

МЕХАНИКА, МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 536.25

В.С. Бердников, В.А. Марков

Тепловые гравитационно-капиллярные волны от периодически нагреваемой проволоки

Экспериментально исследованы нестационарные поля температуры на свободной поверхности жидкости вблизи периодически нагреваемой проволоки. Константовая проволока располагалась на поверхности слоя этилового спирта. Диаметр проволоки 0,2 мм, длина 170 мм; толщина слоев жидкости 24 мм; длина слоя 250 мм; сила тока 2,4 А, напряжение 8,5 В. Ее нагрев осуществлялся прямоугольными импульсами тока. Длительность импульса менялась от 0,08 до 60 с, период следования импульсов – от 2 до 120 с. При подаче импульса тока данной мощности деформации поверхности не наблюдалось. Таким образом, волны имели термокапиллярную природу, но не гравитационно-капиллярную. Поле температуры поверхности жидкости измерялось тепловизором.

Для калибровки тепловизора использовалось измерение температуры поверхности жидкости микротермомпарами. Одна из термопар находилась в поле видимости тепловизора. Одновременно записывалось распределение температуры на поверхности тепловизором и термопарой при прохождении тепловой волны. Запуск серии импульсов тока производился после выдержки в течение времени, достаточного для выравнивания температуры в слое жидкости. Исключалось образование устойчиво стратифицированного по температуре и плотности слоя. Для этого в торцах слоя были установлены теплообменники, в которых прокачивалась термостатированная вода с температурой, равной температуре окружающей среды. Исключалось образование крупномасштабного течения за счет выхолаживания со свободной поверхности и создания перепада температуры между проволокой и торцевыми теплообменниками.

Получены данные о характеристиках поверхностных тепловых волн, прослежена эволюция формы фронта волны, измерена скорость распространения тепловой волны. Выявлена взаимосвязь тепловых волн и возникающего конвективного течения жидкости.

Ключевые слова: *тепловые гравитационно-капиллярные волны, импульсный нагрев проволоки, тепловизионные измерения поля температуры поверхности.*

Конвекция, связанная с неоднородным нагревом, является распространенным видом течения газа и жидкости в природе и технике. Глобальные течения в атмосфере и океане обычно связывают с термогравитационной конвекцией – конвекцией Рэлея, которая обусловлена зависимостью плотности среды от температуры, т.е. действием выталкивающей силы Архимеда. Если есть неоднородно нагретая свободная поверхность жидкости (жидкость – газ, жидкость – парогазовая среда), то конвективное движение жидкости может возникнуть по причине зависимости поверхностного натяжения от температуры, что приводит к возникновению касательных напряжений на поверхности. Действие этого механизма вряд ли приведет к конвекции глобального масштаба, но вблизи поверхности термокапиллярная конвекция оказывает существенное влияние на процессы тепло- и массообмена на границе жидкость – газ. Более того, термокапиллярная конвекция может вовлечь в движение небольшой объем жидкости и сыграть положительную или отрицательную роль в технологических процессах. Так, при ро-

сте кристаллов на космических станциях в условиях, приближенных к невесомости, явление термокапиллярной конвекции играет отрицательную роль. Существенное влияние на процессы гидродинамики, тепло- и массообмена в технологических процессах при выращивании кристаллов в условиях гравитации оказывает тепловая гравитационно-капиллярная конвекция.

Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в подогреваемом снизу горизонтальном слое жидкости является классическим объектом при теоретическом и экспериментальном исследовании гидродинамической неустойчивости и процессов перехода к турбулентности. Теоретическое рассмотрение, численное моделирование и экспериментальное исследование данной задачи обогащают друг друга и дают новые идеи для дальнейшего поиска. Экспериментальные исследования термогравитационной и тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в горизонтальном слое при подогреве снизу, проводимые в Институте теплофизики, направлены как на решение фундаментального вопроса лами-

нарно-турбулентного перехода конвективного течения, так и на решение задач, возникающих при разработке технологических процессов, например, выращивания кристаллов разными способами [1–4].

Основными параметрами, характеризующими режим конвекции, являются число Рэлея $Ra = \beta g \Delta T H^3 / \nu \alpha$ и число Прандтля $P = \nu / \kappa$. Если рассматривается слой жидкости со свободной верхней границей, то необходимо добавить число Марангони $Ma = -(\partial \sigma / \partial T) \Delta T H / \mu \alpha$ и число Био $Bi = \alpha H / \lambda$ [5]. Здесь приняты следующие обозначения: β – коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; ΔT – перепад температуры между границами слоя; H – толщина слоя жидкости; α – коэффициент температуропроводности; ν – коэффициент кинематической вязкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения; μ – размерный коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности жидкости. В случае свободной границы слоя жидкости, при наличии термокапиллярного эффекта будут работать оба механизма неустойчивости: термогравитационный и термокапиллярный, а задача носит название Бенара – Марангони.

