

УДК 532.22

Термокапиллярная деформация слоя воды при локальном нагреве*

В.В. Чеверда¹, А.А. Федорец², И.В. Марчук^{1,3}, О.А. Кабов^{1,4}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Тюменский государственный университет

³Новосибирский государственный университет

⁴Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: slava.cheverda@gmail.com

Исследуется горизонтальный слой воды толщиной 0,29–0,44 мм, локально нагреваемый со стороны подложки. Величина термокапиллярной деформации, возникающей при локальном нагреве, измеряется с помощью инвертированного лазерного сканирующего конфокального микроскопа Zeiss LSM 510 Meta. Нагреватель в виде полоски шириной 0,5 мм, длиной 40 мм и высотой 0,5 мкм из оксида индия напылен на сапфировую подложку. Температура воды со стороны подложки измеряется с помощью ИК-сканера Titanium 570M. Детально исследуется влияние начальной толщины слоя и мощности нагрева на величину термокапиллярной деформации и температурное поле. Показано, что деформация увеличивается с ростом тепловой мощности и уменьшением толщины слоя. Результаты численного моделирования находятся в хорошем качественном соответствии с результатами измерений.

Ключевые слова: неподвижный слой, локальный нагрев, термокапиллярная деформация, термокапиллярная конвекция.

При локальном нагреве слоя воды на границе раздела вода–воздух возникают касательные силы, обусловленные термокапиллярным эффектом. Локализованное термокапиллярное течение и соответственно деформация границы раздела газ–жидкость часто встречаются в промышленных условиях, например, при лазерной резке металлов [1], при осаждении наночастиц из раствора с помощью лазерного излучения [2]. Эффект термокапиллярной деформации лежит в основе ряда методов исследования химического состава, теплофизических, реологических и других свойств жидкостей [3, 4]. Деформация и разрыв слоя жидкости (сквалана и триэтиленгликоля) экспериментально исследовались с помощью интерференционного микроскопа при нагреве сфокусированным пучком инфракрасного лазера [5]. В работе [6] термокапиллярная деформация

* Работа в части экспериментов по измерениям температурных полей выполнена за счет гранта РФФ 14-19-01755; измерения деформаций выполнены при поддержке РФФИ (грант мол_нр 14-38-50445); О.А. Кабов благодарит за финансовую поддержку Программу повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета (ВИУ_ЭНИН_94_2014).

поверхности локально нагреваемой стекающей пленки жидкости измерялась с помощью оптоволоконного сенсора. Оптическая поверхность сенсора находилась в непосредственной близости от жидкости и на точность измерений мог негативно влиять процесс конденсации паров. Кроме того, область измерения была ограничена диаметром оптоволоконка и составляла 100 мкм.

В работе [7] термокапиллярный вал в стекающем слое жидкости исследовался с применением шпирен-метода. В работе [8] этим методом изучались сверхкороткие капиллярные волны, генерируемые на поверхности воды при коалесценции микрокапель. Численное моделирование термокапиллярного течения от локального источника тепла [9] предсказывает, что при увеличении тепловой мощности должно происходить нелинейное увеличение глубины деформации, что может приводить к разрыву слоя.

Целью настоящей работы является исследование термокапиллярных деформаций слоя воды при локальном нагреве со стороны подложки и анализ влияния начальной толщины и мощности нагрева на величину деформаций.

