

УДК 532.22

## Экспериментальное исследование теплообмена в стекающем по наклонной фольге ручейке\*

В.В. Чеверда<sup>1,3</sup>, И.В. Марчук<sup>1,2</sup>, А.Л. Карчевский<sup>2,4</sup>, Е.В. Орлик<sup>3</sup>,  
О.А. Кабов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>4</sup>Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

E-mail: slava.cheverda@gmail.com

Проведено экспериментальное исследование теплообмена при ручейковом стекании воды по фольге длиной 80, шириной 35 мм и толщиной 25 мкм, выполненной из константана. Температура поверхности фольги измерялась с помощью ИК-сканера. Получены распределения плотности теплового потока на поверхности фольги, по которой течет жидкость. Для определения плотности теплового потока со стороны фольги к жидкости вблизи контактной линии решалась задача Коши для стационарного 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 в несколько раз. Это объясняется притоком тепла с периферии фольги к ручейку за счет относительно высокого значения коэффициента теплопроводности материала фольги, а также высокой интенсивностью испарения в области контактной линии.

**Ключевые слова:** ручейк жидкости, локальный нагрев, контактная линия смачивания.

### Введение

В связи с аномально высоким коэффициентом теплоотдачи в области трехфазной контактной линии ручейковое течение, представляющее собой частный случай течения пленки жидкости с ограничивающей с обеих сторон линией раздела — линией соприкосновения трех фаз, обладает высоким охлаждающим свойством [1, 2]. Экспериментальные и теоретические исследования теплообмена в области контактной линии подтверждают, что в области микрорегиона, расположенной вблизи контактной линии, интенсивность теплообмена может быть более чем на порядок выше средней и вызывает локальное понижение температуры в этой области. Прямых измерений плотности теплового потока в области микрорегиона произвести пока не представляется возможным из-за его малого

---

\* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (соглашение № 14-19-01755); оптическая система создана при финансовой поддержке программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета (проект ВИУ\_ЭНИН\_94\_2014).

поперечного размера (порядка 10 мкм), в связи с этим используются различные косвенные методы и численные процедуры.

Изучению ручейковых течений посвящен ряд исследований. В работах [3, 4] были построены карты разновидностей ручейкового течения разных жидкостей (воды, раствора этилового спирта в воде, триэтиленгликоля, раствора глицерина в воде) по наклонной пластине из пропилена или нержавеющей стали. При малых расходах жидкости наблюдается капельное течение, с ростом расхода жидкости течение становится прямолинейным, с дальнейшим увеличением расхода жидкости наблюдается извивающееся течение, которое преобразуется в пленочное [3, 5–7]. Карта разновидностей волнообразования при ручейковом течении водных растворов глицерина и этилового спирта по результатам исследования LIF-методом (Laser Induced Fluorescence method) была построена в работе [8].

Распределение скорости ручейкового течения 50 %-го раствора глицерина в воде, стекающего по наклонному цилиндру из нержавеющей стали, рассчитано в зависимости от расстояния до стенки цилиндра по экспериментальным данным, полученным методом PIV (Particle-Image Velocimeter) [9].

В работе [10] исследовался теплообмен в мениске жидкости HFE7100 между двумя вертикальными нагреваемыми пластинами из металлической фольги. С помощью инфракрасного сканера с разрешением 14,8 микрон было получено распределение температуры на внешней границе фольги и рассчитан локальный тепловой поток к испаряющемуся мениску. 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 работах [11, 14] изучалась задача теплообмена испаряющейся капли на горизонтальной фольге из константана, подогреваемой от источника питания постоянного тока. С использованием результатов измерений температуры, полученных с помощью ИК-сканера, решалась задача Коши для эллиптического уравнения способом, изложенным в [12], и рассчитывалась плотность теплового потока на поверхности, где находится капля. Было показано, что в области микрорегиона тепловой поток выше, чем в среднем по капле.