Структура конвективного течения в горизонтальном слое с подогревом снизу при числах Рэлея больше 10^5 становится зависящей от времени, а ее изучение – сложным. Можно уменьшить горизонтальные размеры слоя, ограничив свободу выбора многообразия структур течения. Так, в узких слоях реализуется упорядоченная структура валов, параллельных узкой стороне слоя. Для генерации параллельных валов можно использовать, например, систему нагретых проволочек, над которыми организуются подъемные потоки системы валов [6]. При постановке граничных условий исследователи используют эти два приема для создания простых форм конвективного течения и изучают усложнение этого течения с ростом динамических параметров задачи.

В работе [7] выполнены численные расчеты для неустановившейся естественной конвекции в изолированном прямоугольном контейнере. Жидкость нагревается линейным источником тепла (нагретая проволочка) или охлаждается линейным стоком тепла (тоненькая трубочка, охлаждаемая жидкостью). Линейные источники

и стоки тепла, помещенные на свободной поверхности, создают термокапиллярное поверхностное напряжение, вызывающее конвективное течение. На свободной поверхности рассмотрены условия испарения или конденсации. В случае испарения с поверхности и для малых чисел Марангони обнаруживается три четких области конвекции, в которых конвекция обуславливается преимущественно термокапиллярным механизмом, механизмом плавучести и смешанным типом сил. Различия в поведении течения выявлены для случая конденсации и испарения. Результаты расчета находятся в качественном соглашении с экспериментами при испарении и для больших чисел Ma .

В работе [8] численно исследованы характеристики конвекции в жидких слоях с нагреваемой снизу свободной поверхностью. Конвекция обусловлена подъемными и капиллярными силами, вызванными изменением поверхностного натяжения с температурой. Проведены расчеты с целью выявления влияния теплоотдачи и вязкости на границе раздела на структуру течения. Исследован переход между режимом Марангони и течением, обусловленным подъемными силами, при нагреве бесконечной проволочкой, расположенной под свободной поверхностью.

Проведены экспериментальные исследования структуры бегущих волн, возникающих на поверхности жидкости в узком контейнере под воздействием нагретой проволочки, находящейся на некоторой глубине под поверхностью. Проволочка располагалась параллельно длинной стороне контейнера [9–10].

Данная работа направлена на изучение поля температуры на свободной поверхности жидкости, вблизи импульсно нагреваемого линейного источника тепла – проволочки, нагреваемой импульсами тока. Проволочка расположена на свободной поверхности жидкости с числом Прандтля, равным 16.

Экспериментальная установка

Схема установки представлена на рис. 1. Кювета 1, в которой находится жидкость, представляет собой прямоугольную полость, изготовленную из прозрачного оргстекла, размером $350 \times 200 \times 50$ мм. Два теплообменника 2 размещены в торцах кюветы. Медные поверхности теплообменников размером 190×60 мм

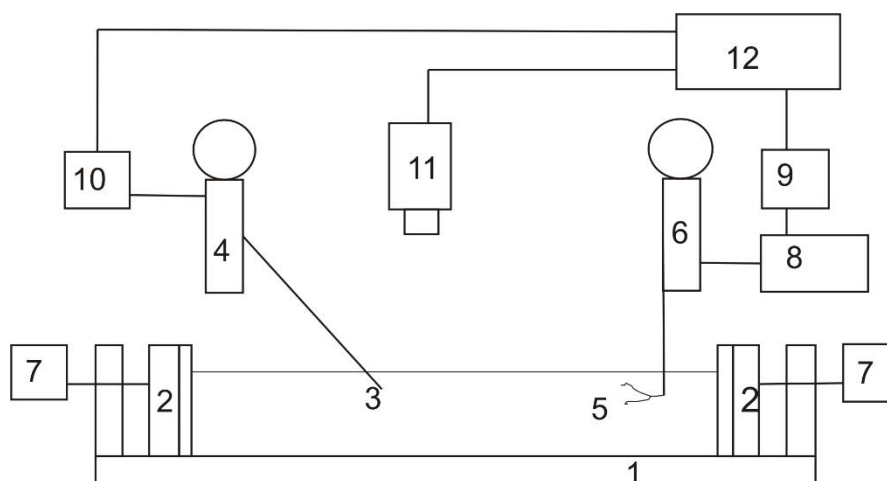


Рис. 1. Блок-схема установки:

1 – кювета; 2 – теплообменник; 3 – проволочный нагреватель; 4 – координатник с микрометром для перемещения проволочки; 5 – термопарный зонд; 6 – координатник с микрометром для перемещения термопар; 7 – термостаты; 8 – вольтметр Щ-300; 9 – контроллер для опроса вольтметра; 10 – контроллер для управления нагревателем; 11 – тепловизионная камера; 12 – персональный компьютер

расположены вертикально, параллельно короткой стороне кюветы и ограничивают исследуемую область с двух сторон. Через теплообменники прокачивается вода из термостатов 7. Температура медной пластины каждого теплообменника контролируется медь-константовыми термопарами, высота слоя жидкости в кювете – с помощью микрометра часового типа (цена деления 0,01 мм). Верхняя граница слоя свободна. На поверхности жидкости параллельно двум теплообменникам помещена проволочка 3. Проволочка растянута на упругих стальных ножках, концы которых заточены. С помощью микровинта проволочка может перемещаться по вертикали, перемещения контролируются микрометром 4. Материал, из которого изготовлена проволочка, – константан. Длина проволочки $l = 170$ мм, диаметр поперечного сечения $d = 0,2$ мм.

