



УДК 532:536

В.С. Бердников, В.А. Гришков, В.А. Марков

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
111250, Новосибирск, просп. Лаврентьева, 1, E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

Экспериментально исследован процесс развития и распространения термокапиллярных волн от импульсно нагреваемого линейного источника тепла, расположенного на свободной поверхности жидкости. Изучена зависимость характеристик волн от положения источника тепла и режимов нагрева (мощности, частоты и длительности импульсов). Эксперименты выполнены на жидкости с числом Прандтля равным 16. Нестационарные поля температуры на поверхности жидкости измерены тепловизором. Поля скорости изучены с использованием видеосъемки визуализированных частичками-трассерами течений прозрачной жидкости.

ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫЙ ЭФФЕКТ, ИМПУЛЬСНЫЙ НАГРЕВ ЛИНЕЙНОГО ИСТОЧНИКА, ТЕПЛОВЫЕ ВОЛНЫ, ТЕПЛОВИЗОР, ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, ПОЛЕ СКОРОСТИ

ВВЕДЕНИЕ

Одна из проблем теплофизики и физической гидродинамики – разработка методик генерации и экспериментального изучения термокапиллярных течений в наземных условиях без влияния сил плавучести, не на микро-, а на макрообъектах. Проблема была хорошо осознана и ее решение приобрело не только академический [1,2], но практический характер во время активного развития экспериментальных исследований особенностей поведения жидкостей и расплавов в условиях микрогравитации и наземного сопровождения орбитальных экспериментов [1,3–5].

Оценка роли термокапиллярного эффекта на фоне слабой термогравитационной конвекции в различных технологических системах, особенно при получении монокристаллов методами направленной кристаллизации в ампулах с продольным градиентом температуры, стала необходимостью при определении условий роста кристаллов на орбитальных станциях “Салют” и “Мир” и на спутниках “Фотон” [4,5]. После осознания важности учета термокапиллярного эффекта в условиях микрогравитации началось серьезное изучение тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в наземных условиях, и, по-видимому, в первую очередь в наиболее важных промышленных методах получения монокристаллов из расплавов – в методах Чохральского, бестигельной зонной плавки, в ампулах и в лодочках с продольным градиентом температуры [3–8]. Исследования проводятся при стационарных или монотонно меняющихся граничных условиях. При этом даже при подавляющем влиянии термокапиллярного эффекта вопрос об относительной роли сил плавучести остается открытым. Еще при анализе результатов экспериментов [3] появилась идея у одного из авторов данной работы использовать для генерации термокапиллярного течения импульсно нагреваемый линейный источник тепла, расположенный на свободной поверхности слоя

этилового спирта. Были проведены качественные эксперименты (в 1983 г., но результаты не были опубликованы) и было обнаружено, что при коротких импульсах и большой скважности жидкость не успевает прогреваться в глубину и вдоль поверхности распространяется тепловая волна термокапиллярной природы. При относительно малой мощности импульсов тока свободная поверхность практически не деформируется. Было обнаружено пороговое значение частоты следования импульсов, выше которой импульсный нагрев равнозначен постоянному нагреву. С появлением тепловизионной техники данный тип течения можно исследовать без возмущающего воздействия микротермопарных зондов [2,3,8] и анализировать поле температуры не в одной точке, а на всей поверхности одновременно. Современные цифровые видеокамеры и компьютерная обработка видеofilмов позволяют одновременно с измерениями поля температуры на поверхности жидкости исследовать гидродинамику.

Исследования конвективного течения от периодически нагреваемого линейного источника, расположенного на свободной поверхности жидкости или заглубленного под свободной поверхностью имеют практическое значение для разработки нестационарных методов измерения теплофизических свойств текучих сред [9] и при анализе различных технологических процессов с авторегулированием температуры стенок.

Если расстояние от проволоочки до поверхности жидкости мало, то вклад в конвективное течение сил плавучести (характеризуемых значением числа Рэлея) мал и основное влияние на параметры волн оказывает термокапиллярный эффект (и термокапиллярная конвекция, определяемая числом Марангони). В данной работе представляются результаты экспериментальных исследований тепловых волн, распространяющихся по поверхности от периодически нагреваемой тонкой проволоочки расположенной на свободной поверхности слоя этилового спирта ($Pr = 16$).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДИКИ

Схема установки показана на рис. 1. Кювета, в которой находится жидкость, представляет собой прямоугольную полость, изготовленную из прозрачного оргстекла с внутренними размерами: длина \times ширина \times высота = $350 \times 200 \times 50$ мм³. Два медных теплообменника размещены по торцам слоя. Дно кюветы с внешней стороны теплоизолировано слоем поролонa. Вертикальные поверхности теплообменников (размером 190×60 мм²) расположены параллельно короткой стороне кюветы и ограничивают исследуемый слой жидкости с двух сторон. Через теплообменники прокачивалась вода из термостатов (температура воды поддерживалась с точностью $0,1^\circ\text{C}$).

Температура медных пластин теплообменников контролировалась медь-константановыми термопарами. На свободной верхней границе жидкости в центре слоя параллельно торцевым теплообменникам помещена константановая проволоочка. Длина проволоочки $l = 170$ мм, диаметр $d = 0,2$ мм. Сопротивление (при $T = 27^\circ\text{C}$) $R = 3,5$ Ом. Проволочка растянута на упругих стальных ножках, концы которых заточены. С помощью микровинта проволоочка могла перемещаться по вертикали, перемещения контролировались микрометром. Для управления режимом нагрева проволоочки был разработан и изготовлен контроллер, подключенный к персональному компьютеру (ПК) через последовательный СОМ порт. Разработанное программное обеспечение позволяло управлять параметрами нагрева проволоочки (период следования импульсов – ПИ, и длительность импульса – ДИ). Мощность нагрева регулировалась источником питания. Температура в объёме, на поверхности и над поверхностью жидкости контролировалась термопарным зондом, состоящим из двух нихром-константановых термопар с диаметрами спаев 40 мкм. Зонд мог перемещаться по трём координатам, в вертикальном направлении зонд перемещался с помощью микровинта, точность измерения вертикальной координаты $0,01$ мм. Контроллер позволял опрашивать два цифровых вольтметра Ш-300, что обеспечивало измерение температуры с термопарных зондов с точностью $0,01^\circ\text{C}$ и с максимальной частотой опроса 25 Гц. Поле температуры на

поверхности жидкости измерялось с помощью компьютерного тепловизора “Инфратерм” (разработка Института физики полупроводников СО РАН) имеющего температурное разрешение $0,03^{\circ}\text{C}$ и позволяющего записывать до 20 кадров в секунду. Измерительная матрица содержит 128×128 элементов, размер которых 40×40 мкм. Тепловизор регистрирует тепловое излучение с участка поверхности жидкости, размеры которого выбирались от $52 \times 52 \text{ мм}^2$ до $300 \times 300 \text{ мм}^2$.

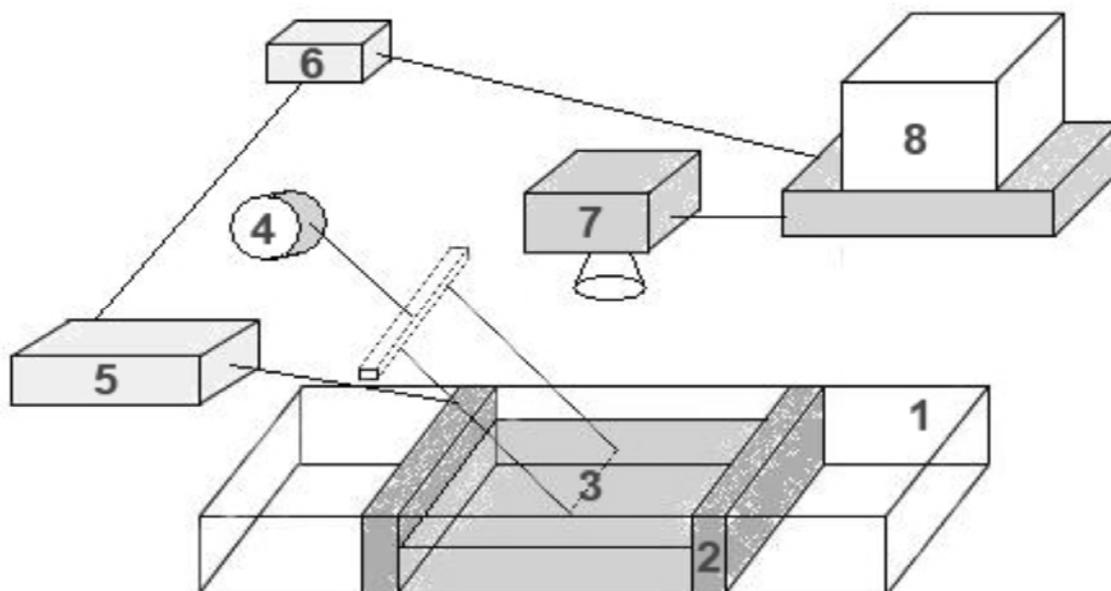


Рис. 1. Блок схема установки:

1- кювета, 2 – теплообменник, 3 – проволочный нагреватель, 4 – координатник, 5 – контролер, 6 – вольтметр Щ-300, 7 – тепловизор, 8 – ПК

Экспериментальные исследования проводились по следующей методике. Кювета с помощью микровинтов устанавливалась строго горизонтально, заполнялась рабочей жидкостью и включалась прокачка воды из термостата. Через 2-3 часа установка выходила в стационарный изотермический режим. Температура теплообменников задавалась равной температуре окружающей среды. В представленной серии экспериментов начальная температура рабочей жидкости была равна $21,5^{\circ}\text{C}$. Высота слоя жидкости поддерживалась постоянной и равной $H = 10,0$ мм или $24,0$ мм. Проволочка выставлялась так, чтобы не было деформации поверхности (деформация около $0,02$ мм дает в плоском пучке света на дне полости яркую полосу). Задавались параметры нагрева: напряжение $U = 8,5$ В, сила тока $I = 2,4$ А, длительность импульса и период следования импульсов задавались программно. Тепловизионная камера устанавливалась таким образом, чтобы проволочка была параллельна стороне поля кадра, и делила кадр на части приблизительно 1:3. Термопары, контролирующие распределение температуры в слое жидкости и на поверхности, в анализируемой серии экспериментов были выведены из поля кадра. После включения импульсного нагрева проволочки до начала тепловизионной съемки выдерживалось время 30 минут. За это время устанавливался тепловой баланс между теплом, выделяемым проволочкой, и теплом снимаемым теплообменниками. Время записи тепловизионного фильма отдельного установившегося режима составляло 40-120 секунд, частота кадров равнялась $19,5$ Гц. Для исследования пространственной формы конвективного течения визуализированной жидкости в двух плоскостях (вид сверху в плоскости свободной поверхности и вид сбоку по нормали к поверхности и проволочке) использовалась цифровая видеокамера (частота кадров 25 Гц). Визуализация жидкости проводилась алюминиевыми частицами-чешуйками с размерами $10-15$ мкм.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходная информация о температуре хранится в виде матрицы мгновенных значений температуры в $128 \times 128 = 16384$ точках. Обработывая на ЭВМ эту информацию, можно получить поле температуры в виде тоновой картинки, в виде трехмерного графика $T(x,y)$ или распределения изотерм на поверхности жидкости. На рис. 2 представлена выборка отдельных кадров тепловизионного фильма в виде тоновых рисунков в формате bmp (256 градаций серого цвета). Показана эволюция поля температуры на поверхности слоя спирта во времени в режиме с длительностью интервала нагрева – ДИ = 5 с, периода следования импульсов ПИ = 10 с. Первые три кадра соответствуют периоду разогрева, следующие три кадра – интервалу остывания. Светлые области вблизи проволоочки соответствуют более высокой температуре, темные – низкой. После включения нагрева, температура в непосредственной близости от проволоочки резко возрастает и достигает 32°C (скачок температуры на $10,5^\circ\text{C}$). Резко возникший большой локальный градиент температуры (и градиент коэффициента поверхностного натяжения) приводит к разбеганию нагретой жидкости вдоль поверхности из-за действия термокапиллярного эффекта. Формируется передний фронт тепловой волны. На кадре 2 (рис. 2) это полоска шириной около 4 мм, которая со временем уширяется. Здесь же видно, что между узкой полоской нагретого

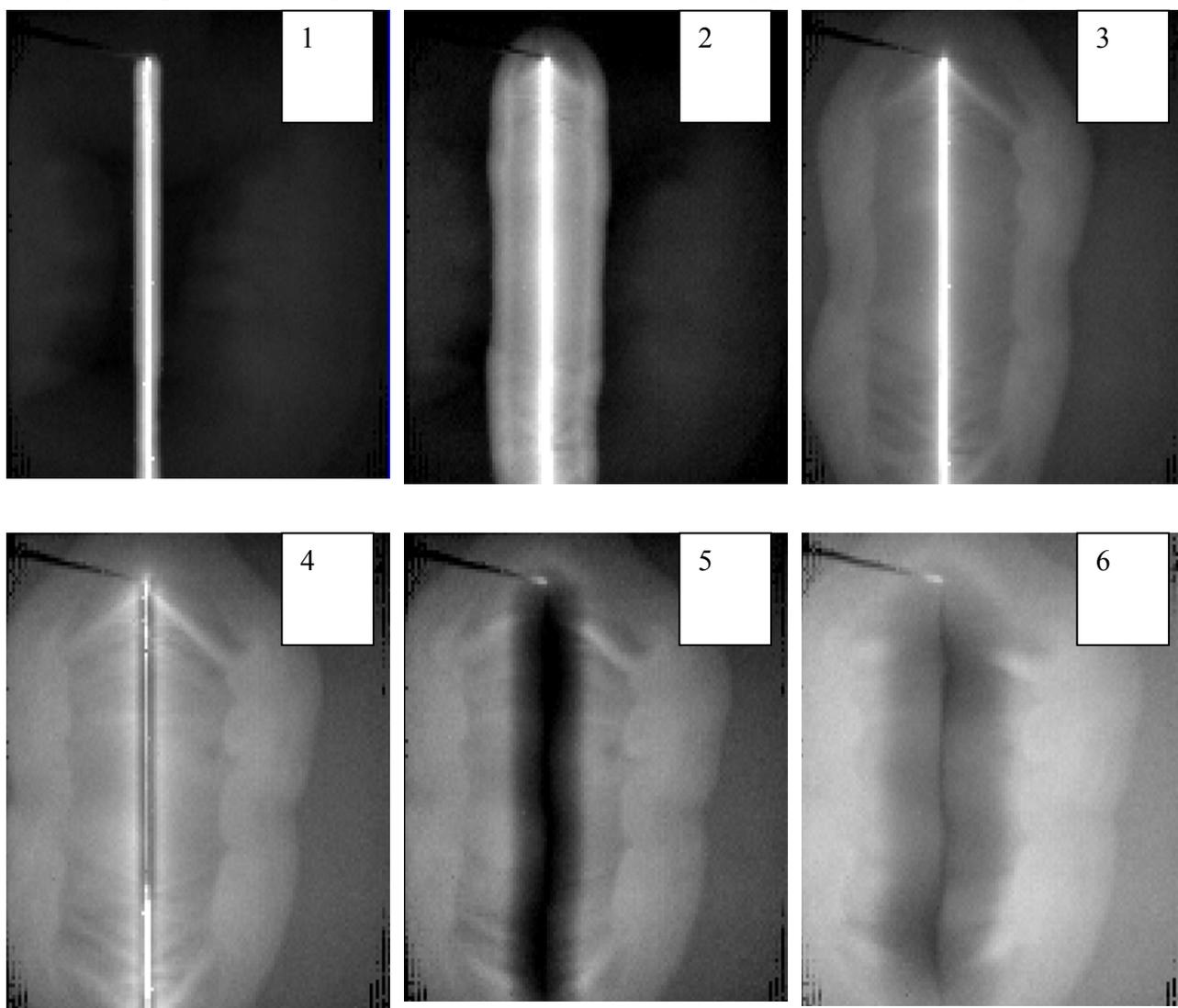


Рис. 2. Эволюция поля температуры вблизи импульсно нагреваемой проволоочки. Время от начала нагрева:

1 – $t = 0,16$ с; 2 – $t = 1,1$ с; 3 – $t = 3,81$ с; 4 – $t = 5,06$ с; 5 – $t = 5,53$ с; 6 – $t = 6,26$ с

фронта и перегретой проволокой формируется область поверхности с пониженной температурой (на кадре 2 понижение температуры составляет 0,1 К). Со временем понижение температуры составит 0,3 К.

Ширина области пониженной температуры увеличивается, и достигает ~20 мм к концу пятой секунды – к концу интервала нагрева проволочки (кадр 4). После выключения нагрева, происходит быстрое охлаждение области около проволочки приблизительно на ~1 К, это вызвано выносом холодной жидкости на поверхность из нижних слоев, возникшим конвективным течением, которое сформировалось за время нагрева (кадр 5). Видно, что на следующем этапе резкий контраст температуры и охлажденная область быстро исчезают (кадр 6). Это вызвано тем, что в этот промежуток времени перегретая жидкость растекается в двух направлениях: и возвратное течение к проволочке и от нее вдоль поверхности.

Можно построить зависимость распределения температуры вдоль перпендикулярной к проволочке оси X для конкретного значения продольной координаты Y от времени в виде тоновой (или цветной) фотографии. На рис. 3 приведен пример такого представления распределения температуры по оси X для режима, выборочные кадры для которого представлены на рис. 2. На рис. 3 представлено распределение температуры, усредненное в полосе 10 мм по координате Y . На этом рисунке хорошо видна симметрия в распространении тепловой волны от проволочки в обе стороны по нормали к ней.

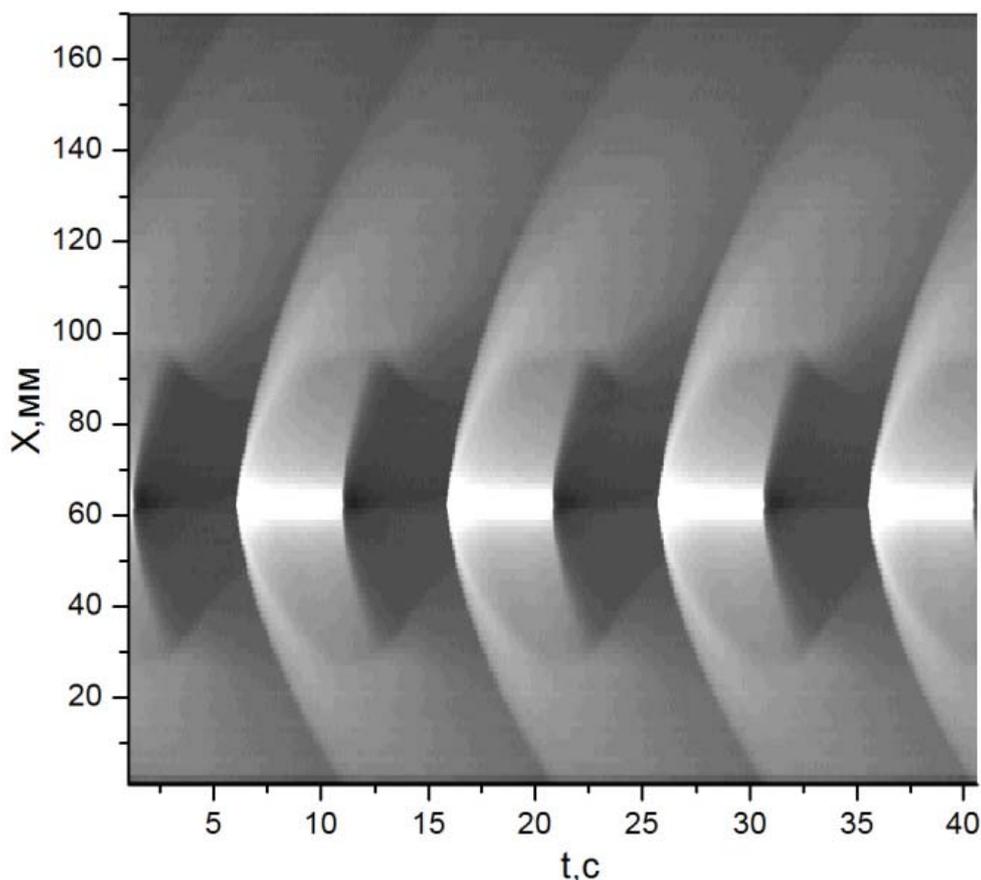


Рис. 3. Зависимость температуры вдоль X ($Y=64$ мм) в зависимости от времени, для режима с ДИ = 5 с, ПИ = 10 с

Распределения температуры по оси X в различные моменты времени приведены на рис. 4а. Проволочка находится при $X=62$ мм. На графике представлены усредненные в полосе 10 мм по продольной координате локальные значения температуры в центральном по длине проволочки сечении.

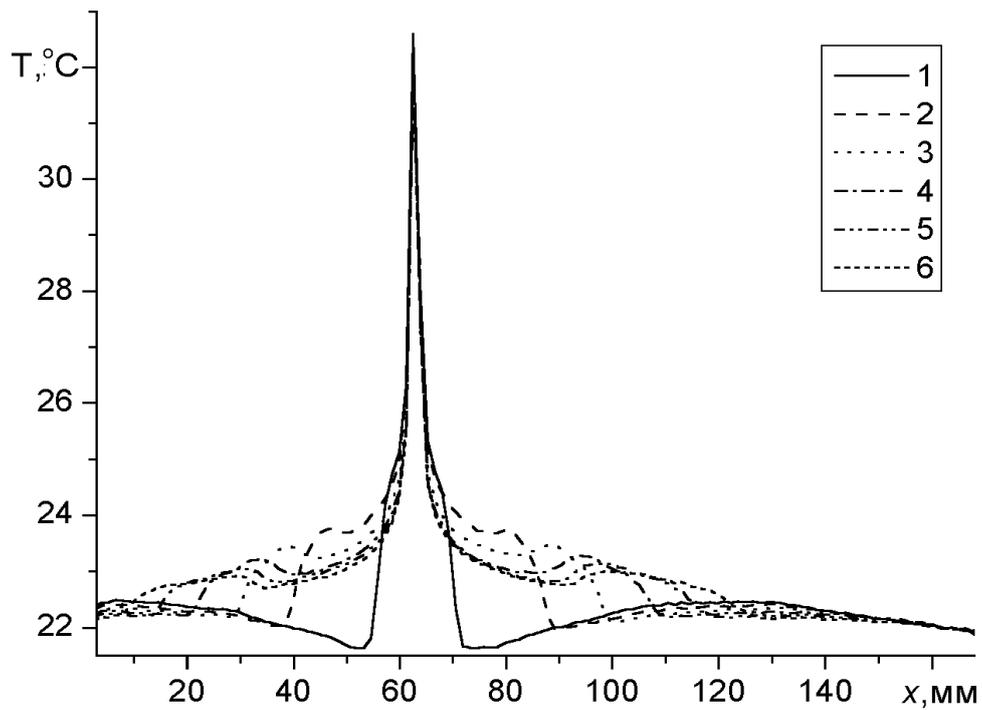


Рис. 4а. Зависимости температуры на поверхности от расстояния до проволоочки в различные моменты времени для режима с ДИ = 5 с, ПИ = 10 с: 1 – $t = 0.21$ с; 2 – $t = 1.05$ с; 3 – $t = 1.89$ с; 4 – $t = 2.72$ с; 5 – $t = 3.56$ с; 6 – $t = 4.40$ с

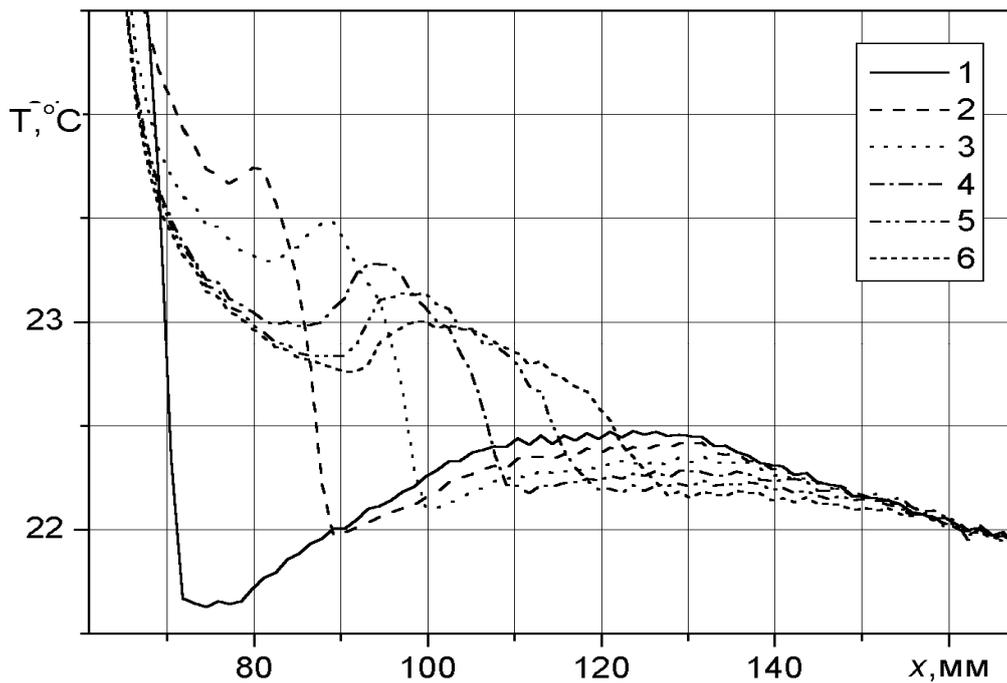


Рис. 4б. Зависимости температуры поверхности от расстояния до проволоочки в различные моменты времени для режима с ДИ = 5 с, ПИ = 10 с: 1 – $t = 0,21$ с; 2 – $t = 1.05$ с; 3 – $t = 1.89$ с; 4 – $t = 2.72$ с; 5 – $t = 3.56$ с; 6 – $t = 4.40$ с

Кривые 1 – 6 соответствуют интервалу времени, когда проволоочка нагрета. Температура в области, непосредственно прилегающей к проволоочке, остаётся одинаковой для всех приведенных на рис. 4 зависимостей во время её нагрева: от примерно 32°C на проволоочке до 26°C на расстояниях до проволоочки $\pm 2,5$ мм. На расстоянии от проволоочки,

соответствующем уровню температуры 24°C начинает формироваться фронт волны. В увеличенном масштабе участки подобных кривых в области низких значений температуры представлены на рис. 4б. В начальный момент контраст температуры на фронте $\sim 2^{\circ}\text{C}$, при протяженности ~ 2 мм. Со временем фронт довольно быстро расплывается и высота фронта также уменьшается. Так через 2,5 с ширина фронта уже ~ 5 мм, и высота упала до $0,7^{\circ}\text{C}$. Наблюдается характерная особенность зависимости температуры от X – сразу за фронтом наблюдается некоторое понижение температуры, которое изменяется от $0,2$ до $0,35^{\circ}\text{C}$ за времена от $0,5$ с до $2,5$ с. Зависимость $T(x)$ от проволоочки до фронта волны имеет резкий спад.

Используя представления температуры в координатах (X,t) можно определить скорости движения фронтов тепловых волн вдоль поверхности жидкости (рис.5). Расшифровать особенности распределений температуры вдоль поверхности в различные моменты времени после включения нагрева помогают видеофильмы течения в плоскости, нормальной к свободной поверхности и к проволочке. Аналоги фотографий с выдержкой, полученные с помощью сложения 25 кадров одного из видеофильмов представлены на рис. 6. Они дают

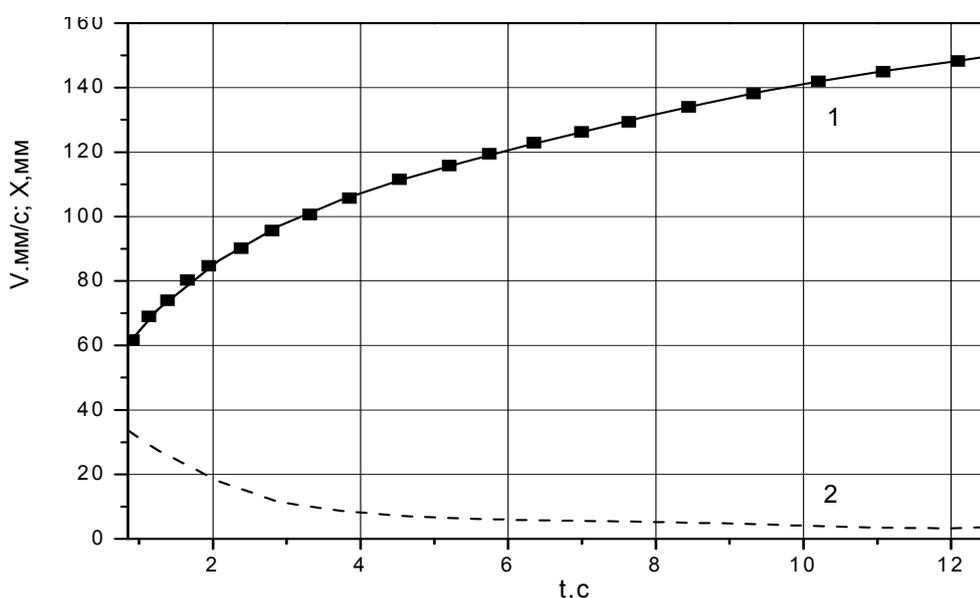


Рис. 5. Зависимости координаты (1) и скорости движения переднего фронта тепловой волны (2) от времени в режиме с ДИ = 1 с, ПИ = 5 с

представление о масштабах и пространственной форме течения: верхний снимок соответствует интервалу времени 1-2 с, а нижний 2-3 с после включения нагрева проволоочки. Обработка видеофильмов позволяет получить поля скорости (рис. 7) и определить направление и интенсивность течения в различные моменты времени. Это позволяет объяснить особенности мгновенных распределений температуры на поверхности жидкости. Видно, что в начальный момент под нагретой проволочкой формируется подъемное течение, которое быстро затухает после отключения нагрева. Амплитуда вертикальной компоненты скорости, как видно на рис. 7 (по кривым a и b) быстро нарастает. Затем после отключения нагрева в течение 2 с подъемный поток затухает. Термокапиллярные вихри смещаются от проволоочки симметрично вправо и влево при этом значительно снижается скорость распространения переднего фронта тепловой волны. Как видно на рис. 6 она имеет через 4 с и после убегания на расстояние, равное примерно половине длины волны практически постоянное значение со слабым затуханием. При растекании перегретого у проволоочки тонкого слоя жидкости из-за большого локального градиента поверхностного натяжения жидкость достаточно быстро остывает за счет теплоотдачи в холодные подстилающие слои. Это хорошо видно на рис. 4. В следующие $0,5$ с формируется опускное возвратное течение. Его амплитуда, как видно на рис. 7 (на кривой z), существенно ниже, чем амплитуда

подъемного потока на начальной стадии. Движущие силы на этой стадии – обратный градиент температуры и поверхностный тонкий слой жидкости в отделившемся вихре имеет избыточную плавучесть. Вопрос о степени деформации поверхности и степени ее влияния на формирование опускного течения, пока что остался открытым.

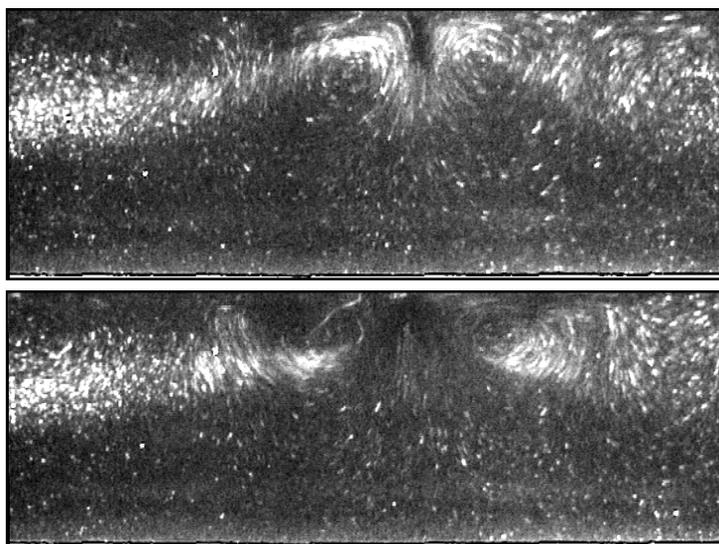


Рис. 6. Структура конвективного течения вблизи проволоки в режиме с ДИ = 1 с, ПИ = 5 с. Толщина слоя жидкости 24 мм

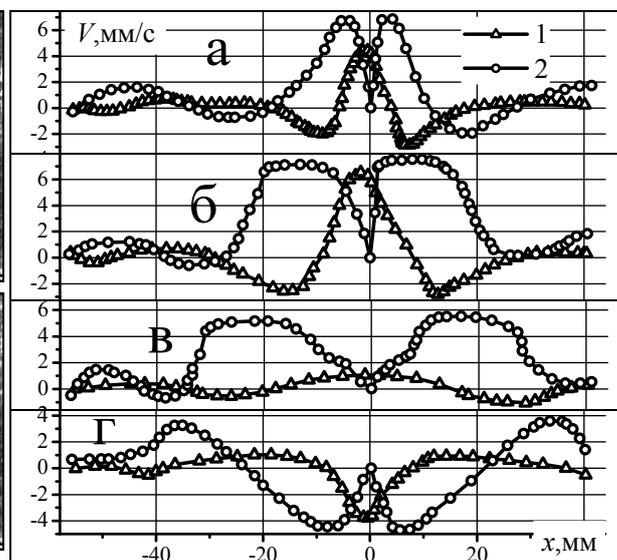


Рис. 7. Профили горизонтальной (1) и вертикальной (2) компонент скорости в режиме с ДИ = 1с, ПИ = 5с: а – $t = 0,2с$; б – $1с$; в – $2с$; г – $4с$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована эволюция пространственной формы тепловых волн генерируемых импульсно нагреваемой проволокой, находящейся на свободной поверхности слоя этилового спирта. Получены зависимости скорости распространения волны от расстояния до проволоки и от параметров разогрева. Показано, что при коротких импульсах малой мощности течение имеет чисто термокапиллярную природу. С использованием цифровой видеосъемки течения визуализированной жидкости изучена пространственная форма возникающего конвективного течения жидкости и его интенсивность на разных стадиях. Тепловые волны, наблюдаемые на поверхности жидкости, представляют собой вихри, разбегающиеся от импульсно нагреваемого источника вдоль свободной поверхности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты: 05-01-00813а; 09-08-01245а; 09-08-00882а).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Pr – число Прандтля;
 ПК – персональный компьютер;
 ПИ – период следования импульсов;
 ДИ – длительность импульса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Повицкий А.С., Любин Л.Я.** Основы динамики и тепломассообмена жидкостей и газов при невесомости // М.: Машиностроение, 1972. 252 с.
2. **Кутателадзе С.С., Кирдяшкин А.Г., Бердников В.С.** Влияние термокапиллярных сил на процессы переноса у свободной поверхности жидкости в горизонтальном слое при тепловой гравитационной конвекции // ДАН СССР.1976. Т.231. № 2. С. 309–311.
3. **Бердников В.С., Забродин А.Г., Марков В.А.** Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в прямоугольной полости // Гидромеханика и процессы переноса в невесомости: Сб. статей. Свердловск: УНЦ АН СССР. 1983. С. 136–151.
4. **Гидромеханика** и тепло-массообмен в невесомости / Под ред. В.С. Авдуревского и В.И. Полежаева. М.: Наука, 1982. 264 с.
5. **Математическое** моделирование конвективного тепломассообмена на основе уравнений Навье-Стокса // Полежаев В.И., Бунэ А.В., Везуб Н.А. и др. – М.: Наука, 1987. - 272с.
6. **Бердников В.С., Гапонов В.А., Коврижных Л.С.** Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в полости с продольным градиентом температуры // Инженерно-физический журнал, 2001, Т. 74, № 4, С. 116–121.
7. **Никитин Н.В., Никитин С.А., Полежаев В.И.** Конвективные неустойчивости в гидродинамической модели роста кристаллов методом Чохральского // Успехи механики.2003.Т. 2. № 4.С.63–105.
8. **Бердников В.С.** Гидродинамика и теплообмен при вытягивании кристаллов из расплавов. Часть 1: Экспериментальные исследования режима свободной конвекции // Изв. ВУЗов, Материалы электронной техники, 2007, № 4, с. 19-27.
9. **Белашенко Д.К.** Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках. М.: Атомиздат, 1970. 397 с.

V.S. Berdnikov, V.A. Grishkov, V.A. Markov

*Kutateladze institute of thermophysics SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentyev Avenue, 1, E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru*

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THERMOCAPILLARY AND BOUYANCY-SURFACE-TENSION DRIVEN WAVES

Development and extending of thermocapillary waves from impulsively heated line source which has been had on a free surface of a fluid is experimentally explored. Dependence of performances of waves on a standing of a heat source and heating regimes (power, frequency and duration of impulses) is studied. Experiments are executed on a fluid with a Prandtl number equal 16. Temperature dynamic fields on a fluid surface are measured by the infra-red imaging. Velocity fields are studied with use of a video shooting of the fluxions of the transparent fluid visualized by tracer-particles.

THERMOCAPILLARY EFFECT, LINE SOURCE PULSED HEATING, HEAT WAVES, THE INFRA-RED IMAGING, TEMPERATURE FIELD, VELOCITY FIELD