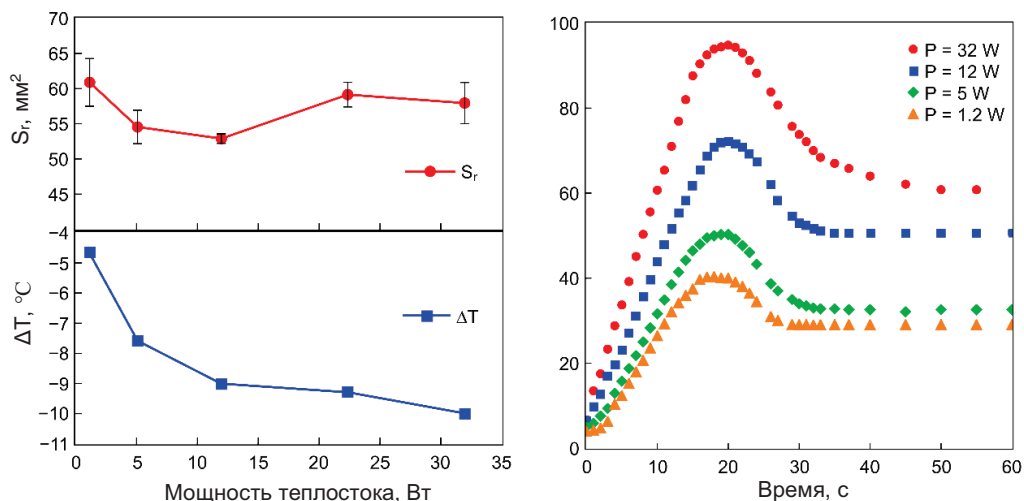


Рисунок 17. (а) Площадь кольцевых паттернов и снижение температуры на стержне, $\Delta T = T(\tau) - T_0$, в зависимости от W модуля Пельтье, $\tau = 10$ с. (б) Эволюция формирования внутренней области (области, очищенной от частиц) при различных W охлаждения: 1.2 Вт, 5 Вт, 12 Вт и 32 Вт при $\tau = 10$ с.

Проанализируем влияние градиентов поверхностного натяжения, которые отвечают за формирование кольцеобразного паттерна, на расположение (распределение) частиц по ширине кольца. Для этого введем параметр $\bar{\sigma} = \sigma / r_{in}$, который представляет собой отношение ширины кольцеобразного паттерна σ к его внутреннему радиусу r_{in} . Поскольку внутренняя и внешняя границы асимметричны, мы оцениваем усредненные значения следующим образом: $r_{in} = \sqrt{S_{in}/\pi}$, а $\sigma = \frac{1}{\sqrt{\pi}} (\sqrt{S_{out}} - \sqrt{S_{in}})$, используя данные S_{in} и S_{out} , рассчитанные путем суммирования количества пикселей (см. методы в главе 2). На рисунке 18 представлены зависимости параметра $\bar{\sigma} = \sigma / r_{in}$ от времени охлаждения при $W = 1.2$ Вт (а) и от мощности охлаждения при $\tau = 10$ с (б).

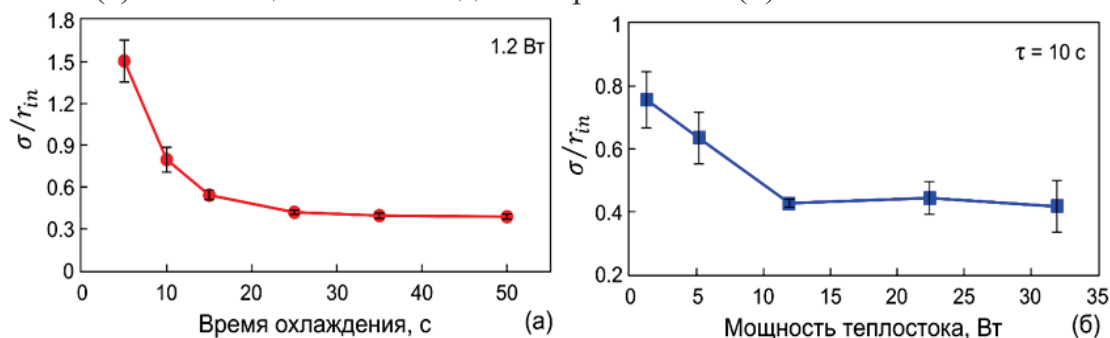


Рисунок 18. Отношение ширины кольца к радиусу его внутренней площади в зависимости от времени охлаждения при $W = 1.2$ Вт (а) и W охлаждения модуля Пельтье при $\tau = 10$ с (б).

