

03

Воздействие термокапиллярных возмущений на волновое движение нагреваемой пленки жидкости

© Е.А. Чиннов, Е.Н. Шатский

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

Поступило в Редакцию 9 июня 2009 г.

С использованием скоростной инфракрасной съемки и флуоресцентной техники измерения толщины выполнено экспериментальное исследование эволюции гидродинамических возмущений в термокапиллярно-волновые при нагреве вертикально стекающей пленки воды. Показано, что на трехмерном фронте гидродинамической волны появляются температурные неоднородности, которые за счет действия термокапиллярных сил приводят к деформации пленки жидкости и формированию струй. Измерены расстояния между трехмерными волнами и струями в зависимости от плотности теплового потока. Выполнено сопоставление экспериментальных данных с теоретическими результатами.

Известно, что двумерные волны в изотермических пленках жидкости неустойчивы к трехмерным возмущениям. При распаде двумерных волн на трехмерные в работах [1,2] выделяют синхронные волны, когда отсутствует фазовое смещение волн в поперечном направлении, и субгармонические волны, когда фазовое смещение имеет место. Показано, что длина волны неустойчивости к поперечным трехмерным возмущениям убывает с ростом числа Рейнольдса. В работе [3] исследовано распространение двумерных и трехмерных волн по вертикально стекающей изотермической пленке воды при $Re = 10-100$, а также воздействие на них искусственных возмущений. Экспериментально было показано, что трехмерные волны при числах Рейнольдса более 40 отличаются от течения для меньших чисел Рейнольдса большим количеством подковообразных волн и впадин между ними на участке одинаковой ширины поперек потока. При $Re > 40$ двумерные волны неустойчивы к поперечным возмущениям с длиной волны, примерно равной 20 mm. Они распадаются на трехмерные волны, которые сильно взаимодействуют и объединяются друг с другом. При $Re = 20$ длина

волны неустойчивости к поперечным трехмерным возмущениям возрастает до 30 mm и более.

К настоящему времени открыты различные механизмы формирования струй в нагреваемых пленках жидкости, выделено два режима: термокапиллярный А и термокапиллярно-волновой Б [4]. Структуры двух типов А и Б различаются уровнем плотности теплового потока, необходимого для их возникновения, величиной и характером зависимости расстояния между струями от плотности теплового потока и числа Рейнольдса. В работах [5,6] обнаружено и исследовано формирование регулярных структур в термокапиллярном режиме А на поверхности гладкой пленки жидкости, стекающей по вертикальной плоскости с нагревателями малого размера 6.5×13 mm при малых числах Рейнольдса. Под действием термокапиллярных сил, направленных против течения, происходило утолщение пленки. При достижении пороговой плотности теплового потока течение разделялось на вертикальные струи, следующие с определенным расстоянием Λ , и тонкую пленку между ними. Данные по формированию структур этого типа на поверхности пленок воды на протяженных нагревателях длиной 60 mm представлены в работе [7]. Теоретическое изучение и детальный анализ этого явления выполнены в [8]. Формирование струй в режиме Б происходило на поверхности волновой пленки жидкости под действием термокапиллярных сил, направленных от более горячих областей к холодным. Струйное течение формировалось постепенно с ростом плотности теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя. В работах [7,9,10] показано, что в области достаточно высоких тепловых потоков при $Re > 15$ расстояние между струями слабо зависит от числа Рейнольдса, наклона и длины пробега пленки. В одной из последних теоретических работ [11] подтверждено существование структур двух типов на поверхности неизотермической пленки жидкости. Показано, что в термокапиллярном режиме волновое течение пленки затухает, а в термокапиллярно-волновом режиме волны распространяются вдоль струй. Однако расчеты ограничены областью $Re < 5-8$ и не описывают режим гидродинамической неустойчивости волновой пленки жидкости к трехмерным возмущениям.

