

УДК 536.24, 532.54, 532.62

## Кризис теплообмена на микрооребрённом нагревателе при течении плёнки жидкости FC-72 под действием потока газа в миниканале\*

В.В. Чеверда<sup>1,2</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>Томский политехнический университет

E-mail: slava.cheverda@gmail.com

Экспериментально исследован кризис теплообмена в пленке жидкости FC-72, движущейся под действием потока газа по гладкому или микрооребрённому нагревателю. Показано, что использование микрооребрения приводит к увеличению критического теплового потока, так как за счет капиллярного эффекта происходит дополнительное омывание жидкостью нагреваемой поверхности.

**Ключевые слова:** двухфазные потоки, пленочные течения, локальный нагрев, кризис теплообмена, микрооребрение.

### Введение

При охлаждении микропроцессора локальное тепловыделение оценивается в  $1 \text{ кВт/см}^2$  [1]. Для пленочных течений критический тепловой поток тесно связан с нарушением непрерывности течения жидкости. Зависимость образования сухих пятен в горизонтальном слое изотермической жидкости от краевого угла смачивания и толщины пленки была показана в работе [2]. Равновесный краевой угол смачивания также учитывался в теоретических исследованиях [3, 4] при моделировании разрыва нагреваемой пленки жидкости. Разрыв пленки жидкости на горизонтальной и слабонаклоненной поверхностях при локальном нагреве исследовался в работе [5]. Было показано, что разрушение пленки воды осуществляется в два этапа: после первоначального разрыва пленки на нагревательном элементе сохраняется пленка толщиной существенно меньше начальной. Затем происходит разрыв этой сверхтонкой пленки жидкости и поверхность полностью осушается.

Улучшение теплообмена наблюдается за счет создания разного рода структур на нагреваемых поверхностях и, в частности, за счет улучшения смачивания рабочей поверхности [6]. Использование разных структур (например, микрооребрения) на нагреваемой поверхности является хорошей альтернативой более сложным факторам

---

\* Измерение краевого угла смачивания подложки выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН, исследование кризиса теплообмена на микрооребрённом нагревателе выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 18-79-10258).

стабилизации (газовому потоку, электрическому полю и т.д.) [7]. Теплообмен в пленке жидкости, стекающей по поверхности с микрооребрением, экспериментально исследовался авторами [8]. Было показано, что кризис теплообмена на микрооребрённой поверхности затягивается по сравнению с гладкой поверхностью. Экспериментальное исследование теплообмена при пленочном течении бинарных смесей фреонов R21 и R114 по внешним поверхностям гладкой и оребрённой (поперек потока) вертикальных труб проводилось в работе [9]. Было установлено, что при малых расходах коэффициент теплоотдачи на микрооребрённой поверхности меньше, чем на гладкой, из-за застоя жидкости и роста толщины жидкости между ребрами. При больших расходах жидкости за счет волнообразования наблюдается увеличение коэффициента теплоотдачи по сравнению со случаем для гладкой поверхности. Стабилизация пленочного течения на пучке горизонтальных труб с помощью микрооребрения по потоку изучалась в работе [10].

В работе [11] было показано, что в связи с более интенсивным испарением течение пленки жидкости под действием потока газа является более перспективным решением проблемы теплообмена по сравнению с применением гравитационно стекающей пленки. Было экспериментально установлено, что критический тепловой поток в пленке воды, движущейся под действием потока воздуха, превосходит критический тепловой поток в стекающей пленке воды в пять раз для одного и того же расхода жидкости. Коэффициент теплоотдачи при локальном нагреве пленки воды при течении под действием потока воздуха в микроканале высотой 220 мкм и шириной 1,5 мм определялся экспериментально в [12]. Было продемонстрировано увеличение коэффициента теплоотдачи с ростом расходов жидкости и газа. Коэффициент теплоотдачи при пленочном течении в миниканале (высотой 5 мм и шириной 30 мм) по вытянутому нагревателю, разбитому на секции, определялся экспериментально в [13]. Было показано увеличение коэффициента теплоотдачи вдоль нагревателя по потоку за счет уменьшения толщины пленки воды, вызванного интенсивным испарением. Деформация локально нагреваемой пленки жидкости (25 %-ный раствор этилового спирта в воде), движущейся под действием потока газа в наземных условиях и в условиях невесомости исследовалась численно в работе [14]. Решалась трехмерная нестационарная задача. Было показано образование термокапиллярных деформаций. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование кризиса теплообмена при движении пленки жидкости под действием потока газа по гладкому или микрооребрённому нагревателю в плоском миниканале.