На рисунке 19 (а) показано СЭМ-изображение части кольца для $\bar{\sigma} > 1$. Видно, что внешняя граница резкая, а внутренняя - пологая и размазанная. Ближе к внешней границе наблюдается высокая плотность частиц из-за их

многослойной упаковки, в то время как вдоль внутренней границы частицы осаждаются в виде монослоя.

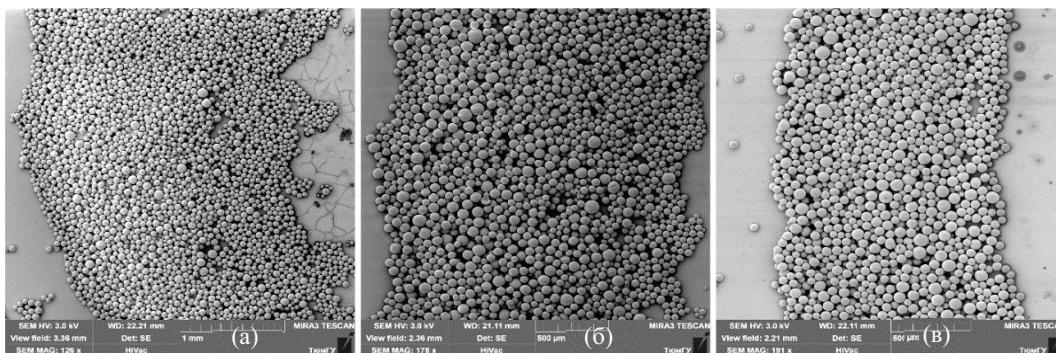


Рисунок 19. SEM изображения распределения микрочастиц полистирола (50 мкм) по ширине кольцевого паттерна для значений τ и W : (а) 5 с, 5.2 Вт; (б) 5 с, 12 Вт; (в) 15 с, 32 Вт.

При увеличении времени охлаждения и снижении температуры ширина кольца становится меньше по сравнению с внутренним радиусом, $\bar{\sigma} < 1$ (рисунок 18, 15 (б, в)). Направленный наружу придонный поток из-за $dy/dr < 0$ (стадия охлаждения) начинает вносить заметный вклад в формирование кольцевого паттерна, что приводит к смещению зоны высокой плотности упаковки частиц в центральную часть кольца (рисунок 19 (б)).

Для значений временных интервалов охлаждения $\tau > 15$ с или для значений мощности теплостока $W \geq 12$ Вт достигается условие $\bar{\sigma} = \text{const}$ (рисунок 18). В этом случае усредненный внутренний радиус кольца достигает максимального значения $r_{in} \approx R_{in}/2$. Кольцевой паттерн формируется преимущественно за счет переноса частиц из центра ячейки к стенке под действием придонного потока, вызванного $dy/dr < 0$ (стадия охлаждения). Для завершения формирования внешней границы паттерна частицы, собранные между внутренней границей и стенкой, переносятся потоком, вызванным $dy/dr > 0$ (процесс нагрева). В этом случае частицы распределяются по ширине кольца более или менее равномерно, и кольцо имеет два острых края (рисунок 19 (в)). Таким образом, такие параметры, как внутренний и внешний диаметр, ширина кольцевого паттерна, а также расположение частиц по ширине кольца можно регулировать, изменяя время охлаждения или мощность, подаваемую на элемент Пельтье.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана экспериментальная установка и методика изготовления ячеек с смонтированным в твердую подложку металлическим стержнем, соединённым с модулем электрического контроля температуры. Разработаны методики исследования процесса переноса микрочастиц в тонких слоях жидкости и формирования паттернов микрочастиц на твердой подложке при локальном нагреве и охлаждении. Разработаны методики измерения поля скорости движения микрочастиц в потоке жидкости и измерения площади паттерна микрочастиц (кругового, кольцевого и области, очищенной от частиц) в зависимости от времени, толщины слоя несущей жидкости и от мощности, выделяемой при нагреве или поглощаемой при охлаждении.