Задачей данной работы являлось экспериментальное исследование эволюции гидродинамических возмущений в термокапиллярно-волновом режиме при нагреве вертикально стекающей пленки воды в малоисследованной области значений числа Рейнольдса $5 < Re < 15$.

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с электронасосом, рабочий участок и фильтр. Рабочий участок состоял из несущей плиты из текстолита с расположенными на ней нагревателем размером 150×150 mm, стабилизаторами температуры, удлиняющей пластиной и пленкоформователем. Дистиллированная вода с помощью насоса подавалась в пленкоформователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Расстояние от нижнего края сопла пленкоформователя до верхнего края нагревателя X_n составляло 543 mm. На поверхности нагрева выполнялось граничное условие $q = \text{const}$. Начальная температура воды при выходе из сопла пленкоформователя составляла 22°C . Число Рейнольдса пленки воды равнялось 10.5 ($Re = \Gamma/\rho\nu$, где Γ — удельный массовый расход жидкости, ρ — плотность жидкости, ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости). В экспериментах проводились визуальные наблюдения с регистрацией изображения на цифровые видео- и фотокамеры. Мгновенное поле толщин пленки жидкости измерялось флуоресцентным методом [9]. Для регистрации поля температур на поверхности пленки жидкости использовался инфракрасный сканер Titanium 570 M, позволяющий измерять поле температур на поверхности пленки с разрешением 640×512 пикселей и частотой полных кадров до 115 Hz.

При расстоянии между нижним краем сопла пленкоформователя и верхним краем нагревателя в 543 mm на поверхности пленки перед нагревателем наблюдались трехмерные подковообразные волны, амплитуды которых превышали более мелкие волны. В отсутствие нагрева и при малых плотностях тепловых потоков структура волн не изменялась при прохождении через нагреватель, струи не образовывались. При высоких плотностях тепловых потоков происходил процесс формирования струй. Подковообразные волны деформировались в верхней части нагревателя. Далее, по мере движения по нагревателю, они преобразовывались в вертикальные неоднородности, из которых формировались струи с расстоянием 13–16 mm между ними. Механизм преобразования гидродинамических волн в термокапиллярно-волновые структуры показан на рис. 1. На рис. 1, *a* и *b* приведены термограммы поверхности вертикально стекающей пленки воды ($q = 0.73 \text{ W/cm}^2$) при дискретной градации серого цвета. Расстояние вдоль течения пленки воды отсчитывалось от верхней кромки нагревателя. В верхней части нагревателя неоднородности температуры соответствуют фронту трехмерной волны холодной жидкости, поступающей на нагреватель. Ниже