Сопротивление проволочки $R = 3,54$ Ом при температуре $T = 27$ °С, плотность $\rho = 8,88 \cdot 10^3$ кг/м³, удельная теплопроводность $\lambda = 20,9$ Вт/м·°С, удельная теплоемкость $c = 410$ Дж/кг·°С.

Для управления режимом нагрева проволочки был разработан и изготовлен контроллер 10, подключенный к персональному компьютеру (ПК) 12 через последовательный СОМ-порт. Разработанное программное обеспечение позволило управлять параметрами нагрева проволочки: периодом следования импульсов (ПИ) и длительностью импульса

(ДИ). Мощность нагрева регулируется источником питания.

Температура в объеме жидкости, на поверхности жидкости и над ней контролируется термопарным зондом 5, состоящим из двух нихром-константовых термопар, диаметр спая которых равен 40 мкм. Зонд может перемещаться по трем координатам. В вертикальном направлении зонд перемещается с помощью микровинта 6, точность измерения вертикальной координаты 0,01 мм. ЭДС термопары измеряется цифровым вольтметром Щ-300 (младший разряд 0,1 мкВ, это обеспечивает измерение температуры с точностью 0,01 °С). Контроллер 9 позволяет опрашивать два цифровых вольтметра Щ-300 8 с максимальной частотой опроса 25 Гц. Управление режимами опроса вольтметров осуществляется с помощью персонального компьютера 12.

Температура поверхности жидкости измеряется с помощью тепловизионной камеры. Компьютерный тепловизор «ИНФРАТЕРМ» (разработка Института физики полупроводников СО РАН) имеет высокое температурное разрешение (0,03 °С), быстродействие камеры позволяет записывать до 20 кадров в секунду. Тепловизор имеет максимум восприимчивости в полосе излучения 2,6–3,1 мкм. Диапазон измеряемой температуры 14–41 °С. Используемый хладагент – жидкий азот. Измерительная матрица состоит из 128 × 128 элементов, размер которых 40 × 40 мкм, и охлаждается

жидким азотом. Тепловизор регистрирует тепловое излучение с участка поверхности жидкости, размеры которого выбирались из диапазона от 52×52 мм до 300×300 мм.

В качестве рабочей среды использован этиловый спирт (число Прандтля $Pr = 16$, плотность $\rho = 807,8$ кг/м³, удельная теплопроводность $\lambda = 0,179$ Вт/м·°С, удельная теплоемкость при постоянном давлении $c_p = 2,4 \cdot 10^3$ Дж/кг·°С).

Методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования проводились по следующей методике. Рабочая жидкость наливалась в горизонтально установленную кювету и включалась прокачка воды из термостата. Через 2–3 ч установка выходила в стационарный режим $T = \text{const}$. Температура теплообменников задавалась равной температуре окружающей среды. В работе представлены результаты серии экспериментов, для которой начальная температура рабочей жидкости составляла $T = 21,5$ °С. Высота слоя жидкости H_0 поддерживалась постоянной и равной 10 или 24 мм. В середину рабочей области, на поверхность жидкости параллельно теплообменникам опускалась проволоочка. Проволочка выставлялась в такое положение, чтобы поверхность жидкости не деформировалась и чтобы отражение проволоочки от свободной поверхности (если смотреть со стороны жидкости) сливалось с самой проволоочкой. 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 проволоочка была параллельна стороне поля кадра и делила его на части в соотношении приблизительно 1 : 2. Поле кадра равнялось 170×170 мм, измерительные термодпары в анализируемой серии экспериментов были выведены из поля кадра. После включения импульсного нагрева проволоочки выдерживалось приблизительно 30 мин, за это время устанавливался тепловой баланс между тепловой энергией, выделяемой проволоочкой, количеством теплоты, снимаемым теплообменниками, и количеством теплоты, проходящим через свободную поверхность жидкости. После таких приготовлений проводились изме-

рения температуры поверхности жидкости тепловизионной камерой. Время записи каждого режима составляло 40–120 с, частота кадров равнялась 19,5 Гц.

