

УДК 532.5;532.6:535.21

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ. 2. ИСТОЧНИК ТЕПЛА, ИНДУЦИРОВАННЫЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А. И. Мизёв

Пермский государственный университет, 614990 Пермь

E-mail: alex.mizyov@physik.uni-giessen.de

Экспериментально исследована структура и устойчивость термокапиллярного течения в глубоком бассейне от сосредоточенного источника тепла, индуцированного излучением и расположенного вблизи свободной поверхности жидкости. Обнаружена абсолютная устойчивость данного течения при любых глубине и мощности источника тепла. Экспериментально исследован профиль поверхности жидкости вблизи теплового пятна.

Ключевые слова: термокапиллярная конвекция, источник тепла.

Введение. Известно, что создание температурной неоднородности на границе раздела приводит к возникновению конвективного течения, называемого термокапиллярным. Причины появления такой неоднородности могут иметь как случайный (неоднородный фронт процесса растворения или химической реакции с выделением тепла), так и целенаправленный характер (источник тепла или холода на поверхности). Одним из способов целенаправленного создания тепловой неоднородности может служить облучение поверхности раздела электромагнитным излучением в диапазоне частот поглощения при неоднородном распределении интенсивности в пучке. Такая ситуация часто встречается во многих прикладных задачах и технологических процессах [1–3]. Особый интерес к индуцированию термокапиллярной конвекции с помощью излучения связан с тем, что данная ситуация встречается при выращивании кристаллов на борту космических аппаратов [4, 5]. Именно этот тип конвекции в силу своего негравитационного характера начинает играть в таких случаях определяющую роль и приводит к возникновению неоднородного фронта кристаллизации и как следствие к нарушению однородной структуры монокристаллов.

Сама тема исследования не нова. Имеется ряд теоретических и экспериментальных работ по исследованию структуры и устойчивости течения от источника тепла, индуцированного излучением [6–8]. Однако в данных исследованиях свойства жидкости и длина волны излучения подбираются таким образом, чтобы коэффициент поглощения был как можно больше. При этом неоднородность температуры оказывается сконцентрированной в очень узком приповерхностном слое. Это, по мнению авторов, моделирует случай сосредоточенного источника тепла, расположенного непосредственно на границе раздела. Однако не менее интересен и случай “затопленного” теплового пятна, так как позволяет дополнительно регулировать интенсивность и структуру течения жидкости.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования термокапиллярного течения в глубоком бассейне от сосредоточенного источника тепла, индуци-

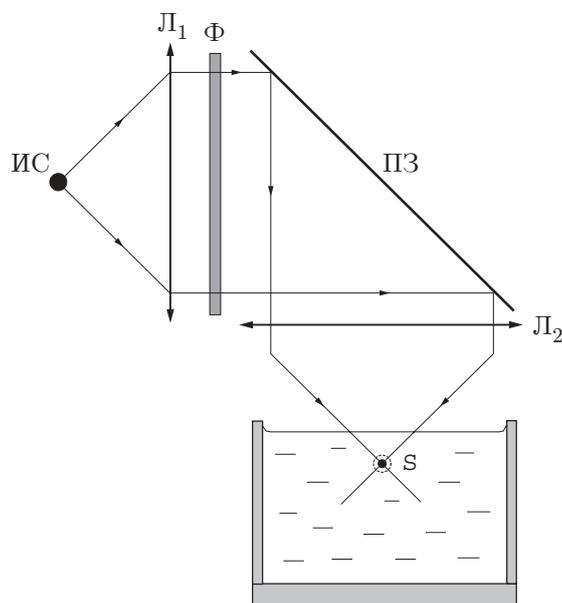


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

рованного излучением и расположенного вблизи свободной поверхности жидкости. Показано существенное отличие структуры и устойчивости течения от случая твердотельного источника тепла (см. [9]). Обсуждается роль граничных условий на поверхности источника тепла.

Экспериментальная установка и методика измерений. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Источник света ИС, в качестве которого используется лампа с нитью накаливания в форме круга, помещается в фокальной плоскости собирающей линзы Л₁. Затем пучок света проходит через инфракрасный фильтр Ф и при помощи поворотного зеркала ПЗ направляется на собирающую линзу Л₂. Образовавшийся сходящийся световой поток направляется на поверхность жидкости.