2. Установлено, что при локальном нагреве (осесимметричный тепловой градиент) микрочастицы переносятся придонным течением в зону нагрева, формируя круговой паттерн, а при локальном охлаждении микрочастицы перемещаются из области стока тепла к теплой периферии, в результате чего охлаждаемая зона очищается от частиц. Полученные закономерности характерны для моодисперсных сферических микрочастиц (полистирол, диаметр 50 мкм) и полидисперсных микрочастиц неправильной формы (полиэтилен, 20–200 мкм) в испаряющемся изопропанолe и нелетучем ПМС-10 в исследованном диапазоне толщин слоя и мощности источника/стока тепла.
3. Показано, что площадь кругового паттерна (при локальном нагреве) увеличивается с увеличением числа частиц и мощности источника тепла, уменьшается с увеличением толщины слоя жидкости за счет формирования многослойной упаковки, и не зависит от типа несущей жидкости. Характерное время сборки частиц в паттерн не зависит от количества частиц, увеличивается с толщиной слоя (для случая полистирольных частиц в изопропанолe), уменьшается с увеличением мощности источника тепла, а также коррелирует со временем установления стационарного перепада температуры вдоль радиуса ячейки.
4. Показано, что площадь подложки, очищенная от частиц (при локальном охлаждении), уменьшается с увеличением количества частиц, возрастает с увлечением мощности стока тепла и незначительно изменяется с толщиной слоя. Обнаружено, что для частиц полиэтилена в ПМС-10 площадь, очищенная от частиц больше, по сравнению с изопропанолем. Характерное время формирования площади, очищенной от частиц, уменьшается с увеличением количества частиц и с повышением мощности стока тепла, и незначительно увеличивается с толщиной слоя. Выявлено также, что время полной очистки подложки в слое ПМС-10 в два раза больше слоя изопропонала.
5. Предложен метод создания кольцевых паттернов миллиметрового размера с использованием моодисперсных микросфер полистирола (диаметром 50 мкм) в слое изопропанола на твердой подложке. Механизм основан на управлении скоростью и направлением ТК течения и, следовательно, микрочастицами, находящимися в данном потоке, путем изменения знака и величины градиента температуры в жидкости в режиме - «охлаждение-нагрев». Продемонстрировано также динамическое преобразование паттернов (кольцевой-круговой-кольцевой) при изменении знака градиента температуры в требуемой последовательности.
6. Установлено, что скорость формирования кольцевых паттернов, размер кольца и расположение частиц по ширине кольца зависит от мощности источника/стока тепла, и длительности приложенного теплового потока.
7. Разработана математическая модель, основанная на приближении тонкого слоя, которая позволяет описать пространственно-временную эволюцию толщины жидкого слоя, концентрации частиц, температуры жидкости и

подложки, а также скорости потока вблизи подложки. Полученные численные результаты качественно и количественно согласуются с результатами экспериментов.

8. Предлагаемый в работе подход к управлению переносом микрочастиц в тонких слоях жидкости имеет такие преимущества, как простота реализации и гибкость, и может использоваться для создания широкого разнообразия конфигураций паттернов с использованием частиц различных физико-химических свойств, форм, и носителей среды. Возможность создавать положительные градиенты температуры путем управляемого теплоотвода открывает большие перспективы для применения предлагаемого метода в биологических исследованиях и медицине, где важно не разрушать термически живые объекты.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих междунароные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus:

1. Al-Muzaiqer M.A. Transport and assembling microparticles via Marangoni flows in heating and cooling modes / M. A. Al-Muzaiqer, N. A. Ivanova, V. M. Fliagin, P. V. Lebedev-Stepanov // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2021. – Vol. 621(5). – P. 126550.
2. Al-Muzaiqer M. A. Nonuniform heating of a substrate in evaporative lithography/ M. A. Al-Muzaiqer, K. S. Kolegov, N. A. Ivanova, V. M. Fliagin // Physics of Fluids. – 2021. – Vol. 33. – P. 092101.
3. Al-Muzaiqer M. Fabrication of Ring-Shaped Deposits of Polystyrene Microparticles Driven by Thermocapillary Mechanism / M. Al-Muzaiqer, N. Ivanova, D. Klyuev // Materials. – 2021. – Vol. 14(18). –P. 5267.
4. Kubochkin N. S. Detachment of particles from surfaces by thermocapillary flows induced by a moving laser beam / N.S. Kubochkin, A.V. Tatosov, M. Al-Muzaiqer, N.A. Ivanova // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2019. Vol. 33(15). – P. 1-19.