Для измерения деформации поверхности слоя воды (дистиллированной и деионизированной фирмой MilliQ) при локальном нагреве используется инвертированный конфокальный лазерный микроскоп «Zeiss» LSM 510 META (рис. 1а), погрешность измерения которого составляет 5 мкм. Основой рабочего участка (рис. 1б) является подложка из сапфирового стекла диаметром 86 мм и толщиной 0,35 мм. На стекло напылен резистивный, прозрачный в оптическом диапазоне нагреватель из In_2O_3 длиной 40 мм, шириной 0,5 мм и толщиной 0,5 нм. Боковые стенки кюветы изготовлены из алюминия в виде кольца с внутренним диаметром 40 мм и высотой 10 мм. Непосредственно перед началом измерения с помощью высокоточного дозатора в кювету помещался заданный объем жидкости, сверху кюветы закрывалась стеклом для минимизации испарения. Первое сканирование проводилось при выключенном нагревателе и позволяло измерить исходную толщину H_0 слоя воды, недеформированного термокапиллярным течением. Затем включался нагреватель, выдерживалось время, необходимое для установления стационарного режима течения, и проводилось повторное сканирование, при котором измерялась толщина слоя в области термокапиллярной деформации. Эксперимент проводился при температуре окружающего воздуха 25 ± 2 °С. Область сканирования определялась возможностями используемого объектива микроскопа и имела форму квадрата со стороной 1,25 мм. Рабочий участок устанавливался таким образом, чтобы ось нагревателя проходила через центр области сканирования. Точность определения толщины слоя жидкости составляла порядка 5 мкм. В поле зрения микроскопа имело место равномерное утончение слоя жидкости, при этом искривления поверхности не наблюдалось. Изменялась средняя толщина слоя жидкости в области видения микроскопа.

Сапфир в рабочем оптическом диапазоне используемой инфракрасной камеры Titanium 570M (3,7–4,8 мкм) прозрачен. Благодаря этому, используя ИК-сканер, можно получить распределение температуры снизу как нагревателя (напыленный нагреватель непрозрачен в указанном диапазоне ИК-спектра), так и всей нижней малой части слоя воды, составляющей порядка 23 мкм (расстояние, на котором интенсивность света в указанном диапазоне уменьшается в 10 раз). Для проведения исследования кюветы помещается в другой экспериментальный стенд (рис. 1с). Ниже рабочего участка крепится зеркало с золотым напылением. Отраженное от зеркала инфракрасное излучение с нижней поверхности кюветы регистрируется с помощью инфракрасной камеры. Видеозапись с инфракрасной камеры осуществляется при выключенном нагревателе, потом нагреватель включается. До нагрева распределение температуры является однородным. Полученные кадры обрабатываются с помощью программного обеспечения инфракрасной камеры и по полученным данным анализируется распределение

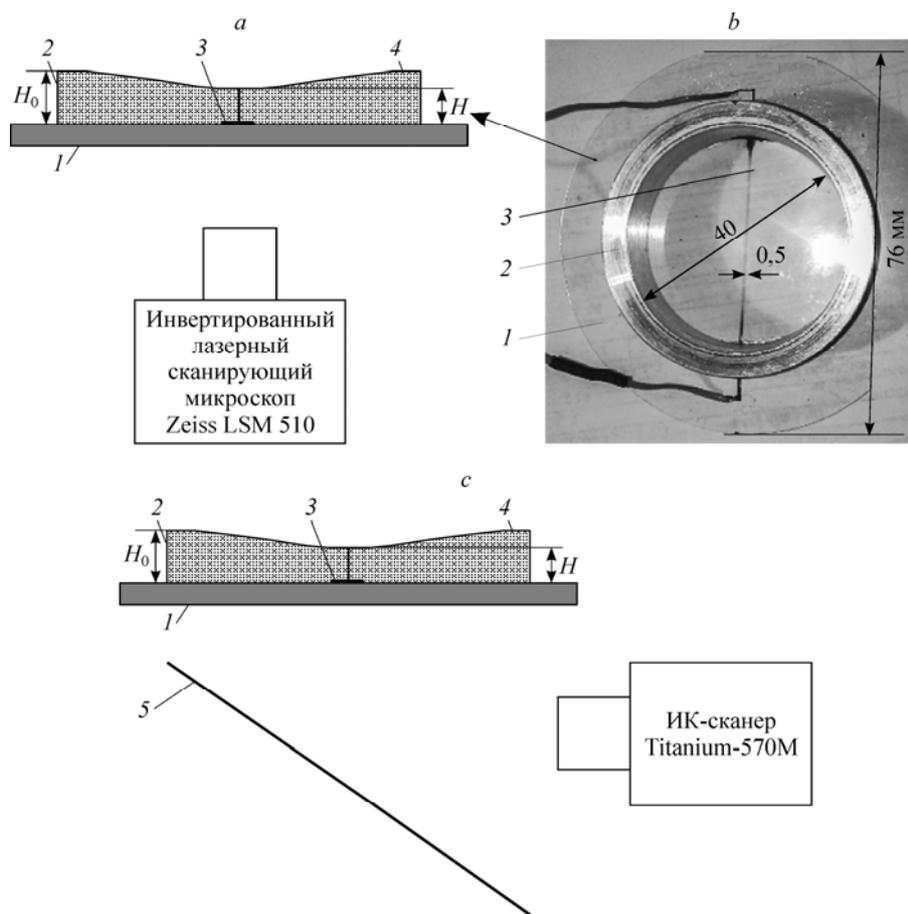


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и фотография рабочего участка (б) для измерения деформации поверхности слоя жидкости, схема установки для построения поля температур нижней стороны слоя жидкости (с).