Численное исследование теплообмена при течении нескольких ручейков воды, стекающих по структурированной поверхности под действием силы тяжести, капиллярных и термокапиллярных сил, показывает, что при увеличении температуры подложки течение становится неустойчивым и каждый ручеек может разбиваться на два, а иногда и на капли [13].

Целью настоящей работы является определение плотности теплового потока в области трехфазной контактной линии ручейка, стекающего по нагреваемой поверхности, с использованием данных инфракрасной термографии и методов решения некорректных задач.

## 1. Экспериментальная установка

Экспериментальный стенд является незамкнутым и открытым в атмосферу (рис. 1а). Фотография работающего стенда представлена на рис. 1б. По вертикальной фольге длиной  $l = 80$  мм, шириной  $w = 35$  мм и толщиной  $h = 25$  мкм стекает ручеек воды. Материал фольги — константан, плотность —  $8,9$  г/см<sup>3</sup>, теплоемкость —  $0,41$  Дж/(г·К), теплопроводность —  $23$  Вт/(К·м). Жидкость на фольгу подавалась через трубку со специальным соплом с помощью шприцевого насоса Cole Parmer 78-8110С с заданным расходом. Фольга через латунные электроды-держатели была подключена к источнику питания постоянного тока TТi QPX 1200L. С помощью источника питания осуществлялся джоулев нагрев фольги и регулировалась тепловая мощность, выделяемая на фольге. Наблюдения велись с помощью фотоаппарата Nikon D 7000 и инфракрасного (ИК) сканера Titanium 570 M. Разрешение ИК-сканера в экспериментах составляло  $640 \times 512$  пикселей, частота сканирования —  $50$  Гц, температурное разрешение —  $0,1$  К. Поверхность фольги с обратной стороны, где осуществлялись измерения ИК-сканером, была

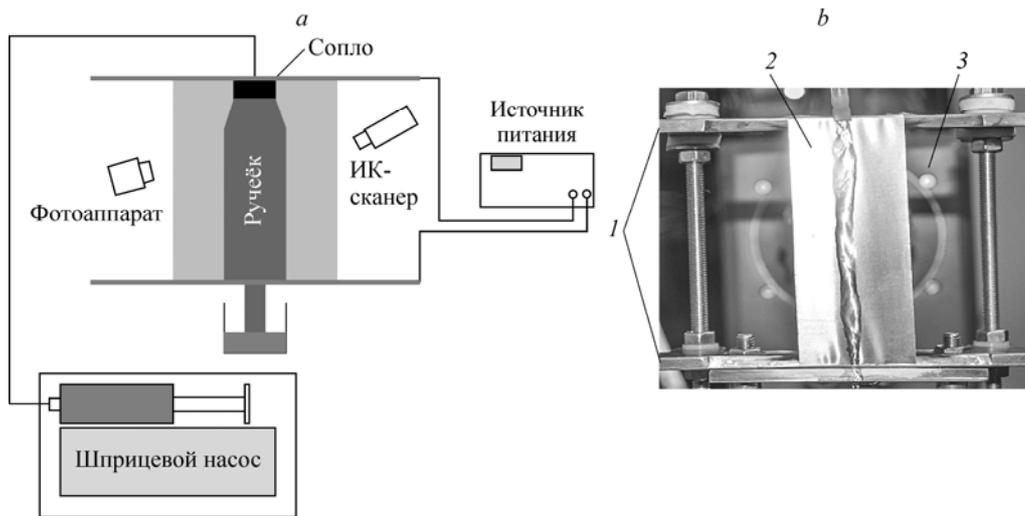


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования теплообмена в ручейке, стекающем по нагреваемой константановой фольге.

*a* — схема, *b* — фотография стекающего ручейка при  $Q = 10$  мл/мин,  $P = 2$  Вт;  
 1 — латунные электроды, 2 — фольга с ручейком, 3 — ИК-камера.

