

ЛОКАЛЬНО НАГРЕВАЕМЫЙ ДВУХФАЗНЫЙ ПОТОК В МИКРОКАНАЛЕ

АННОТАЦИЯ

Использование тонкой интенсивно испаряющейся пленки жидкости, движущейся под действием потока газа в микроканале, представляется одним из наиболее перспективных технических решений для охлаждения оборудования с высоким локальным тепловыделением (до 100 Вт/см^2 и более). Устойчивость совместного течения локально нагреваемой тонкой (1-100 мкм) пленки жидкости и потока газа является сложной и практически неисследованной проблемой. Исследования, проведенные в Институте теплофизики СО РАН под руководством автора, показали, что касательные и нормальные напряжения на поверхности пленки, вызванные действием потока газа и термокапиллярными силами, приводят к неустойчивости движения пленки и возникновению как хаотических трехмерных деформаций, так и стационарных структур, которые оказывают существенное влияние на теплообмен и разрыв пленки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Неизотермические испаряющиеся пленки жидкости, двигающиеся под действием потока газа, не только составляют предмет изучения фундаментальных аспектов физики и гидродинамики, но и имеют важное практическое значение [1-3]. Такие пленки обеспечивают высокую интенсивность теплообмена, особенно в области сверхтонкой пленки жидкости вблизи мениска (локальный максимум до 1800 Вт/см^2 [4]) и могут быть использованы для охлаждения высоконапряженного электронного оборудования. В работе проанализированы способы создания пленочных течений, изучено разрушение пленки и подтверждена работоспособность нескольких схем как в условиях земной гравитации, так и микрогравитации.

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Предполагается, что система охлаждения может быть установлена непосредственно на кремневой подложке и позволяет отводить тепло из локальной зоны и транспортировать его в область с гораздо большей поверхностью теплообмена. Испарение, использующее теплоту фазового перехода, является наиболее эффективным способом охлаждения. На рис. 1 показана система охлаждения, где тепло, выделяемое на одиночном чипе, передается в пленку жидкости, увлекаемую спутным потоком газа. Из существующих систем охлаждения наиболее эффективными являются системы, основанные на использовании импактной струи жидкости или капель, а также течения однофазной жидкости или двухфазного потока в микроканалах. Рассматриваемая в данной работе система является частным случаем

последних. Однако она лишена ряда недостатков, таких как: 1) большие расходы жидкости и перепады давления; 2) неустойчивость течения, вызванная кризисом теплообмена в одном микроканале; 3) проблема равномерного заполнения жидкостью многоканальной системы.

Эксперименты и расчеты в данной работе проводятся для двух рабочих жидкостей — воды и диэлектрической жидкости FC-72. Минимальное число Рейнольдса жидкости в системе охлаждения может быть оценено из выражения $Re_{\min} = q_{CHF} L / \mu ((T_{\text{sat}} - T_0) c_p + r)$, рис.2. Используется значение плотности теплового потока, при которой пленка жидкости достигнет температуры насыщения, а затем полностью испарится. Расход FC-72 $1,6 \text{ г/с}$ ($Re=280$) необходим, чтобы отвести тепловой поток 200 Вт/см^2 . Для воды данный расход составляет $0,08 \text{ г/с}$. Требование минимальных расходов газа приводит к необходимости использования микроканалов высотой $50\text{-}200 \text{ мкм}$.

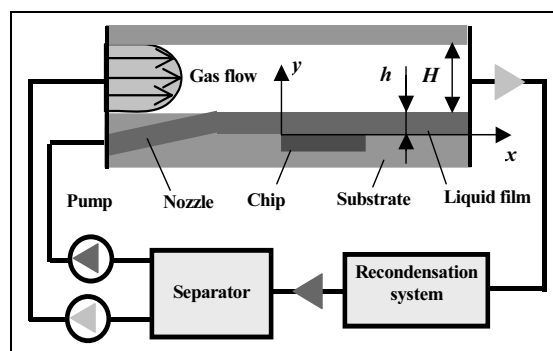


Рис. 1. Концепция системы охлаждения, [11]

