

УДК 532.22

**Плотность теплового потока
в области контактной линии капли,
лежащей на горизонтальной поверхности
тонкой нагреваемой фольги***

В.В. Чеверда^{1,2}, А.Л. Карчевский^{2,3}, И.В. Марчук^{1,2}, О.А. Кабов^{1,4}

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

²*Новосибирский государственный университет*

³*Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск*

⁴*Томский политехнический университет*

E-mail: slava.cheverda@gmail.com

Экспериментально исследовались испаряющиеся капли воды, сидящие на горизонтальной нагреваемой подложке, в качестве которой использовалась константановая фольга толщиной 25 мкм, с размерами 42×35 мм². Эксперименты проводились с одной каплей или с ансамблем из двух или трёх капель на фольге. Температура нижней поверхности фольги измерялась ИК-сканером. Для определения плотности теплового потока при испарении жидкости вблизи контактной линии, решалась задача Коши для уравнения теплопроводности с использованием термографических данных. Результаты расчетов показали, что максимальная плотность теплового потока имеет место в области контактной линии и превосходит среднюю плотность теплового потока со всей поверхности фольги. Это объясняется притоком тепла с периферии фольги к капле за счет относительно высокого значения коэффициента теплопроводности материала фольги, а также высокой интенсивностью испарения в области контактной линии.

Ключевые слова: капля жидкости, локальный нагрев, контактная линия смачивания.

Изучение процессов переноса тепла в области динамической трехфазной контактной линии стенка–жидкость–пар является одной из важнейших задач физики. Недостаточно полное понимание процессов переноса в области линии контакта трех фаз сдерживает развитие исследований целого ряда явлений, таких как кипение, кавитация, ручейковые течения, разрушение пленок жидкости, растекание и испарение капель, капельная конденсация и др. [1, 2]. Толщина жидкости в этой области шириной порядка нескольких микрон, которую часто называют микрорегион, снижается от 1–3 мкм до 10–20 нм, т.е. до толщины адсорбированной пленки. Существенная кривизна границы раздела газ–жидкость в области микрорегиона, изменение толщины на 2–3 порядка, неравновесные эффекты (например, скачок температуры на границе раздела), влияние сил Ван-дер-Ваальса и структуры подложки вызывают трудности как для экспериментального, так и для теоретического исследования рассматриваемой проблемы.

* Работа выполнена за счет гранта РФ (соглашение № 14-39- 00003).

Задача об определении интенсивности испарения и плотности теплового потока в нагреваемой жидкости в области трехфазной контактной линии активно исследуется в связи с важными практическими приложениями в энергетике, медицине, в химической, фармацевтической и пищевой промышленности [3, 4]. Теоретические и экспериментальные исследования подтверждают, что интенсивность теплообмена в области контактной линии может быть более чем на порядок выше средней и вызывает локальный минимум температуры на твердой стенке. Однако прямых измерений плотности теплового потока в области микрорегиона, ширина которого по разным оценкам составляет от 0,5 до 10–20 мкм, провести пока не представляется возможным, поэтому используются различные косвенные методы и численные процедуры. В работе [5] исследовался мениск жидкости HFE7100, испаряющийся между двумя вертикальными нагреваемыми пластинами из металлической фольги. Было установлено, что локальная плотность теплового потока в области контактной линии в 5,4–6,5 раз больше, чем средняя плотность теплового потока на поверхности.

В работе экспериментально исследовались испаряющиеся капли воды, сидящие на горизонтальной нагреваемой подложке (см. рис 1). В качестве подложки использовалась константановая фольга (CuNi) толщиной 25 мкм, размером 88×35 мм², с коэффициентом теплопроводности 23 Вт/мК. Применялся джоулев нагрев фольги. Мощность тепловыделения в экспериментах составляла от 0,25 до 2,5 Вт. Фотографирование профиля капли проводилось с помощью оптической теневой системы с разрешением 8 мкм/пиксель. По фотографиям, сделанным методом Юнга–Лапласа [6], определялись геометрические параметры капель, которые в экспериментах были следующими: объем — $1,1 \div 39,3$ мкл, диаметр основания (смоченного пятна) — $3 \div 7,19$ мм, высота — $0,88 \div 1,81$ мм, контактный угол смачивания — $50 \div 75^\circ$ (средний угол 63°). Температура нижней поверхности фольги измерялась ИК-сканером Titanium 570M. Термографическая съемка проводилась с частотой записи 25 Гц, разрешением 640×512 пикселей и временем интегрирования 3050 мкс. Для увеличения минимальной разрешимой разности температур при использовании ИК-камеры обратная сторона фольги покрывалась слоем сажи. Измеренная в экспериментах температура поверхности фольги лежала в диапазоне 29–86 °С. Средний коэффициент теплоотдачи от поверхности фольги к окружающему воздуху находился в пределах $16 \div 20$ Вт/м²К (рис. 2).