Результаты эксперимента

Исходная информация о температуре хранится в виде матрицы значений температуры в $128 \times 128 = 16\,384$ точках (в каждом элементе матрицы хранится целое число, равное температуре в градусах Цельсия, умноженной на 100). Таким образом считывается мгновенное поле температуры на поверхности жидкости в 16 384 точках с точностью 0,01 °С. Обработывая на компьютере эту информацию, можно получить изолинии распределения температуры поверхности жидкости. Поле температуры можно представить в виде тоновой картинки и в виде трехмерного графика $T(x, y)$. В данной работе результаты представлены в виде тоновых рисунков в обычных форматах. При обработке информации на компьютере всегда использовались первичные данные.

Параметры нагрева проволоочки, при которых были проведены исследования, следующие: ДИ = 5 с; ПИ = 10 с; скважность сигнала (ДИ/ПИ), характеризующая среднюю мощность тепловыделения за время эксперимента, равна 0,5. Мощность нагрева проволоочки равна 20,4 Вт, следовательно, средняя мощность тепловыделения 10,2 Вт. Этой мощности достаточно для того, чтобы за 1 с нагреть 1 мл спирта на 5,3 °С.

На рис. 2 представлены кадры поля температуры на поверхности спирта. Момент начала нагрева проволоочки является началом отсчета времени ($t = 0$ с), на рис. 2, а–е зафиксировано состояние в моменты 0,16; 1,1; 3,81; 5,06; 5,53; 6,26 с соответственно. Первые три кадра – разогрев, последние три – остывание (проволочка не греется). Данные о распределении температуры по поверхности приведены в виде тонового рисунка в формате BMP (256 градаций серого цвета). Светлые области соответствуют более высокой температуре, темные – низкой. На каждом фрагменте этого рисунка нижний и верхний пороги температуры выбирались таким образом, чтобы область вблизи нагретой проволоочки была видна наилучшим образом. При этом другие области поля рисунка, где температура меньше

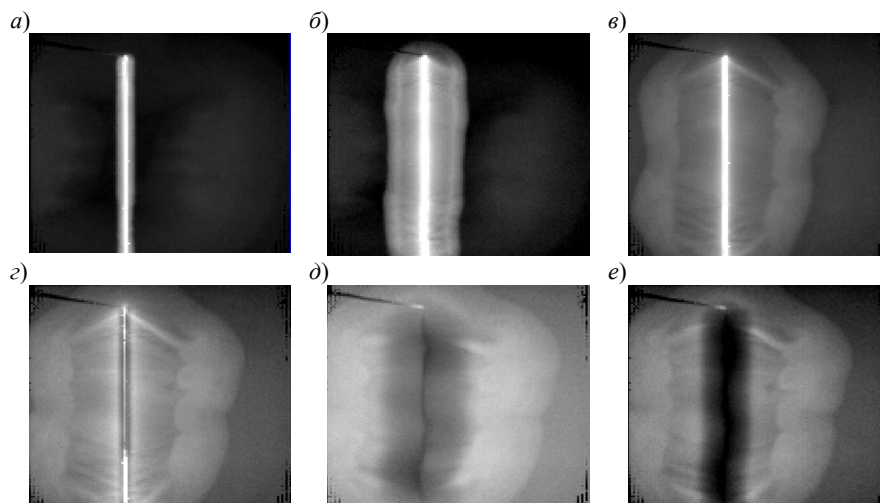


Рис. 2. Эволюция поля температуры вблизи импульсно-нагреваемой проволоочки (ДИ = 5 с, ПИ = 10 с) по времени от начала нагрева t , с:
 $a - 0,16$; $b - 1,1$; $c - 3,81$; $d - 5,53$; $e - 6,26$

нижнего порога температуры, отображены черным цветом.

После включения нагрева температура в непосредственной близости от проволоочки резко возрастает примерно на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и достигает $32\text{ }^{\circ}\text{C}$. Формируется фронт тепловой волны, на рис. 2, б это узкая полоска ($\sim 4\text{ мм}$), которая со временем уширяется. За фронтом (ближе к проволоочке) формируется область пониженной температуры (на рис. 2, б понижение температуры составляет $\sim 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), со временем понижение температуры составит $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ширина области пониженной температуры увеличивается и достигает $\sim 20\text{ мм}$ к концу пятой секунды – к концу нагрева проволоочки (см. рис. 2, г). Структура области пониженной температуры отличается от структуры области нагретого фронта волны. Если область нагретого фронта волны однородная по температуре, то на области за фронтом волны видна упорядоченная (ячеистая) структура в виде второй волны вдоль проволоочки. После выключения нагрева происходит быстрое охлаждение области около проволоочки приблизительно на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, это вызвано выносом на поверхность холодной жидкости конвективным течением, которое сформировалось за время нагрева (см. рис. 2, д). Видно, что структура области за фронтом еще сохранилась, но быстро исчезает (см. рис. 2, е). Перед следующим включением нагрева область пониженной температуры вблизи проволоочки почти исчезает.