### 1. Экспериментальный стенд

Для проведения эксперимента используется открытый контур. В ходе эксперимента жидкость и газ подаются из резервуаров. Использование регуляторов Bronkhorst позволяет поддерживать постоянными расход газа и давление в рабочем участке. Дегазированная жидкость подается в рабочий участок с помощью шприцевого насоса. Для поддержания постоянной температуры жидкости и газа на входе в рабочий участок используются термостабилизирующие системы на базе Пельтье-элементов.

При помощи мембранного насоса двухфазная смесь эвакуируется в атмосферу. Для отделения жидкости FC-72 от газовой фазы используется сепарационная и рекуперационная системы с жидким азотом. Все параметры эксперимента записываются и контролируются при помощи программы, разработанной в системе LabView.

Рабочий участок (см. рис. 1а) включает в себя подложку из нержавеющей стали с запрессованным в нее медным стержнем размером 10×10 мм и текстолитовую пластину. Сторона подложки, по которой течет жидкость, предварительно обрабатывается абразивом М40 для лучшего смачивания. Рамка из текстолита крепится к текстолитовой пластине и накрывается сверху оптическим стеклом, тем самым создается миниканал

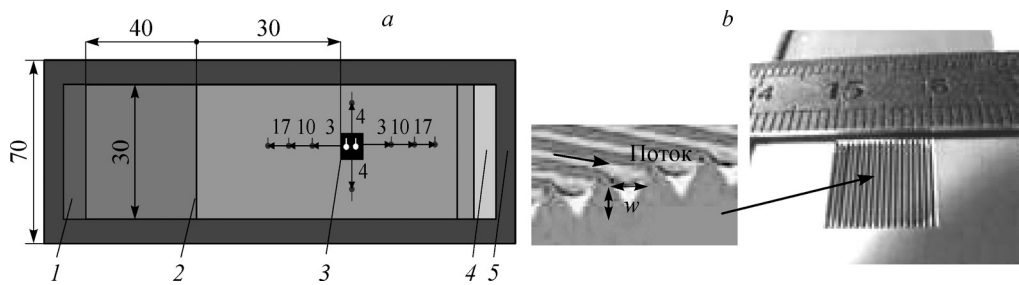


Рис. 1. Схема рабочего участка (вид сверху) (а), схема и снимок микроорезбренного нагревателя (b).  
 1 — поступление газа, 2 — поступление жидкости, 3 — медный стержень с прикрепленным снизу керамическим нагревателем, 4 — выход двухфазной смеси, 5 — рамка из текстолита.  
 Размеры приведены в мм.

высотой 1,5 мм и шириной 30 мм. При помощи жидкостного сопла высотой 150 мкм и шириной 30 мкм формируется пленка жидкости. Газовый поток поступает в миниканал и увлекает пленку жидкости. К вмонтированному в подложку стержню крепится керамический нагреватель. Поверхность стержня, находящаяся в миниканале, может быть гладкой ( $w = 0$  мм) или с микроорезбрением ( $w = 0,5$  мм). Микроорезбрение ориентировано по потоку, ширина отдельно взятой структуры составляет 0,5 мм (рис. 1b). Смачиваемость измерялась с помощью прибора Kruss DSA-100. Краевой угол смачивания составил  $100^\circ \pm 3^\circ$ . Температура подложки измерялась десятью термопарами К-типа, расстояние до которых от левой и правой кромок нагревателя отмечено на рис. 1а.

Визуализация деформаций поверхности пленки осуществлялась с помощью скоростной шпирен-системы, включающей скоростную видеокамеру Optronis CL600×2, источник света IDT 8 LED и оптические элементы. Эта система позволяет детектировать деформации в диапазоне  $\pm 3,25^\circ$  с максимальным разрешением  $1280 \times 1024$  пикселей и максимальной частотой для полного кадра 500 Гц. В экспериментах использовалась диэлектрическая и легкоиспаряющаяся жидкость FC-72, специально разработанная для охлаждения микроэлектроники. В качестве газа использовался чистый азот.

