

Вх. N27/22  
от 20.05.22

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Аль-Музайкера Мохаммеда Али Яхья Али «Исследование влияния локальных источников и стоков тепла на перенос микрочастиц и формирование паттернов в тонких слоях жидкости», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Диссертационная работа М.А. Аль-Музайкера направлена на экспериментальные исследования процессов переноса твердых микрочастиц в тонком слое жидкости, нагреваемом или охлаждаемом точечным источником, и формирования зоны осажденных частиц (паттернов) на подложке. **Актуальность** рассматриваемых в диссертации задач обусловлена необходимостью установления закономерностей переноса твердых микрочастиц под действием сил Марангони в тонких слоях жидкости и разработки методов управления движением и осаждением микрочастиц в данных условиях, что является основой ряда технологий для создания поверхностей с заданными характеристиками, очистки поверхностей полупроводниковых и оптических материалов от микро- и наночастиц, сортировки микрочастиц в микрофлюидных устройствах. Применение данных технологий в значительной степени сдерживается в настоящее время недостаточным пониманием механизмов движения и осаждения микрочастиц на поверхности подложки. Несмотря на повышенное внимание к рассматриваемым в диссертации вопросам в российской и зарубежной литературе, разработка методов управления формированием паттернов, в том числе с использованием тепловых процессов в тонких слоях жидкости, остается весьма актуальной.

**Целью диссертационной работы** М.А. Аль-Музайкера является разработка новых подходов к решению проблемы управления процессами переноса микрочастиц в неизотермических пленках жидкости и создания на

подложках упорядоченных структур (паттернов) с заданными характеристиками. Решаемые в диссертации задачи состоят в разработке методик исследования движения микрочастиц в тонком слое жидкости при локальном подводе или отводе тепла, установлении закономерностей переноса микрочастиц термокапиллярной конвекцией в данных условиях, разработке метода создания кольцевых паттернов различного масштаба, применении математической модели термокапиллярных течений и переноса микрочастиц для интерпретации результатов измерений. Таким образом, **выбор темы диссертационной работы** является вполне обоснованным и направлен на решение фундаментальной задачи теплофизики и теоретической теплотехники.

Выполненные М.А. Аль-Музайкером исследования позволяют разработать и обосновать новый подход к целенаправленному управлению движением и осаждением микрочастиц в формируемом локальным источником или стоком тепла поле температуры слоя жидкости. **Новизна полученных результатов** состоит в экспериментальном установлении закономерностей переноса микрочастиц термокапиллярными течениями, индуцированными локальным нагревом и охлаждением слоя жидкости, разработке метода динамического контроля таким течением, установлении закономерностей формирования паттернов заданной морфологии в зависимости от толщины слоя жидкости, физических свойств, концентрации частиц и тепловой мощности источника тепла. Новым результатом является разработанная методика создания кольцевых паттернов микрочастиц полистирола на поверхности стекла, основанная на динамическом управлении термокапиллярным потоком при изменении градиента температуры в слое жидкости.

**Основные результаты диссертации** включают установленные экспериментально новые закономерности процессов переноса микрочастиц полистирола в тонких слоях жидкости и формирования паттернов при воздействии локального источника и стока тепла в зависимости от фракции

частиц, толщины слоя и подводимой мощности. Установлены закономерности процесса переноса микрочастиц полиэтилена в тонких слоях летучей и малолетучей жидкости при воздействии локального источника и стока тепла в зависимости от свойств несущей жидкости и толщины слоя при заданном количестве частиц. Предложен метод получения кольцевых паттернов микрочастиц различного масштаба и морфологии при динамическом управлении частицами в режиме последовательного охлаждения и нагрева слоя жидкости.

Полученные в диссертационной работе результаты обосновывают тепловой метод управления процессом переноса микрочастиц в тонком слое жидкости, который может быть использован для создания различной конфигурации паттернов в микрофлюидных и полупроводниковых технологиях, что показывает ее **практическую значимость**. Применение локального отвода тепла для удаления микрочастиц в слое жидкости может быть использовано в биологических и медицинских исследованиях, в которых необходимо исключить разрушение исследуемого объекта.