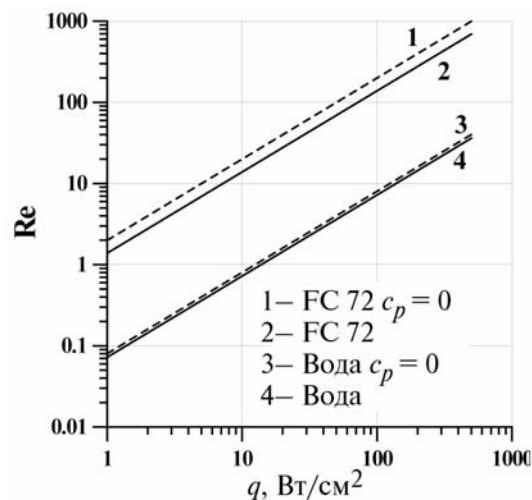


Рис. 2. Минимальное число Рейнольдса жидкости

Возможность использования стекающих пленок жидкости для охлаждения микроэлектронного оборудования была исследована в работах [5,6]. Было обнаружено, что тепловой поток, необходимый для разрыва пленки жидкости на подложке с локальными источниками тепла, на 2-3 порядка выше, чем для вертикальных труб длиной 1-2 м при $Re=const$. Разрыву пленки предшествует формирование регулярных структур (рис.3), которые представляют собой струи жидкости, стекающие с определенной длиной волны [7]. Для различных систем жидкость-подложка получено обобщение [8]

$$K_p = 1932 Re^{0,66} \left[\frac{(v^2 / g \sin \varphi)^{1/3}}{L} \right]^{0,90} Pr^{-0,18}. \quad (1)$$

Обобщение справедливо для размеров нагревателя 2.2-150 мм в диапазоне чисел Рейнольдса 0,3-226. Расчет показывает (рис.4), что для электронных компонентов с размером в направлении течения пленки более 2 мм максимальный тепловой поток, который может быть отведен пленкой жидкости, стекающей под действием гравитации, составляет около 100 Вт/см² для воды и около 10 Вт/см² для FC-72 ($T_0=20^\circ C$). Следует заметить, что формула (1) получена для пленок жидкости, существенно переохлажденных относительно температуры насыщения.

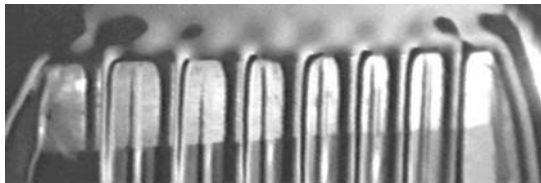


Рис. 3. Регулярные структуры в пленке жидкости, нагреватель 6.7×68, 10%-ный раствор этилового спирта в воде, $\varphi=90^\circ$, $Re=2$, $T_0=17^\circ C$, $q=2.6$ Вт/см²

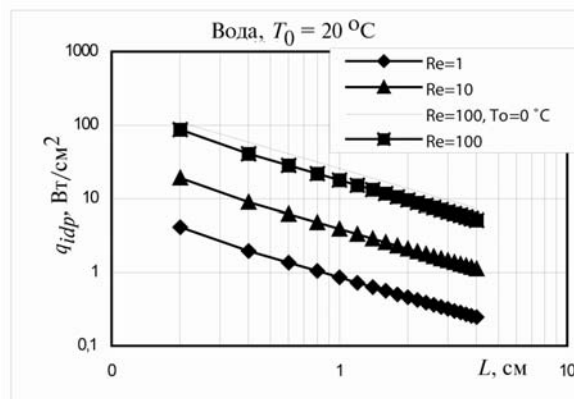


Рис. 4. Критический тепловой поток для формирования сухих пятен в стекающей пленке воды

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рассматривается канал, высота которого H существенно меньше его ширины B (рис. 1). Поверхностное натяжение зависит от температуры: $\sigma(T) = \sigma_0 - \sigma_T(T - T_0)$, где $\sigma_0, \sigma_T = const > 0$. Установившееся двумерное движение испаряющейся пленки жидкости и газа в канале описывается следующей

системой уравнений Навье-Стокса, неразрывности, энергии и диффузии:

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \mu \Delta \vec{v} - \nabla p + \rho \vec{g}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0; \quad (3)$$

$$(\vec{v} \cdot \nabla) T = a \Delta T; \quad (4)$$

$$\rho_g (\vec{v}_g \cdot \nabla) \vec{v}_g = \mu_g \Delta \vec{v}_g - \nabla p_g + \rho_g \vec{g}; \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{v}_g = 0 \quad (6)$$

$$(\vec{v}_g \cdot \nabla) T = a_g \Delta T + \frac{1}{\rho_g c_p^g} \vec{v}_g \cdot \nabla p_g + \frac{\mu_g}{\rho_g c_p^g} \Phi; \quad (7)$$