1 — сапфировая подложка, 2 — чашка, 3 — резистивный нагреватель из оксида индия, 4 — слой жидкости, 5 — зеркало.

температуры на нагревателе и в слое жидкости во времени. Толщина слоя воды в этом случае измеряется микрометром. При этом с помощью мультиметра фиксируется касание стальной иглой нагревателя, затем игла поднимается, наливается жидкость, потом фиксируется касание иглой поверхности воды. Точность этого способа составляет порядка 20 мкм.

По результатам измерения толщины слоя с помощью инвертированного конфокального лазерного микроскопа была определена величина относительной термокапиллярной деформации слоя жидкости ($\Delta H = H_0 - H$, где H_0 — начальная толщина слоя жидкости, H — толщина, измеренная после установления равновесия при включенном нагревателе) в центре рабочего участка над нагревателем. На графике (рис. 2) видно, что при температуре 26 °С величина термокапиллярной деформации слоя воды, рассчитанная по численной модели [9], зависит от мощности нагрева и начальной толщины слоя воды.

Перепад температур вычисляется следующим образом: из значения температуры в центре на поверхности жидкости (над нагревателем), которое соответствует ее наибольшему значению на поверхности жидкости, вычитается значение температуры, полученное

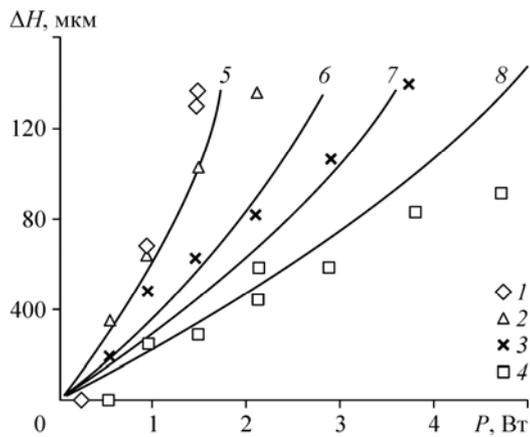


Рис. 2. Зависимость величины деформации ΔH слоя воды от тепловой мощности P , выделяемой на нагревателе, и начальной толщины слоя жидкости H_0 при температуре окружающего воздуха 26°C . Результаты измерений настоящей работы: 290 (1), 353 (2), 391 (3), 440 (4) мкм; расчетное значение деформации по модели [9] для соответствующих толщин слоя 290 (5), 353 (6), 391 (7), 440 (8) мкм.

на поверхности жидкости на периферии (соответствует наименьшему значению температуры на поверхности воды). Эксперименты и расчеты показывают, что увеличение нагрева приводит к росту

градиента температуры на поверхности жидкости. При этом на поверхности жидкости возникает касательная сила, вызванная термокапиллярным эффектом в направлении от нагревателя к периферии. На графике (рис. 2) видно, что величина термокапиллярной деформации монотонно возрастает с увеличением мощности нагрева при фиксированной начальной толщине слоя и убывает с увеличением начальной толщины слоя при фиксированной мощности нагрева. С увеличением начальной толщины слоя воды требуется большая электрическая мощность для деформирования границы раздела. На это указывает наклон линий на графике (рис. 2): он становится более пологим с увеличением начальной толщины слоя. Результаты численного расчета совпадают с экспериментальными данными с удовлетворительной точностью.