В качестве рабочей жидкости в данной серии экспериментов использован декан. Предварительные исследования показали, что интегральный коэффициент поглощения в инфракрасном диапазоне для декана составляет $\alpha = 0,06 \text{ мм}^{-1}$. Это означает, что на глубине около 20 мм интенсивность светового потока составляет примерно 30 % интенсивности падающего излучения. Это характерная глубина проникновения. При этом в каждом элементе жидкости, находящемся на пути излучения, выделяется тепло, пропорциональное поглощенной энергии. Последняя, в свою очередь, зависит от плотности светового потока, падающего на данный элемент жидкости. Как видно из рис. 1, плотность потока излучения распределена неравномерно, принимая максимальные значения в окрестности точки S — центре изображения нити накаливания лампы. Следовательно, максимум тепловыделения в жидкости будет локализован в этой области, представляя собой сосредоточенный источник тепла. Предварительно были проведены измерения распределения плотности светового потока вблизи точки S для определения размеров источника тепла. Для этого на пути распространения излучения ставился датчик интенсивности светового потока, который представлял собой покрытый сажей кусочек медной фольги размером $0,5 \times 0,5 \text{ мм}$. К фольге припаян спай медьконстантановой термопары, сигнал с которой измерялся микровольтметром. Второй спай располагался в термостатированном резервуаре. С помощью двухкоординатного препаратоводителя датчик перемещали в области распространения светового потока. Расстояние от линзы, на котором плотность светового потока достигает

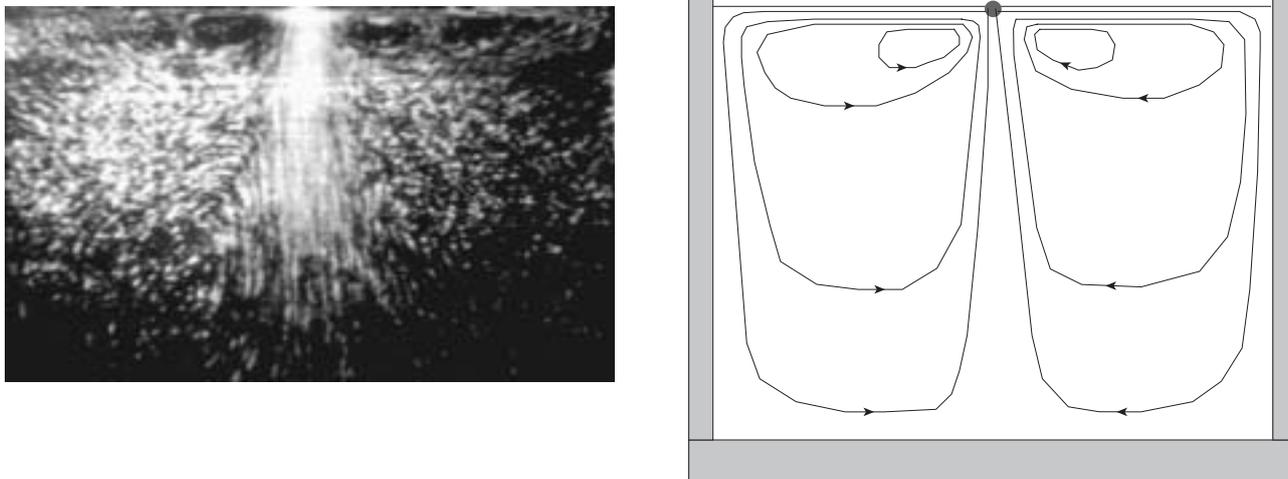


Рис. 2. Фотография вертикального среза течения в плоскости центра источника тепла

максимума, считалось центром источника тепла. В качестве границ теплового источника выбрана координата, в которой плотность светового потока составляет 30 % максимальной. При таком выборе геометрические размеры источника тепла получились следующие: диаметр — 10 мм, высота — 5 мм.

Предварительно также были проведены измерения мощности получившегося источника тепла при помощи сравнительного калориметрического метода, основанного на сравнении темпов нагрева небольшого объема жидкости неизвестным и эталонными источниками тепла. По результатам исследования был построен градуировочный график зависимости мощности светового источника тепла от напряжения, подаваемого на лампу накаливания. Оказалось, что в диапазоне рабочих напряжений лампы мощность источника тепла может меняться в пределах $0 \div 3$ Вт.

