

03

Критический тепловой поток в локально нагреваемой пленке жидкости, движущейся под действием потока газа в мини-канале

© Д.В. Зайцев, Д.А. Родионов, О.К. Кабов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Международный исследовательский институт теплообмена Свободного университета г. Брюсселя и ИТ СО РАН, 1050 Брюссель, Бельгия
E-mail: zaitsev@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 27 февраля 2009 г.

Выполнено экспериментальное исследование разрыва и кризиса теплообмена в пленке жидкости, движущейся под действием потока газа в горизонтальном канале, при нагреве от локального источника тепла размером 1×1 см. В экспериментах был достигнут тепловой поток 250 W/cm^2 , что на порядок превышает предельный тепловой поток для пленки жидкости, стекающей под действием гравитации, для того же числа Рейнольдса пленки жидкости ($Re_1 = 21$). Таким образом, экспериментально подтверждена перспективность использования пленок жидкости, движущихся под действием потока газа в канале, в системах охлаждения оборудования с интенсивным локальным тепловыделением.

PACS: 44.35.+c, 47.55.dm, 47.55.Hd, 47.27.nd

Развитие микроэлектроники тесно связано с проблемой отвода тепла. Интенсивность тепловыделения микропроцессоров в современных компьютерах достигает $100\text{--}200 \text{ W/cm}^2$, что на пределе возможностей воздушных систем охлаждения. Соответственно перспективными представляются жидкостные, двухфазные и испарительные системы охлаждения. На сегодняшний день наиболее эффективными являются системы, основанные на использовании импактных струй, течения двухфазного потока в мини-каналах и течения жидкости в микроканалах. При охлаждении микроэлектронного оборудования данные системы позволяют снимать тепловые потоки до 300 W/cm^2 . Однако электронная промышленность уже сегодня готова произво-

дять компоненты, где плотность теплового потока может достигать величины 500 W/cm^2 и выше [1]. Даже наиболее эффективные системы, использующие двухфазные потоки, неспособны осуществить охлаждение таких компонентов, что является технологическим барьером, препятствующим дальнейшему развитию микроэлектронных систем.

Для достижения высоких тепловых потоков и уменьшения объема используемой жидкости особенно многообещающе выглядит технологическое решение, где тепло передается от тепловыделяющего элемента к тонкой, интенсивно испаряющейся пленке жидкости, движущейся под действием трения принудительного потока газа в мини- или микро- (высотой менее $300 \mu\text{m}$) канале [2]. Устойчивость совместного течения неоднородно нагреваемой пленки жидкости и потока газа является сложной и мало исследованной проблемой. В исследованиях, проведенных авторами [3], было обнаружено, 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 регулярных структур, которые оказывают существенное влияние на теплообмен и разрыв пленки. Установлено, что величина порогового теплового потока для разрыва пленки до трех раз превосходит соответствующую величину для пленки, стекающей под действием гравитации. Однако конструкция рабочего участка в [3] не позволила достичь тепловых потоков, больших 30 W/cm^2 .

В настоящей работе используется нагревательный элемент новой конструкции, который позволяет проводить исследования при тепловых потоках до 500 W/cm^2 . Основой рабочего участка является пластина из нержавеющей стали толщиной 1.5 mm , в которую впрессован медный стержень с квадратной головкой $10 \times 10 \text{ mm}$, имитирующий микропроцессор (рис. 1). Верхняя рабочая плоскость стержня отполирована совместно с рабочей поверхностью пластины. Источником теплоты является нихромовая спираль, намотанная на свободную часть стержня. Поверх спирали наложен слой теплоизоляционного материала (минеральная вата). Конструкция нагревателя обеспечивает условие $T_w = \text{const}$, где T_w — температура поверхности нагревателя. Рабочий участок накрыт крышкой из оптического стекла. Рабочая жидкость из термостата через жидкостное сопло поступает в канал, увлекается потоком газа и движется по пластине из нержавеющей стали в виде

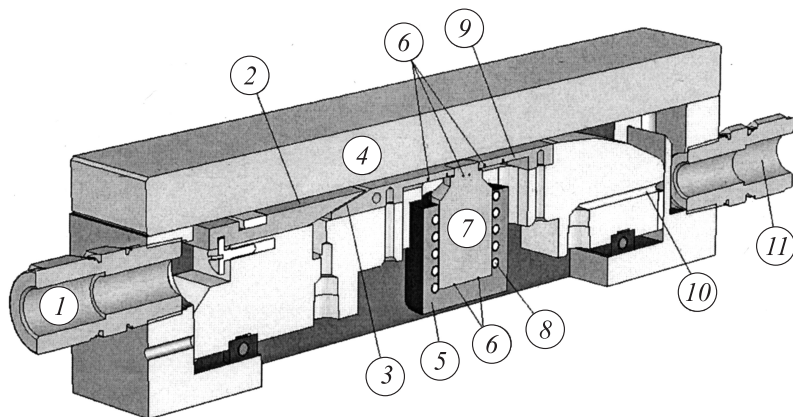


Рис. 1. Устройство рабочего участка: 1 — вход газа; 2 — канал; 3 — жидкостное сопло; 4 — стеклянная крышка; 5 — теплоизоляция; 6 — термопары; 7 — медный стержень; 8 — нихромовая спираль; 9 — пластина из нержавеющей стали; 10 — выход жидкости; 11 — выход газа.