## 2. Результаты

Экспериментально исследовался кризис теплообмена при течении пленки жидкости FC-72 в миниканале по гладкому нагревателю и нагревателю с микроорезбрением (ширина и высота ребер равнялись 0,5 мм) под действием потока азота. Динамика течения по подложке с гладким нагревателем и с нагревателем с микроорезбрением существенно отличается. Критический тепловой поток ( $q_{CHF}$ ) на гладком нагревателе ( $w = 0$ ) составляет  $3,1 \text{ Вт/см}^2$  при числе Рейнольдса жидкости  $Re_l = 7,6$  и числе Рейнольдса газа  $Re_g = 183,8$ . Термокапиллярный эффект [4, 12] оказывает определяющее влияние. Под действием термокапиллярных сил жидкость вытесняется с поверхности нагревательного элемента, формируется утолщение пленки в области передней кромки нагревателя по отношению к набегающему потоку [14]. Образование двух сухих пятен по бокам нагревателя представлено на рис. 2а. На нагревателе с микроорезбрением жидкость продолжает орошать нагреватель за счет капиллярного эффекта в канавках даже при достаточно высоких температурах тепловых потоков (рис. 2b). Жидкость интенсивно испаряется, протекая по нагревательному элементу, что приводит к росту кривизны мениска в канавках вдоль нагревателя и появлению перепада давления в пленке жидкости. Этот эффект широко используется для транспорта теплоносителя в тепловых трубах с канавками [15].

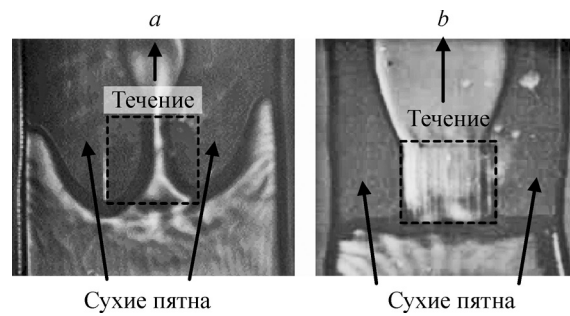


Рис. 2. Образование деформации в виде двух сухих пятен в пленке жидкости FC-72 при течении по подложке с  $w = 0$  мм при  $Re_1 = 7,6$ ,  $Re_g = 183,8$ ,  $q_{CHF} = 3,1$  Вт/см<sup>2</sup> (a) и с  $w = 0,5$  мм при  $Re_1 = 15,1$ ,  $Re_g = 147,4$ ,  $q_{CHF} = 15,15$  Вт/см<sup>2</sup> (b) под действием потока азота. Пунктиром отмечен нагреватель.

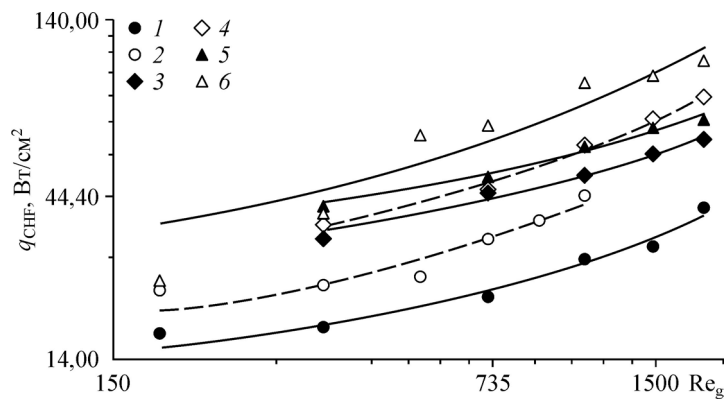


Рис. 3. Критический тепловой поток для пленки жидкости FC-72 при течении в горизонтальном миниканале под действием потока газа азота для гладкого и микроорезбленного нагревателя. 1 —  $w = 0$  мм,  $Re_1 = 30,2$ ; 2 —  $w = 0,5$  мм,  $Re_1 = 30,2$ ; 3 —  $w = 0$  мм,  $Re_1 = 60,3$ ; 4 —  $w = 0,5$  мм,  $Re_1 = 60,4$ ; 5 —  $w = 0$  мм,  $Re_1 = 76,1$ ; 6 —  $w = 0,5$  мм,  $Re_1 = 75,5$ .