Для более точной оценки интенсивности теплообмена при испарении жидкости вблизи контактной линии была сформулирована постановка задачи Коши для эллиптического уравнения (стационарной теплопроводности). На нижней стороне фольги задавались температура и плотность теплового потока, боковые стенки полагались адиабатическими. Задача Коши для уравнения Лапласа или эллиптического уравнения общего вида является одной из старейших некорректных задач. Ее решение является неустойчивым, т.е. малым вариациям в данных Коши могут соответствовать значительные изменения решения. Если предположить существование ограниченного решения, то возможно показать условную устойчивость. Неустойчивость решения задачи Коши проявляет себя при реализации любого численного метода ее решения. В настоящей работе использовался метод, который сводит решение задачи Коши к решению проблемы моментов [8]. В соответствии с ним в сопряженной задаче специальным образом выбирается краевое условие, и вычисление значения теплового потока на недоступной для измерений части

границы сводится к суммированию соответствующего ряда. Рассматриваемый метод был применен к обработке экспериментальных данных в работах [8, 9]. Было показано наличие двух пиков в области контактной линии смачивания.

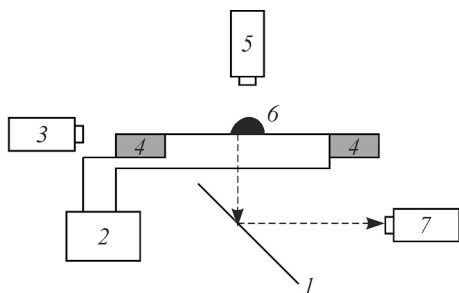


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — зеркало с золотым напылением, 2 — источник питания, 3 — теневая методика, 4 — латунные электроды, 5 — видеокамера, 6 — капля, 7 — ИК-сканер.