На рис. 3а, 3б приведены измеренные в экспериментах распределения температуры нижней части слоя воды. На графике (рис. 3с) представлены распределения безразмерной температуры $(T - T_0)/(T_{\text{max}} - T_0)$ в зависимости от безразмерного расстояния (r/a) от нагревателя вдоль линии 3 в различные моменты времени, где T_0 — начальная температура, измеренная при выключенном нагревателе ($^\circ\text{C}$), T_{max} — максимальная температура для конкретной серии эксперимента ($^\circ\text{C}$), T — температура, измеренная при установившемся равновесии ($^\circ\text{C}$), r — расстояние от нагревателя в плоскости пластины (мм), a — ширина нагревателя (0,5 мм). Распределения безразмерной температуры построены после обработки полученных с помощью ИК-сканера изображений (рис. 3а, 3б). Из рис. 3с можно сделать вывод о быстром установлении температуры (порядка 5 с) в слое воды, а также о том, что весь слой воды прогревается в направлении, перпендикулярном нагревателю. Видно, что тепло от нагревателя распространяется на расстояние, более чем на порядок превышающее ширину нагревателя. Это происходит как из-за теплопроводности подложки, так и из-за термокапиллярного конвективного движения жидкости.

Таким образом, выполнено экспериментальное исследование горизонтального слоя воды при локальном нагреве со стороны подложки с применением инвертированного конфокального лазерного микроскопа «Zeiss» LSM 510 META и ИК-сканера Titanium 570M; показано, что величина деформации поверхности жидкости увеличивается с ростом тепловой мощности и уменьшением толщины слоя; измерены поля температур нижней части слоя воды и установлено, что тепло от нагревателя распространяется на расстояние, более чем на порядок превышающее ширину нагревателя; проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования и показано, что наблюдается хорошее качественное соответствие.