$$(\vec{v}_g \cdot \nabla) C = D \Delta C. \quad (8)$$

Детальное описание постановки задачи и граничных условий приведено в [9]. В случае ламинарного течения газа и жидкости и недеформируемой пленки возможно аналитическое решение проблемы [10]. На рис. 5 и 6 с использованием данной модели показан расчет зависимости начальной толщины пленки (до нагрева) от числа Re газа и высоты канала. Снижение высоты канала при $Re_g=const$ приводит к повышению средней скорости и снижению толщины пленки. Толщина пленки воды может быть менее 3 мкм для высоты канала 100 мкм, что обеспечивает интенсивность теплообмена 214000 Вт/(м²·К), учитывая только кондуктивный механизм ($\alpha=\lambda/h$, $\lambda=0.642$ Вт/(м·К)). Вопрос об оптимальной высоте канала следует решать с учетом режимов течения и устойчивости пленки, однако такая информация в литературе практически отсутствует, особенно для неоднородно нагреваемых микроканалов.

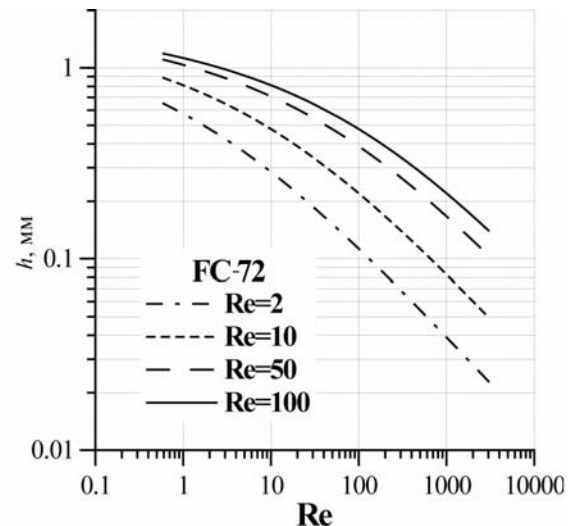


Рис. 5. Толщина пленки при изотермическом течении FC-72 и азота в мини-канале, $H=1.4$ мм

Численные расчеты стационарного движения локально нагреваемой пленки жидкости и газа в мини-канале, с учетом испарения [9] показывают, что при относительно высоких скоростях движения газа и жидкости (число Рейнольдса газа до 3000) испарение даже незначительного количества жидкой фазы (менее 10 процентов) оказывает существенное

венное влияние на теплоотвод от локального источника тепла. С другой стороны, показано, что все три механизма теплообмена (конвекция в пленке жидкости, конвекция в газе, испарение) являются важными и в значительной степени определяют температуру нагревательного элемента.

Выявлена роль начального участка теплового пограничного слоя, формирующегося в пленке, и показано его отрицательное влияние на интенсификацию теплообмена посредством интенсивного испарения. При достаточно малых размерах нагревателя и относительно больших числах Рейнольдса пленки и газа температура поверхности пленки практически не зависит от плотности теплового потока, что снижает интенсивность испарения. Одно из возможных технических решений данной проблемы - использование микроорегбрения. Расчеты показали, что для микроэлектронных компонентов размерами 2-10 мм отвод теплового потока 100 Вт/см^2 при температуре стенки меньше $100 \text{ }^\circ\text{C}$ с помощью пленки воды возможен даже при слабом испарении (15%). Следует заметить, что расчеты выполнены для недеформируемой пленки жидкости. Деформация поверхности, с одной стороны, может привести к дополнительной интенсификации теплообмена, с другой — к формированию сухих пятен.

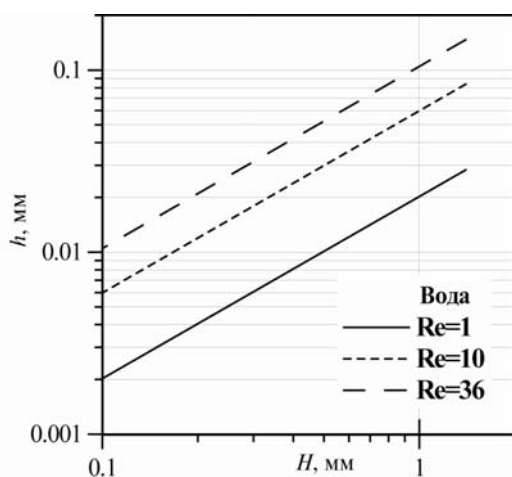


Рис. 6. Влияние высоты микроканала на толщину пленки при изотермическом течении воды и азота, $Re_g=3000$