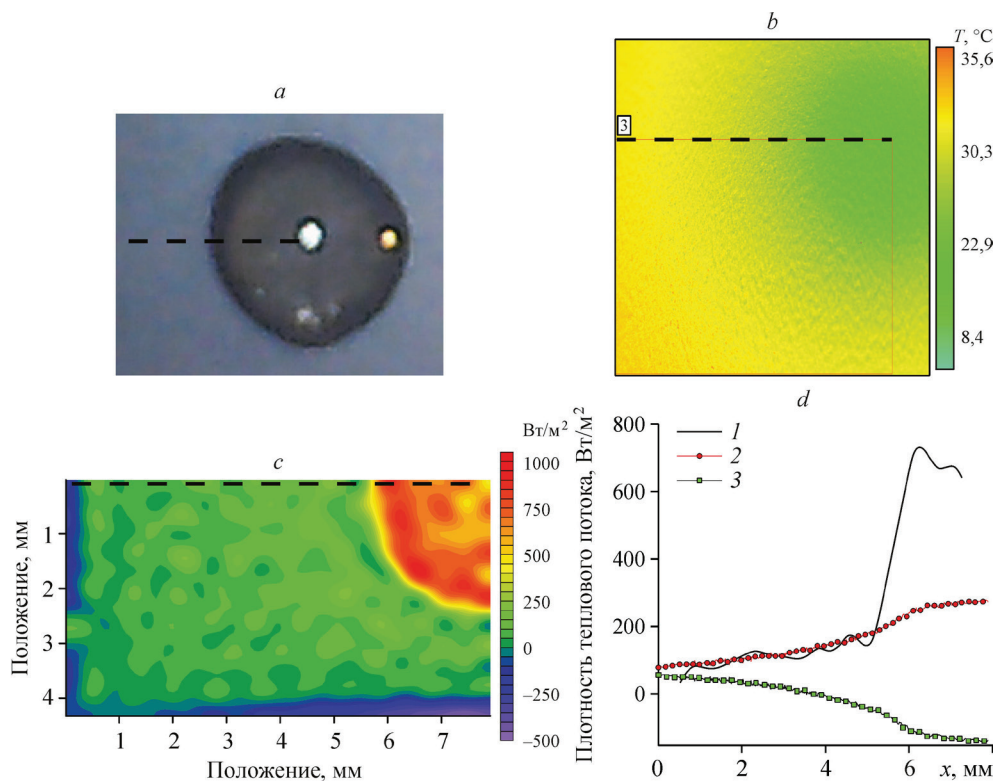


Рис. 2. Фото капли (а), распределения температуры фольги (b), плотности теплового потока для четверти капли (с) и плотности теплового потока вдоль штриховой линии на фрагментах а–с (d).

Решение задачи Коши (1), расчет без учета перераспределения теплового потока в фольге (2), плотность теплового потока на нижней стороне фольги (3); неподвижная капля воды диаметром 3,4 мм, средняя плотность теплового потока $q_{av} = 67,9 \text{ Вт/м}^2$.

С использованием предлагаемого метода решения задачи Коши по термографическим измерениям были рассчитаны распределения плотности теплового потока на поверхности фольги со стороны капли. На рис. 2 приведены первоначально измеренное с помощью ИК-макробъектива поле температур, рассчитанное распределение плотности теплового потока на подложке для четверти капли, а также распределение локальной плотности теплового потока вдоль штриховой линии, проходящей через центральное сечение капли. Результаты расчетов показали, что максимальная плотность теплового потока имеет место в области контактной линии и превосходит среднюю плотность теплового потока на всей поверхности фольги в 5 раз. Средняя плотность теплового потока в области смоченной каплей превосходит среднюю плотность теплового потока на всей поверхности фольги. Это объясняется притоком тепла с периферии фольги, обусловленного относительно высоким значением коэффициента теплопроводности материала фольги, а также высокой интенсивностью испарения в области контактной линии. На рис. 2d показан также расчет распределения локальной плотности теплового потока без учета перераспределения тепла, выделенного в фольге (линия 2). Видно, что отсутствие учета теплопроводности подложки дает существенно заниженную плотность теплового потока и отсутствие пиков в области контактной линии. На рис. 3 представлены результаты измерений и расчетов для трех капель, одновременно в ряд сидящих на подложке, расстояние между которыми в среднем составляет 2 мм. Для каждой из капель нарушаются условия симметрии. В области контактной линии, расположенной между каплями, выраженных максимумов плотности теплового потока уже не наблюдается, так как в этом случае для каждой из капель уменьшается приток тепла с периферии, за который капли конкурируют.