Эксперимент проводился следующим образом. В конвективную камеру заливалась рабочая жидкость. Конструкция установки предусматривала возможность перемещения камеры с жидкостью в вертикальном направлении относительно линзы Л₂ (см. рис. 1). При помощи микрометрической подвижки кювета выставлялась на такой высоте, чтобы центр светового источника находился на поверхности жидкости. Такое положение источника считается за его нулевое значение глубины погружения. Затем подавалось некоторое напряжение на лампу накаливания. В процессе проведения эксперимента при фиксированных мощности и глубине погружения светового источника тепла исследовались структура возникающего конвективного течения и форма поверхности жидкости. Методы визуализации течения и исследования формы поверхности жидкости аналогичны описанным в [9].

Результаты экспериментов. На рис. 2 представлена фотография вертикального среза течения в плоскости центра источника тепла некоторой фиксированной мощности, расположенного на поверхности жидкости. Видно, что центробежное течение сконцентрировано в узкой приповерхностной области, в то время как возвратное течение занимает весь объем жидкости. Характерной чертой такого течения является центральный подъемный вертикальный поток, распространяющийся от самого дна к поверхности жидкости. Видно, что течение жидкости вдоль поверхности имеет радиально-симметричную структуру и занимает весь объем жидкости (края фотографии).

На рис. 3 представлена зависимость радиальной составляющей скорости от радиальной координаты для трех различных положений источника тепла относительно поверхно-

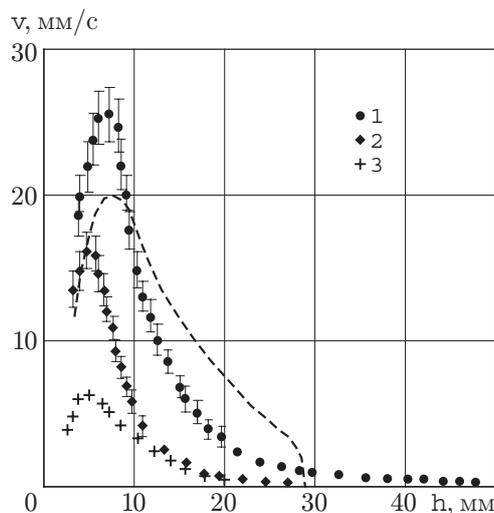


Рис. 3. Зависимость радиальной скорости течения на поверхности жидкости от радиальной координаты для различных положений источника тепла относительно поверхности жидкости:

мощность источника тепла $P = 0,6$ Вт; глубина погружения центра источника тепла h_0 , мм: 1 — 0; 2 — 5; 3 — 10; штриховая линия — аналогичная зависимость для твердотельного источника тепла при $h_0 = 1$ мм, $P = 0,6$ Вт

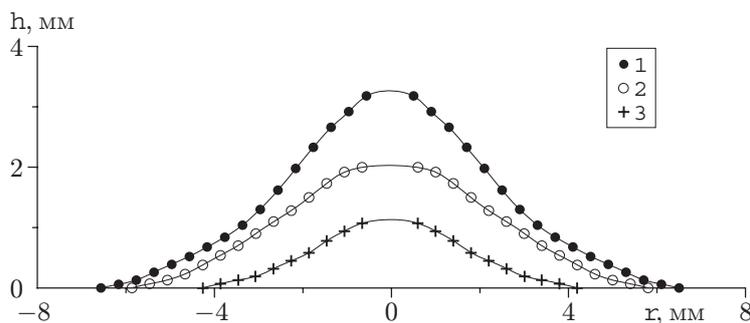


Рис. 4. Профиль поверхности жидкости при различных положениях источника тепла мощностью 0,6 Вт:

глубина погружения центра источника тепла h_0 , мм: 1 — 0; 2 — 5; 3 — 10

сти жидкости. Видно, что по мере удаления центра светового источника в глубь жидкости скорость течения на поверхности быстро уменьшается. Значения скорости вдали от источника для больших глубин погружения не отмечены на графике, так как при данном масштабе практически сливаются с координатной осью. Такое распределение скорости на поверхности и в объеме жидкости характерно для любых мощности и глубины погружения светового источника. При изменении этих параметров меняется лишь скорость течения. Такая структура течения абсолютно устойчива при любых значениях мощности, достижимых в эксперименте. На рис. 3 штриховой линией показана аналогичная зависимость для случая твердотельного источника тепла (см. [9]). Видно, что той локализации течения, которая была характерна для случая твердотельного источника тепла, не наблюдается.