пленки. После прохождения рабочего участка газ выходит в атмосферу, а жидкость возвращается в термостат. Высота канала составляет 1.5 мм. Расстояние от газового сопла до нагревателя составляет 93 мм, а от жидкостного сопла до нагревателя — 32 мм. Ширина канала составляет 30 мм. При помощи термопар в нескольких точках определяется температура поверхности нагревателя, а также температура пластины из нержавеющей стали (рис. 1). Температура поверхности нагревателя определяется с учетом глубины залегания термопар (3 мм).

В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода с начальной температурой 24°C. В качестве рабочего газа используется воздух с начальной температурой 24–25°C и относительной влажностью 20–25%. Тепловой поток определяется по электрической мощности, выделяемой на нихромовой спирали. Число Рейнольдса пленки жидкости Re_1 ($Re_1 = \Gamma_l / \mu_l$, где Γ_l — удельный массовый расход жидкости, μ_l — динамическая вязкость жидкости) в эксперименте не изменяется и составляет 21. Число Рейнольдса газа Re_g ($Re_g = Q_g / \nu_g$, где Q_g — удельный объемный расход газа, ν_g — кинематическая вязкость газа) варьируется от 360 до 2700. Приведенная скорость газа

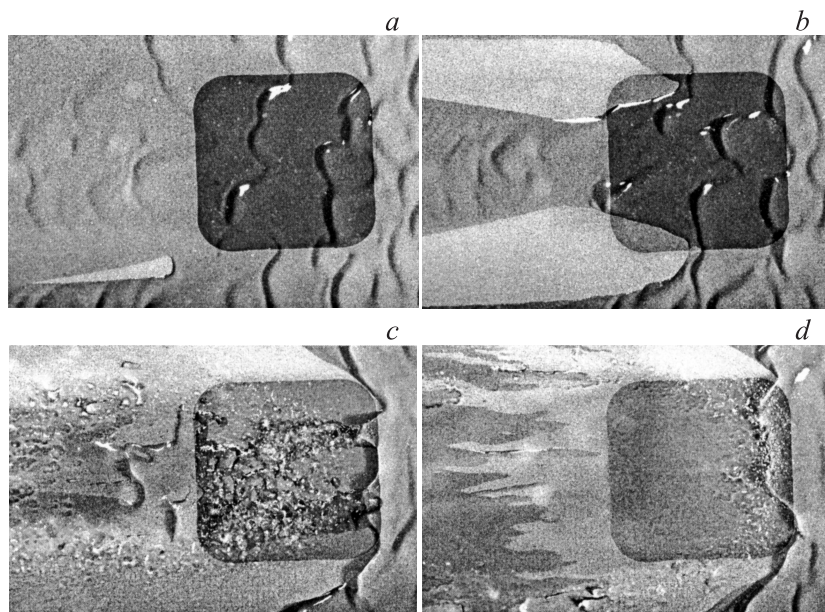


Рис. 2. Разрушение пленки жидкости в процессе увеличения теплового потока, при $Re_1 = 21$ и $Re_g = 1800$. Течение направлено справа налево. *a* — $q = 42 \text{ W/cm}^2$, $T_w = 63^\circ\text{C}$; *b* — $q = 50 \text{ W/cm}^2$, $T_w = 67^\circ\text{C}$; *c* — $q = 145 \text{ W/cm}^2$, $T_w = 119^\circ\text{C}$; *d* — $q = 170 \text{ W/cm}^2$, кризис.

(объемный расход газа, деленный на поперечную площадь канала) U_{Sg} изменяется от 4 до 30 м/с. Максимальное давление в канале в области нагревателя имеет место при $Re_g = 2700$ и по оценкам составляет приблизительно 1.15 атм. Участок ориентирован горизонтально. При исследовании пленки жидкости, стекающей под действием гравитации, участок располагается вертикально, а стеклянная крышка снимается.

На рис. 2 представлены фотографии течения и разрушения пленки жидкости в процессе увеличения теплового потока при $Re_g = 1800$. При некотором пороговом тепловом потоке q_{idp} пленка разрывается и образуется первое сухое пятно. Первое сухое пятно зарождается чуть ниже нагревателя по потоку, вдоль боковой кромки нагревателя (рис. 2, *a*).

Физический механизм разрыва пленки является термокапиллярным, так как сухое пятно образуется при достаточно низкой температуре подложки [3]. Термокапиллярное касательное напряжение на поверхности пленки, вызванное зависимостью поверхностного натяжения жидкости от температуры, и касательное напряжение, вызванное потоком газа, являются главными противоборствующими силами. Наиболее тонкая пленка формируется в области максимального градиента температуры на границе раздела газ–жидкость вдоль боковых кромок нагревателя. При несколько большем тепловом потоке $q_{idp,H}$ образуются первые сухие пятна на нагревателе (рис. 2, *b*; для $360 \leq Re_g \leq 1080$ $q_{idp,H} = q_{edp}$). С увеличением теплового потока пятна на нагревателе растут, но по достижении температуры насыщения ($T_w \approx 100^\circ\text{C}$) почти весь нагреватель покрывается метастабильной тонкой пленкой жидкости, в которой с большой скоростью возникают и исчезают сухие пятна размером порядка 1 мм (рис. 1, *c*). При критическом тепловом потоке q_{cr} нагреватель полностью осушается, и его температура начинает неограниченно возрастать (снимок на рис. 2, *d* сделан за доли секунды до полного осушения нагревателя).

На рис. 3 показано влияние числа Рейнольдса газа на пороговое значение теплового потока для разрыва пленки (q_{idp}) и на критический тепловой поток (q_{cr}) в сравнении с пленкой жидкости, стекающей под действием гравитации. Видно, что при относительно небольших расходах газа пленка жидкости менее устойчива к разрушению в сравнении с гравитационной пленкой. Тем не менее при высоких числах Рейнольдса газа тепловой поток, необходимый для разрыва пленки, до 2 раз выше, чем для гравитационной пленки, а критический тепловой поток до 10 раз выше и достигает 250 W/cm^2 .

Как видно из рис. 3, для пленки жидкости, стекающей под действием гравитации, q_{cr} примерно на 20% выше q_{idp} . Для пленки жидкости, движущейся под действием потока газа, увеличение Re_g приводит к росту касательного напряжения на границе раздела газ–жидкость, направленному против термокапиллярных сил, что обеспечивает более равномерное распределение жидкости на нагревателе по сравнению с гравитационной пленкой. В результате q_{cr} для пленки жидкости, движущейся под действием потока газа, до 5 раз выше q_{idp} .

Достигнутые высокие тепловые потоки подтверждают перспективность использования пленок жидкости, движущихся под действием потока газа, в системах охлаждения оборудования с интенсивным

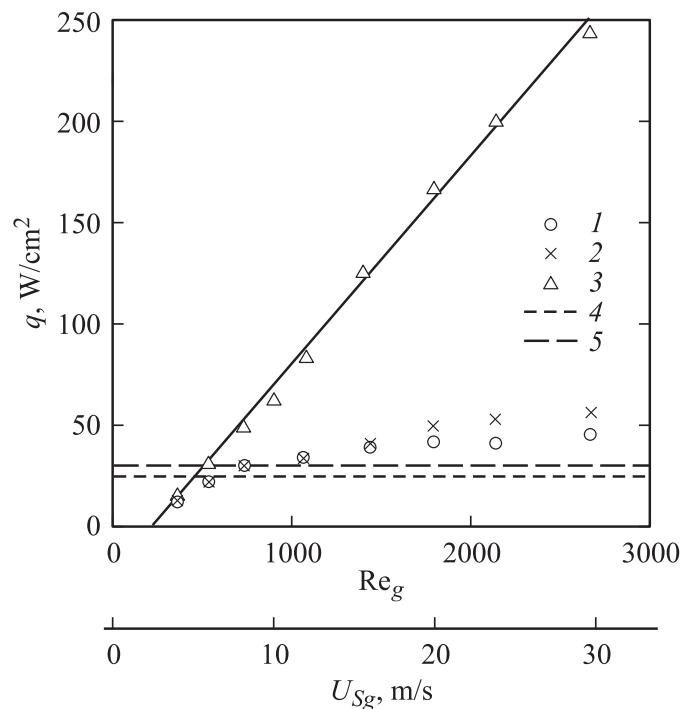


Рис. 3. Влияние расхода газа на разрыв пленки и кризис теплообмена при $Re_1 = 21$: 1 — q_{idp} (рис. 2, *a*); 2 — $q_{idp,H}$ (рис. 2, *b*); 3 — q_{cr} (рис. 2, *d*); для пленки жидкости, свободно стекающей по вертикальной поверхности ($q_{idp} = q_{idp,H}$): 4 — q_{idp} , 5 — q_{cr} .

локальным тепловыделением. Поскольку данный эксперимент был проведен при давлении, близком к атмосферному, имела место достаточно высокая температура поверхности нагревателя (до 120°C). Высокая температура обеспечивает интенсивное испарение пленки. Уменьшение давления в системе позволило бы уменьшить температуру насыщения жидкости, а следовательно, и температуру поверхности нагревателя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-08-65426) и CRDF (проект RUE1-2846-NO-07).

Список литературы

- [1] *Mahajan R., Chiu C., Chrysler G.* // Proc. IEEE. 2006. V. 94. N 8. P. 1476–1486.
- [2] *Kabov O.A., Kuznetsov V.V., Legros J.C.* // Proc. Second Int. Conf. on Microchannels and Minichannels. June 17–19, 2004. Rochester, NY, USA. P. 687–694.
- [3] *Kabov O.A., Lyulin Yu.V., Marchuk I.V., Zaitsev D.V.* // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2007. V. 28. P. 103–112.