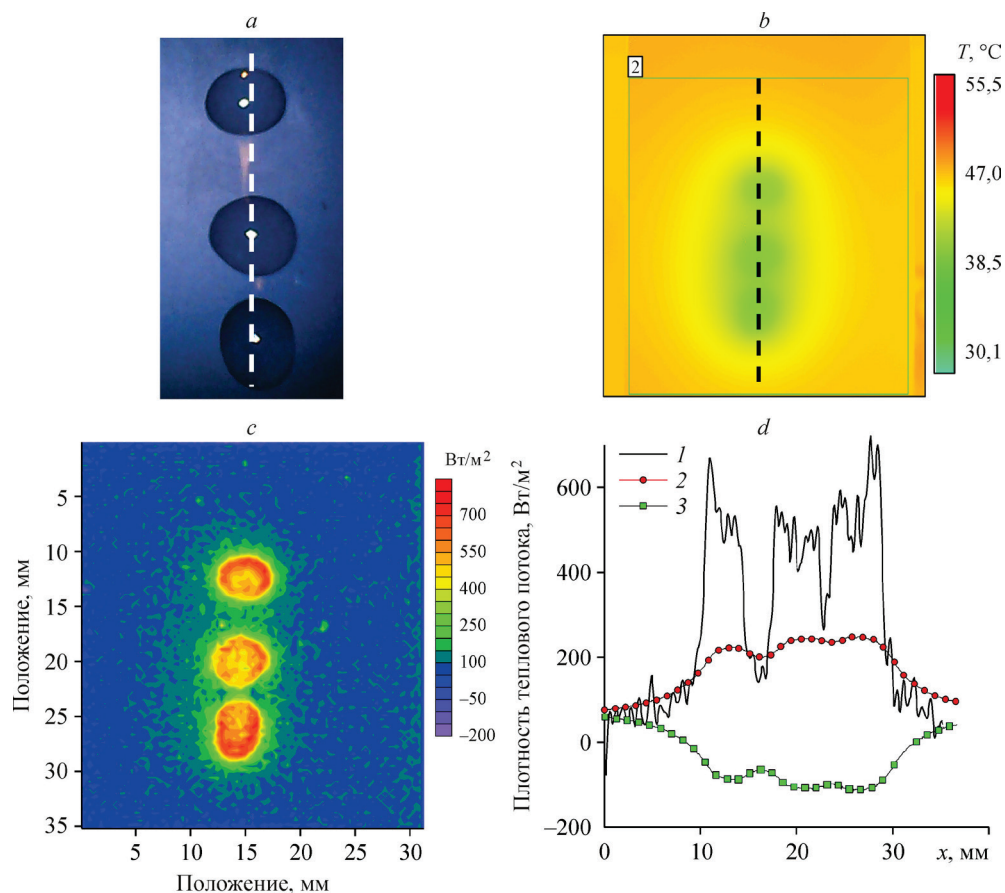


Рис. 3. Фото трех капель (а), распределения температуры фольги (b), плотности теплового потока (с) и плотности теплового потока вдоль штриховой линии на фрагментах а и b (d).

Решение задачи Коши (1), расчет без учета перераспределения теплового потока в фольге (2), плотность теплового потока на нижней стороне фольги (3); три неподвижных капли воды средним диаметром 3,3 мм, средняя плотность теплового потока $q_{av} = 67,9 \text{ Вт/м}^2$.

Список литературы

1. Sobac B., Brutin D. Triple-line behavior and wettability controlled by nanocoated substrates: influence on sessile drop evaporation // *Langmuir*. 2011. Vol. 27. P. 14999–15007.
2. Moraila-Martínez C.L., Cabrerizo-Vilchez M.A., Rodríguez-Valverde M.A. Controlling the morphology of ring-like deposits by varying the pinning time of driven receding contact lines // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2013. Vol. 1. P. 195–205.
3. Kundan A., Plawsky J.L., Wayner P.C. Thermophysical characteristics of a wickless heat pipe in microgravity — constrained vapor bubble experiment // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 78. P. 1105–1113.
4. Ajaev V.S., Gatapova E.Y., Kabov O.A. Rupture of thin liquid films on structured surfaces // *Physical Review E*. 2011. Vol. 84. P. 041606-1–041606-7.
5. Ibrahem K., Rabbo M.F.A., Roisman T.G., Stephan P. Experimental investigation of evaporative heat transfer characteristics at the 3-phase contact line // *Experimental Thermal and Fluid Sci.* 2010. Vol. 34. P. 1036–1041.
6. Марчук И.В., Чеведа В.В., Стрижак П.А., Кабов О.А. Определение поверхностного натяжения и контактного угла смачивания по форме поверхности осесимметричных пузырей и капель // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т. 22, № 3. С. 311–317.
7. Karchevsky A.L. Reformulation of an inverse problem statement that reduces computational costs // *Eurasian J. of Mathematical and Computer Applications*. 2013. Vol. 1, No. 2. P. 4–19.
8. Karchevsky A.L., Marchuk I.V., Kabov O.A. Calculation of the heat flux near the liquid-gas-solid contact line // *Applied Mathematical Modelling*. 2016. Vol. 40, Iss. 2. P. 1029–1037.
9. Чеведа В.В., Марчук И.В., Карчевский А.Л., Орлик Е.В., Кабов О.А. Экспериментальное исследование теплообмена в стекающем по наклонной фольге ручейке // *Теплофизика и аэромеханика*. 2016. Т. 23, № 3. С. 431–436.

Статья поступила в редакцию 15 июля 2016 г.,
после доработки — 10 февраля 2017 г.