

03

Деформация подковообразных волн при нагреве пленки жидкости

© Е.А. Чиннов

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

В окончательной редакции 19 декабря 2007 г.

Выполнено экспериментальное исследование формирования струй на поверхности неизотермической пленки воды, вертикально стекающей по протяженным пластинам с нагревателями в нижней их части. Измерены расстояния между струями и толщины пленок в зависимости от числа Рейнольдса и плотности теплового потока. Обнаружен эффект деформации подковообразных волн при нагреве пленки жидкости.

PACS: 47.20.Ma, 47.55.nb

Известно, что длина прохождения пленки жидкости от начала формирования до точки измерения X оказывает существенное влияние на волнообразование на ее поверхности и, как следствие, на теплообмен. Однако при разных значениях X в основном исследовалось течение изотермической пленки [1–7]. Традиционно, учитывая эволюцию пленочного изотермического течения по длине рабочего участка, выделяют наиболее типичные области течения: гладкую зону, зону двумерных плоских волн, зону распада двумерных волн и зону нестационарных трехмерных волн [1].

При распаде двумерных волн на трехмерные в работах [2,3] выделяют синхронные волны, когда отсутствует фазовое смещение волн в поперечном направлении, и субгармонические волны, когда фазовое смещение имеет место.

В работах [4,5] исследовалась волновая динамика подковообразных волн на поверхности стекающей пленки жидкости. Показано, что при достаточно больших значениях X волны на поверхности пленки жидкости качественно соответствуют теоретическим предсказаниям для солитонов [6,7]. Однако при естественном образовании подковообразных волн нельзя количественно характеризовать как уединенные

солитоны. На поверхности пленки распространяется одновременно несколько подковообразных волн, которые могут взаимодействовать друг с другом. Только недавно в работе [8] путем дополнительного одиночного возмущения гладкой пленки жидкости получены стационарные уединенные трехмерные волны. В [9] показано, что экспериментальные данные [8] количественно соответствуют теоретическим решениями для трехмерных солитонов.

К настоящему времени открыты различные механизмы формирования струй в нагреваемых пленках жидкости; выделено два режима: термокапиллярный А и термокапиллярно-волновой Б [10]. 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 [11–13] обнаружено и исследовано формирование регулярных структур в режиме А на поверхности гладкой пленки жидкости, стекающей по вертикальной плоскости с нагревателями малого размера $6.5 \times 13 \text{ mm}$ при малых числах Рейнольдса ($Re = \Gamma/\mu$, где Γ — удельный массовый расход воды, μ — коэффициент динамической вязкости воды). 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. Теоретическое изучение и детальный анализ этого явления выполнены в [14].

Режим Б является следствием наложения двух механизмов неустойчивости: трехмерной гидродинамической и термокапиллярной. Деформации на поверхности пленки появлялись в результате развития гидродинамической неустойчивости на нагревателях достаточной ширины и длины при $Re > 5$ в области распада двумерных и формирования трехмерных волн [10]. Под действием термокапиллярных сил, направленных от более горячих областей к холодным, происходил рост деформации поверхности пленки. Струйное течение формировалось постепенно, с ростом плотности теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя. Ранее формирование структур двух типов и влияние искусственных возмущений изучались только при малых значениях X [15].

В настоящей работе выполнено исследование формирования струй в пленке воды, стекающей по вертикальным протяженным пластинам с нагревателями в условиях, когда на поверхности пленки формируются подковообразные волны.

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий в себя 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. В экспериментах использовалось два рабочих участка.

Первый рабочий участок состоял из несущей плиты из текстолита с расположенными на ней нагревателем и стабилизаторами температуры, удлиняющей пластины и пленкоформирователя. Пленкоформирователь располагался в верхней части рабочего участка. Расстояние от нижнего края сопла пленкоформирователя до верхнего края нагревателя X_n составляло 396 мм. Нагреватель представлял собой плоский теплообменник размером 60×120 мм из меди с прямоугольными каналами внутри для движения нагретой жидкости. Температура обращенной к пленке стенки нагревателя измерялась тремя термопарами, расположенными на вертикальной оси симметрии. На поверхности нагрева реализовывалось граничное условие, близкое к $T = \text{const}$. Начальная температура жидкости при выходе из сопла пленкоформирователя составляла $20 - 24^\circ\text{C}$. Средняя плотность теплового потока q на нагревателе определялась по количеству тепла, переданного от подогревающей воды. Дополнительная информация о конструкции первого рабочего участка приведена в [16].

На втором рабочем участке с нагревателем размером 150×150 мм использовался перемещаемый в вертикальной плоскости пленкоформирователь. Расстояние от нижнего края сопла пленкоформирователя до верхнего края нагревателя X_n изменялось от 200 до 543 мм. На поверхности нагрева выполнялось граничное условие $q = \text{const}$. Дополнительная информация о конструкции второго рабочего участка приведена в [17]. Число Рейнольдса пленки изменялось от 6 до 15.

В экспериментах проводились визуальные наблюдения с регистрацией изображения на цифровые видео- и фотокамеры. Толщина пленки жидкости измерялась флуоресцентным методом [18].