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проведены на двух рабочих участках и двух рабочих жидкостях (вода и FC-72). Исследование течения пленки воды, движущейся под действием потока газа в горизонтальном канале высотой 2 мм, описано в [11]. Для исследований с жидкостью FC-72 в рамках международного сотрудничества с Центром по микрогравитации Свободного университета Брюсселя создан автоматизированный экспериментальный стенд, рис. 7. Стенд позволяет также проводить исследования в условиях микрогравитации (параболические полеты). Под-

ложка, включающая жидкостное сопло, сделана из нержавеющей стали и составляет с прозрачной крышкой канал размерами $0.2 \dots 1.8 \times 40 \times 140 \text{ мм}$ (высота×ширина×длина), рис.8. Медный нагреватель размером $10 \times 10 \text{ мм}$ запрессован в стальную пластину, рис.9. Эксперименты проведены в диапазоне чисел Рейнольдса жидкости 0.5-12 и газа 0.3-30 соответственно ($T_{0f} = T_{0g} = 20-22 \text{ }^\circ\text{C}$).



Рис. 7. Фотография экспериментального стенда

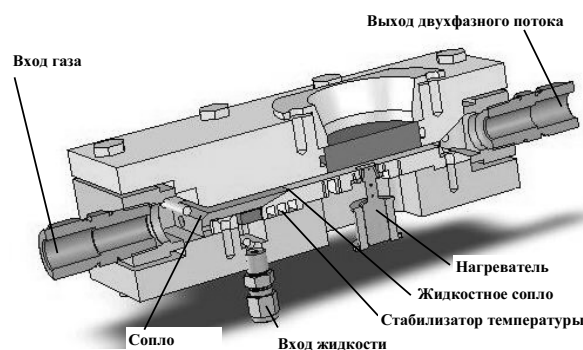


Рис. 8. Конструкция рабочего участка

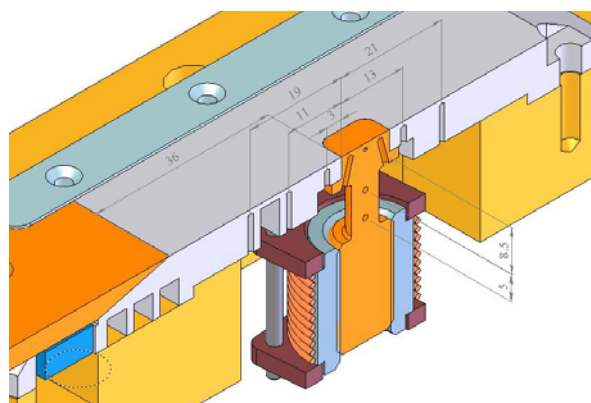


Рис. 9. Конструкция нагревательного элемента

Установлено, что совместное движение пленки и газа в канале может быть устойчиво в широком диапазоне чисел Рейнольдса (отсутствие волн). Для визуализации течения использовался Шлирен-метод с отражением, рис. 10, 11. В пленке жидкости формируются стационарные трехмерные деформации

термокапиллярной природы. Обнаружено, что динамика формирования сухих пятен в интенсивно испаряющейся пленке жидкости FC-72 имеет существенные особенности. Сухие пятна образуются в области боковых сторон нагревателя. Для достаточно больших чисел Рейнольдса жидкости значение критического теплового потока для разрыва пленки может в 3-5 раз превосходить соответствующее значение для пленки, стекающей под действием гравитации, что хорошо соотносится с результатами полученным в [11]. Показана техническая возможность формирования пленок в условиях микрогравитации. Пленки в условиях пониженной гравитации подвержены волнообразованию в существенно большей степени.

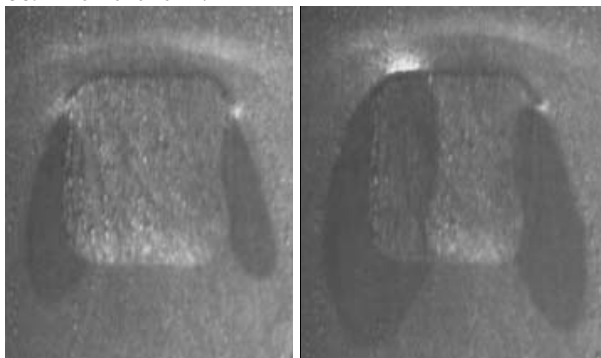


Рис. 10. Динамика формирования сухих пятен в пленке жидкости FC-72, $Re_l=5$, $Re_g=30.4$, $q=4$ Вт/см²