На рис. 4 представлен график, иллюстрирующий профиль поверхности жидкости вблизи источника тепла при различных его положениях относительно границы раздела. Видно, что искривления всегда одного знака — поверхность жидкости выгнута в сторону

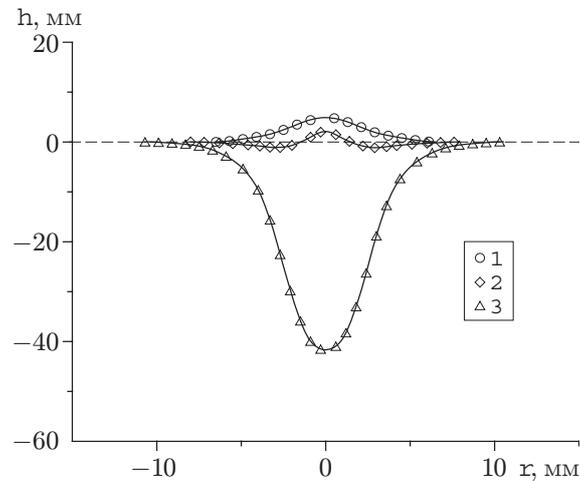


Рис. 5. Профиль поверхности жидкости при различной толщине слоя жидкости:
 h , мм: 1 — 10; 2 — 2; 3 — 1; $P = 1,2$ Вт

газовой фазы. При любых значениях мощности и положениях источника форма поверхности остается стационарной. Наблюдаемая картина деформации свободной поверхности существенно отличается от случая затопленного твердотельного источника тепла (см. [9]) и не совпадает с результатами других исследований [6–8]. Анализ работ, в которых также исследовался профиль облучаемой поверхности жидкости, показывает, что поверхность всегда вогнута в сторону жидкой фазы. Однако во всех этих случаях вблизи поверхности жидкости находится какая-либо твердая граница (в перечисленных работах это нижняя граница плоского слоя, в экспериментах [9] — верхняя поверхность источника тепла), которая, вероятно, и определяет наблюдаемое различие. Для проверки данного предположения было исследовано влияние толщины слоя жидкости на структуру течения и форму границы раздела.

На рис. 5 представлены профили поверхности жидкости вблизи светового источника тепла мощностью 1,2 Вт при различной толщине слоя жидкости. Вплоть до глубины $h = 10$ мм профиль поверхности неизменен. При дальнейшем уменьшении толщины слоя появляется область поверхности с противоположным знаком кривизны, и начиная со значения $h \approx 1$ мм поверхность принимает вогнутую в сторону жидкой фазы форму. Форма поверхности всегда остается стационарной. Структура течения при этом подобна наблюдавшейся для твердотельного источника тепла (штриховая линия на рис. 3).

Заключение. Представленные в обеих частях статьи результаты исследования показывают, что структура термокапиллярного течения в значительной степени зависит от природы источника тепла. Это касается как структуры основного течения, так и его устойчивости. В случае твердотельного источника течение всегда локализовано, т. е. имеет конечные размеры конвективной ячейки как на поверхности, так и в объеме жидкости. В случае индуцированного излучением источника наблюдается иная картина — ничем не ограниченная (кроме стенок кюветы) ячейка. В теоретических работах [10–14], посвященных термокапиллярному течению от точечного источника тепла, в качестве основного течения всегда получается бесконечное по радиальной координате течение на поверхности, пропорциональное $1/r^n$. Результаты экспериментов, изложенные в статье, показывают, что необходимо учитывать специфику самого источника при расчете основного течения. Различие экспериментальных результатов, по-видимому, связано с различием граничных условий для скорости на поверхности источника тепла. Световой источник проницаем для потоков жидкости и в этом отношении близок к точечному источнику, рассматриваемому

в теоретических исследованиях, что и обуславливает сходство результатов для основного течения.

Различием условий для скорости на поверхности обусловлено, по-видимому, и различие в отношении устойчивости термокапиллярного течения. Имеющее место на границе твердотельного источника тепла условие прилипания способствует появлению возмущений вблизи поверхности нагревательного элемента, приводящих к наблюдаемой в локальной области, расположенной непосредственно над источником тепла, неустойчивости течения и как следствие к появлению поверхностных волн. Термокапиллярное течение от светового источника, границы которого абсолютно проницаемы, оказывается более устойчивым.