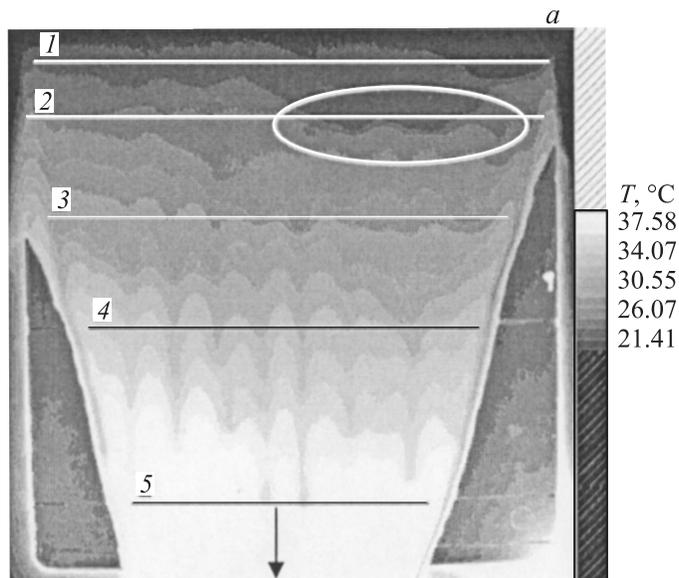


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности вертикально стекающей пленки воды ($Re = 10.5$, $q = 0.73 \text{ W/cm}^2$) при дискретной градации серого цвета. Термограмма поверхности пленки воды: *a* — через 0.05 s от момента прохождения крупной волны линии *1*. *b* — через 0.25 s . Горизонтальные линии на рисунке располагаются на расстоянии $X_1 = 4 \text{ mm}$, $X_2 = 20 \text{ mm}$, $X_3 = 49 \text{ mm}$, $X_4 = 80 \text{ mm}$, $X_5 = 130 \text{ mm}$ от верхней кромки нагревателя. *c* — температурные профили на поверхности пленки, построенные в сечениях *1–5* при прохождении крупной подковообразной волны, что соответствует моментам времени $t_1 = 0$, $t_2 = 0.05$, $t_3 = 0.15$, $t_4 = 0.25$, $t_5 = 0.36 \text{ s}$ от момента прохождения этой волной линии *1*.

по потоку происходит образование периодических структур, соответствующих формированию струй. Видно, что правая часть термограмм отличается от левой. В правой части зарегистрировано прохождение крупной волны, область которой выделена эллипсом.

Термограммы на рис. 1, *a* и *b* построены для моментов времени $t_2 = 0.05 \text{ s}$ и $t_4 = 0.25 \text{ s}$, отсчитываемых от момента прохождения крупной волны верхней линии *1*. Температурные профили на поверхности пленки, построенные в сечениях *1–5* различные моменты времени при

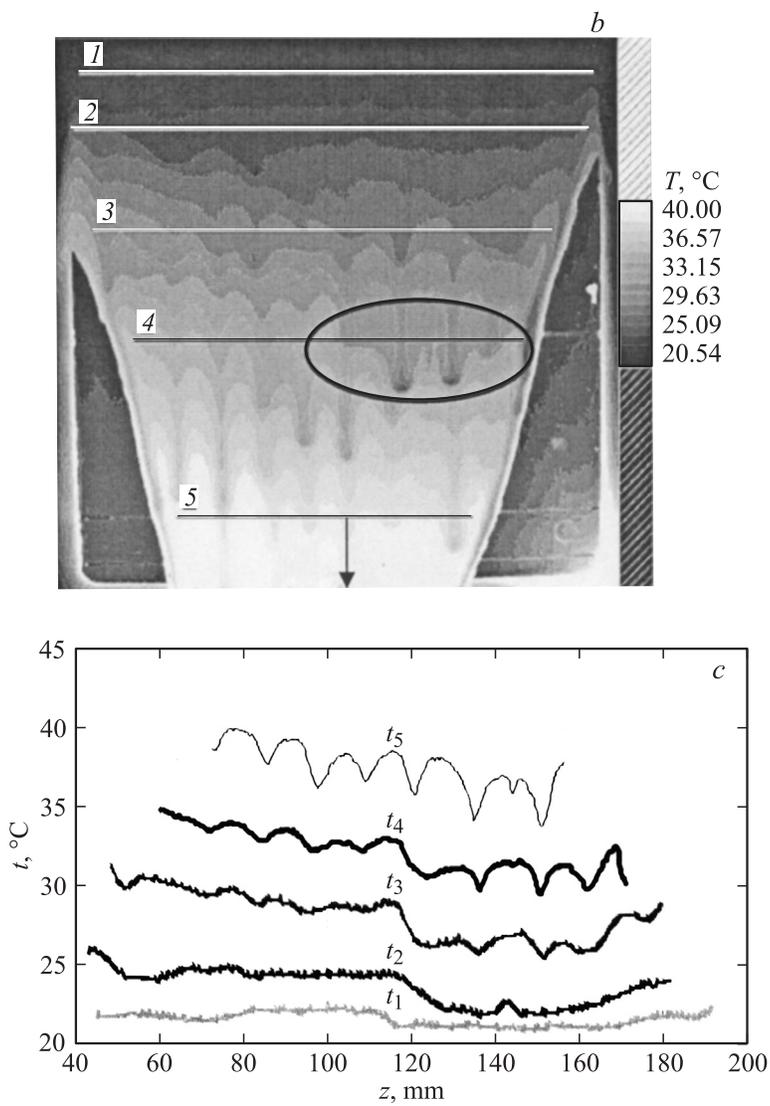


Рис. 1 (продолжение).