Зависимость температуры от времени $T(t)$ в конкретной точке поверхности жидкости

может быть представлена как значения температуры в точке (x, y) , сформированные по последовательности кадров. Можно построить зависимость распределения температуры вдоль оси X (перпендикулярной проволоочке) для конкретного значения Y и для конкретного момента времени, который определен литерой кадра. И наконец, можно построить зависимость распределения температуры вдоль оси X ($Y = \text{const}$) от времени в виде тоновой фотографии. Для этого формируется таблица следующим образом. Первый столбец – значения температуры вдоль оси X при постоянном значении Y , взятые из начального кадра (время равно 0). Второй столбец – значения температуры вдоль оси X при значении Y , взятые из следующего кадра (время равно t_1), и т.д. Потом эта таблица переводится в тоновую фотографию, и получается наглядное представление температуры вдоль оси X в зависимости от времени. На рис. 3 приведен пример такого представления распределения температуры по X ($Y = \text{const} = 64$) в зависимости от времени для ДИ = 5 с, ПИ = 10 с, выборочные кадры которого представлены на рис. 2. В случае когда температура изменяется только по координате X , а от Y не зависит (в экспериментах с линейным источником тепла как раз такой случай), можно усреднить значения температуры для нескольких Y вблизи $Y = 64$, тем самым несколько уменьшить случайную ошибку измерения. Усреднив температуру по десяти значениям Y (от 55 до 65), получили зависимость температуры от X для каждого

кадра, а затем построили зависимость распределения температуры вдоль оси X от времени в виде тоновой фотографии. Такое представление более информативно, чем зависимость температуры от времени для одной точки поверхности жидкости. На рис. 3 хорошо видна симметрия относительно $X = 62$ мм. Зависимость $T(X, t)$ можно представить в виде изотерм (рис. 4).

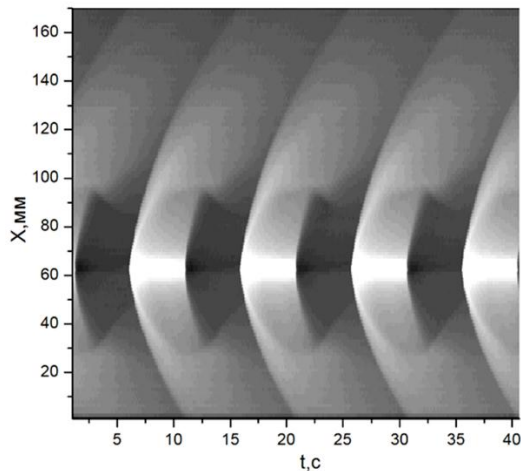


Рис. 3. Зависимость температуры вдоль X ($Y = 64$ мм) в зависимости от времени (ДИ = 5 с, ПИ = 10 с)

Используя такое представление температуры в координатах (X, t) , можно определить скорости движения фронта волны вдоль поверхности жидкости. Используя рис. 3, переносим зависимость фронта тепловой волны от

времени на новый лист, предварительно получив таблицу $X = X(t)$. Аппроксимируя эту зависимость полиномом четвертой степени, получаем результат, представленный на рис. 5 кривой 1. Производная этой зависимости – кривая 2, вторая производная – кривая 3. Проволочка находится на поверхности жидкости, $X = 62$ мм. Начало нагрева проволоочки совпадает со значением времени $t = 5,0$ с. Конец нагрева проволоочки совпадает со значением времени $t = 10,0$ с. Начало следующего импульса приходится на $t = 15,0$ с. Скорость фронта резко уменьшается за 2–3 с от 35 до 5 мм/с. Ускорение первые полсекунды отрицательное и постоянно, приблизительно равно -13 мм/с². Далее величина ускорения уменьшается, и приблизительно через 2,5 с становится почти равной нулю.

Зависимость температуры вдоль поверхности по нормали к проволочке по координате X для разных моментов времени приведена на рис. 6–8, где значение температуры для каждого X получено методом усреднения десяти значений температуры, взятых в полосе при Y от 55 до 65. На рис. 6, 7 зависимости 1–6 соответствуют временам, когда проволочка нагрета. Температура в области, непосредственно прилегающей к проволочке, остается одинаковой для всех зависимостей во время нагрева: приблизительно от 32 °C