покрыта специальной чёрной графитовой краской с коэффициентом излучения, близким к 1. Краевой угол смачивания воды и фольги был измерен методом сидящей капли с использованием методики, описанной в работе [15], и составлял  $63 \pm 10^\circ$ . В эксперименте использовалась сверхочищенная, полученная с помощью системы Milli-Q вода, которая в ходе эксперимента стекала в специальную емкость, находящуюся под рабочим участком.

## 2. Результаты экспериментов

В ходе эксперимента задавалась постоянная мощность нагревателя и постоянный расход жидкости. Мощность варьировалась в диапазоне от 0,1 до 1,39 Вт, расход жидкости — от 10 до 100 мл/мин. Ширина ручейка измерялась по фотографиям и составляла от 2,2 до 9 мм. Температура окружающего воздуха равнялась  $31\text{--}32^\circ\text{C}$ . Для анализа данных использовался метод, основанный на решении задачи Коши для эллиптического уравнения [12]. Расчет теплового потока с фольги проведен с использованием изображений с ИК-сканера (см. рис. 2*a* и 3*a*) без учета тепловых потоков в фольге и путем решения задачи Коши, описывающей теплопроводность внутри фольги. На сухой стороне фольги задавались температура и плотность теплового потока, боковые стенки полагались адиабатическими. Задача Коши для эллиптического уравнения 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 можно показать его условную устойчивость. Неустойчивость решения задачи Коши проявляется себя при реализации любого численного метода ее решения. В настоящей работе использовался метод, который сводит решение задачи Коши к решению проблемы моментов (см. [12]). Выбираемые специальным образом краевые условия в сопряженной задаче и простота геометрии области позволяет не решать проблему моментов, а свести вычисление значения теплового потока на недоступной для измерений поверхности фольги к суммированию соответствующего ряда. Реализованный метод решения был применен к обработке полученных экспериментальных данных.

Было показано, что плотность теплового потока вдоль течения ручейка изменяется незначительно, в то время как в поперечном направлении наблюдается существенная неоднородность, а именно: максимальная плотность теплового потока наблюдается в области контактной линии (рис. 2, 3). Считалось, что плотность теплового потока на обратной стороне фольги может быть выражена с использованием коэффициента конвективной теплоотдачи:  $q_b = \alpha_{av}(T_w - T_a)$ , здесь  $T_w$  — измеренная тепловизором температура поверхности фольги,  $T_a$  — температура окружающего воздуха,  $\alpha_{av}$  — средний коэффициент теплоотдачи. Таким образом, в задаче Коши заданы два крайевых условия: температура и плотность теплового потока. Средний конвективный коэффициент теплоотдачи от фольги к воздуху измерялся в ходе эксперимента и его значения составляли около 25 Вт/(м<sup>2</sup>К). Выражение для плотности теплового потока на поверхности фольги с ручейком  $q_t = 2q_{av} - q_b$  получается из уравнения энергии для фольги с плотностью теплового потока на обратной стороне  $q_b = \alpha_{av}(T_w - T_a)$ , если пренебречь распространением

