

На правах рукописи



ФЛЯГИН Виктор Михайлович

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ВИХРЯ В ТОНКОМ СЛОЕ
ЖИДКОСТИ НА ТВЕРДОЙ ПОДЛОЖКЕ

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2006

Работа выполнена на кафедре радиофизики Тюменского государственного университета в лаборатории «Жидкостные микрогравитационные технологии»

**Научный
руководитель:**

кандидат физико-математических наук,
ведущий доцент
Безуглый Борис Антонович

**Официальные
оппоненты:**

доктор физико-математических наук,
профессор
Кутушев Анвар Гумерович

кандидат физико-математических наук,
доцент
Костарев Константин Геннадьевич

**Ведущая
организация:**

Институт Гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
г. Новосибирск

Защита состоится 27 декабря 2006 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. _____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан ____ ноября 2006 г.

*Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук*



Татосов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Явление фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции [1,2] является основой ряда технологических процессов и научно-исследовательских методов в таких областях, как лазерная диагностика жидкостей, микрофлюидика, лазерная обработка материалов.

Исследование термокапиллярной (ТК) конвекции в тонких слоях органических жидкостей, индуцированной тепловым действием лазерного излучения, позволило обнаружить интересный эффект: при проецировании на экран излучения, отраженного от искривленной поверхности жидкости, формируется ТК отклик [2]. Это интерференционная картина, которая содержит информацию о деформации слоя, вызванной ТК вихрем. С использованием ТК отклика разработан ряд методов лазерной диагностики жидкостей [3-6], позволяющих определить вязкость, толщину слоя, горизонтальность подложки, на которой находится слой, кривизну свободной поверхности, краевой угол смачивания, мощность лазерного пучка, теплопроводность подложки. Это направление лазерной диагностики жидкостей является перспективным в силу своих отличительных качеств:

- бесконтактность: доступ к образцам жидкостей возможен через оптически прозрачные окна, что позволяет исследовать агрессивные и опасные вещества;
- вид получаемой информации – ТК отклик, оптическое изображение, легко поддающееся автоматической обработке;
- малые мощности индуцирующих пучков, не вызывающие необратимых изменений в исследуемых веществах.

Несмотря на обилие разработанных методов, основанных на фотоиндуцированной ТК конвекции, она недостаточно изучена. ТК отклик определяется ТК углублением, однако установить связь между распределением интенсивности излучения в ТК отклике и профилем поверхности не удалось до сих пор. Это объясняется малым количеством работ, в которых фигурируют экспериментально восстановленные профили поверхности. Нет также и исчерпывающих данных о полях температур и скоростей в ТК вихре в силу сложности эксперимента.

В данной работе предпринята попытка восполнить существующие пробелы в информации о ТК конвекции в тонких слоях прозрачных органических жидкостей на твердых подложках. Предложен компенсационный способ измерения температуры подложки при возбуждении конвекции лазерным излучением. Измерение проводится

контактным термодатчиком в зоне облучения. Методом трассерных частиц восстановлено поле скоростей и профиль поверхности ТК углубления. Исследовано влияние толщины слоя, мощности лазерного пучка и вязкости жидкости на ТК вихрь.

Цель работы - исследование ТК конвекции, индуцированной точечным источником тепла в подложке, и разработка методов измерения характеристик осесимметричного ТК вихря.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложен компенсационный способ измерения температуры подложки контактнм термодатчиком в зоне облучения при ТК конвекции в тонком слое прозрачной жидкости.

2. Исследовано влияние мощности индуцирующего лазерного пучка, вязкости жидкости и толщины ее слоя на температуру подложки.

3. Впервые, методом трассерных частиц, восстановлено поле скоростей осесимметричного ТК вихря в слое жидкости тоньше 1 мм, изучено влияние температуры нагрева, вязкости жидкости и толщины ее слоя на распределение скорости.

4. Предложен новый способ восстановления профиля деформации свободной поверхности жидкости, основанный на сопоставлении координат трассерных частиц в слое и их мнимых изображений, формируемых за счет отражения от поверхности мениска смачивания стенки кюветы.

Практическая ценность. Разработанный компенсационный способ измерения температуры подложки контактнм термодатчиком применим для непосредственного измерения температуры подложки с тонким слоем жидкости. Использование принципа, на котором основан данный способ измерения температуры, позволяет сравнивать результаты исследования при разных способах возбуждения конвекции, сопоставляя мощность лазерного пучка при фотоиндуцированной, и мощность электрического нагревателя при контактноиндуцированной конвекции. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для проверки теоретических моделей, описывающих процессы тепломассопереноса в тонких пленках с учетом поверхностных сил.

Достоверность полученных результатов основана на тщательной разработке методик экспериментов и высокой воспроизводимости результатов.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования ТК конвекции в

тонких слоях прозрачных органических жидкостей, возбуждаемой точечным источником тепла в подложке.

2. Компенсационный способ измерения температуры подложки контактным термодатчиком в зоне облучения лазерным пучком.

3. Способ восстановления профиля ТК углубления по изображениям трассерных частиц.

Апробация работы. Результаты исследований обсуждались на научных семинарах лаборатории "Жидкостные микрогравитационные технологии" и физического факультета ТюмГУ; доложены на II-й научной школе-семинаре молодых ученых, студентов и аспирантов «Теплофизика, гидрогазодинамика, теплотехника» (Тюмень, 2005); научном семинаре, посвященном юбилею кафедры «Механики многофазных систем» (Тюмень, 2006), Четвертой Российской Национальной конференции по теплообмену РНКТ-4, (Москва, 2006 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы, из них - 1 статья в рецензируемом журнале и 1 заявка на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложений и списка литературы. Полный объем работы 109 стр., включая 68 рисунков и 7 таблиц. Библиография содержит 114 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, показана научная новизна исследований, сформулированы цели работы, кратко изложено ее содержание.

Первая глава содержит краткое описание явления фотоиндуцированной ТК конвекции, и критический обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию характеристик осесимметричного ТК вихря в слоях жидкостей, а также восстановлению профиля поверхности ТК углубления и определению величины его прогиба (рис. 1).

Во второй главе описан компенсационный способ измерения температуры подложки контактным термодатчиком в зоне облучения при ТК конвекции, индуцированной лазерным пучком. Исследовано влияние на температуру подложки параметров системы (мощность лазерного пучка, вязкость жидкости и толщина ее слоя).

Измерение температуры капиллярных объектов является сложной технической задачей из-за макронаправленности большинства методов.

$T(r, z)$ ΔT	Камотани [7,8], 1992 - 1998 распределение температуры на поверхности жидкости, тепловизор $P = 480$ мВт, ΔT до 15.5 К	Гладуш [9], 1998 поле температур в слое расплава парафина, термопара $P = 0.8 \dots 10$ Вт, ΔT до 120 К
	поле скоростей, PIV $P = 480$ мВт, v_{\max} до 5 мм/с; $\Delta T = 15$ К, v_{\max} до 2.5 мм/с ($\nu = 10$ сСт)	поле скоростей, LDA v_{\max} до 27 мм/с
$v(r, z)$ v_{\max} v_s d_v	Низовцев [10], 1989, трассерные частицы диаметр вихря в стационарном режиме $P = 0.2 \dots 1$ мВт, $h_0 = 100 \dots 500$ мкм, $d_v = d_p + 0.5h_0$ максимальная скорость потока $P = 1$ мВт, $h_0 = 350$ мкм, $v_{\max} = 0.25$ мм/с (68 сПз) ... 4.8 мм/с (1 сПз)	Альварес-Суарес [11], 1990, фотохромная визуализация динамика роста макс. скорости потока на начальном этапе $E_p = 0.025 \dots 0.08$ Дж, $\tau = 50 \dots 100$ нс, $v_{\max} \sim 60$ мм/с (1.2 сПз) диаметр вихря d_v до 7 мм ($d_p = 1.1 \dots 1.2$ мм)
	Da Costa [12,13], 1982 скорость на поверхности по положению газовых пузырьков $P = 35$ мВт, $d_p = 1$ мм, $v_s (r = d_p/2) = 0.5$ мм/с (10 Пз)	Безуглый [14], 1983 диаметр вихря, краситель $P = 8$ мВт, $h_0 = 100 \dots 600$ мкм, $d_v = 8 \dots 10$ мм (Па·с)
$h(r)$ δh	профиль деформации слоя, интерференционный $P = 35$ мВт, $\delta h_0 = 350$ мкм (10 Пз)	профиль деформации слоя, денситометрия, интерференционный $P = 25$ мВт, $d_p = 8 \dots 10$ мм, $h_0 = 1.35$ мм, $\delta h \sim 1.25$ мм (1.2 сПз)
	Helmers [15], 1984, интерференционный профиль деформации слоя воды ($\sigma = 72.7$ дин/см, $\mu = 1$ сПз) $P = 0.8 \dots 4$ Вт, $\Delta T = 0.31 \dots 0.84$ К, $h_0 = 1.35$ мм, $\delta h = 0.93 \dots 2.44$ мкм	Суходольский [16], 1998, сканирующий точечный пучок стационарный профиль деформации $P = 1 \dots 3$ Вт, $h_0 = 1 \dots 2$ мм, $\delta h \sim 300$ мкм ($\mu = 50 \dots 500$ сПз)
	Федорец [17], 2002, фотоабсорбционный развитие прогиба ТК углубления $I_w = 0.18 \dots 3.45$ мВт/мм ² , $h_0 = 200 \dots 280$ мкм, $\delta h = 3 \dots 70$ мкм (5.8 сПз)	Чаппаров [18], 2003, сканирующий лазерный лист стационарный профиль деформации $P = 5.2 \dots 17.7$ мВт, $h_0 = 465 \dots 690$ мкм, $\delta h = 10 \dots 120$ мкм (5.8 сПз)