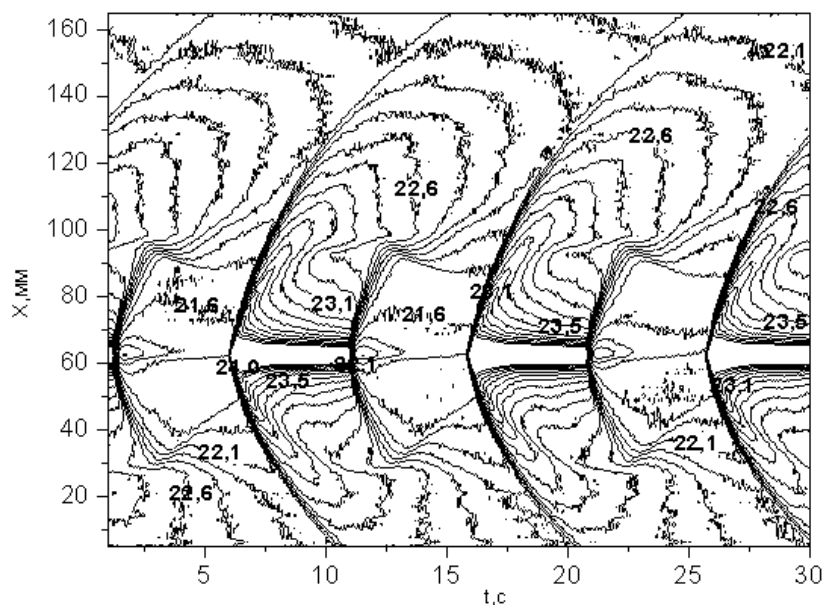


Рис. 4. Представление зависимости температуры вдоль X ($Y = 64$ мм) в зависимости от времени (ДИ = 5 с, ПИ = 10 с) в виде изотерм

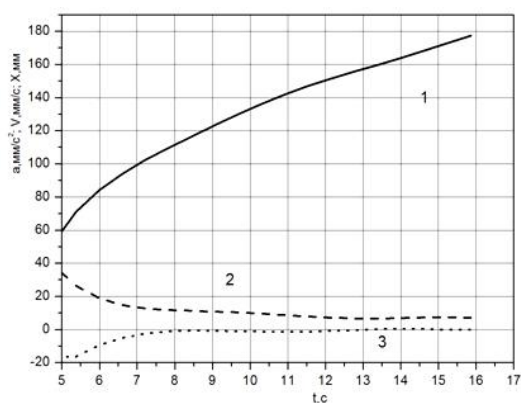


Рис. 5. Кинематические характеристики движения фронта волны (ДИ = 5 с, ПИ = 10 с):

1 – зависимость координаты фронта от времени; 2 – зависимость скорости движения фронта от времени; 3 – зависимость ускорения движения фронта от времени

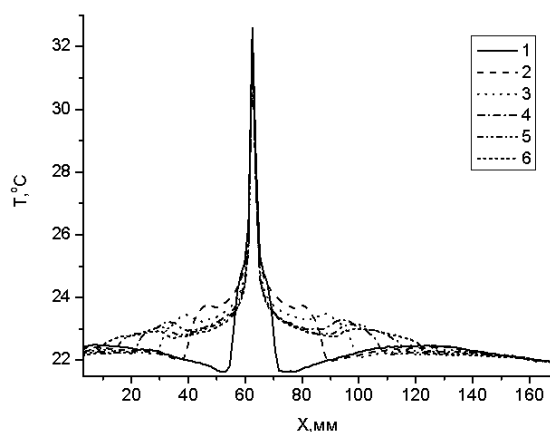


Рис. 6. Зависимость температуры поверхности жидкости от расстояния до проволоочки при нагреве для различных моментов времени t , с:

1 – 0,21; 2 – 1,05; 3 – 1,89; 4 – 2,72; 5 – 3,56; 6 – 4,40

(на проволочке $X = 62$ мм) до 26°C (при расстояниях до проволоочки $\pm 2,5$ мм). На уровне 24°C начинает продвигаться фронт волны, и в первый момент продвижения высота фронта составляет $\sim 2^\circ\text{C}$. Вначале фронт крутой ~ 2 мм, но довольно быстро расплывается, и высота фронта также уменьшается. Так, через 2,5 с фронт уже равен ~ 5 мм, а высота падает до $0,7^\circ\text{C}$. Наблюдается особенность зависимости температуры от X : сразу за фронтом наблюдается некоторое понижение температуры, которое изменяется от $0,1$ до $0,35^\circ\text{C}$ за время от 0,5 до 2,5 с. Сама зависимость $T(X)$ от проволоочки до фронта волны представляет собой резкий спад.

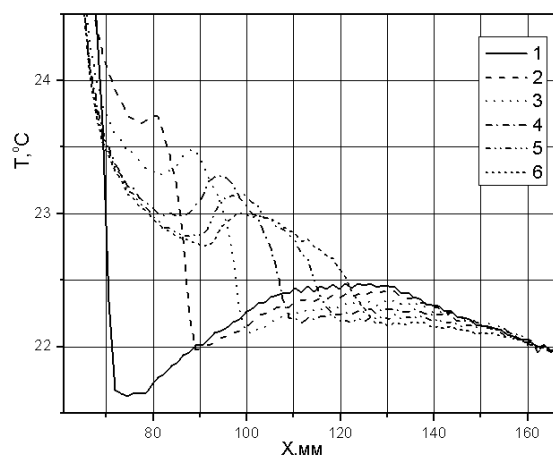


Рис. 7. Фрагмент рис. 6

На рис. 8 представлена зависимость температуры поверхности от X для разных моментов времени после выключения нагрева проволоочки. Как и на рис. 6, 7, значение температуры для каждого X получено методом усреднения десяти значений температуры, взятых при Y от 55 до 65.