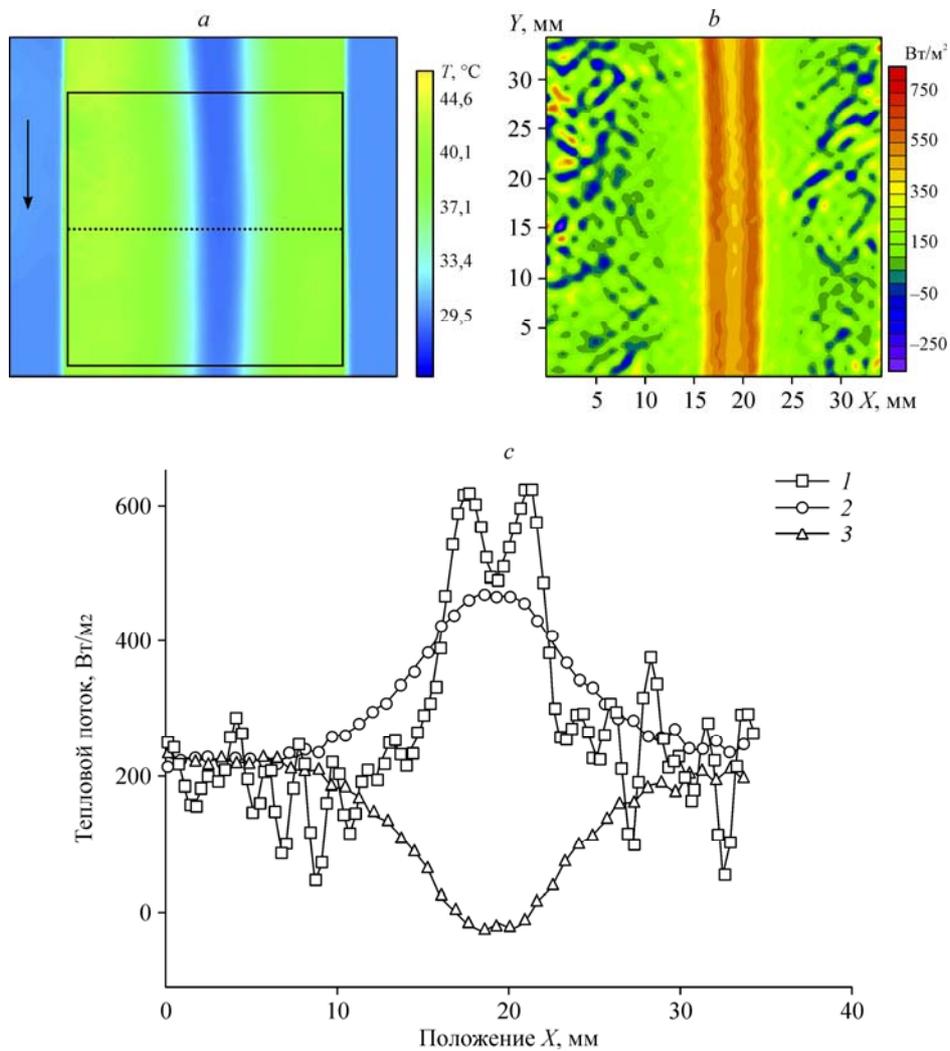


Рис. 2. Распределения температуры и плотности теплового потока на поверхности фольги со стекающим ручейком при  $Q = 10$  мл/мин и средней плотности теплового потока  $q_{av} = 226,0$  Вт/м<sup>2</sup>. *a* — термограмма с противоположной от ручейка стороны, *b* — рассчитанная плотность теплового потока со стороны ручейка, *c* — плотность теплового потока в среднем сечении; решение задачи Коши (1), расчет без учета перераспределения теплового потока в фольге (2), на нижней стороне фольги (3).