Интересен сравнительный анализ наблюдаемой структуры течения с результатами некоторых теоретических исследований. Из результатов, представленных в данной работе, следует, что термокапиллярное течение осесимметрично при любом типе источника тепла. Даже появление поверхностных волн (в случае с твердотельным источником тепла) не нарушает такой симметрии. В то же время в ряде теоретических работ [12–14] показано, что термокапиллярное течение от точечного источника тепла на поверхности полубесконечной жидкости становится неустойчивым уже при малых числах Марангони (а в некоторых работах абсолютно неустойчиво) по отношению к азимутальным возмущениям, что, по мнению авторов, приводит к смене осесимметричного течения течением с азимутальной составляющей скорости на поверхности (так называемое течение “ромашкового” типа). Уверенности в правильности их результатов авторам указанных работ придают результаты представленного в [15] экспериментального исследования капиллярного течения от сосредоточенного источника поверхностно-активного вещества. В этих экспериментах как раз и наблюдалась абсолютная неустойчивость осесимметричного течения по отношению к таким возмущениям. Результаты же, представленные в данной статье, показывают, что в случае термокапиллярной конвекции это не так. Причину столь разного поведения системы при явной идентичности природы капиллярных сил, обусловленных зависимостью коэффициента поверхностного натяжения от температуры или концентрации примеси, предстоит еще выяснить в ходе отдельного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безуглый Б. А., Галашин Е. А., Криндач Д. П., Майоров В. С. Разделение примесей в жидкости при тепловом действии лазерного излучения // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2, вып. 18. С. 832–838.
2. Безуглый Б. А., Криндач Д. П., Майоров В. С. Получение изображения в жидких пленках с использованием явления термокапиллярной конвекции // Журн. техн. физики. 1982. Т. 52, вып. 12. С. 16–18.
3. Боровский И. Б., Городский Д. Д., Шарафеев И. М., Моряцев С. Ф. О поверхностном легировании металлов с помощью непрерывного лазерного излучения // Физика и химия обработки материалов. 1984. № 1. С. 19–23.
4. Balasubramaniam R., Ostrach S. Transport phenomena near the interface of a Czochralski-grown crystal // J. Crystal Growth. 1988. V. 88, N 2. P. 263–281.
5. Полежаев В. И. Гидродинамика, тепло- и массообмен при росте кристаллов // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М.: ВИНТИ, 1984. Т. 18. С. 198–259.
6. Kamotani Y., Ostrach S., Masud J. Oscillatory thermocapillary flows in open cylindrical containers induced by CO₂ laser heating // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1999. V. 42. P. 555–564.
7. Низовцев В. В. Термокапиллярная конвекция в жидком слое при лазерном облучении // Инж.-физ. журн. 1988. Т. 55, № 1. С. 85–92.

8. **Bezuglyi V. A.** Capillary-convective phenomena induced by heat effect of light // 11th Intern. conf. "Surface forces", Moscow, Russia, June 25–29, 1996. S. 1., 1996. P. 18.
9. **Мизёв А. И.** Экспериментальное исследование термокапиллярной конвекции, индуцированной локальной температурной неоднородностью вблизи поверхности жидкости. 1. Твердотельный источник тепла // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 4. С. 36–49.
10. **Братухин Ю. К., Маурин Л. Н.** Термокапиллярная конвекция в жидкости, заполняющей полупространство // Прикл. математика и механика. 1967. Т. 31. С. 577–580.
11. **Братухин Ю. К., Маурин Л. Н.** Устойчивость термокапиллярной конвекции в жидкости, заполняющей полупространство // Прикл. математика и механика. 1982. Т. 46, № 1. С. 162–165.
12. **Братухин Ю. К., Макаров С. О.** О вторичных термокапиллярных движениях солитонного типа // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1992. № 4. С. 20–27.
13. **Shtern V., Hussain F.** Azimuthal instability of divergent flows // J. Fluid Mech. 1993. V. 252. P. 518–536.
14. **Goldsh tik M., Hussain F., Shtern V.** Symmetry breaking in vortex-source and Jeffery — Hamel flows // J. Fluid Mech. 1991. V. 232. P. 521–566.
15. **Пшеничников А. Ф., Яценко С. С.** Конвективная диффузия от сосредоточенного источника поверхностно-активного вещества // Уч. зап. Перм. ун-та. 1974. № 316. С. 175–181.

*Поступила в редакцию 11/VIII 2003 г.,
в окончательном варианте — 8/XII 2003 г.*