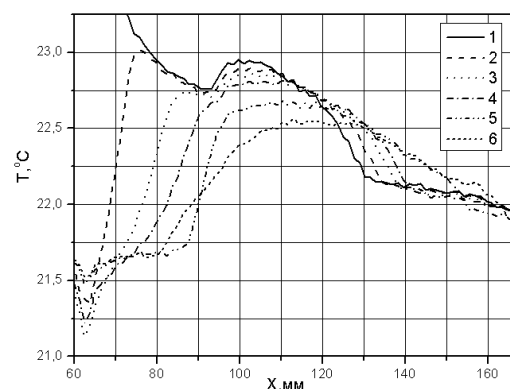


Рис. 8. Зависимость температуры поверхности жидкости от расстояния до проволоочки после выключения нагрева для различных моментов времени t , с:

1 – 4,82; 2 – 5,23; 3 – 5,65; 4 – 6,07; 5 – 7,48; 6 – 9,42

На рис. 8 кривая 1 соответствует моменту времени $t = 4,84$ с после включения нагрева проволоочки, кривые 2–6 представляют эволюцию поля температуры при выключенном нагреве проволоочки. Сразу после выключения нагрева, за время меньше 0,1 с температура в области проволоочки уменьшается приблизительно на 10°C и становится равной средней температуре жидкости, т.е. $\sim 21,5^\circ\text{C}$. Область низкой температуры поверхности жидкости в области проволоочки увеличивается, происходит распространение холодного фронта. Так,

в момент времени $t = 5,23$ с (через 0,23 с после выключения нагрева) ширина холодной области равна ~ 10 мм, а высота холодного фронта составляет $\sim 1,5$ °С. Скорость холодного фронта в первые 0,5 с после выключения нагрева проволоочки равна ~ 25 мм/с. Со временем скорость уменьшается, и через 2,5 с после выключения нагревателя скорость фронта равна ~ 4 мм/с, при этом высота фронта уменьшилась до 0,9 °С, а ширина осталась практически той же ~ 10 мм. Через 4 с после выключения нагрева область холодной жидкости вблизи проволоочки начинает уменьшаться, но остается значительной до очередного включения нагрева. В течение времени от 5 до 10 с, когда нагрева проволоочки нет, горячий фронт волны распространяется от проволоочки почти с постоянной скоростью ~ 3 мм/с. Высота фронта волны уменьшается, ширина увеличивается, и ко времени $t = 10$ с фронт волны становится слабо выраженным.

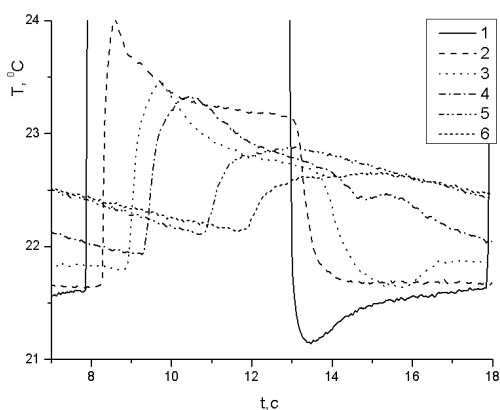


Рис. 9. Зависимость температуры поверхности жидкости от времени для различных расстояний от проволоочки X , мм:
1 – 0; 2 – 13,3; 3 – 26,6; 4 – 33,2; 5 – 53,1;
6 – 63,8

На рис. 9 представлена зависимость температуры поверхности жидкости от времени для различных расстояний от проволоочки. Тепловые волны от длинной проволоочки двумерные – от координаты Y вдоль проволоочки температура не зависит. При построении этих графиков было проведено усреднение температуры по Y для интервала от 55 до 65, это позволило уменьшить

случайный шум. Максимальная температура проволоочки 32 °С. Кривая 1 выходит за границы графика, она представляет собой прямоугольный импульс с высотой 32 °С. С увеличением расстояния от проволоочки высота импульса уменьшается, форма становится размытой, фронты не крутые, передний фронт имеет большую температуру, чем задний. При $X = 33,2$ мм задний фронт у импульса температуры практически исчезает, при больших расстояниях наблюдается только передний фронт, а затем монотонное спадание температуры. На расстояниях от проволоочки больше 33 мм температура поверхности всегда больше средней температуры жидкости ($\sim 21,5$ °С).

Наблюдения за течением визуализированной жидкости показывают, что существуют пространственно-временные течения жидкости, вызванные периодическим нагревом проволоочки.

Выводы

1. При импульсном нагреве проволоочки, находящейся на поверхности жидкости, генерируется тепловая волна, распространяющаяся перпендикулярно проволоочке по поверхности жидкости.