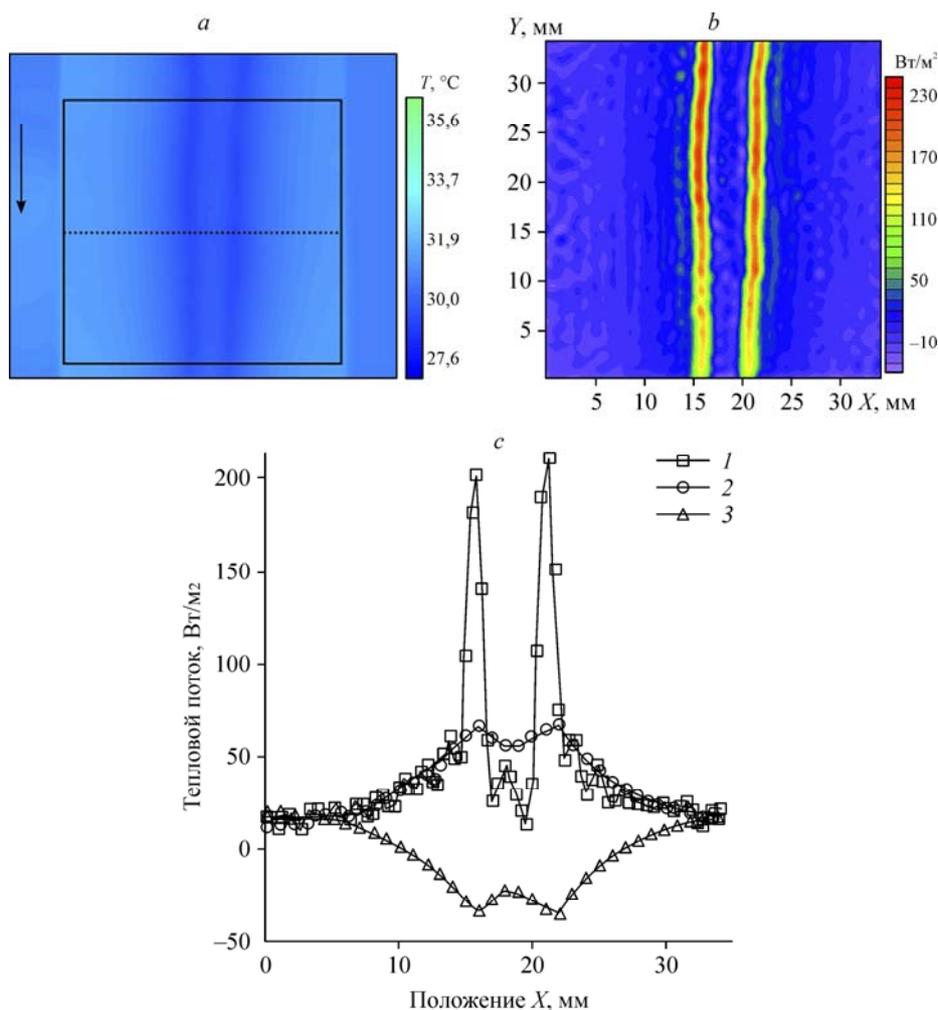


Рис. 3. Распределения температуры и плотности теплового потока на поверхности фольги со стекающим ручейком при  $Q = 10$  мл/мин и средней плотности теплового потока  $q_{av} = 16,7$  Вт/м<sup>2</sup>. *a* — термограмма с противоположной от ручейка стороны, *b* — рассчитанная плотность теплового потока со стороны ручейка, *c* — плотность теплового потока в среднем сечении; решение задачи Коши (1), расчет без учета перераспределения теплового потока в фольге (2) и на нижней стороне фольги (3).

тепла вдоль фольги и через торцевые поверхности. Здесь  $q_{av} = P/S$ ,  $P$  — выделяемая тепловая мощность,  $S = 2lw$  — суммарная площадь двух сторон фольги.

Средняя плотность теплового потока в области, смоченной ручейком, выше средней плотности теплового потока со всей поверхности фольги примерно в 2,5 раза, а плотность теплового потока в области контактной линии смачивания ручейком фольги выше средней плотности теплового потока со всей поверхности фольги примерно в 2,8 раза (рис. 2с). Стоит отметить, что при малом тепловом потоке (рис. 3с) все тепло выделяется в основном в области контактной линии, средняя плотность теплового потока в области, смоченной ручейком, выше средней плотности теплового потока со всей поверхности фольги примерно в пять раз, а плотность теплового потока в области контактной линии смачивания ручейком фольги выше средней плотности теплового потока со всей поверхности фольги примерно в одиннадцать раз. Это объясняется притоком тепла с периферии фольги к ручейку за счет относительно высокого значения коэффициента теплопроводности материала фольги, а также высокой интенсивностью испарения в области контактной линии.