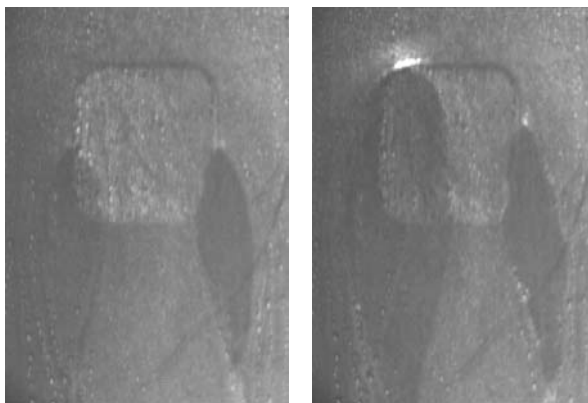


Рис. 11. Динамика формирования сухих пятен в пленке жидкости FC-72, $Re_l=12$, $Re_g=30.4$, $q=10$ Вт/см²

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (проект 05-08-65426), а также PRODEX Programme (Belgium).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

a – температуропроводность, м²/с;
 B, H – ширина и высота канала, м;
 c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);
 C – концентрация, кг/м³;
 D – коэффициент диффузии, м²/с;
 h – толщина пленки, м;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 K_p – критерий разрыва $= -q_{idp} (d\sigma/dT) / (\lambda \cdot \rho \cdot (g \cdot \nu)^{2/3}$;
 L – длина нагревателя, м;
 p, P – давление, Па;
 q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 q_{idp} – тепловой поток для разрыва пленки, Вт/м²;
 Q – объемный расход, м³/с;

$Re = Q\rho/B\mu$ – число Рейнольдса;
 r – теплота фазового перехода, Дж/кг;
 T – температура, °С;
 u, v – скорости, м/с;
 \vec{v} – вектор скорости, м/с.

Греческие символы:

α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К);
 φ – угол наклона, град;
 Φ – Диссипативная функция;
 ρ – плотность, кг/м³;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/Км;
 μ – коэффициент динамической вязкости, кг/(м·с);
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

Нижние индексы:

0 – начальные значения (при $T=T_0$)
 g, l – газ и жидкость
 s – поверхность
 sat – насыщение
 T – производная по T
 w – стенка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hewitt G.F. and Hall-Taylor M.S. Annular two-phase flow. Pergamon Press, Oxford, 1970.
2. Hanratty T.J. Separated flow modeling and interfacial transport phenomena // Appl. Sci. Res. 1991. V.48. P.353-390.
3. Aktershev S.P. and Alekseenko S.V. Interfacial Instabilities in an Annular Two-Phase Flow // Russ. J. Eng. Thermophys. 1996. V.6. N 4. P. 307-320.
4. Stephan P. and Busse C.A. Analysis of heat transfer coefficient of grooved heat pipe evaporator walls // Int. J. Heat Mass Transfer. 1992. V. 35. P. 383-391.
5. Кабов О.А. Разрыв пленки жидкости стекающей по поверхности с локальным источником тепла // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7. № 4. С. 537-545.
6. Зайцев Д.В., Кабов О.А., Червуда В.В., Буфетов Н.С. Влияние волнообразования и краевого угла смачивания на термокапиллярный разрыв стекающей пленки жидкости // ТВТ. 2004. Т. 42. №3. С.449–455.
7. Кабов О.А. Формирование регулярных структур в стекающей пленке жидкости при локальном нагреве // Теплофизика и аэромеханика. 1998. Т. 5. № 4. С. 597-602.
8. Зайцев Д.В., Кабов О.А. Разрыв пленки жидкости стекающей по нагреваемой поверхности // XXVII Сиб. теплофизический семинар.: Публикация на CD-ROM, статья 055. 2004. С. 1-19.
9. Gatapova E.Ya., Kabov O.A., Kuznetsov V.V. and Legros J.C. Evaporating shear-driven liquid film flow in minichannel with local heat source // J. of Engineering Thermophysics. 2005. V.13. N 2. P. 17-46.
10. Gatapova E.Y., Lyulin Y.V., Marchuk I.V., Kabov O.A. and Legros J-C. The thermocapillary convection in locally heated laminar liquid film flow caused by a co-current gas flow in narrow channel // Proc. First Int. Conf. on Microchannels and Minichannels, Rochester, NY., 2003. P. 457-464.
11. Kabov O.A., Lyulin Yu.V., Marchuk I.V., Zaitsev D.V. Locally heated annular liquid films in microchannels and minichannels // Proc. Int. Conf. on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, Keynote lecture KL6, publication on CD by ECI, Castelvécchio, Italy, 2005. P. 1-8.