Структурно диссертация состоит из введения, четырёх глав основного текста, заключения, списка использованных источников, включающего 139 наименований, содержит 120 страниц текста и 57 рисунков.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определены ее цели и задачи, научная новизна и практическая ценность, представлен личный вклад диссертанта и результаты апробации работы.

В **первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы, детализированы процессы переноса микро- и наночастиц в жидкости и особенности формирования упорядоченных паттернов твердых частиц, приведена классификация методов управления переносом твердых микрочастиц и формирования паттернов на подложке, включая активные и пассивные методы.

Во **второй главе** приведено описание экспериментального стенда и рабочих участков, методологии проведения экспериментальных исследований, определена неопределенность измерений основных рабочих параметров. Экспериментальные исследования проводились с использованием цилиндрической ячейки с прозрачным дном и ограничивающими стенками, с металлическим стержнем, расположенным в центре ячейки, через который проводился подвод или отвод тепла с помощью элемента Пельтье. Торец стержня был расположен заподлицо с поверхностью пластины, что обеспечивало отсутствие влияния заделки стержня на характеристики движения частиц. Регистрация движения твердых микрочастиц проводилась с использованием современных методов визуализации микрообъектов, которые включали применение оптического и сканирующего электронного микроскопов, скоростной видеокамеры, программ обработки видеоизображений. Для измерения поля температур поверхности применена инфракрасная камера. При выполнении экспериментов использовались монодисперсные, сферические микрочастицы полистирола с размером 50 мкм и полидисперсные несферические микрочастицы полиэтилена, в качестве рабочей жидкости применялся изопропанол и малолетучий полиметилсилоксан. Приведены методики измерения поля скорости микрочастиц в потоке жидкости и измерения площади паттерна микрочастиц в зависимости от времени, толщины слоя несущей жидкости и от мощности, выделяемой при нагреве или поглощаемой при охлаждении. Площадь получаемых паттернов частиц, которые могли иметь сложную форму, определялась при обработке изображений с неопределенностью не более 6%.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментального исследования процессов переноса микрочастиц в тонком слое жидкости и формирования паттернов при локальном нагреве и охлаждении. Выполнены исследования формы паттернов при локальном нагреве слоя изопропанола и полиметилсилоксана. Получено, что микрочастицы при нагреве слоя

концентрируются в центре ячейки, их площадь увеличивается с увеличением числа частиц и мощности теплового источника, и уменьшается с увеличением толщины слоя жидкости за счет формирования многослойной упаковки. Интересным результатом является то, что время формирования частиц в паттерн не зависит от количества частиц, увеличивается при увеличении толщины слоя и уменьшается с увеличением мощности источника тепла. Выполнены исследования формы паттернов микрочастиц при локальном охлаждении слоя изопропанола и полиметилсилоксана. Эксперименты показали, что в отличие от случая локального нагрева слоя жидкости, когда микрочастицы переносятся придонным течением в зону нагрева, при локальном охлаждении микрочастицы перемещаются из области стока тепла к периферии подложки, что приводит к очистке охлаждаемой зона от частиц. Получено, что площадь подложки, очищенная от частиц в данных условиях, уменьшается с увеличением количества частиц, возрастает с увлечением мощности стока тепла и слабо зависит от толщины слоя. Важным для практического применения полученных результатов является то, что для частиц полиэтилена в полиметилсилоксане площадь, очищенная от частиц больше, по сравнению с изопропанолом, и время полной очистки подложки в слое полиметилсилоксана в два раза больше, чем для слоя изопропанола. В диссертационной работе М.А. Аль-Музейкера приведена также качественная математическая модель движения твердых частиц в нагреваемом слое жидкости. Математическая модель основана на приближении тонкого слоя, односкоростной модели движения гомогенной суспензии и включает сопряженные уравнения переноса тепла для слоя жидкости и подложки. Получено, что результаты численных расчетов поля скорости микрочастиц и температуры подложки при локальном нагреве и охлаждении качественно согласуются с экспериментальными данными, но наблюдается существенное отличие в значениях параметров. Это показывает необходимость усложнения модели в дальнейшем для более корректного описания экспериментальных данных.