Рис. 1. Экспериментальные работы по измерению характеристик ТК вихрей и восстановлению профиля ТК углубления в осесимметричных системах. Слева указаны измеряемые величины, справа показаны: работа, авторы, год, метод исследования, параметры системы (мощность пучка, толщина слоя, вязкость жидкости) и основные результаты.

Бесконтактные (ИК-термометры, тепловизоры) и полуконтактные (использующие люминесцирующие или термохромные жидкокристаллические трассеры) методы весьма дороги и требуют сложного оборудования. Контактные методы вносят тепловые и механические искажения в исследуемую среду. Так, измерение температуры в тонких ($h < 1$ мм) слоях пропанола с помощью термопары медь-константан (диаметр проводника 200 мкм) вносит непоправимые искажения из-за утечки тепла по металлическим проводникам, суммарная толщина которых порядка толщины слоя, а теплопроводность превосходит в $\lambda_{Cu} / \lambda_{Pr} \approx 2600$ раз. От механического возмущения поля скоростей можно избавиться, поместив термопару в подложку таким образом, чтобы ее спай находился заподлицо с поверхностью подложки. Однако искажение теплового поля сохранится за счет высокой теплопроводности материала датчика.

Принцип компенсации теплоотода в датчик температуры состоит в следующем. В случае однородной нетеплопроводной подложки (эбонит) мощности P лазерного пучка будет соответствовать диаметр D_S ТК отклика (рис. 2 а). Если же в зоне облучения лазерным пучком находится датчик температуры, то за счет его высокой теплопроводности температура подложки снизится. Это приведет к уменьшению диаметра ТК отклика до значения D_t (рис. 2 б). При увеличении мощности пучка температура датчика будет расти. Так как ТК вихрь формируется за счет градиента температуры на свободной поверхности жидкости, то *одинаковые температурные поля на подложке должны вызывать, при прочих равных условиях, одинаковые ТК вихри и ТК углубления.*

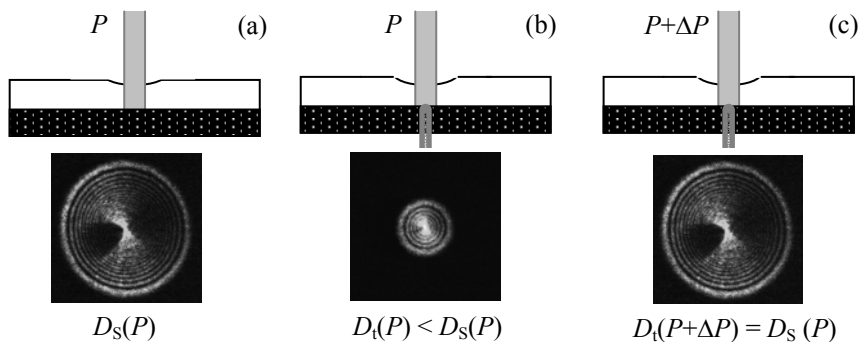


Рис. 2. К объяснению принципа компенсационного способа измерения температуры: (а) – стандартная схема; (б) – в подложку встроен датчик температуры; (с) – теплоотвод в датчик компенсировали увеличением мощности.

Увеличивая мощность излучения на ΔP , доводим диаметр ТК отклика до величины D_S . Тогда можно считать, что температура датчика равна температуре подложки при мощности P (рис. 2 с).

В качестве датчика для измерений температуры использовали:

1. термопару медь-константан с диаметром спая 0.72 мм;
2. термопару медь-константан с диаметром спая 0.53 мм;
3. NTC – термистор EPCOS B57540G, размеры датчика 0.8×0.8×1.4 мм.

Точность абсолютного измерения температуры термопарой составляет $\pm 0.5 \dots 1$ К, заявленная точность используемого термистора $\pm 2 \dots 3$ % при 25 °С.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. В дно эбонитовой кюветы 6 заподлицо встроены три датчика температуры 9 (на рис. 3 показан только один), залитые эпоксидной смолой 11. Сигнал термопар регистрировали микровольтметром с ценой деления 10 мкВ,

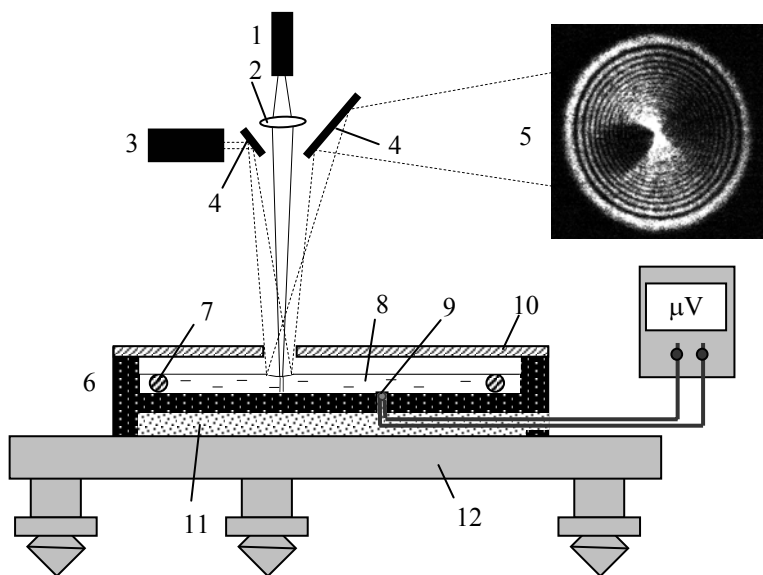


Рис. 3. Экспериментальная установка. 1 – индуцирующий полупроводниковый лазерный модуль, 2 – система линз, 3 – пробный He-Ne лазер, 4 – зеркала, 5 – экран, 6 – эбонитовая кювета, 7 – калиброванные проволочки диаметром 265 мкм, 8 – слой жидкости, 9 – датчик температуры, 10 – стеклянная пластина с отверстием, 11 – эпоксидная смола, 12 – микрометрический треножник.

сигнал термистора – омметром, с ценой деления 10 Ом. В кювете находится слой жидкости 8, толщину которого задают калиброванными проволочками 7, а горизонтальность – треножником 12. Конвекцию в слое жидкости индуцируют полупроводниковым лазерным модулем 1 ($P = 20$ мВт, $\lambda = 660$ нм), пучок которого фокусируют на слой системой линз 2 так, что его диаметр на подложке равен 1 мм. В качестве пробного использовали пучок He-Ne лазера 3 ($P = 0.3$ мВт), с диаметром пятна в плоскости слоя 8 мм, направляя его системой зеркал 4. На экране 5 измеряли диаметр ТК отклика.

Как и следовало ожидать, в случае проецирования пучков на датчик диаметр ТК отклика был существенно меньше из-за отводимого им потока тепла (рис. 4). Так как скорости ТК течений определяются градиентом поверхностного натяжения, которое в свою очередь зависит от температуры, то введение в подложку неоднородности в виде датчика с большим коэффициентом теплопроводности приводит к понижению температуры нагрева жидкости.