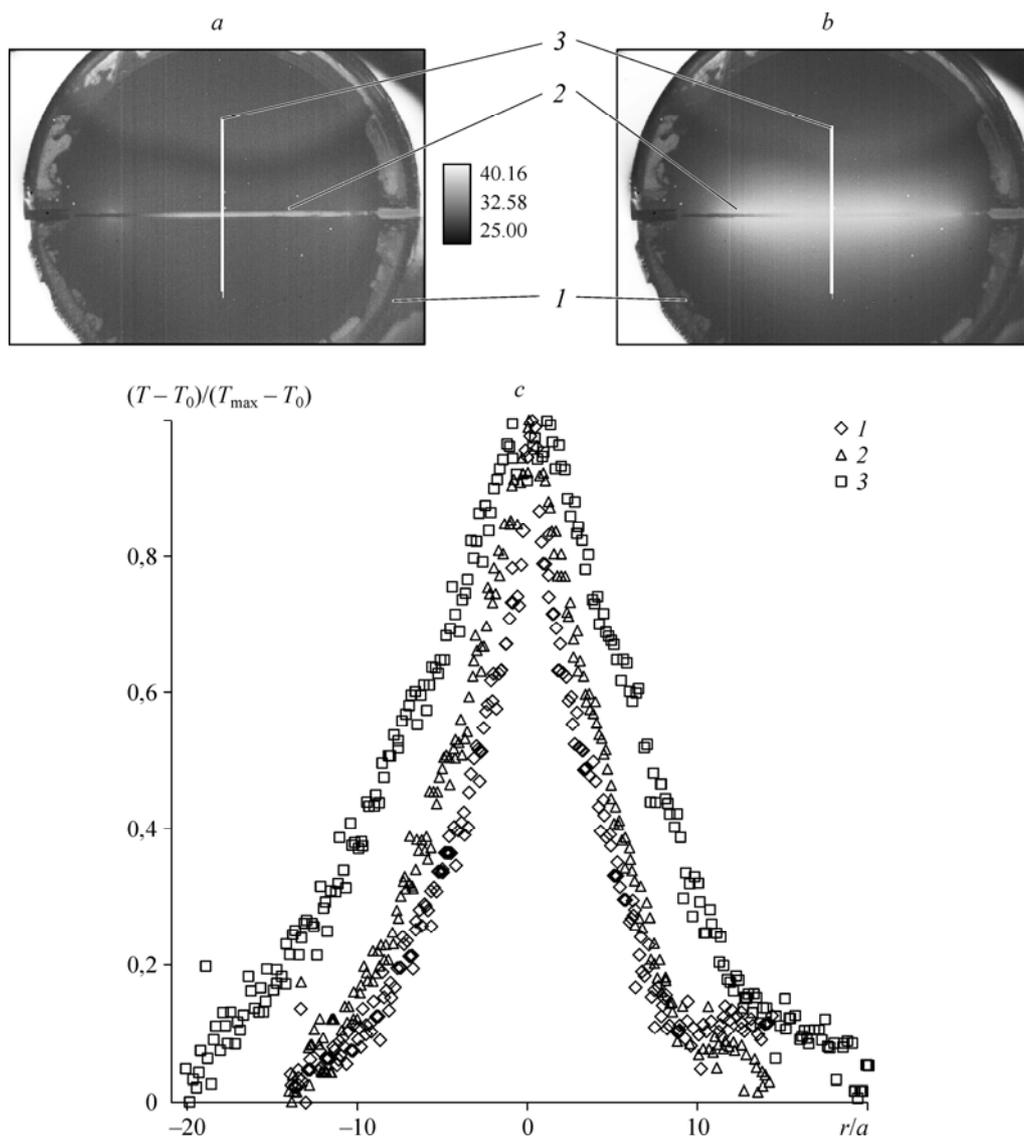


Рис. 3. Распределение температуры в нижней части слоя воды (толщиной 515 мкм).

a — нагреватель выключен, *b* — установившееся распределение температуры при включенном нагревателе (0,51 Вт), *c* — распределения температуры во времени в зависимости от расстояния до нагревателя по линии 3 (на фрагментах *a*, *b*): 1 — начало эксперимента ($T_0 = 27,6$, $T_{\max} = 28,6$), 2 — через 7 с после начала эксперимента ($T_0 = 27,6$, $T_{\max} = 29,5$), 3 — через 10 с после начала эксперимента ($T_0 = 27,6$, $T_{\max} = 29,7$).

a, *b*: 1 — алюминиевый цилиндр, 2 — нагреватель, 3 — линия, проходящая через середину нагревателя, вдоль которой осуществляется построение распределения температуры.

Список литературы

1. Cline H.E. Surface rippling induced in thin-films by a scanning laser // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. P. 443–448.
2. Nabetani Y., Yoshikawa H., Grimsdale A.C., Müellen K., Masuhara H. Effects of optical trapping and liquid surface deformation on the laser microdeposition of a polymer assembly in solution // Langmuir. 2007. Vol. 23, No. 12. P. 6725–6729.
3. А. с. № 1188588 СССР, МПК⁴ G01/V11/16. Способ определения вязкости / Безуглый Б.А., Ланин С.Н., Низовцев В.В. № 3745533; заявл. 28.05.84; опубл. 30.10.85, Бюл. № 40.

4. Патент № 2247968 РФ, МПК⁷ G01N21/00. Экспресс-метод идентификации и контроля качества жидкостей / Федорец А.А., Безуглый Б.А.; патентообладатель Тюменский гос. ун-тет. № 2003123856/28; заявл. 29.07.2003; опубл. 10.03.2005, Бюлл. № 7 // Изобретения. 2005.
5. Wedershoven H.M.J.M., Berendsen C.W.J., Zeegers J.C.H., Darhuber A.A. Infrared laser induced rupture of thin liquid films on stationary substrates // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104, No. 5. P. 054101-1–054101-4.
6. Zaitsev D.V., Kabov O.A., Evseev A.R. Measurement of locally heated liquid film thickness by a double-fiber optical probe // Experiments in Fluids. 2003. Vol. 34, No. 6. P. 748–754.
7. Scheid B., Kabov O.A., Minetti C., Colinet P., Legros J.C., Measurement of free surface deformation by reflectance-schlieren technique // Proc. 3-rd European Thermal Sci. Conf., Heidelberg, 10-13 September 2000. Vol. 1. P. 651–657.
8. Федорец, А.А., Марчук И.В., Кабов О.А. О роли капиллярных волн в механизме коалесценции капельного кластера // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99, № 5–6. С. 307–310.
9. Marchuk I.V. Thermocapillary deformation of a thin locally heated horizontal liquid layer // J. Eng. Thermophys. 2009. Vol. 18, No. 3. P. 227–237.

*Статья поступила в редакцию 30 июня 2015 г.,
после доработки — 5 августа 2015 г.*