2. Амплитуда теплового возмущения составляет приблизительно 2 °С вблизи проволоочки и уменьшается с увеличением расстояния от проволоочки.

3. При определенных параметрах импульса тока (ДИ = 5 с, ПИ = 10 с, мощность тока 20,4 Вт) скорость тепловой волны уменьшается с увеличением расстояния от проволоочки от ~ 35 до ~ 5 мм/с за время ~ 3 с от начала формирования фронта волны. На расстоянии 70 мм от проволоочки скорость тепловой волны становится почти постоянной, равной ~ 3 мм/с.

4. Обнаружено, что в области пониженной температуры за фронтом волны (вблизи и вдоль проволоочки) во время импульса нагрева возникает упорядоченная структура в виде мелкомасштабных вторичных конвективных ячеек (см. рис. 2, в–д), амплитуда этих ячеек мала.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке СО РАН (проект III.18.2.5. Гос. рег. 01201350443) и РФФИ (грант №15-08-07991).

Библиографический список

1. 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.
2. Бердников В.С., Забродин А.Г., Марков В.А. Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в прямоугольной полости // Гидромеханика и процессы переноса в невесомости: Сб. ст. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 136–151.
3. Бердников В.С., Марков В.А. Теплопередача и статистические характеристики поля температуры в горизонтальном подогреваемом снизу слое жидкости // Изв. АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук. 1986. № 1. С. 96–102.
4. Бердников В.С., Марков В.А., Ким О.В. Термогравитационная конвекция в плоском горизонтальном и наклонном слоях жидкости, подогреваемых снизу // Структура вынужденных и термогравитационных течений: Сб. науч. тр. Новосибирск, 1983. С. 122–146.
5. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
6. Berdnikov V.S., Getling A.V., Markov V.A. Wavenumber selection in Rayleigh-Benard convection: Experimental evidence for the existence of an inherent optimal scale. *Exper. Heat Transfer*. 1990. Vol. 3. P. 269–288.
7. C.Y. Shieh and Wen-Jei Yang. Transient thermocapillary flow in rectangular tanks with phase change. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1987. Vol. 30. № 5. P. 843–854.
8. Maquet J., Gouesbet G. and Berlemont A. Numerical simulation of surface tension and combined buoyancy driven convection in a liquid layer heated by a hot-wire. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1992. Vol. 35. № 10. P. 2695–2703.
9. Vince J. and Dubois M. Hot wire below the free surface of a liquid: structural and dynamical properties of a secondary instability. *Europhys. Lett.* 1992. Vol. 20. P. 505–510.
10. Weill M.E., Rhazi M. and Gouesbet G. Experimental investigation of oscillatory phenomena produced by a hot wire located near and below a free surface. *J. de Physique*. 1985. Vol. 46. P. 1501–1506.

V.S. Berdnikov, V.A. Markov

Gravitational-Capillary Heat Waves Produced by a Periodically Heated Wire

Abstract. Non-stationary fields of temperature on the free surface of a liquid layer in the vicinity of a periodically heated constantan wire were experimentally investigated. The liquid was ethanol. The wire, located on the surface of the ethanol layer, was heated ohmically by square current pulses. The pulse duration varied from 0.08 to 60 sec, and the pulse repetition period was 2 to 120 sec. The wire diameter was 0.2 mm, and the wire length, 170 mm. The thickness of the ethanol layer was 24 mm, and its length, 250 mm. The current strength was 2.4 A at an applied voltage of 8.5 V. Under the adopted heating conditions, no ethanol surface deformation occurred. Thus, the heat waves generated on the surface of the liquid were thermocapillary rather than gravitational-capillary ones. The field of liquid surface temperature was measured by an infra-red (IR) imager.

The IR imager was calibrated using liquid-surface temperature data obtained with the help of microthermocouples. One of the thermocouples was located in the field of vision of the infra-red imager. The distributions of surface temperature measured by the IR imager and by the thermocouples were registered simultaneously during the passage of a heat wave. Start of a heating pulse train was initiated after a time interval sufficient for temperature leveling in the liquid layer. Measures were taken to exclude the formation of a liquid layer stably stratified in terms of temperature and density. That was done by installation of heat exchangers with circulating water, whose temperature was equal to ambient temperature, at the lateral walls of the vessel. Formation of large-scale flows due to the cooling on the free surface and due to the temperature drop between the wire and the lateral heat exchangers was also excluded.

Data on characteristics of surface heat waves were obtained, the evolution of the heat-wave front waveform was traced, and the speed of propagation of the heat waves was measured. The interconnection between the heat waves and the convective flow generated in the liquid was revealed.

Key words: *gravitational-capillary heat waves; pulse heating of wire; thermographic measurements of surface temperature field.*

Бердников Владимир Степанович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, профессор кафедры прикладной математики НГТУ. E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru

Марков Владимир Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» СГУПСа. E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru