

03

Взаимодействие термокапиллярных возмущений с трехмерными волнами в нагреваемой пленке жидкости

© Е.А. Чиннов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 2 марта 2012 г.

Выполнено экспериментальное исследование эволюции трехмерных волн в термокапиллярно-волновые структуры при нагреве вертикально стекающей пленки воды. Для изучения взаимодействия гидродинамических возмущений с термокапиллярными неустойчивостями использована скоростная инфракрасная камера высокого разрешения. Впервые при высоких числах Рейнольдса ($Re = 150$) зарегистрировано существование термокапиллярных структур в режиме А, который характеризуется высокими градиентами температуры на поверхности пленки жидкости и определенным значением наиболее опасной длины волны неустойчивости, возникающей при пороговом увеличении плотности теплового потока. Обнаружено периодическое появление структур с существенно меньшим расстоянием между максимальными значениями температуры, чем это наблюдалось ранее. Показано, что длина начального термического участка резко уменьшается с ростом плотности теплового потока и развитием термокапиллярной неустойчивости в области верхней кромки нагревателя.

В стекающих неизотермических пленках жидкости выделено два режима формирования струй [1]. При появлении структур в режиме А в верхней части нагревателя наблюдались высокие градиенты температуры до 10–15 К/мм. При достижении пороговой плотности теплового потока в верхней части нагревателя на поверхности пленки появлялись значительные деформации, а течение разделялось на вертикальные струи с определенной длиной волны Λ . При малых числах Рейнольдса высокие термокапиллярные напряжения, направленные против течения, приводили к утолщению пленки в виде горизонтального вала [2]. К настоящему времени структуры в режиме А детально исследованы экспериментально при $Re \leq 12$, а при более высоких числах Рейнольдса они наблюдались только при $Re = 22$ [3] и $Re = 24$ [4], $Re = \Gamma/\rho\nu$, где

Γ — удельный массовый расход жидкости, ρ — плотность жидкости, ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости. Теоретические исследования, как правило, ограничены анализом течения неизотермической безволновой пленки жидкости при малых числах Рейнольдса [5–7]. Подтверждено существование структур в режиме А при $Re \leq 2$.

В режиме В формирование струйного течения происходило постепенно с ростом теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя. Неоднородности в толщине пленки жидкости поперек потока приводили к неоднородностям температуры на поверхности пленки жидкости. Возникал поперечный градиент температуры (до 1–2 К/мм), приводящий к увеличению деформации поверхности пленки жидкости.

Известно, что на некотором расстоянии от сопла на поверхности пленки жидкости формируются волны. Гидродинамические двумерные волны в изотермических пленках жидкости неустойчивы к трехмерным возмущениям. При распаде двумерных волн на трехмерные в работах [8,9] выделяются синхронные волны, когда отсутствует фазовое смещение волн в поперечном направлении, и субгармонические волны, когда фазовое смещение имеет место. В работе [10] исследовано распространение двухмерных и трехмерных волн по вертикально стекающей изотермической пленке воды при $Re = 10–100$, а также воздействие на них искусственных возмущений. Показано, что при $Re > 40$ по вертикально стекающей пленке воды распространяются трехмерные синхронные волны, а горизонтальное расстояние между гребнями этих волн не зависит от числа Рейнольдса.

Основная часть исследований воздействия термокапиллярных сил на волновое течение в стекающих пленках жидкости была выполнена при малых и умеренных числах Рейнольдса ($Re < 50$). Целью данной работы является исследование взаимодействия термокапиллярных неустойчивостей с трехмерными волнами в нагреваемой пленке жидкости при более высоких числах Рейнольдса.

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с электронасосом, рабочий участок и фильтр. Дистиллированная вода с помощью насоса подавалась в пленкоформирователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Рабочий участок состоял из несущей плиты с расположенными на ней нагревателем, стабилизатором температуры и пленкоформирователем. Пленкоформирователь располагался в верхней части рабочего участка.

Расстояние от нижнего края сопла пленкоформирователя до верхнего края нагревателя составляло 263 мм. Нагреватель представлял собой плоский теплообменник с длиной вдоль течения пленки 100 мм и шириной 150 мм из меди с прямоугольными каналами внутри для движения нагретой жидкости. Температура обращенной к пленке стенки нагревателя измерялась тремя термомпарами, расположенными на вертикальной оси симметрии. На поверхности нагрева реализовывалось близкое к $T = \text{const}$ граничное условие, обеспечивающее высокое значение градиентов температуры вблизи верхней кромки нагревателя. Средняя плотность теплового потока q на нагревателе определялась по количеству тепла, переданного от подогревающей воды. Тепловой поток варьировался в пределах $0.5\text{--}10\text{ W/cm}^2$. Начальная температура воды при выходе из сопла пленкоформирователя T_0 составляла 25°C . Для регистрации поля температур на поверхности пленки жидкости использовался скоростной (с частотой полных кадров 100 Hz) инфракрасный сканер Titanium HD 570M с высоким разрешением 640×512 пикселей и чувствительностью 18 мК.

При $Re = 150$ на поверхности пленки воды, вертикально стекающей вдоль нагревателя размером 100×150 мм, наблюдаются неустойчивости разных типов. Синхронные трехмерные волны уже сформированы к моменту достижения верхней кромки нагревателя. Мгновенные поля температур для разных плотностей тепловых потоков показаны на рис. 1. При малых плотностях тепловых потоков $q = 2.5\text{ W/cm}^2$ трехмерные волны со средним горизонтальным расстоянием между гребнями, равным 15.5 мм, проходили через нагреватель. При этом, как это наблюдалось в режиме В при меньших и больших числах Рейнольдса, формирование струйного течения происходило постепенно с ростом теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя. За счет поперечного градиента температуры, значение которого не превышало 1 К/мм, происходило увеличение толщины пленки жидкости. Среднее расстояние между струями в нижней части нагревателя составляло 14.5 мм и соответствовало данным для других значений Re в режиме В. Структуры в режиме А при указанном тепловом потоке не наблюдались. Особенностью течения пленки жидкости при исследуемом и близких к нему значениях числа Рейнольдса было возникновение структур меньшего масштаба (рис. 1) в виде температурных неоднородностей поперек потока с расстоянием между максимумами 2 ± 0.4 мм. Эти температурные неоднородности возникали в остаточном слое жидкости