прохождении крупной волны, показаны на рис. 1, с. Видно, что при $t = 0$ на поверхности крупной волны температура ниже, чем в более тонкой пленке перед фронтом соседней волны. В момент t_2 разница между температурой на гребне волны и на остальной поверхности пленки вдоль линии 2 возрастает. На гребне волны появляются неоднородности температуры. В момент t_3 неоднородности температуры на гребне волны возрастают, а к моменту t_4 , когда крупная волна проходит середину нагревателя, окончательно формируются периодические структуры на поверхности пленки. Сохраняется значительная разница между температурой на гребне волны и на остальной поверхности пленки вдоль линии 4. После прохождения волны перепад температуры между правой и левой частями пленки исчезает, но ее периодические измерения остаются прежними. В нижней части нагревателя при расстоянии вдоль течения пленки воды от верхней кромки нагревателя $X = 130$ mm (линия 5) регистрировались четко выраженные струи. Таким образом, можно видеть, как на трехмерном фронте гидродинамической волны формируются температурные неоднородности, которые за счет действия термокапиллярных сил приводят к деформации пленки жидкости и формированию струй.

На рис. 2, а показаны характерные мгновенные поперечные профили толщины пленки жидкости в нижней части нагревателя размером 150×150 mm при $X = 130$ mm, полученные флуоресцентным методом для разных значений тепловых потоков. Видно изменение толщины пленки жидкости в направлении, перпендикулярном течению пленки Z . Точка отсчета $Z = 0$ соответствовала началу области измерений, которая располагалась в центральной части нагревателя. При $q = 0$ сечение подковообразной волны имеет значительную ширину, а при $q = 0.73$ W/cm² образуются струи с существенно меньшей шириной. Были выполнены измерения расстояний Λ между локальными максимумами толщины для разных значений тепловых потоков (рис. 2, а). В результате обработки 30 измерений для каждого теплового потока строились гистограммы распределения Λ и определялись средние значения. Аналогичным образом обрабатывались данные по распределению температуры в том же сечении и результаты фото- и видеорегистрации процесса. В отсутствие нагрева и при малых плотностях тепловых потоков параметр Λ определялся как расстояние между гребнями волн. В результате была найдена зависимость расстояния между струями от плотности теплового потока в нижней части нагревателя при $X = 130$ mm (рис. 2, б). В отсутствие теплового потока полученные

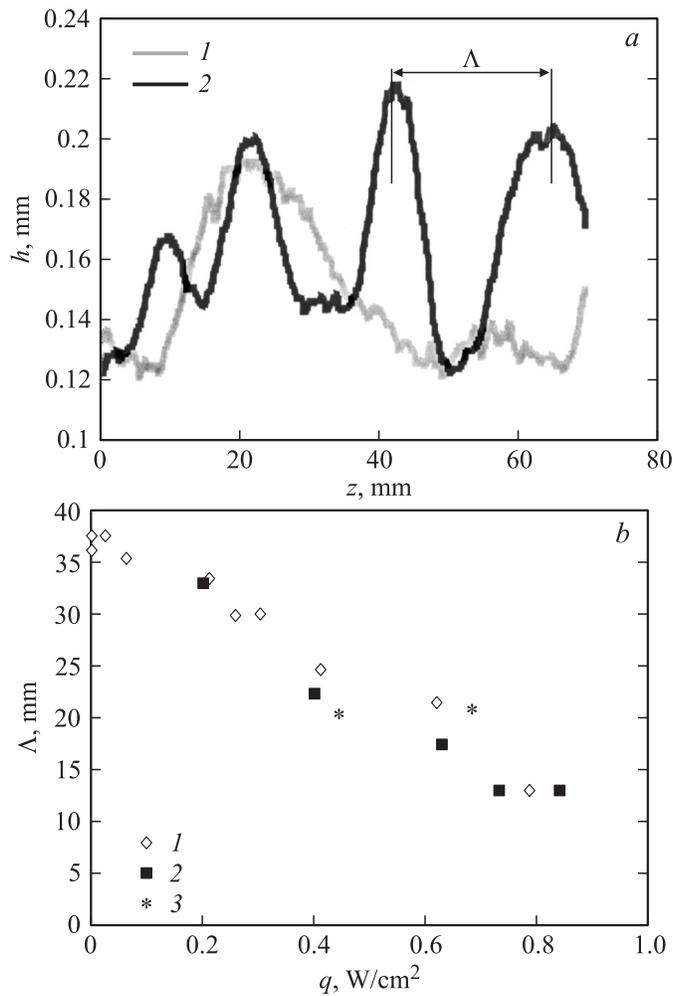


Рис. 2. Характерные линейные параметры процесса. *a* — характерные мгновенные поперечные профили толщины пленки жидкости в нижней части нагревателя при $X = 130$ mm для различной плотности теплового потока: 1 — 0, 2 — 0.62 W/cm^2 . *b* — зависимость расстояния между гребнями волн или струями от плотности теплового потока в нижней части нагревателя при $X = 130$ mm, построенная по данным: 1 — обработки цифровых фотографий, 2 — обработки тепловизионных изображений, 3 — флуоресцентного метода.

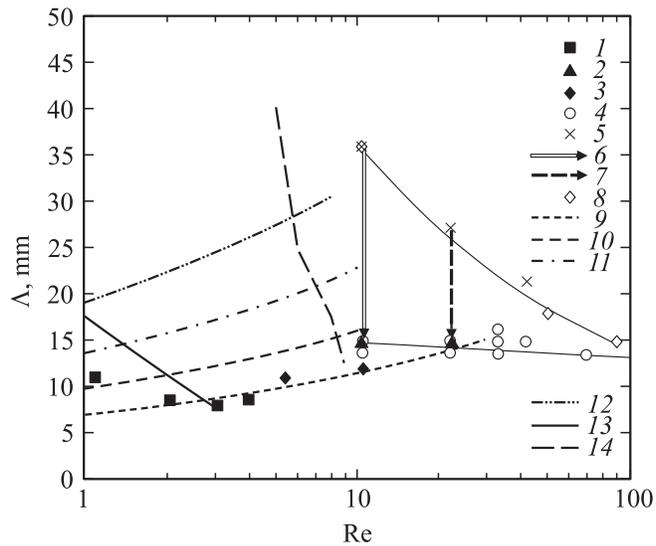


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и теоретических данных для стекающей пленки воды. Экспериментальные данные: $T = \text{const}$, нагреватель размером $60 \times 120 \text{ mm}$ [7]: 1 — $Ma = 100$, тип А; 2 — $Ma = 150$, тип Б; 3 — $Ma = 200$, тип А; $q = \text{const}$, нагреватель размером $150 \times 150 \text{ mm}$; 4 — тип Б [12], 5 — $Ma = 0$; изотермическое течение, 6 — данные рис. 2, b , увеличение Ma , 7 — данные [7] для $Re = 22$, 8 — $Ma = 0$ [3]; теоретические расчеты из работы [11] по формуле для линейной неустойчивости: 9 — $Ma = 200$, 10 — $Ma = 100$, 11 — $Ma = 50$, 12 — $Ma = 25$; 13 — границы термокапиллярного режима, 14 — границы области, где получены решения для термокапиллярно-волнового режима.

данные согласуются с результатами работы [3], а при высоких тепловых потоках совпадают с ранее полученными данными для формирования термокапиллярно-волновых структур при более высоких значениях числа Рейнольдса.

На рис. 3 показана зависимость средних расстояний между гребнями волн изотермической пленки воды от числа Рейнольдса, включающая данные настоящей работы, результаты [7] и данные по трехмерной неустойчивости [3]. Представлены данные для формирования струй в термокапиллярно-волновом режиме Б [12]. Видно, что с увеличением Re разница между характерными длинами волн двух указанных типов

неустойчивостей сокращается. Приведены теоретические результаты для значений числа Марангони 25, 50, 100 и 200, рассчитанные из полученной в работе [11] зависимости, $Ma = -\gamma\Delta T / (\rho\nu^{4/3}g^{1/3})$, где γ — производная коэффициента поверхностного натяжения от температуры, ΔT — разница между средней температурой на поверхности нагревателя и начальной температурой жидкости, g — ускорение силы тяжести. Представлено сопоставление теоретических данных с результатами работы [7], полученными для формирования структур А и Б. Эти данные были получены при условии $T = \text{const}$ на нагревателе, что позволило определить ΔT и Ma . Выбраны данные, для которых перед разрывом пленки значения числа Марангони приблизительно составляли 100, 150 и 200. Из графика видно, что имеется удовлетворительное соответствие теоретических ($Ma = 100, 200$) и экспериментальных данных. При $Ma < 100$ экспериментальные данные отсутствуют. Теоретическая зависимость, полученная в работе [11], дает возрастание длины волны неустойчивости с уменьшением Ma , но при этом остается неизменной тенденция ее увеличения с ростом Re , что противоречит опытным данным для $Ma = 0$. При $Re > 5-8$ расчеты по теоретической модели [11] не приводят к формированию струйных течений, в то время как полученные опытные данные описывают переход от трехмерного волнового течения изотермической пленки к термокапиллярно-волновому режиму. Анализ термограмм показывает, что независимо от гидродинамических условий (ширины и амплитуды волны) на фронте волн происходит развитие термокапиллярных возмущений, которые вызывают формирование струй. При прохождении крупных волн возрастают пульсации температуры и толщины, но расстояние между струями в термокапиллярно-волновом режиме не изменяется.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 09-01-00765-а) и президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-6749.2006.8.

Список литературы

- [1] *Joo S.W., Davis S.H.* // J. Fluid Mech. 1992. V. 242. P. 529–547.
- [2] *Liu J., Schneider J.B., Golub J.P.* // Phys. Fluids. 1995. V. 7. N 1. P. 55–67.
- [3] *Park C.D., Nosoko T.* // AIChE Journal. 2003. V. 49. N 11. P. 2715–2727.
- [4] *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 128–137.

- [5] *Kabov O.A., Chinnov E.A.* // Russian Journal Engineering Thermophysics. 1997. V. 7. N 1–2. P. 1–34.
- [6] *Кабов О.А.* // Теплофизика и аэродинамика. 1998. Т. 5. № 4. С. 597–602.
- [7] *Чиннов Е.А.* // Теплофизика и аэродинамика. 2009. Т. 16. № 1. С. 69–77.
- [8] *Frank A.M., Kabov O.A.* // Phys. Fluids. 2006. V. 18. P. 032107-1–032107-10.
- [9] *Чиннов Е.А., Харламов С.М., Сапрыкина А.В.* и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 2. С. 249–255.
- [10] *Чиннов Е.А., Шарина И.А.* // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. № 1. С. 121–130.
- [11] *Scheid B., Kalliadasis S., Ruyer-Quil C.* et al. // Physical Review E. 2008. V. 78. N 6. Article Number: 066311.
- [12] *Чиннов Е.А.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 14. С. 40–47.