

Вх. №30/22  
от 23.05.22

## ОТЗЫВ

официального оппонента к.т.н. Волкова Романа Сергеевича на диссертационную работу **Клюева Дениса Сергеевича «Исследование фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции в двухслойных жидких системах»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

### Актуальность работы

Работа посвящена исследованию поведения поверхности раздела одно- и двухслойных систем жидкостей при наличии локального градиента температуры, вызванного поглощением лазерного излучения на межфазной границе. Применение лазерно-индуцированного термокапиллярного эффекта в методах бесконтактной диагностики материалов, манипуляции микрообъёмами жидкостей, а также в качестве технологии управления свободной поверхностью с целью преобразования оптического сигнала, безусловно, представляет в настоящее время большой интерес. В то же самое время, необходимо отметить, что интегральные характеристики изучаемого процесса (термокапиллярной деформации поверхности) обусловлены как физико-химическими свойствами самих поверхностей (подложки и жидкости), межфазным натяжением жидкости или группы жидкостей, так и особенностями и механизмом нагрева. При этом известные в настоящее время бесконтактные оптические методы диагностики не позволяют в полной мере решить комплексную задачу, состоящую как в определении размеров фототермокапиллярного отклика, так и в идентификации его структуры.

Затронутые в работе вопросы об эволюции формы поверхности двухслойных систем, а также о ключевых особенностях протекания процессов термокапиллярной конвекции в зависимости от параметров среды, определенно имеют важное теоретическое и прикладное значение. Наряду с этим развитие эффективных методов и способов повышения точности и скорости определения формы границы раздела системы жидкость-воздух, а также оценка возможности практического использования двухслойной системы в качестве

оптического элемента при наличии локального нагрева межфазной границы, несомненно, являются актуальными задачами, стоящими большого внимания.

### **Цели и задачи исследования**

Цель диссертационной работы – экспериментальное и численное исследование поведения поверхности раздела одно- и двухслойных систем жидкостей при наличии локального градиента температуры, вызванного поглощением лазерного излучения на межфазной границе.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка и апробация способа повышения точности и скорости определения формы границы раздела системы жидкость-воздух;
- получение и анализ экспериментальных данных об эволюции формы поверхности двухслойных систем, а также о ключевых особенностях протекания процессов термокапиллярной конвекции в зависимости от параметров среды;
- проведение численных расчётов и сравнение их результатов с данными натуральных экспериментов;
- оценка возможности практического использования двухслойной системы в качестве оптического элемента при наличии локального нагрева межфазной границы.

### **Научная новизна и практическая значимость полученных результатов**

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Усовершенствована физико-математическая модель лазерно-индуцированной термокапиллярной конвекции в тонком слое жидкости. Нововведением является применение в физико-математической модели условий открытых внешних воздушных границ расчётной области, удалённых от эбонитовой чашки Петри, и учёт тепловых потерь за счёт излучения;
2. Обнаружен новый тип гидродинамической неустойчивости колебательного типа в двухслойной системе ПМС/бензиловый спирт со свободной поверхностью верхнего слоя;

3. Впервые предложена аппроксимирующая функция, позволяющая описывать сложный профиль деформации поверхности двухслойной системы;
4. Впервые предложена и исследована сложная двухслойная система со свободной поверхностью верхнего слоя в качестве жидкостного оптического элемента – подвижной, самоцентрирующейся диафрагмы.

Практическая значимость работы заключается в наличии предложенной аппроксимирующей функции для усовершенствования метода определения профиля деформации поверхности жидкости. Предложенная аппроксимация, объективно, может быть полезна другим исследователям в качестве вспомогательного инструмента для описания деформаций границ раздела жидкость – газ, а также может быть использована для повышения точности сканирующих методов диагностики жидкостей. Кроме того предложена адаптивная самоцентрирующаяся оптофлюидная диафрагма с возможностью перемещения и аттенюации проходящего излучения, что, безусловно, делает работу более интересной.

### **Публикации и апробация**

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 10 печатных работах, 4 из которых являются статьями в рецензируемых научных журналах перечня Web of Science и Scopus, а одна входит в журнал перечня ВАК. Кроме этого результаты работы представлены на 5 международных Всероссийских и зарубежных научных конференциях.

### **Достоверность работы**

Достоверность результатов обеспечивается точностью используемого современного измерительного оборудования; их высокой воспроизводимостью; согласованностью между экспериментально измеренными и использованными в численной модели параметрами жидкостей, а также высокой сходимостью результатов численных расчётов с данными, полученными из натурального эксперимента.

### **Оценка содержания диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, обозначены цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы, указан личный вклад автора, сформулированы положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

**В первой главе** проведён анализ опубликованных работ по исследованию термокапиллярной конвекции и деформации свободной границы в тонких слоях жидкости. Рассмотрены основные существующие методы измерения профиля деформированной поверхности жидкого слоя. Проведён подробный обзор существующих типов адаптивных жидкостных диафрагм, указаны их основные преимущества перед твердотельными аналогами, а также определены их недостатки.

**Во второй главе** приведены описание и результаты экспериментального и численного исследований термокапиллярной (ТК) деформации свободной поверхности прозрачного слоя силиконового масла. Особо следует отметить малое расхождение между представленными в главе 2 численными и экспериментальными результатами, что подчеркивает точность представленных данных.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования динамики ТК деформации в системах двух несмешивающихся жидкостей с открытой воздушной границей. Посредством обобщения представленных в рамках главы экспериментальных результатов было установлено существование трёх режимов протекания ТК конвекции: состояние устойчивого термокапиллярного псевдоразрыва слоя; состояние устойчивой термокапиллярной деформации; переходный режим. Обнаружено, что для различных пар жидкостей может иметь место существование как только первого или второго режимов, так и наличие всех трёх режимов ТК неустойчивости одновременно. Также установлено, что уменьшение толщины

слоя ведёт к увеличению общего времени колебаний и к уменьшению амплитуды ТКО и периода осцилляций. В завершении главы предложена и апробирована аппроксимирующая функция на основе комбинации функции Анъези и рациональной сигмоиды.

**В четвёртой главе** представлен механизм работы оптофлюидной круглой диафрагмы, который основан на тепловом эффекте Марангони, управляемом лазерным лучом в системе двух несмешивающихся жидкостей. В качестве диафрагмы была использована система из двух тонких слоёв несмешивающихся жидкостей. Установлено, что зависимости от мощности пучка лазера накачки и толщины верхнего слоя может образовываться либо ТК вогнутая деформация верхнего слоя.

**В заключении** сформулированы основные научные результаты работы и выводы.

### **Соответствие паспорту специальности**

Тема диссертации Д.С. Ключева «Исследование фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции в двухслойных жидких системах» соответствует паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника (по части формулы специальности: «установление связей между строением веществ и их феноменологическими свойствами, обоснование методов расчета термодинамических и переносных свойств в различном агрегатном состоянии, выявление механизмов переноса массы, импульса и энергии при конвекции, излучении, сложном теплообмене»; области исследований: «экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси»).

### **Замечания по диссертационной работе**

Следует выделить несколько несущественных замечаний:

- в рамках главы 1 при упоминании контактных методов измерений следовало добавить больше ссылок на соответствующие источники литературы, а также описать принципы работы и характеристики известных

контактных датчиков, используемых для изучения профилей деформации поверхностей. Упомянутое «прямое наблюдение за движением зонда» сложно отнести к контактным измерениям, так как имеет место использование оптики (п. 1.2.1.1). К тому же следовало конкретизировать преимущества бесконтактных оптических методов с ранее упомянутыми схемами, а также уточнить, какие внешние факторы способны оказать влияние на результаты бесконтактных измерений, помимо самого источника излучения (п. 1.2.1.2);

- в главе 2 (п. 2.1.1) отсутствует информация о точности профилометра THORLABS VC106N-VIS, что важно при дальнейшем анализе результатов и неопределенностей измерений. Кроме того недостаточно информации о размерах и форме отверстия в экране 4 (рисунок 4), через который проходит луч DPSS лазера, методах оценки угла падения луча лазера по отношению к горизонтальной плоскости. Также, что самое главное, отсутствует информация о стабильности (во времени) мощности используемого DPSS лазера и методах текущего контроля данного параметра системы (то же касается и He-Ne лазера, упомянутого в п. 3.1 главы 3);
- по всему тексту диссертационной работы на части кривых на рисунках присутствуют неопределенности. Какой тип погрешности они иллюстрируют (систематические, случайные)? Также следует объяснить, по какой причине на многих рисунках неопределенности не изображены;
- в заключении отсутствует акцент на практическое использование полученных результатов и конкретные технологии, в рамках которых использование результатов диссертационной работы поможет существенно усовершенствовать, упростить или в той или иной мере улучшить протекающие процессы.

Приведенные выше замечания не снижают общее положительное впечатление от диссертации и могут быть рассмотрены, как рекомендации по дальнейшему улучшению работы, а диссертационная работа Д.С. Клюева, в целом, заслуживает высокой оценки.

## Заключение

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации Д.С. Клюева можно сделать вывод о том, что диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Правительством РФ постановлением от 24.09.2013 № 842 (пунктам 9-14), так как является законченной научно-квалификационной работой. Учитывая вышеизложенное, считаю, что Д.С. Клюев заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

## Официальный оппонент

Доцент исследовательской школы физики  
высокоэнергетических процессов,  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский Томский  
политехнический университет»  
кандидат технических наук  
(специальность 05.14.14 – Тепловые  
электрические станции, их  
энергетические системы и агрегаты)



Волков Роман Сергеевич

«20» 05 2022 г.

Подпись Волкова Романа Сергеевича заверяется

Ученый секретарь Национального  
исследовательского Томского  
политехнического университета,  
кандидат технических наук  
Кулинич Екатерина Александровна



Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30  
т. 8(3822), 701-777, доп. 1910

20.05.2022