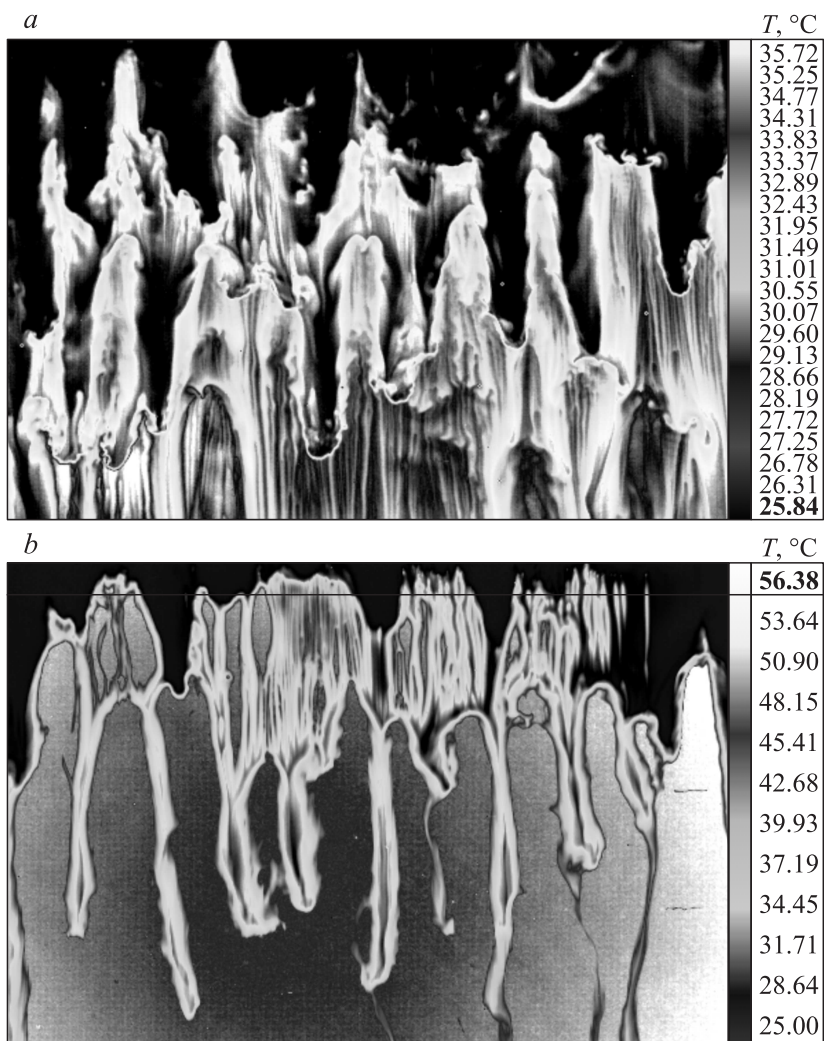


Рис. 1. Мгновенные распределения температуры на поверхности пленки жидкости в области нагревателя при: *a* — $q = 2.5 \text{ W/cm}^2$ и *b* — $q = 10 \text{ W/cm}^2$.

перед крупными трехмерными волнами. При малых тепловых потоках эти структуры возникали в нижней части нагревателя (рис. 1, *a*). С увеличением q область формирования маломасштабных температурных неоднородностей сдвигалась вверх по потоку. При плотности теплового потока $q = 10 \text{ W/cm}^2$ (рис. 1, *b*) градиенты температуры возрастали до 10 K/mm , что характерно для возникновения структур в режиме А. Среднее расстояние между струями в поперечном направлении составляло 12 mm и было близко к длине волны неустойчивости в режиме А при меньших значениях Re . По мере движения некоторые струи сливались, увеличивая среднее межструйное расстояние в нижней части нагревателя. Периодически в верхней части нагревателя появлялись вышеотмеченные структуры меньшего масштаба. Трехмерные гидродинамические волны разрушались в верхней части нагревателя. Определяющее влияние на процесс оказывала термокапиллярная неустойчивость.

На рис. 2, *a* показана усредненная по 150 кадрам картина распределения температуры на поверхности пленки над нагревателем при плотности теплового потока $q = 10 \text{ W/cm}^2$. Распределение температур в указанных на рис. 2, *a* сечениях приведено на рис. 2, *b* в зависимости от расстояния от левого края нагревателя Z . В верхней части нагревателя на поверхности пленки жидкости в поперечном направлении наблюдается большее количество максимумов. При $X = 26 \text{ mm}$ количество максимумов соответствует количеству впадин между струями в режиме А, а при $X = 9 \text{ mm}$ их количество еще выше. Видно, что на фоне крупных температурных неоднородностей на поверхности пленки в верхней части нагревателя наблюдаются неоднородности меньшего масштаба. В средней части нагревателя при расстоянии от верхнего края нагревателя $X = 62 \text{ mm}$ в зависимости температуры от поперечной координаты (линия 1 с наибольшими значениями температуры) можно выделить 11 максимумов, что соответствует количеству впадин между струями в режиме В. Примерно такое же количество межструйных областей можно выделить на рис. 2, *a*.