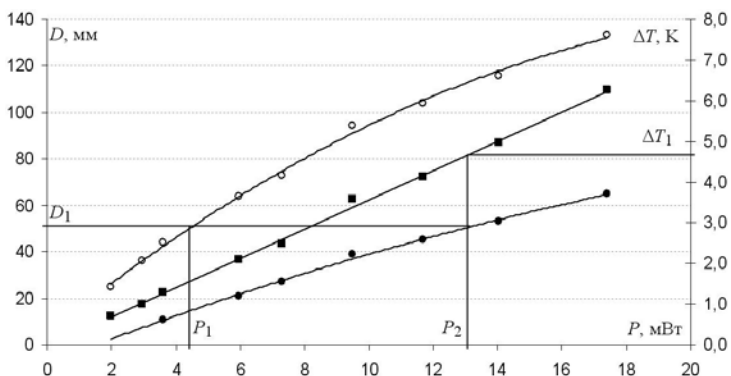


Рис. 4 Зависимости диаметров ТК отклика от мощности: в отсутствии датчика (○), на датчике (●), а также перепада температуры от мощности (■) (изопропанол, толщина слоя 665 мкм, датчик – 1-я термопара).

Методика восстановления значения перепада температуры.

Температуру подложки в зоне нагрева в отсутствие датчика определяли следующим образом. Выберем некий диаметр отклика D_1 (рис. 4). Ему соответствует мощность лазерного пучка P_1 – в отсутствие датчика и P_2 – непосредственно на датчике (2 случая). Разница мощностей $P_2 - P_1$ показывает отток тепла в термопару. Диаметр ТК отклика является функцией ряда параметров установки и слоя (собственная расходимость и оптический путь пробного лазерного луча от поверхности слоя жидкости

до экрана, мощность и диаметр индуцирующего пучка в точке падения на слой, толщина слоя жидкости, коэффициенты поглощения и теплопроводности подложки), свойств жидкости (вязкость, теплопроводность, объемное расширение, поверхностное натяжение). Температура окружающей среды не меняется, поэтому параметры одной и той же жидкости для рассматриваемых случаев одинаковы. В процессе проведения эксперимента изменяются только три параметра установки: мощность индуцирующего пучка, а также коэффициенты поглощения и теплопроводности, различные для материала подложки и сплава термопары. Различия поглощения и теплопроводности можно в определенной мере *компенсировать подбором мощности пучка*, так как в совокупности они непосредственно влияют только на тепловое поле в подложке. При распространении тепла в жидкость тепловое поле усредняется за счет конвективных потоков. Кривизна ТК углубления влияет не только на диаметр, но и на внутреннюю структуру ТК отклика. Различия между структурами ТК откликов в процессе эксперимента не наблюдалось. Поэтому *при равенстве диаметров ТК откликов развивающиеся в рассматриваемых случаях ТК вихри, а также температуры подложки и спая термопары в зоне облучения считались одинаковыми*. Изменение температуры подложки относительно температуры окружающей среды, зафиксированное датчиком при его нагреве излучением лазера мощностью P_2 , равняется ΔT_1 . Следовательно, изменение температуры подложки в отсутствие датчика при мощности P_1 равняется ΔT_1 . Восстанавливая таким образом температуру подложки для различных мощностей лазерного пучка, получаем зависимость изменения температуры на подложке в зоне нагрева от мощности лазерного излучения (рис. 5). Видно, что введение датчика температуры в подложку приводит к понижению перепада температуры примерно в 3 раза.

Влияние параметров системы на перепад температуры подложки. На рис. 6 представлены зависимости перепада температуры на подложке в отсутствие датчика от толщины слоя для различных значений мощности лазерного излучения в случае четырех жидкостей: октан, изопропанол и полидиметилсилоксаны ПМС-5 и ПМС-10. Эксперименты с ПМС-20 также дали аналогичные зависимости. Их сложный характер можно объяснить взаимным влиянием двух конкурирующих процессов. При повышении толщины: (а) увеличивается объем ТК вихря, а следовательно, и количество энергии на его поддержание, и температура подложки падает; (б) растет застойная зона ТК вихря, скорости течения в которой много меньше типичных скоростей ТК вихря, следовательно в этой области основным является кондуктивный перенос тепла, заведомо

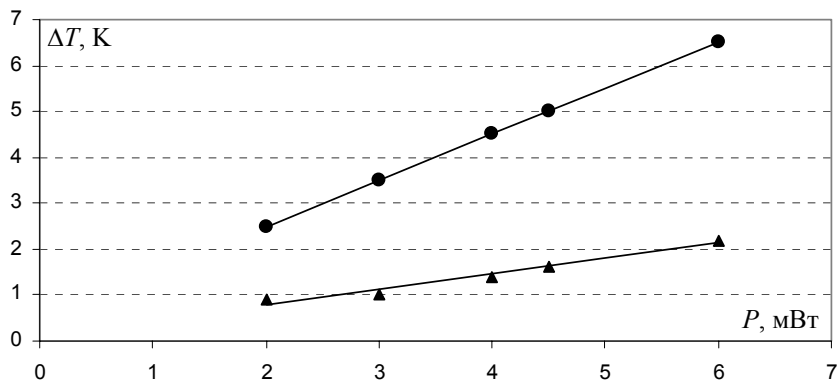


Рис. 5 Зависимость перепада температуры подложки от мощности индуцирующего пучка в отсутствие датчика (●), зависимость перепада температуры датчика от мощности (▲) (изопропанол, толщина слоя 665 мкм, датчик – 1-я термopара).

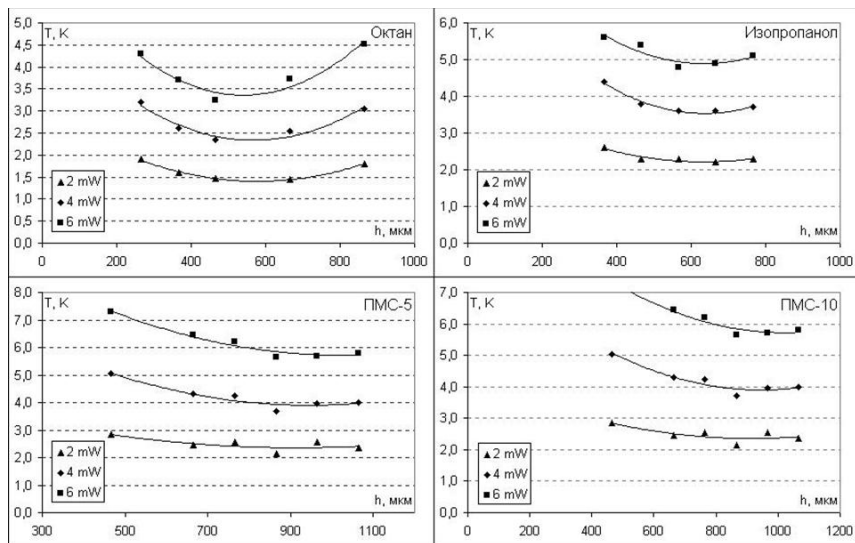


Рис. 6. Зависимость перепада температуры подложки от толщины слоя для октана (0.56 сСт), изопропанола (2.5 сСт), ПМС-5 (5.1 сСт) и ПМС-10 (10.2 сСт).

менее эффективный, чем конвективный, и температура подложки растет. Кроме того, деинтенсификация конвекции ведет к уменьшению

конвективной составляющей теплообмена. Как видно из рис. 6, при увеличении толщины слоя для одинаковой мощности индуцирующего лазера температура подложки в зоне облучения понижается до некоторой минимальной величины, и *основной вклад в ее уменьшение вносит увеличение объема ТК вихря*, тогда как рост застойной зоны незначителен. По положению минимума температуры можно судить о толщине слоя, при которой теплоотвод от подложки в жидкость наиболее эффективен. При дальнейшем увеличении толщины основное влияние на температуру будет оказывать *тепловое сопротивление растущей застойной зоны*.

Исследование влияния размеров и материала датчика на характер развивающегося ТК вихря проводили следующим образом. Чтобы учесть различия коэффициентов поглощения лазерного излучения у используемых датчиков, их чувствительные элементы и участок подложки, предназначенный для измерения, были покрыты слоем черного цапонлака. Так как теплопроводности лака и жидкостей близки (для ПМС $\lambda = 0.14 \dots 0.16$ Вт/(м·К), для основного компонента цапонлака – акрила $\lambda = 0.15 \dots 0.2$ Вт/(м·К)), а ТК вихрь имеет вблизи подложки застойную зону, слой лака вследствие его малой толщины можно считать частью этой зоны. Поэтому в дальнейшем его тепловым сопротивлением пренебрегали.

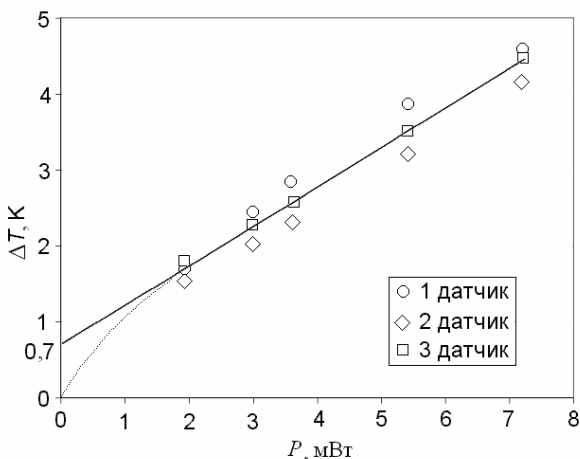


Рис. 7. Сравнение значений температур, снятых разными датчиками. Прямая линия – тренд по среднему значению для трех датчиков.