## Выводы

Выполнено экспериментальное исследование теплообмена в стекающем по вертикальной нагреваемой фольге ручейке воды. С применением инфракрасной термографии и решением задачи Коши определены температура и плотность теплового потока на фольге по температуре, измеренной с обратной стороны фольги. В результате установлено, что максимальная плотность теплового потока имеет место в области контактной линии и превосходит среднюю плотность теплового потока со всей поверхности фольги в несколько раз. Использование ручейкового течения с двумя контактными линиями смачивания может быть рекомендовано как перспективное решение для интенсификации теплообмена при пленочном течении жидкости.

## Обозначения

$h$ — толщина фольги, м,	$Q$ — расход жидкости, мл/мин,
$l$ — длина фольги, м,	$S$ — площадь, м <sup>2</sup> ,
$P$ — электрическая мощность, Вт,	$T$ — температура, °С,
$q$ — плотность теплового потока, Вт/см <sup>2</sup> ,	$T_a$ — температура окружающего воздуха, °С,
$q_{av}$ — средняя плотность теплового потока, Вт/см <sup>2</sup> ,	$T_w$ — температура поверхности фольги, °С,
$q_b$ — плотность теплового потока на обратной от ручья стороне, Вт/см <sup>2</sup> ,	$w$ — ширина фольги, м,
	$\alpha_{av}$ — средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К).

## Список литературы

1. Stephan P., Brandt C. Advanced capillary structures for high performance heat pipes // Heat Transfer Engng. 2004. Vol. 25, No. 3. P. 78–85.
2. Potash M., Wayner P.C. Evaporation from a two-dimensional extended meniscus // Int. J. Heat Mass Transfer. 1972. Vol. 15. P. 1851–1863.
3. Schmuki P., Laso M. On the stability of rivulet flow // J. Fluid Mechanics. 1990. Vol. 215. P. 125–143.
4. Le Grand-Piteira N., Daerr A., Limat L. Meandering rivulets on a plane: a simple balance between inertia and capillarity // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96. P. 254503-1–254503-4.
5. Hirt C.W. Simulating the wetting and drying of shallow flows // Los Alamos: Flow Sci., 1998. 7 p.
6. Su G.W., Geller J.T., Pruess K., Wen F. Experimental studies of water seepage and intermittent flow in unsaturated, rough-walled fractures // Water Resources Research. 1999. Vol. 35, No. 4. P. 1019–1037.
7. Snoeijer J.H., Rio E., Le Grand, N., Limat, L. Self-similar flow and contact line geometry at the rear of cornered drops // Physics of Fluids. 2005. Vol. 17, No. 7. P. 1–12.
8. Alekseenko S.V., Bobylev A.V., Kharlamov S.M., Markovich D.M. Frequency susceptibility of rivulets flowing down vertical plate // Proc. of 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 7–10 July, 2008. 8 p.
9. Alekseenko S.V., Antipin V.A., Bobylev A.V., Markovich, D.M. Application of PIV to velocity measurements in a liquid film flowing down an inclined cylinder // Experiments in Fluids. 2007. Vol. 43, No. 2–3. P. 197–207.
10. Ibrahim K., Abd Rabbo M.F., Gambaryan-Roisman T., Stephan P. Experimental investigation of evaporative heat transfer characteristics at the 3-phase contact line // Experimental Thermal and Fluid Sci. 2010. Vol. 34, No. 8. P. 1036–1041.
11. Marchuk I., Karchevsky A., Surtaev A., Kabov O. Heat flux at the surface of metal foil heater under evaporating sessile droplets // Int. J. Aerospace Engng. 2015. Art. ID 391036. 5 p.
12. Karchevsky A.L. Reformulation of an inverse problem statement that reduces computational costs // Eurasian J. Mathematical and Computer Applications. 2013. Vol. 1, No. 2. P. 5–20.
13. Gambaryan-Roisman T., Stephan P. Flow and stability of rivulets on heated surfaces with topography // J. Heat Transfer. 2009. Vol. 131, No. 3. P. 033101-1–033101-6.
14. 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, No. 2. P. 1029–1037.
15. 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.

Статья поступила в редакцию 3 ноября 2015 г.,  
после доработки — 25 декабря 2015 г.