На рис. 3 приведены зависимости средней длины начального термического участка для струй и межструйных областей от величины теплового потока. Длина начального термического участка L_b определялась отдельно для каждой струи и межструйной области на усредненном тепловизионном кадре. За границу выхода теплового пограничного слоя на поверхность, как и в предшествующих работах (см. [11]), была взята

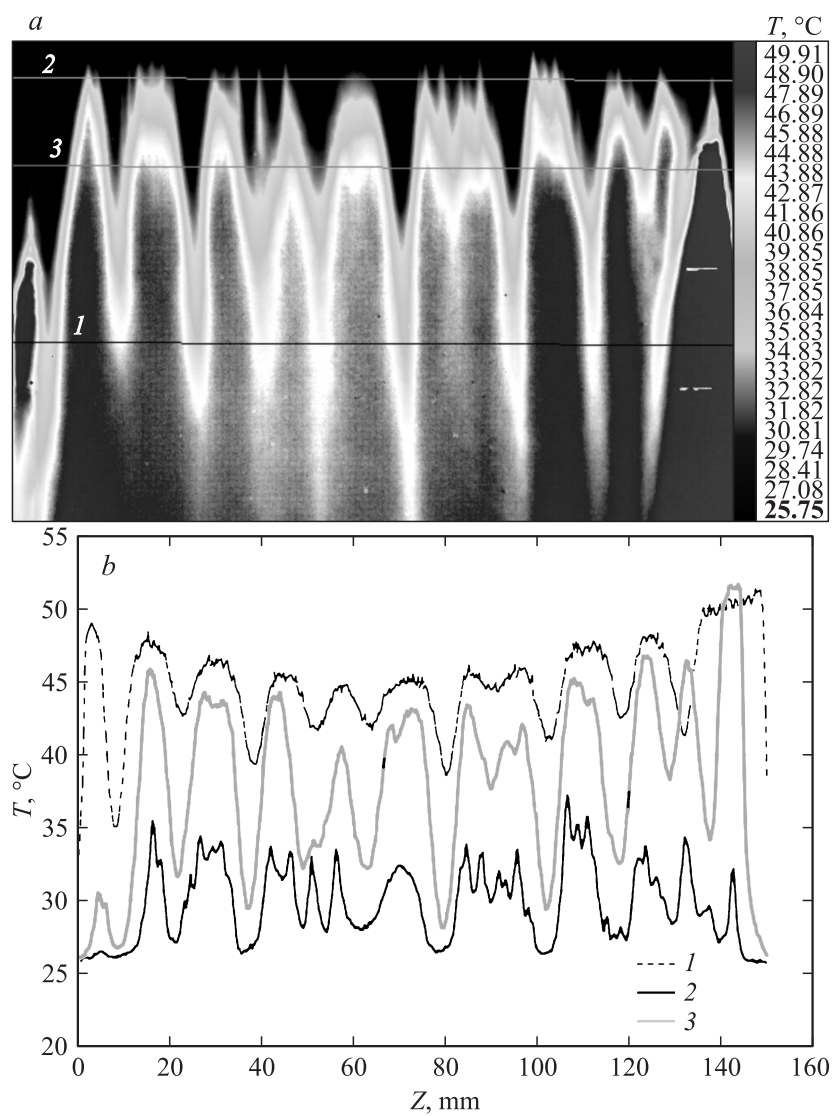


Рис. 2. Усредненное распределение температуры при $q = 10 \text{ W/cm}^2$: *a* — на поверхности пленки жидкости, *b* — в сечениях при $X = 9$ (кривая 2); 26 (3) и 62 (1) mm.

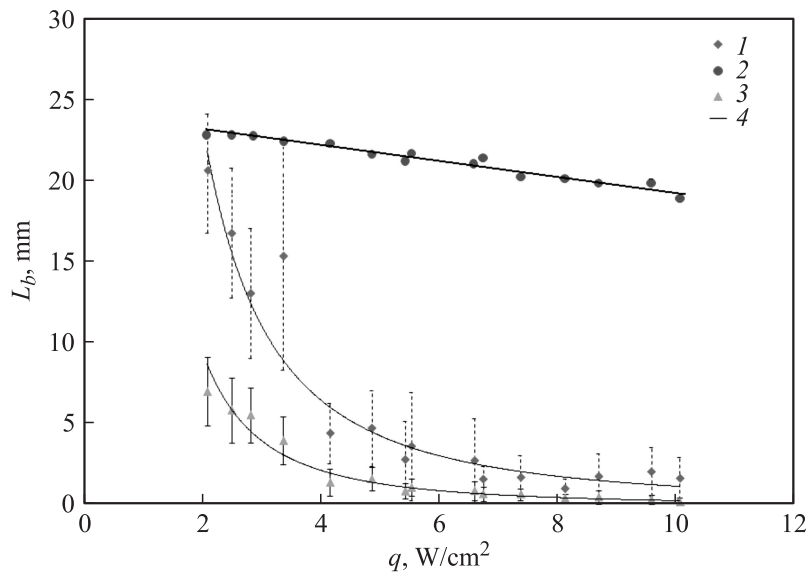


Рис. 3. Зависимость длины начального термического участка от плотности теплового потока: 1, 3 — для струй и межструйной области, 2 — рассчитанная по формуле из [11], сплошными линиями обозначены аппроксимации соответствующих данных.

условная точка $T/T_0 = 1.01$, когда температура на поверхности пленки превышала начальную на один процент. При малых q в области струй, формирующихся по гребням трехмерных синхронных волн, длина начального термического участка совпадает с L_b , определяемой по экспериментальной зависимости из [11] для меньших чисел Рейнольдса. Длина начального термического участка резко уменьшается с ростом плотности теплового потока и при высоких q существенно меньше величины, определяемой по той же зависимости. В межструйной области L_b еще меньше. Следует отметить, что длина начального термического участка в области струй резко уменьшается в три раза при изменении плотности теплового потока от 3 до 4 W/cm². Возникновение неустойчивости, приводящей к формированию структур в режиме А, также происходит при пороговом изменении q .

При $Re = 150$ на нагревателе размером 100×150 mm при граничном условии, близком к $T = \text{const}$, зарегистрировано проявление

неустойчивостей трех разных типов: гидродинамической $3D$ и двух термокапиллярных А и В. Неустойчивость типа А, характеризующаяся определенным значением наиболее опасной длины волны и высокими градиентами температуры на поверхности пленки жидкости, ранее не наблюдалась при столь высоких значениях Re . Новым эффектом является периодическое появление структур с существенно меньшим расстоянием между максимальными значениями температуры, чем это наблюдалось ранее.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-6686.2012.8, РФФИ (проект № 12-01-00360) и СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 116).

Список литературы

- [1] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 128.
- [2] Kabov O.A. // Heat Transfer Research. 1996. V. 27. Is. 1. P. 221.
- [3] Чиннов Е.А. // Телофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 1. С. 69.
- [4] Kabov O.F., Chinnov E.A. // Russ. J. Engng Thermophys. 1997. V. 7. N 1/2. P. 1.
- [5] Scheid B., Oron A., Colinet P. et al. // Phys. Fluids. 2002. V. 14. P. 4130.
- [6] Kalliadasis S., Kiyashko A., Demekhin E.A. // J. Fluid Mech. 2003. V. 475. P. 377.
- [7] Frank A.M., Kabov O.A. // Phys. Fluids. 2006. V. 18. P. 032 107-1.
- [8] Joo S.W., Davis S.H. // J. Fluid Mech. 1992. V. 242. P. 529–547.
- [9] Liu J., Schneider J.B., Golub J.P. // Phys. Fluids. 1995. V. 7. N 1. P. 55–67.
- [10] Park C.D., Nosoko T. // AIChE Journal. 2003. V. 49. N 11. P. 2715–2727.
- [11] Lel V.V., Al-Sibai F., Kneer R. // Microgravity Sci. Technol. 2009. V. 21. Suppl. 1. P. 215–220.