Увеличение линейных размеров датчиков ведет к уменьшению температуры спаия или кристалла и значений диаметров откликов за счет увеличения теплового потока в датчик. На рис. 7 показаны перепады

температуры после пересчета для ПМС-10 с толщиной слоя 865 мкм. Данные для разных датчиков совпадают с учетом погрешности (± 0.5 К), и коррелируют с данными, полученными ранее. Это означает, что потери тепла в датчике и различия в коэффициентах поглощения компенсируются увеличением мощности индуцирующего лазера. Если не учитывать возмущение теплового поля в подложке, вызванное датчиком температуры, можно считать, что *предложенный способ измерения температуры подложки не зависит от размеров и материала датчика*. При этом размер его чувствительного элемента должен быть приблизительно равен диаметру пучка индуцирующего лазера.

При снижении мощности лазерного пучка до нуля изменение температуры должно быть нулевым. Экстраполяцией средних значений по трем датчикам получаем для нулевой мощности перепад температуры 0.7 К (рис. 7). Так как в области малых перепадов температуры существует переход от кондуктивного переноса тепла к преимущественно конвективному, что ведет к образованию термокапиллярного вихря, это несоответствие можно объяснить увеличением теплоотвода и уменьшением температуры подложки в зоне нагрева за счет конвективных течений. Следовательно, при малых мощностях должен наблюдаться нелинейный участок зависимости перепада температуры от мощности индуцирующего лазера (рис. 7, пунктирная линия).

Третья глава посвящена исследованию поля скоростей ТК вихря методом трассерных частиц. Обоснован выбор трассерных частиц для проведения эксперимента: частиц алюминиевой пудры (хорошее отражение и их малые размеры – около 10-15 мкм). Недостатком является высокая плотность алюминия – в 3 раза выше, чем у полидиметилсилоксанов, которые использовали в эксперименте. С течением времени распределенные в жидкости частицы оседали на подложку. Скорость осаждения частицы оценили по формуле Стокса ($v_g = 4.2 \dots 16.7$ мкм/с) и учитывали при обработке результатов.

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 8. В эбонитовую кювету 1 микропипеткой вносили заданный объем жидкости 2, толщину слоя выставляли методом калиброванных проволочек. Для работы с силиконовыми маслами предусмотрен кольцевой нихромовый нагреватель 9 для ТК запириания силиконовых масел, предотвращающий их “выползание” из кюветы. Конвекцию вызывал перепад температуры на встроенном заподлицо в дно кюветы спаяе термопары медь-константан диаметром 1 мм, который нагревался проволочным нагревателем 3. Термопарой в реальном времени измеряли перепад температуры, подключив ее экранированными проводами из безкислородной меди к

милливольтметру с ценой деления 1 мкВ (на рисунке не указан). Для минимизации влияния колебаний температуры окружающей среды, случайных токов воздуха и устранения внешней засветки все узлы установки поместили в металлический ящик, стенки которого изнутри обшиты пенопластовыми пластинами толщиной 8 мм.

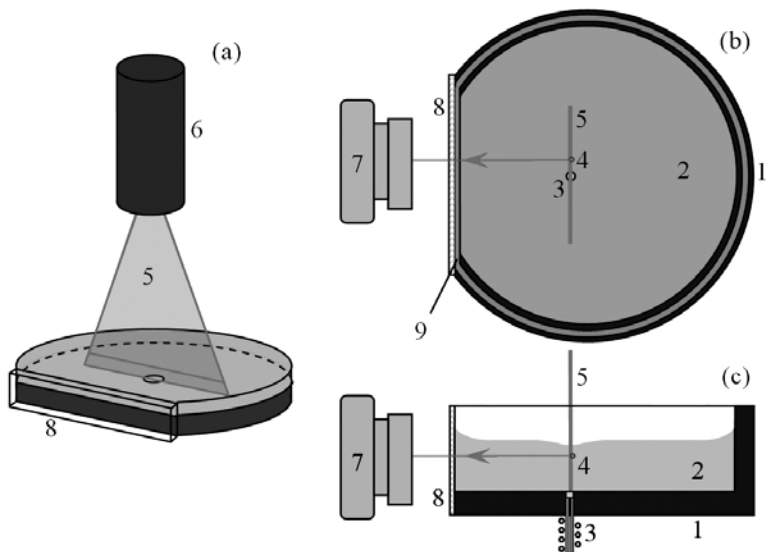


Рис. 8. Схема экспериментальной установки: (а) – вид в изомерии, (б) – вид сверху, (в) – вид сбоку. 1 – эбонитовая кювета; 2 – слой жидкости; 3 – термопара с электрическим нагревателем; 4 – трассерная частица; 5 – лазерный лист; 6 – полупроводниковый лазер с системой линз и щелей для получения лазерного листа; 7 – телекамера; 8 – стеклянное окно для наблюдения, 9 – проволоочный нагреватель для ТК запираания слоя.

Толщина слоя h_0 сильно преувеличена по сравнению с размерами кюветы L , аспект-отношение в зависимости от толщины слоя $Ar = h/L \approx 0.008 \dots 0.02$.

В слое жидкости равномерно распределены частицы алюминиевой пудры 4 (на рисунке показана только одна частица). Максимальная концентрация достигает $6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, и объем, занимаемый ими, не превышает 0.01 %. Поэтому искажением поля скоростей и температур за счет внесения трассеров пренебрегали. Частицы подсвечивали лазерным листом 5 в виде веера толщиной 300 мкм и шириной в плоскости слоя около 8 мм, формируемый из пучка полупроводникового лазера системой линз и щелей 6 и направленный вертикально вниз через центр нагревателя

параллельно плоскости ПЗС матрицы камеры. Частицы, оказавшиеся в плоскости лазерного листа, рассеивают его излучение, часть которого попадает в телекамеру 7 через стеклянное окно 8 и формирует изображение этих частиц (рис. 9).

Снятое телекамерой изображение (рис. 9) оцифровывали на персональном компьютере платой видеозахвата. Для лучей, падающих на границу раздела воздух/жидкость под большими углами, выполняется условие полного внутреннего отражения. Если лучи отражаются в области мениска смачивания стеклянного окна, они попадают в камеру и формируют мнимые изображения частиц. Поэтому снимок разделен поверхностью жидкости на две части – область реального и мнимого отображения. Видеопоток записывали с разрешением 720×576 пикселей с частотой 25 кадров/с. Поле зрения телекамеры захватывает область примерно 2.5×2.0 мм², масштабный коэффициент составляет ≈ 3.53 мкм/пиксель. При средней скорости 1 мм/с точность измерений составляет $(88 \text{ мкм/с} \cdot 100 \%) / 1000 \text{ мкм/с} \approx 8.8 \%$.

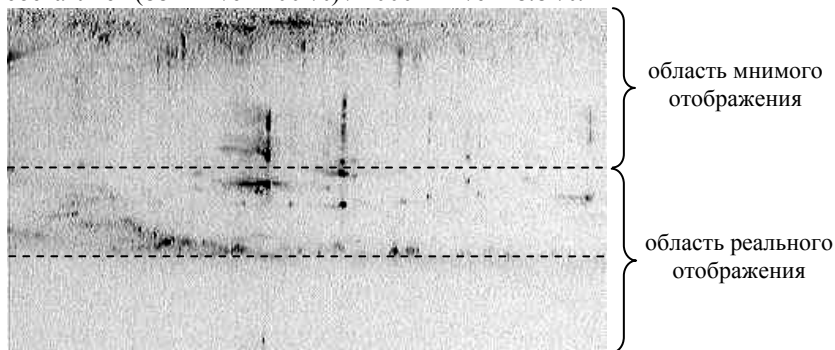


Рис. 9. Негатив изображения, снятого телекамерой. Темные точки соответствуют трассерным частицам. Пунктирными линиями показаны примерные положения границ подложка/жидкость и жидкость/воздух. Изображение получено для слоя ПМС-5 толщиной $h_0 = 530$ мкм.

Если вертикальный размер области наблюдения (2 мм) полностью перекрывает толщину слоя (~ 1 мм), то горизонтального размера (2.5 мм) явно недостаточно: диаметр ТК углубления, наблюдаемого в скользящем свете, может составлять 10 мм и более. Расширение области наблюдения за пределы 2.5 мм технически сложно, поэтому в данной работе ограничились исследованием доступной для наблюдения зоны.

