

РАЗРЫВ ЛОКАЛЬНО НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ, ДВИЖУЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ГАЗА В МИНИ-КАНАЛЕ

АННОТАЦИЯ

В статье представлены экспериментальные данные по течению и разрыву пленки жидкости, движущейся под действием вынужденного потока газа в горизонтальном миниканале (высотой 2 мм) при нагреве от нагревателя размером 22×6.55 мм. Для изотермического случая построена карта режимов течения. Обнаружено, что сценарий разрыва пленки под действием нагрева существенно различается для различных режимов течения. Критический тепловой поток для разрыва пленки в некоторых режимах оказался в несколько раз больше, чем в случае пленки жидкости, движущейся под действием гравитации. Этот факт делает использование вынужденного течения пленок жидкости перспективным для охлаждения оборудования с высоким локальным тепловыделением.

1. ВВЕДЕНИЕ

Основная часть экспериментальных исследований по течению пленок в неизотермических условиях выполнена при свободном стекании воды по вертикальным трубам длиной 0,3...3,6 м в диапазоне чисел Рейнольдса от 20 до 1000. Обзор работ приведен в [1—3]. В [4—6] впервые обнаружено формирование регулярных структур в виде трехмерных образований на поверхности гладкой пленки жидкости, стекающей под действием гравитации по пластине с нагревателем малого размера. Помимо задачи о гравитационном стекании пленки жидкости перспективным является использование тонких пленок жидкости, движущихся под действием газового потока, в системах охлаждения микроэлектронного оборудования, как в земных условиях, так и в условиях микрогравитации. В таких системах процесс спутного течения пленки и газа происходит в микро- или мини-каналах. Характерная высота рассматриваемых каналов варьируется от 50 до 3000 мкм. При этом движение газа и жидкости, как правило, имеет ламинарный характер. Существенную роль при движении двухфазных потоков в мини- и микроканалах играет поверхностное натяжение. В усло-

виях интенсивного тепло- и массообмена возникают термокапиллярные силы, вызываемые наличием градиента температуры на поверхности раздела газ-жидкость и концентрационно-капиллярные силы, вызываемые градиентом концентрации при течении многокомпонентных жидкостей. Вопрос о влиянии газовой фазы на поверхностные явления остается не до конца изученным. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что присутствие неконденсируемой компоненты в фазе пара сильно стимулирует появление поверхностной неустойчивости испаряющегося жидкого слоя [7]. Теоретическое исследование проблемы выполнено в работах [8—10] и др. Наличие потока газа над поверхностью жидкости приводит к появлению касательных и нормальных напряжений на межфазной поверхности, оказывающих существенное влияние на устойчивость пленки и характеристики возникающих волн. В экспериментальных работах [11—13] и др. исследовались общие закономерности совместного вертикального и горизонтального течения пленки жидкости и турбулентного потока газа. Были установлены различные волновые режимы течения и определены границы этих режимов, а также измерены параметры возникающих на поверхности жидкости волн. В работе [14] проведены экспериментальные исследования течения пленки жидкости под действием нагретого турбулентного потока воздуха. В работе [15] выполнено исследование теплообмена и гидродинамики при движении азота и жидкости FC-72 в симметрично нагреваемом канале высотой 0.5 мм.

Практически не исследовано течение пленки жидкости, движущейся под действием газа, при ее нагреве от локального источника тепла. Исключение составляют предварительные теоретические исследования [16—18].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментального участка представлена на (рис. 1). Газ из компрессора через фильтр подается в накопительную камеру, установленную в верхней части рабочего участка, и поступает в канал. Для организации совместного течения пленки жидкости и газа рабочий участок накрыт прозрачной крышкой. Из термостата рабочая жидкость подается в накопительную камеру, выходит из сопла с щелью $h_N = 0,15 \dots 0,25$ мм и движется в канале, увлекаемая газом. Одновременно рабочая жидкость прокачивается через термостабилизатор температу-

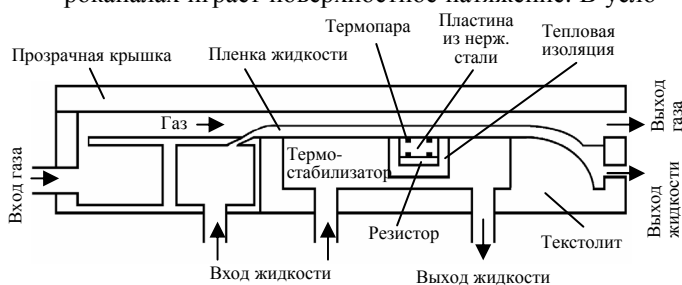


Рис. 1. Схема рабочего участка

ры, за счет чего обеспечивается постоянство температуры пленки, натекающей на нагреватели. В нижней части рабочего участка жидкость накапливается в приемнике и возвращается в термостат, а газ выходит в атмосферу. Расходы газа и жидкости определяются с помощью ротаметров.