**В четвертой главе** приведены результаты по разработке метода формирования кольцевых паттернов различного масштаба и морфологии распределения частиц, достигаемых при последовательном локальном охлаждении и нагреве ограниченного слоя жидкости. Метод создания кольцевых паттернов миллиметрового размера реализован на твердой подложке с использованием монодисперсных микросфер полистирола в слое изопропанола. Механизм формирования кольцевого паттерна основан на управлении скоростью и направлением термокапиллярного течения при изменении знака и величины градиента температуры при последовательном охлаждении и нагреве ограниченного слоя жидкости. Установлено, что скорость формирования кольцевых паттернов, размер кольца и расположение частиц в паттерне зависят от мощности источника/стока тепла и длительности подвода/отвода тепла.

**В общих выводах и заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

**Соответствие паспорту специальности.** Работа соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (физико-математические науки), область 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.

В целом, данная работа производит хорошее впечатление, хотя в ней имеются определенные недостатки.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. Предметом исследования являются термокапиллярные течения, возникающие при локальном нагреве слоя жидкости. Такие течения характеризуются полем температуры поверхности жидкости и информации об электрической мощности, приложенной к элементу Пельтье, недостаточно. Это связано с тем, что тепловой поток,

подводимый к жидкости, определяется отношением мощности нагрева/охлаждения к электрической мощности, потребляемой модулем, и температурой внешней поверхности элемента Пельтье. Этих данных в работе нет. Поэтому более правильным было бы использование датчика теплового потока в нагреваемом или охлаждаемом медном стержне и приведения в тексте диссертации измеренных значений.

2. В диссертации приведена только неопределенность измерения площади паттерна, но нет данных по неопределенности измерения температуры поверхности жидкости, скорости микрочастиц и других определяющих параметров.
3. В тексте диссертации в разделе 3.4.2 приведен вывод математической модели для описания конвективного переноса микрочастиц в жидкости и результаты расчета по модели. Вместе с тем, разработка математической модели и результаты численных расчетов не входят в основные положения, выносимые на защиту, и не отражены в личном вкладе соискателя. Необходимо пояснить вклад автора диссертации в разработке математической модели и выполненных численных расчетах.
4. В формулах диссертации есть ошибки, например, в уравнении (3.10) динамическая вязкость обозначена различными символами, на стр. 70 индекс  $\nu$  не приведен, в тексте диссертации много неудачных выражений, например «приведено в абзаце [112]» на стр. 29, «вязким потоком объемной жидкости» на стр. 43 и т.д.

#### **Общая характеристика диссертационной работы**

Отмеченные замечания не снижают научную и практическую ценность выполненных исследований. Представленная диссертационная работа выполнена на необходимом научном уровне и содержит решение актуальной научной задачи. Полученные результаты опубликованы в 6 рецензируемых журналах из списка ВАК, в том числе в зарубежных журналах с высоким импакт-фактором, прошли апробацию на российских и зарубежных научных конференциях. Автореферат в необходимой степени отражает содержание

диссертации, тем не менее, математическая модель тепломассопереноса в тонком слое жидкости при локальном нагреве и охлаждении представлена недостаточно детально, что затрудняет восприятие результатов, представленных в данном разделе автореферата.

Диссертационная работа Аль-Музайкера Мохаммеда Али Яхья Али «Исследование влияния локальных источников и стоков тепла на перенос микрочастиц и формирование паттернов в тонких слоях жидкости» является научно-квалификационной работой, в которой получены новые закономерности процесса переноса твердых микрочастиц в термокапиллярных течениях, возникающих в тонком слое жидкости, нагреваемом или охлаждаемом локальным источником. Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов считаю, что представленная диссертация удовлетворяет всем требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, а ее автор Аль-Музайкер Мохаммед Али Яхья Али заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник лаборатории процессов переноса в многофазных системах ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.14: Теплофизика и теоретическая теплотехника



Кузнецов Владимир Васильевич

« 15 » мая 2022 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.



Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

Тел.: +7 383 330-71-21, внут. тел. 4-67

e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Ученый секретарь, ФГБУН Институт теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе СО РАН, к.ф.-м.н.



*Handwritten signature*  
Макаров Максим Сергеевич

5. 2022г.