Восстановление поля скоростей ТК вихря. Скорость частицы определяли по двум последовательным кадрам как отношение

пройденного ею расстояния dx за время смены кадра $dt = 1/25$ с. Благодаря тому, что количество частиц невелико, они достаточно хорошо узнаваемы. Это позволяет обойтись без сложных систем с кросс-корреляционной обработкой кадров, и находить поле скоростей вручную.

На рис. 10 показаны два последовательных совмещенных снимка видеозаписи в слое ПМС-5 толщиной 530 мкм при перепаде температуры $\Delta T = 1.5$ К (температура указана относительно температуры термостата). Вблизи дна кюветы из-за осаждения плотность частиц несколько выше, чем у поверхности слоя. По их координатам оценивали положение поверхности подложки.

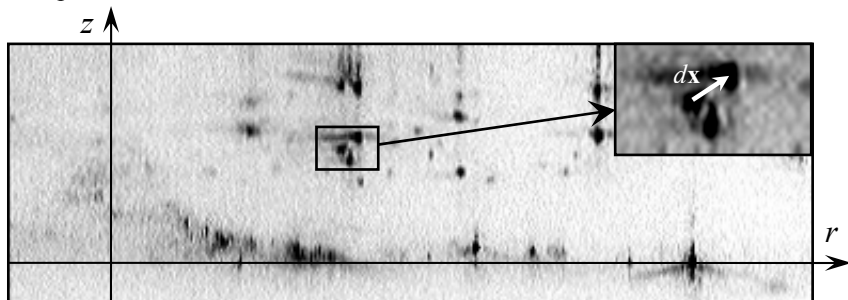


Рис. 10. Два последовательных совмещенных кадра видеозаписи, по которым определяли поле скоростей.

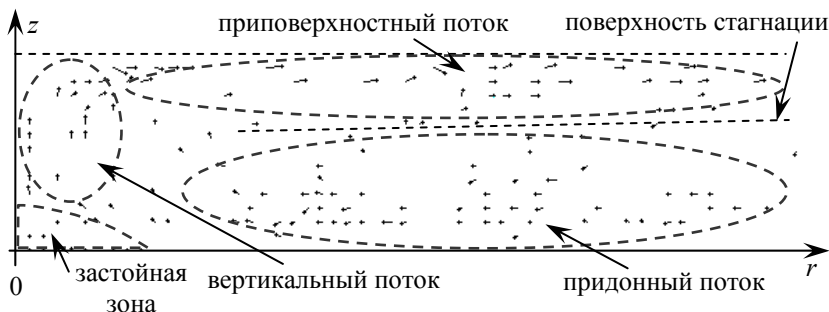


Рис. 11. Восстановленное поле скоростей в слое ПМС-5 толщиной 530 мкм. Температура нагревателя 1.5 К.

При обработке массива координат полученное векторное поле разбивается на квадратные участки размером 50 мкм. Все попадающие в выделенный квадрат векторы скоростей усредняются, и начало полученного вектора помещается в точку в центре квадрата. После этого

вносится поправка на осаждение частицы под действием силы тяжести. На рис. 11 изображено усредненное поле скоростей, соответствующее кадрам на рис. 10. Можно выделить четыре области с разным характером течения. Застойная зона в области нагрева над спаем термопары с преимущественно кондуктивным теплопереносом, над ней – вертикальный поток, направленный к поверхности жидкости. На расстоянии более 1 мм от оси ТК вихря существуют радиальный приповерхностный поток, направленный из центра на периферию, и находящийся под ним радиальный придонный поток, направленный к центру. Они разделены *поверхностью стагнации, скорости течения на которой равны нулю*. Ее можно рассматривать как аналог твердой тонкой пленки, на которой для обоих потоков выполняется условие прилипания. Поэтому *в совокупности приповерхностный и придонный потоки являются течением Пуазейля с подвижной верхней границей*.

Методика восстановления профиля ТК углубления. Рассмотрим отдельный кадр видеозаписи (рис. 12). Парные точки в верхней части снимка – реальные (нижние) и мнимые (верхние) изображения частиц, находящихся вблизи поверхности жидкости.

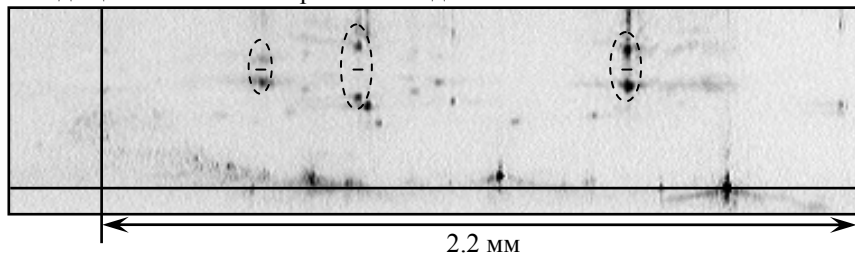


Рис. 12. Кадр видеозаписи, используемый для восстановления профиля поверхности. Парные точки обведены эллипсами.

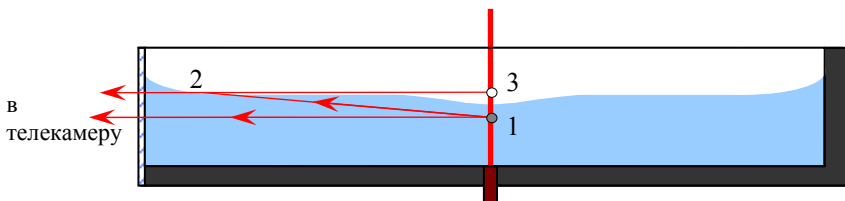


Рис. 13. Ход лучей, отраженных от трассерной частицы.

1 – трассерная частица в слое жидкости, 2 – искривленная поверхность мениска смачивания стеклянного окна, 3 – мнимое изображение трассерной частицы.

Мнимые изображения получаются за счет полного внутреннего отражения от искривленной поверхности мениска смачивания стеклянного окна рассеянного частицей излучения (рис. 13). По координатам парных точек определяли положение поверхности жидкости как середину расстояния между их центрами. Для уменьшения погрешности измерения выбирали такие точки, которые находились друг от друга на расстоянии одного диаметра трассерной частицы (до 15 мкм) и менее (для наглядности на рис. 13 показаны пары точек с заведомо большим расстоянием). Восстановленный профиль поверхности для слоя ПМС-5 толщиной 530 мкм показан на рис. 14. Наиболее удаленная экспериментальная точка на расстоянии 2.2 мм от оси вихря находится ниже исходного уровня жидкости, поэтому радиус ТК углубления превосходит 2.2 мм. Возможное продолжение поверхности жидкости показано на рис. 14 штриховой линией.

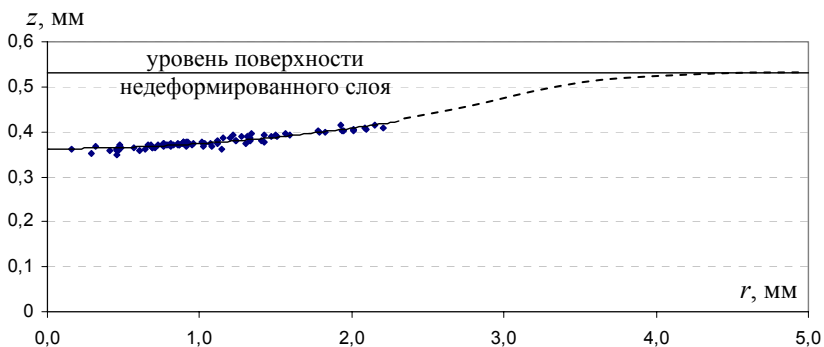


Рис. 14. Восстановленный участок профиля ТК углубления. Штрихом показано возможное продолжение поверхности жидкости.

Исследование профиля ТК углубления. Эксперименты проводили с силиконовыми маслами ПМС-5, ПМС-10 и ПМС-20. Профили поверхности восстанавливали для толщин слоя 530, 730 и 1030 мкм, температур нагревателя 1.5, 5.5 и 12.5 К. На рис. 15 показаны центральные участки профилей в слое ПМС-5 для указанных значений температуры нагрева и толщины слоя.

Центральный участок ТК углубления является вогнутым зеркалом со своим радиусом кривизны R . Кривизна поверхности наряду с поверхностным натяжением σ определяет величину капиллярного

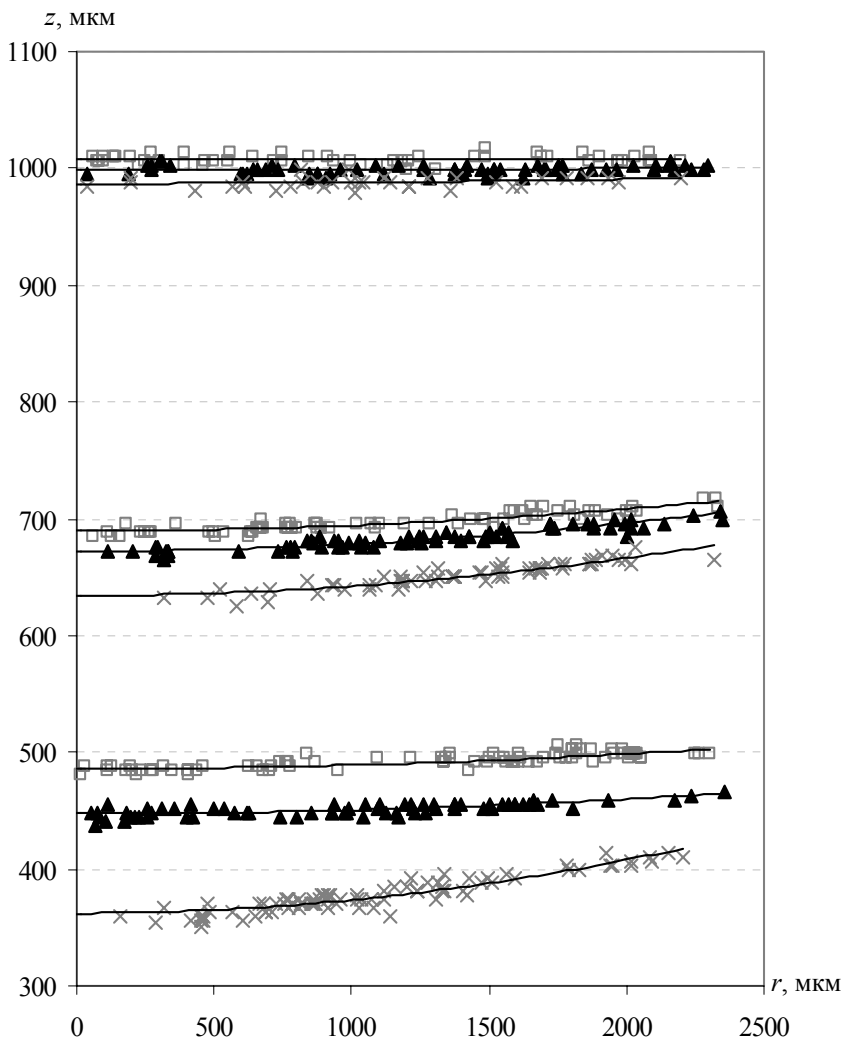


Рис. 15. Семейство профилей ТК углубления в слоях ПМС-5 толщиной 530 (нижние кривые), 730 (средние кривые) и 1030 мкм (верхние кривые) для перепада температур 1.5 (серые квадратики), 5.5 (черные треугольники) и 12.5 К (серые крестики).

давления $P_{\sigma} = 2\sigma/R$ (давление Лапласа). Значения радиусов кривизны и капиллярного давления для профилей, соответствующих толщинам слоя 530, 730 и 1030 мкм при перепаде температуры нагревателя 12.5 К, указаны в табл. 1.

Таблица 1. Радиусы кривизны центральных участков ТК углубления

h_0 , мм	ПМС-5		ПМС-10		ПМС-20	
	R , см	P_{σ} , мПа	R , см	P_{σ} , мПа	R , см	P_{σ} , мПа
0.53	4.35	906.2	4.90	803.8	3.42	1151
0.73	6.25	630.4	5.88	669.8	7.69	512.2
1.03	50.0	78.8	10.4	378.2	9.26	425.5

С одной стороны, видно, что увеличение температуры нагревателя приводит к росту радиуса кривизны поверхности R и значения капиллярного давления P_{σ} . Аналогично обстоит дело и с влиянием толщины слоя: с ее ростом наблюдается уменьшение значений R и P_{σ} . С другой стороны, влияние изменения вязкости на эти величины не так очевидно. Недостаточная точность определения профиля поверхности ($\pm 5.4...7.3$ мкм) наряду с тем, что профиль восстановлен лишь частично, не позволила определить, каким образом вязкость сказывается на значениях радиуса R кривизны ТК углубления.

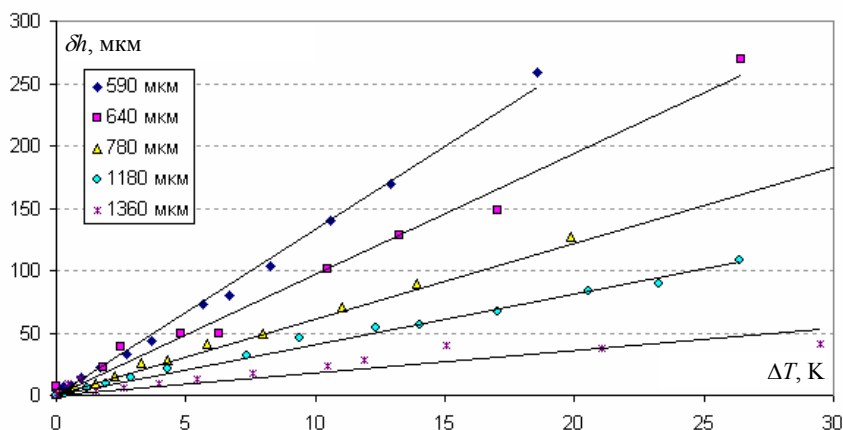


Рис. 16. Зависимость прогиба ТК углубления от температуры. Различные кривые соответствуют разным толщинам слоев.

Наиболее характерная точка ТК углубления – его центр. На рис. 16 представлено семейство зависимостей прогиба δh от температуры нагревателя при различных толщинах для слоя ПМС-5. Их линейный характер говорит о том, что величина прогиба во всех случаях прямо пропорциональна температуре нагрева. Рост температуры нагревателя приводит к увеличению градиента температуры на поверхности жидкости и, как следствие, градиента поверхностного натяжения. Это приводит к росту скоростей течения ТК вихря и размера ТК углубления.

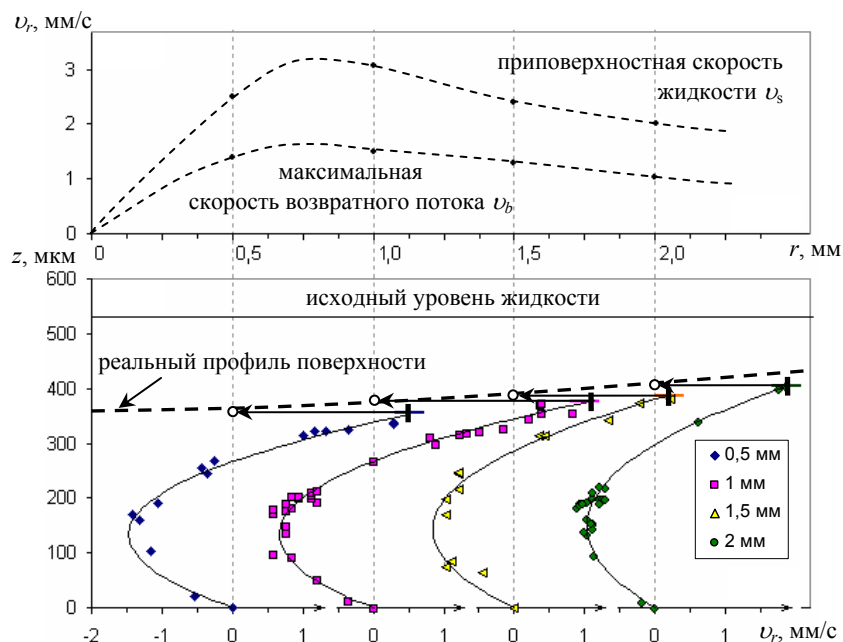


Рис. 17. Скорость приповерхностного слоя жидкости и максимальная скорость возвратного потока (сверху), и соответствующие им вертикальные распределения горизонтальной компоненты скорости на расстояниях 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 мм от оси ТК вихря (снизу). Температура нагревателя 12,5 К, жидкость – ПМС-5.

Исследование поля скоростей ТК вихря проводилось в жидкостях ПМС-5, ПМС-10 и ПМС-20. На рис. 17 показаны вертикальные сечения поля радиальной компоненты скорости в слое ПМС-5 толщиной 530 мкм. Перепад температуры на нагревателе 12,5 К. Как и в других работах по измерению скоростей капиллярных течений (рис. 1), получены значения в диапазоне нескольких мм/с. Крестики на верхних концах графиков

обозначают положение поверхности жидкости. Для восстановления реального профиля поверхности значения высот, отмеченные крестиками, перенесены в соответствующие сечения в виде светлых кружков. Видно, что максимальные значения скоростей наблюдаются на расстоянии около 1 мм от оси вихря. С уменьшением расстояния доминирует вертикальная компонента вектора скорости, поэтому приповерхностная скорость при приближении к оси вихря уменьшается. С увеличением расстояния скорость течения также уменьшается, что обусловлено как осевой симметрией ТК вихря, так и локальным изменением толщины слоя: на оси ТК вихря толщина минимальна из-за прогиба, и растет с увеличением расстояния от оси. Отличие зависимости $v_r(r)$ от $v_r \sim 1/r$, которая должна наблюдаться при осесимметричном растекании жидкости от точечного источника, обусловлено наличием вертикальной компоненты скорости течения, нелинейным градиентом поверхностного натяжения на границе воздух-жидкость (для поверхностной скорости), и локальным изменением толщины слоя за счет образования ТК углубления.

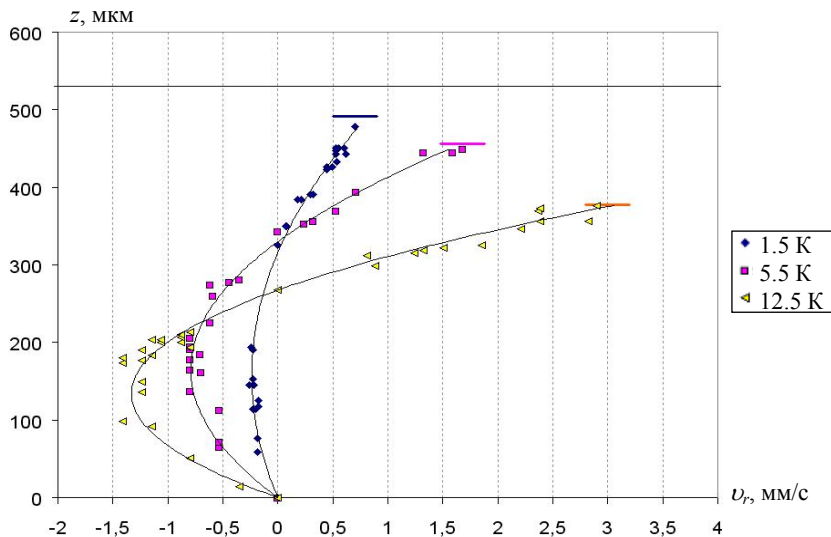


Рис. 18. Изменение распределения радиальной компоненты скорости по толщине слоя на расстоянии 1 мм от центра ТК вихря для различных перепадов температуры нагревателя. Жидкость – ПМС-5. Начальная толщина слоя 530 мкм.

Влияние толщины слоя и температуры нагревателя на скорость течения жидкости иллюстрирует рис. 18. Эксперименты выполнены со слоями ПМС-5 толщиной 530, 730 и 1030 мкм. С ростом температуры

увеличивается градиент поверхностного натяжения, что приводит к росту скоростей течения. Используя граничное условие для свободной поверхности жидкости:

$$\mu \left. \frac{dv_r}{dz} \right|_{z=h} = \frac{d\sigma}{dr},$$

и полученные экспериментально зависимости $v_r(z)$, находим градиенты поверхностного натяжения, возникающие за счет градиента температуры на поверхности жидкости (табл. 3).

Таблица 3. Оценки градиентов поверхностного натяжения.

$\Delta T, \text{ К}$	$d\sigma/dr, \text{ дин/см}^2$		
	$h = 530 \text{ мкм}$	$h = 730 \text{ мкм}$	$h = 1030 \text{ мкм}$
1.5	0.41	0.38	0.49
5.5	1.05	1.17	0.99
12.5	1.92	1.58	1.58

Максимальная скорость возвратного потока v_b в исследованном диапазоне толщин изменяется не более чем на 7 %. Поверхностные скорости заметно меняются только при большом перепаде температуры нагревателя: 12.5 К – в 1.5 раза при изменении толщины с 530 до 1030 мкм. Это можно объяснить большой величиной (около 160 мкм) ТК прогиба при толщине 530 мкм. Вследствие деформации поверхности жидкости толщина слоя на оси вихря падает до ≈ 370 мкм и свободная поверхность оказывается ближе к нагревателю по сравнению с более толстыми слоями, что создает больший градиент температуры (табл. 3).

Используя полученные ранее оценки давления Лапласа под искривленной поверхностью для ПМС-5 при перепаде температуры $\Delta T = 12.5 \text{ К}$, (табл. 2), сравним их с динамическим давлением $P_i = \rho v_s^2/2$, возникающим в жидкости за счет движения приповерхностного слоя. Расчеты проводили по профилям горизонтальной компоненты скорости, полученным на расстоянии 1 мм от оси ТК вихря. Значения приповерхностной скорости для разных толщин слоя, и оценки динамического давления приведены в табл. 4.

Таблица 4. Оценки капиллярного P_σ и динамического P_i давлений.

$h, \text{ мм}$	$r, \text{ мм}$	$P_\sigma, \text{ мПа}$	$v_s, \text{ мм/с}$	$P_i, \text{ мПа}$
0.53	43.5	906.2	3.1	0.98
0.73	62.5	630.4	2.6	0.69
1.03	500	78.8	2.5	0.64

Видно, что при толщине слоя 530 мкм значения давлений различаются на 3 порядка, тогда как при 1030 мкм – уже на 2 порядка. Сильная зависимость капиллярного давления от толщины слоя и несовпадение значений капиллярного и динамического давлений связаны с изменением сечения возвратного потока. Аппроксимируя зависимости $P_{\sigma}(h)$ и $P_d(h)$ функциями вида $y = a/x^b$, и экстраполируя в область больших толщин, находим, что при толщине слоя около 5.5 мм они дают одинаковые значения. Поэтому несовпадение значений капиллярного и динамического давлений можно объяснить следующим образом. Скорость возвратного потока пропорциональна градиенту давления и толщине слоя. При уменьшении толщины уменьшается сечение возвратного потока ТК вихря, что приводит к росту потерь на вязкое трение. При неизменном капиллярном давлении скорость возвратного потока неизбежно должна уменьшиться. Однако, так как градиент температуры, определяющий скорость приповерхностного течения, слабо изменяется с ростом толщины слоя (т.е. почти не изменяется скорость приповерхностного потока), а в стационарном случае должно выполняться равенство потоков, то *уменьшение сечения возвратного потока компенсируется увеличением кривизны поверхности жидкости и ростом капиллярного давления.* Поэтому кривизна ТК углубления в тонких слоях жидкости значительно больше, чем в толстых, что сказывается на диаметре ТК отклика.

Изучение влияния вязкости жидкости на скорость течения ТК вихря проводили для значений вязкости 5, 10 и 20 сСт. На рис. 19 изображены вертикальные распределения скоростей на расстоянии 1 мм от центра нагревателя. При увеличении вязкости в 4 раза (с 5.1 до 20.2 сСт) скорость течения заметно снижается: в 4 раза (с 0.35 до 1.4 мм/с при $\Delta T = 12.5$ К) в придонном потоке (обратно пропорционально вязкости, что характерно для течения Пуазейля) и в 3 раза (с 0.35 до 1.4 мм/с при $\Delta T = 12.5$ К) на поверхности жидкости. Так как жидкость в приповерхностном потоке более нагрета, а при нагреве вязкость жидкости уменьшается, то *различие между скоростями приповерхностного потока для жидкостей с разными вязкостями менее выражено, чем в случае возвратного потока.* В табл. 5 приведены значения градиента поверхностного натяжения в точке на расстоянии 1 мм от оси вихря при $\Delta T = 12.5$ К в слое толщиной 530 мкм.

Так как $d\sigma/dr$ однозначно зависит от распределения температуры на поверхности жидкости, то за счет уменьшения скоростей ТК вихря тепло концентрируется в области нагрева и обеспечивает большой градиент поверхностного натяжения.

Таблица 5. Оценки градиента поверхностного натяжения для жидкостей с различными вязкостями.