Основой рабочего участка является текстолитовая пластина размерами 195×250×40 мм, в которую вмонтированы четыре электрических нагревателя длиной по потоку 11 и 6,5 мм и шириной 4, 6, 5, 13 и 22 мм. Каждый нагреватель позволяет определять локальную плотность теплового потока в нескольких точках путем измерения перепада температуры по толщине пластинки из нержавеющей стали при помощи термопар. Расстояние между газовым и жидкостным соплами составляет 85 мм, что позволяет иметь установившийся газовый поток при его натекании на пленку. Расстояние от жидкостного сопла до нагревателей составляет 124 мм.

В экспериментах канал располагался горизонтально. Высота канала 2 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась вода с начальной температурой 20...22°C. В качестве рабочего газа использовался воздух с температурой 22...25°C. Эксперименты проводились при давлении, близком к атмосферному. Использовался только нагреватель размером 22 (поперек течения)×6.55(вдоль течения) мм. Некоторые эксперименты выполнены при течении потока по всей ширине канала с шириной пленки $W_f=120$ мм. Однако большинство экспериментов (включая все эксперименты с нагревом) выполнены при использовании только половины ширины канала ($W_f=65$ мм), что обеспечивало более устойчивое течение пленки.

С помощью специально изготовленных иголок с внешним диаметром 0.7 мм, подключенных к микроманометру ММН-2400В, производился контроль равномерности потока газа по ширине канала. Установлено, что неравномерность расхода газа по ширине канала не превышает $\pm 5\%$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3.1. Изотермическое течение

Изотермическое течение (все нагреватели выключены) исследовалось при $Re_l=1-60$ и $Re_g=0-1950$. На рис. 2 представлена полученная карта режимов течения. Видно, что для $W_f=65$ мм пленка более устойчива к разрыву, чем для $W_f=120$ мм (данные 1, 2, 3 и 4). Для малых расходов газа и жидкости, пленка является гладкой. С увеличением Re_l и Re_g , сначала на поверхности пленки появляются двумерные волны (2D), затем они разбиваются на трехмерные волны (3D). При относительно больших Re_l и относительно малых Re_g происходит затопление канала. На рис. 3 представлены фотографии течения пленки с двумерными и трехмерными волнами.

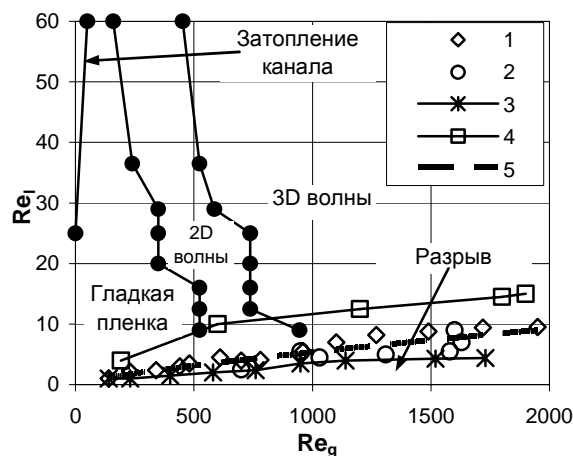
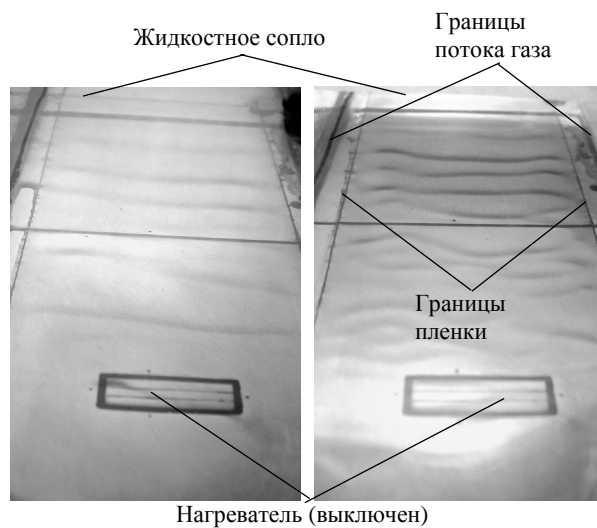


Рис. 2. Карта режимов течения для изотермического случая. Разрыв: 1 — $W_f=65$ мм, $h_N=250$ мкм, 2 — $W_f=65$ мм, $h_N=250$ мкм, 3 — $W_f=65$ мм, $h_N=150$ мкм; 4 — $W_f=120$ мм, $h_N=200$ мкм; 5 — усреднение данных 1 и 2. Все остальные данные — $W_f=65$ мм, $h_N=200$ мкм



а) $Re_g=452$, 2D волны б) $Re_g=946$, 3D волны

Рис. 3. Фотографии двумерных (2D) и трехмерных (3D) волн, $Re_l=29$, $q=0$, $W_f=65$ мм, $h_N=200$ мкм

3.2. Локальный нагрев пленки

Термокапиллярный разрыв пленки исследовался на нагревателе 22×6.55 мм при тепловых потоках $q=0.87...32.1$ Вт/см². Тепловой поток измерялся по электрической мощности, выделенной на нагревателе. Параметры эксперимента: $Re_l=5.5...36.5$, $Re_g=160...1480$, $W_f=65$ мм, $h_N=200$ мкм. Сценарий разрыва пленки зависит от режима течения. Для гладкой пленки (рис. 2) увеличение теплового потока сначала приводит к едва заметным деформациям на поверхности пленки в нижней области нагревателя, а затем происходит практически мгновенное осушение всего нагревателя. При этом в области верхней кромки нагревателя образуется горизонтальный вал жидкости, а ниже нагревателя образуется сухое пятно в форме треугольника (рис. 4).



Рис. 4. Разрыв гладкой пленки, $Re_l = 16$, $Re_g = 240$, $q = 5.7 \text{ Вт/см}^2$

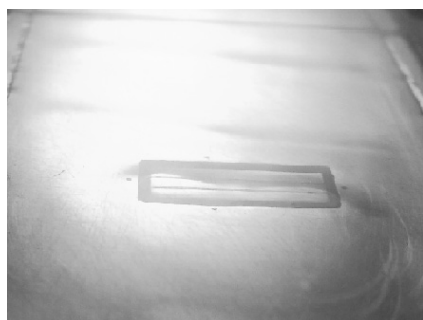


Рис. 5. Впадина в нижней части нагревателя, усиленная двумерной волной (сухих пятен нет), $Re_l = 29$, $Re_g = 452$, $q = 11.8 \text{ Вт/см}^2$

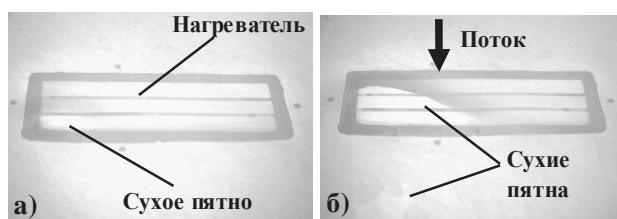
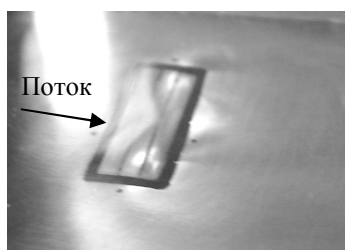
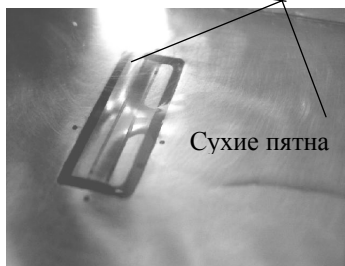


Рис. 6. Динамика образования сухих пятен в режиме двумерных волн, $Re_l = 16$, $Re_g = 524$, $q = 4 \text{ Вт/см}^2$. Фотографии сделаны с интервалом примерно 15 секунд



а) $q = 8.2 \text{ Вт/см}^2$ (сухих пятен нет)



б) $q = 9 \text{ Вт/см}^2$

Рис. 7. Динамика образования сухих пятен в режиме трехмерных волн, $Re_l = 20$, $Re_g = 946$

В режиме двумерных волн, разрыв начинается с образования неустойчивой впадины в нижней части нагревателя, периодически усиливаемой движущимися двумерными волнами (рис. 5). Первое стабильное сухое пятно образуется внизу нагревателя при некотором критическом тепловом потоке, и медленно увеличивается со временем, как показано на рис. 6. При дальнейшем увеличении теплового потока происходит полное осушение нагревателя. В режиме трёхмерных волн увеличение теплового потока приводит к образованию неустойчивых трёхмерных структур, существенно усиливающихся под действием проходящих трёхмерных волн (рис. 7, а). При увеличении теплового потока, обычно в нижней области нагревателя образуются два сухих пятна, при этом структуры становятся более устойчивыми (рис. 7, б). Эти структуры напоминают так называемые «регулярные структуры» (несколько струй поперёк течения жидкости с тонкой пленкой между ними), формирующиеся в локально нагреваемой, стекающей под действием гравитации, плёнке жидкости ($Re < 10$).

Общей чертой для всех режимов является зарождение сухого пятна у нижней кромки нагревателя. Теоретические работы также предсказывают, что нижняя кромка нагревателя является наиболее вероятной для разрыва плёнки [16, 17]. Необходимо отметить, что в случае локально нагреваемой гравитационной плёнки жидкости сухое пятно зарождается обычно у верхней кромки нагревателя и распространяется вниз по течению [19]. Одной из возможных причин этого является отсутствие в [19] термостабилизации вокруг нагревателя, и, как следствие, отсутствие градиента температуры на нижней кромке нагревателя. Другой отличительной особенностью разрыва гравитационной плёнки является устойчивость первого сухого пятна, в то время как для плёнки жидкости, движущейся под действием потока газа, первые сухие пятна, как правило, не устойчивы, при этом устойчивые сухие пятна образуются при дальнейшем увеличении теплового потока примерно на 20 %. Возможно, это связано с тем, что первые сухие пятна «смываются» интенсивными волнами и «сдуваются» потоком воздуха.

На рис. 8 показана зависимость критического теплового потока q_{idp} , при котором возникает первое устойчивое сухое пятно, от числа Рейнольдса жидкости и газа. Видно, что q_{idp} возрастает с ростом как Re_l , так и Re_g . Штриховая линия представляет данные по разрыву локально нагреваемой гравитационной плёнки жидкости на нагревателе $13 \times 6.5 \text{ мм}$ (аналогичная длина нагревателя) [19]. При относительно небольших Re_l плёнка, движущаяся под действием потока газа, рвётся при таких же, или даже меньших тепловых потоках, чем гравитационная плёнка. Однако при больших Re_l , q_{idp} для вынужденно движущейся пленки до 3 раз и более превосходит q_{idp} для гравитационной плёнки. К сожалению, конструкция нагревателя не позволи-

ла достичь тепловых потоков больших, чем 30 Вт/см^2 . Увеличение расхода газа, вероятно, позволит достичь еще больших значений q_{idp} при фиксированном расходе жидкости. Это позволяет рассматривать вынужденное течение пленок жидкости перспективным для использования в охлаждении оборудования с высоким локальным тепловыделением.

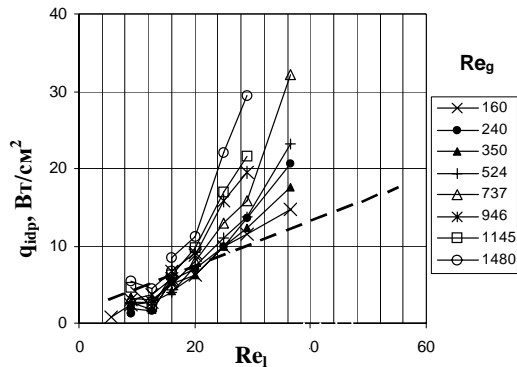


Рис. 8. Зависимости критического теплового потока от чисел Рейнольдса жидкости и газа. Штриховая линия — данные для гравитационной плёнки [19]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено экспериментальное исследование течения и разрыва пленки жидкости, движущейся под действием потока газа в горизонтальном канале с нагревателем $22 \times 6.55 \text{ мм}$. Обнаружено, что спутный поток газа оказывает существенное стабилизирующее влияние на течение локально нагреваемой пленки жидкости. В некоторых режимах критический тепловой поток для разрыва пленки возрастает в несколько раз по сравнению с чисто гравитационным течением пленки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-08-65426), гранта Президента Российской Федерации МК-3651.2005.8, Лаврентьевского гранта молодых ученых СО РАН (2006-2007), а также гранта INTAS YSF # 03-55-1791.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Q — средняя плотность теплового потока на нагревателе, Вт/см^2 ;

q_{idp} — критический тепловой поток, при котором возникает первое устойчивое сухое пятно, Вт/см^2 ;

Re_l — число Рейнольдса пленки, $=\Gamma_l/\mu$, безразмерное;

Re_g — число Рейнольдса газа, $=\Gamma_g/\mu_g$, безразмерное;

W_f — ширина течения пленки, мм;

h_N — высота щели жидкостного сопла, мкм;

Γ_l — удельный массовый расход жидкости, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$;

Γ_g — удельный массовый расход газа, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$;

μ — динамическая вязкость жидкости, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$;

μ_g — динамическая вязкость газа, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ганчев Б.Г.** Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими пленками. М.: Энергоатомиздат, 1987.