Сравнение критических тепловых потоков ( $q_{CHF}$ ) на нагревателях с гладкой поверхностью и с микроорезблением при разных расходах газа и жидкости показывает, что на гладком нагревателе критический тепловой поток меньше, чем на нагревателе с  $w = 0,5$  мм (рис. 3a). На рис. 3 видно, что на нагревателе с  $w = 0,5$  мм значения критического теплового потока выше, чем в случае гладкого нагревателя ( $w = 0$ ). Экспериментальные данные показывают, что с ростом расходов жидкости и газа величина критического теплового потока увеличивается.

### Заклучение

Исследовано увеличение критического теплового потока при течении пленки жидкости FC-72 в миниканале под действием потока азота при наличии микроорезбления на поверхности нагревательного элемента. На поверхности с  $w = 0,5$  мм величина критического теплового потока выше, чем на гладком нагревателе ( $w = 0$ ). По мнению авторов статьи, этот факт объясняется более существенным капиллярным эффектом для поверхности с  $w = 0,5$  мм.

Список литературы

1. **Bar-Cohen A., Wang P.** On-chip hot spot remediation with miniaturized thermoelectric coolers // *Microgravity Sci. and Technology*. 2009. Vol. 21, supp. 1. P. 351–359.
2. **Kadoura M., Chandra S.** Rupture of thin liquid films sprayed on solid surfaces // *Experiments in Fluids*. 2013. Vol. 54, Iss. 2. P. 1465–1–1465–11.
3. **El-Genk M.S., Saber H.H.** An Investigation of the breakup of an evaporating liquid film, falling down a vertical, uniformly heated wall // *J. Heat Transfer*. 2002. Vol. 124, Iss. 1. P. 39–50.
4. **Ajaev V.S., Gatapova E.Ya., Kabov O.A.** Stability and break-up of thin liquid films on patterned and structured surfaces // *Advances in Colloid and Interface Sci.* 2016. Vol. 228. P. 92–104.
5. **Zaitsev D.V., Kabov O.A.** An experimental modelling of gravity effect on rupture of a locally heated liquid film // *Microgravity Science and Technology*. 2007. Vol. 19, No. 3/4. P. 174–177.
6. **Kim J.K., Park C.W., Kang Y.T.** The effect of micro-scale surface treatment on heat and mass transfer performance for a falling film H<sub>2</sub>O/LiBr absorber // *Int. J. Refrigeration*. 2003. Vol. 26, Iss. 5. P. 575–585.
7. **Tiwari N., Davis J.M.** Stabilization of thin liquid films flowing over locally heated surfaces via substrate topography // *Physics Fluids*. 2010. Vol. 22, Iss. 4. P. 042106–1–042106–12.
8. **Zaitsev D.V., Lozano Aviles M., Auracher H., Kabov O.A.** Rupture of a subcooled liquid film falling down a heated grooved surface // *Microgravity Sci. and Technology*. 2007. Vol. 19, Iss. 3. P. 71–74.
9. **Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Володин О.А.** Теплоотдача при испарении стекающих пленок смеси фреонов на гладкой и структурированной поверхностях // *Теплофизика и аэромеханика*. 2011. Т. 18, № 4. С. 605–616.
10. **Гогонин И.И.** Теплообмен при испарении и кипении пленки, орошающей пакет горизонтальных труб // *Теоретические основы химической технологии*. 2014. Т. 48, № 1. С. 103–111.
11. **Зайцев Д.В., Родионов Д.А., Кабов О.А.** Критический тепловой поток в локально нагреваемой пленке жидкости, движущейся под действием потока газа в мини-канале // *Письма в Журнал технической физики*. 2009. Т. 35, вып. 14. С. 88–94.
12. **Houshmand F., Peles Y.** Heat transfer enhancement with liquid–gas flow in microchannels and the effect of thermal boundary layer // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 70. P. 725–733.
13. **Hirokawa T., Ohta H., Kabov O.A.** Experimental investigation on behaviors and heat transfer in shear-driven liquid film flow // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2015. Vol. 3, Iss. 3. P. 303–317.
14. **Kabova Yu.O., Kuznetsov V.V., Kabov O.A.** Gravity effect on the locally heated liquid film driven by gas flow in an inclined minichannels // *Microgravity Sci. and Technology*. 2008. Vol. 20, Iss. 3. P. 187–192.
15. **Reay D.A., Kew P.A., McGlen R.J.** *Heat Pipes*. 6th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. 288 p.

*Статья поступила в редакцию 14 января 2019 г.,  
после доработки — 19 февраля 2019 г.,  
принята к публикации 28 февраля 2019 г.*