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

5. Аль-Музаикер М. Я. Исследование переноса микрочастиц в тонком слое жидкости под воздействием градиента температуры / М. Я. Аль-Музаикер, В. М. Флягин, Г. Л. Обаид Обаид, Н. А. Иванова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2021. – Том 2. – № 26. С.10-26.
6. Аль-Музаикер М. Я. Влияние смачиваемости подложки и влажности воздуха на самосборку наночастиц при испарении капель коллоидных растворов / М. Я. Аль-Музаикер, 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.

Публикации в других изданиях:

7. Kolegov. Nonuniform heating of a cell in evaporative lithography / K. Kolegov, M. Al-Muzaiqer, N. Ivanova, V. Fliagin // Book of abstracts «The 5th International Conference on Droplets», Darmstadt, Germany. – 2021. – P. 229.
8. Иванова Н. Неравномерный нагрев подложки в испарительной литографии / Н. А. Иванова, К. С. Колегов, М. А. Аль-Музайкер // Сборник тезисов докладов XV Всероссийской школы «Математическое моделирование в биомеханика в современном университете», Пермь. – 2021. – С. 65.
9. Al-Muzaiqer M. A. The influence of meniscus shape on the self-assembly of microparticles in a colloidal solution / M. A. Al-Muzaiqer, V. M. Fliagin, N. A. Ivanova // Труды тринадцатого ежегодного заседания Научного Совета по физике конденсированных сред при отделении физических наук РАН и научно-практического семинара «Актуальные проблемы физики конденсированных сред», Черноголовка. – 2020. – С. 88.
10. Иванова Н. А. Манипуляция ансамблями микрочастиц в испаряющихся жидкостях: влияние локальных источников и стоков тепла / Н. А. Иванова, В. М. Флягин, М. А. Аль-Музайкер // Сборник тезисов докладов конференции VII Всероссийской конференции с участием зарубежных учёных «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения», Красноярск. – 2020. – С. 106–107.
11. Аль-Музайкер М.А. Манипуляция ансамблями микрочастиц в испаряющихся жидкостях: влияние локальных источников и стоков тепла / М. А. Аль-Музайкер, В. М. Флягин, Н. А. Иванова // Сборник тезисов докладов IV Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, Ялта. – 2019. – С. 55.
12. Аль-Музайкер М. Влияние смачиваемости поверхности на самоорганизацию наночастиц в испаряющихся каплях / М. А. Аль-Музайкер, М. Д. Горева, В. М. Флягин, Н. А. Иванова // Сборник тезисов докладов XXXV Сибирского теплофизического семинара посвящённой 75-летию Заслуженного деятеля науки РФ Терехова В. И., Новосибирск. – 2019. – С. 105.
13. Аль-Музайкер М. А. Термоиндуцированная конвекция Марангони для самоорганизации частиц в коллоидных растворах / М. А. Аль-Музайкер, В. М. Флягин, Н. А. Иванова // Сборник тезисов докладов III Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, Ялта. – 2018. – С. 63.
14. Al-Muzaiqer M. Thermal Marangoni convection for particles assembling in colloidal films / M. Al-Muzaiqer, V. Fliagin, N. Ivanova // Book of abstracts IMA9-9th Conference of the International Marangoni Association, Interfacial Fluid Dynamics and Processes, Gullin, China. – 2018. – P. 51.

Подписано в печать 24.03.2022. Тираж 120 экз
Объём 1.0 уч. изд. л. Формат 60×84/16. Заказ 113.

Издательство Тюменского государственного университета
625002, г. Тюмень, ул. Осипенко, 81
Тел.: (3452) 59-74-81, 59-75-93
E-mail: izdatelstvo@utmn.ru