2. **Гимбутис Г.** Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Мокскласс, 1988.

3. **Bankoff S.G.** Significant Questions in Thin Liquid Film Heat Transfer // *Journal of Heat Transfer*. 1994. Vol. 116, P.10—16.

4. **Кабов О.А.** Теплоотдача от нагревателя с малым линейным размером к свободно стекающей пленке жидкости // Труды Первой Российской национальной конференции по теплообмену. М., 1994. Т.6. С. 90—95.

5. **Кабов О.А., Diatlov A.V., Marchuk I.V.** Heat Transfer from a Vertical heat Source to Falling Liquid Film // *Proceedings of the First Intern. Symp. on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation*, G.P. Celata and R.K. Shah Eds., Rome, Italy, 9-11 October. 1995. Vol. 1. P. 203—210.

6. **Кабов О.А., Лерго Ж.К., Марчук И.В., Шейд Б.** Деформация свободной поверхности в движущемся локально нагреваемом тонком слое жидкости // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2001. №3. С. 200—208.

7. **Haut B. and Colinet P.**, 2005, Surface-tension-driven instabilities of a pure liquid layer evaporating into an inert gas // *J. Colloid and Interface Science* Vol. 285. Issue 1. P. 296—305.

8. **Jurman L.A., McCready M.J.** Study of waves on thin liquid films sheared by turbulent gas flow // *Phys. Fluids A*. 1989. Vol. 1. N 3. P. 522—536.

9. **Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E.** Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow // *Intern. J. Heat & Mass Transfer*. 1995. Vol. 38. N 11. P. 2127—2134.

10. **Aktershev, S.P., Alekseenko, S.V.** Interfacial Instabilities in an Annular Two-Phase Flow // *Russ. J. Eng. Thermophys.* 1996. Vol. 6. N 4. P. 307.

11. **Lilleleht L.U., Hanratty T. J.** Measurement of interfacial structure for co-current air-water flow // *J. Fluid Mech.* 1961. Vol. 11. P. 65—81.

12. **Волновое движение пленок жидкости, текущих совместно с газовым потоком** / В.В. Гугучкин, Е.А. Демехин, Г.Н. Калугин и др. // *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1975. № 4. С. 174—177.

13. **Kawahara A., Chung P.M.-Y., Kawaji M.** Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel // *Intern. J. of Multiphase Flow*. 2002. Vol. 28. P. 1411—1435.

14. **Roskamp H., Willmann M., Witting S.** Heat up and evaporation of shear driven liquid wall films in hot turbulent air flow // *Intern. J. Heat and Fluid flow*. 1998. Vol. 19. N 2. P. 167—172.

15. **Bar-Cohen A., Sherwood G., Hodes M., Solbreken G.L.** Gas-Assisted Evaporative Cooling of High Density Electronic Modules // *IEEE Transactions on CPMT, Part A.*, 1995. Vol. 18. N 3. P. 502—509.

16. **Gatapova E.Ya., Marchuk I.V., Kabov O.A.** Heat Transfer and Two-Dimensional Deformations in Locally Heated Liquid Film with Co-Current Gas Flow // *Journal of Thermal Science and Engineering, The Heat Transfer Society of Japan*, 2004. Vol. 12. N 1. P. 27—34.

17. **Kabov O.A., Kuznetsov V.V., Legros J.C.** Heat transfer and film dynamics in shear-driven liquid film cooling system of microelectronic equipment // *Proc. Second Int. Conf. on Microchannels and Minichannels*, Ed. S.G. Kandlikar, June 17—19. 2004. Rochester. NY. P. 687—694.

18. **Gatapova E.Ya., Kuznetsov V.V., Kabov O.A. and Legros J.-C.** Annular liquid film flow under local heating in microchannels // *Proc. III Intern. Conf. on Microchannels and Minichannels*, Toronto, paper ICMM2005-75253, 2005.

19. **Kabov O.A.**, Breakdown of a liquid film flowing over the surface with a local heat source // *Thermophysics and Aeromechanics*, 2000. Vol. 7(4). P. 513—520.