ν , сСт	$d\sigma/dr$, дин/см ²
5	1.92
10	2.22
20	2.47

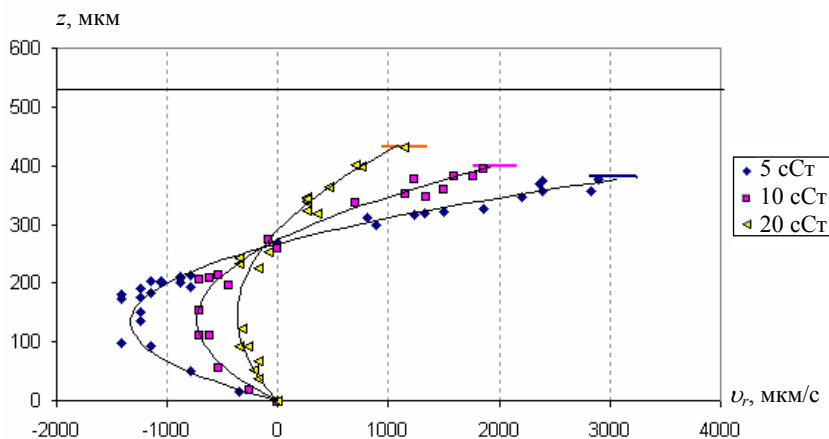


Рис. 19. Изменение распределения скоростей на расстоянии 1 мм от оси ТК вихря для различных значений вязкости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен недорогой компенсационный способ измерения температуры подложки с помощью точечного контактного термодатчика в зоне облучения при фотовозбуждении термокапиллярной конвекции.
2. Проведены измерения перепада температуры подложки для набора жидкостей с различными вязкостями, ее значения при мощности индуцирующего лазера до 8 мВт для различных жидкостей достигают 7.5 К.
3. Установлено, что зависимость температуры подложки от толщины слоя имеет минимум, наличие которого можно объяснить следующим образом. Падение температуры на поверхности подложки в области малых толщин предположительно связано с увеличением объема

термокапиллярного вихря и, следовательно, увеличением расхода энергии на его поддержание. По положению минимума можно судить о толщине слоя, при которой теплоотвод от подложки наиболее эффективен. При дальнейшем росте толщины в придонном слое основным механизмом переноса тепла становится кондуктивный, и, из-за его малой эффективности по сравнению с конвективным механизмом, температура подложки растёт.

4. Сравнение перепадов температуры, измеренных с помощью трех датчиков, показало, что в приближении, когда возмущение теплового поля в подложке, вызванное датчиком, не учитывается, а размер его чувствительного элемента приблизительно равен диаметру пучка индуцирующего лазера, предложенный подход к измерению температуры подложки в зоне нагрева не зависит от размеров и материала датчика.
5. Предложен новый метод определения профиля поверхности термокапиллярного углубления, использующий эффект полного внутреннего отражения от поверхности жидкости излучения, рассеиваемого трассерными частицами.
6. Восстановлены центральные участки профиля термокапиллярного углубления для силиконовых масел ПМС-5, ПМС-10 и ПМС-20.
7. Методом трассерных частиц построено поле скоростей термокапиллярного вихря в слоях тоньше 1 мм. Исследовано влияние температуры нагревателя, толщины слоя жидкости и ее вязкости на распределение скоростей. Установлено, что на расстояниях более 1 мм от оси вихря, где вертикальные компоненты скорости пренебрежимо малы, приповерхностный и придонный потоки разделяет поверхность стагнации.
8. Наибольшее влияние на скорость термокапиллярного течения оказывает вязкость жидкости, причем в придонном потоке скорость обратно пропорциональна вязкости, а в приповерхностном потоке эта зависимость менее выражена из-за нагрева жидкости, вызывающего локальное уменьшение вязкости.
9. С уменьшением толщины слоя уменьшается сечение возвратного потока, и увеличиваются потери энергии на вязкое трение. Их компенсирует рост кривизны термокапиллярного углубления и, следовательно, градиент давления: при уменьшении толщины слоя в 2 раза капиллярное давление увеличивается более чем в 11 раз.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Флягин В.М. Контактное измерение температуры подложки в зоне облучения при фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции в тонком слое прозрачной жидкости / Безуглый Б.А., Флягин В.М. // ПЖТФ. – 2006. – т. 32. – № 15. – С. 82-87.
2. Заявка №2006109850/17(010704) Способ измерения температуры подложки, покрытой тонким слоем прозрачной жидкости при фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции. Безуглый Б.А., Иванова Н.А., Флягин В.М. (получено положительное решение формальной экспертизы).
3. Флягин В.М. Оценка температуры в зоне нагрева при возбуждении фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции / Безуглый Б.А., Флягин В.М. // Труды РНКТ-4. – 2006. – т.3 – С. 47-50.
4. Флягин В.М. Оценка температуры в зоне нагрева при возбуждении фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции / Безуглый Б.А., Флягин В.М. // Сборник “Теплофизика, гидродинамика, теплотехника”. Выпуск 3. – 2006. (в печати).

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Безуглый Б.А. О фотоконденсации йода / Безуглый Б.А., Галашин Е.А., Дудкин Г.Я. // Письма в ЖЭТФ. – 1975. – т. 22. – № 2. – с. 76-79.
2. Da Costa G. Self-holograms of laser induced surface depression in heavy hydrocarbons / G. Da Costa, J. Calatrony // Appl. Opt. - 1978. - V. 17. № 15. - P. 2381-2385.
3. Безуглый Б.А. Лазерный метод измерения толщины тонкого жидкости слоя жидкости на твердой поверхности с помощью термокапиллярного отклика / Б.А. Безуглый, А.А. Федорец // ПЖТФ. - 2001. - № 9. - С. 20-25.
4. Тарасов О.А. Оценка возможности использования лазерно-индуцированного термокапиллярного эффекта для фототермической спектроскопии / О.А. Тарасов // Физическая и квантовая оптика. - 2005. - Т. 99. - № 6. - С. 1004-1011.
5. Безуглый Б.А. Усовершенствованный метод наклонной пластинки измерения краевого угла смачивания / Б.А. Безуглый, О.А. Тарасов, А.А. Федорец // Коллоидный журнал. - 2001. - № 6. - С. 735-741.
6. Чемоданов С.И. Эффект задержки термокапиллярного отклика слоя прозрачной жидкости при лазерном нагреве поглощающей подложки / Б.А. Безуглый, С.И. Чемоданов // Журнал технической физики. – 2005. - Т. 75. - Вып. 9. - С. 136-138.

7. Kamotani Y. Analysis of velocity data taken in Surface Tension Driven Convection Experiment in microgravity / Kamotani Y., Ostrach S. // *Phys. Fluids*. – 1994. – V. 6 – № 11. – P. 3601-3609.
8. STDCE 2 experiment / Kamotani Y., Ostrach S., Masud J. // *Proc. Fourth Microgravity Fluid Physics & Transport Phenomena Conference, Cleveland, Ohio*. – 1998. – P. 263-268.
9. Гладуш Г.Г. Термокапиллярная конвекция при лазерном нагреве поверхности / Гладуш Г.Г., Дробязко С.В., Лиханский В.В. и др. // *Квант. Электроника*. – 1998. – Т. 25. – № 5. – с. 439-442.
10. Низовцев В.В. Исследование стимулированной локальным облучением и естественной конвекции в тонком слое испаряющейся жидкости / В.В. Низовцев // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1989. – № 1. – С.139–145.
11. Альварес-Суарес Ю.С. Теоретическое и экспериментальное исследование конвекции в слое жидкости при локальном нагреве / Альварес-Суарес Ю.С., Рязанцев В.М., Шевцова В.М // *ПМТФ*. – 1990. – № 2. – С.53–57.
12. Da Costa G. Competition between capillary and gravity forces in a viscous liquid film heated by a Gaussian laser beam / G. Da Costa // *J. Physique*. - 1982. - V. 43. - № 10. - P. 1503-1508.
13. Calatroni J. Interferometric determination of the surface profile of a liquid heated by a laser beam / J. Calatrony, G. Da Costa // *Optics commun.* - 1982. - V. 42. - № 1. - P. 5-9.
14. Безуглый Б.А. Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации. Дисс.канд.физ.-мат. наук / Б.А. Безуглый. – М., 1983. –270 с.
15. Helmers H. Holographic study of laser-induced liquid surface deformations / H. Helmers, W. Witte // *Optics communications*. - 1984. - V. 49. - № 1. - P. 21-23.
16. Sukhodol'skii A.T. On thermocapillary aberrational transformation of laser beams / S.A. Viznyuk, S.F. Rastopov, A.T. Sukhodol'skii // *Opt. comm.* – 1989. – V. 71. – № 5. – P. 239-243.
17. Федорец А.А. Фотоиндуцированный термокапиллярный эффект и его применение для измерения свойств жидкостей: Дисс.канд. физ.-мат. наук / А.А. Федорец. - Тюмень, 2002. – 146с.
18. Чаппаров Ф.Х. Автоматизированная экспериментальная установка для определения профиля поверхности жидкости, деформированной капиллярными течениями / Б.А. Безуглый, А.А. Федорец, Ф.Х. Чаппаров // *Сборник тезисов ВНКСФ-9*. – 2003. – Т. 2. – С. 999-1000.