При расстоянии между нижним краем сопла пленкоформователя и местом измерения характеристик пленочного течения X от 200 до 700 мм на поверхности пленки перед нагревателем наблюдались трехмерные подковообразные волны. Волны были структурно устойчивы, достаточно далеко удалены друг от друга (в области нагревателя одновременно находились 2–4 волны). Как показано в работе [5], для вертикально стекающих пленок воды при X более 200 мм амплитуда волн остается постоянной, а скорость изменяется незначительно. Стационарные уединенные трехмерные волны были зарегистрированы только при малых числах Рейнольдса $Re < 10–15$ [8]. При высоких $Re > 30$ наблюдалось взаимодействие волн, что приводило к их неустойчивости. По имеющимся данным для вертикально стекающих пленок воды при значениях X от 200 до 700 мм и $Re < 15–30$ наблюдаемые волны можно характеризовать как устойчивые подковообразные. В отсутствие нагрева и при малых плотностях тепловых потоков структура волн не изменялась при прохождении через нагреватель и струи не образовывались (рис. 1, *a*). Область малых значений плотностей тепловых потоков примерно соответствовала определенной в [18] области тепловых нагрузок $q < 0.4q_{bd}$ (q_{bd} — плотность теплового потока, соответствующего разрыву пленки), не приводящих к деформации волнового течения пленки жидкости.

При высоких плотностях тепловых потоков ($q > 0.4q_{bd}$) происходил процесс формирования струй. Подковообразные волны деформировались в верхней части нагревателя. Далее, по мере движения по нагревателю, они преобразовывались в вертикальные динамические неоднородности, из которых формировались струи с расстоянием 13–16 мм между ними (рис. 1, *b*).

На рис. 2 показаны характерные мгновенные поперечные профили толщины пленки воды в нижней части нагревателя размером 150×150 мм при $X = 344$ мм и $Re = 10.5$, полученные флуоресцентным методом. Видно изменение толщины пленки в направлении, перпендикулярном течению 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 $q = 1$ W/cm² образуются струи с существенно меньшей шириной.

Данные по безразмерному расстоянию между струями Λ/l_σ приведены на рис. 3 в сравнении с ранее полученными результатами [8]

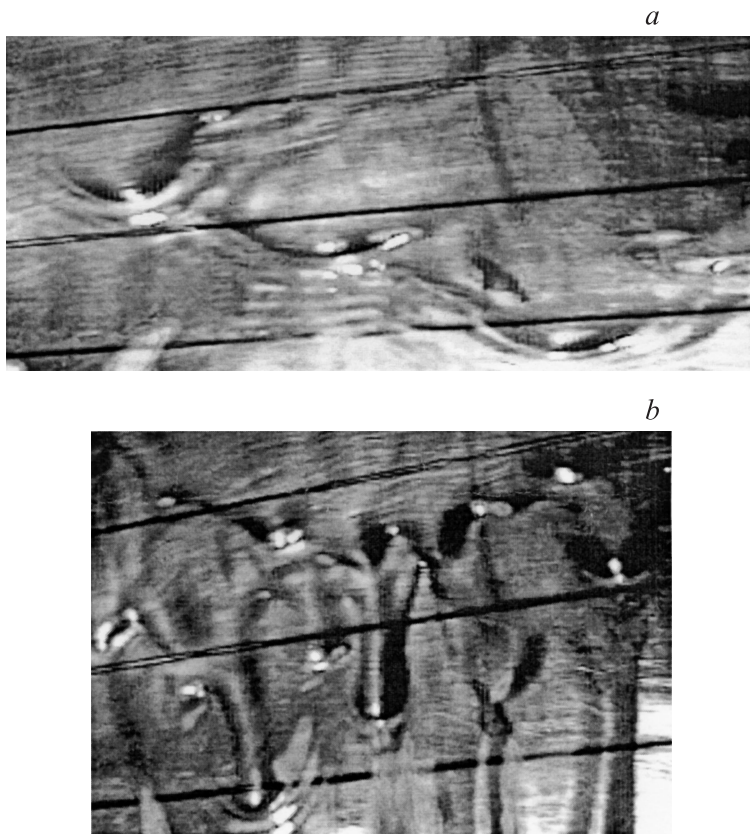


Рис. 1. Фотографии стекающей по нагревателю размером 60×120 mm пленки воды, $X_n = 396$ mm, $Re = 10.5$. *a* — $q = 0.65$ W/cm², *b* — $q = 2.17$ W/cm². Расстояние между горизонтальными полосами 15 mm.

для нагревателя размером 150×150 mm при невысоких значениях X в режиме Б ($l_\sigma = [\sigma/(g\rho)]^{1/2}$ — капиллярная постоянная, для воды — $l_\sigma = 2.7$ mm, σ — коэффициент поверхностного натяжения, g — ускорение свободного падения, ρ — плотность жидкости). В отсутствие нагрева и при малых плотностях тепловых потоков параметр Λ определялся как расстояние между гребнями синхронных трехмерных [2,3]

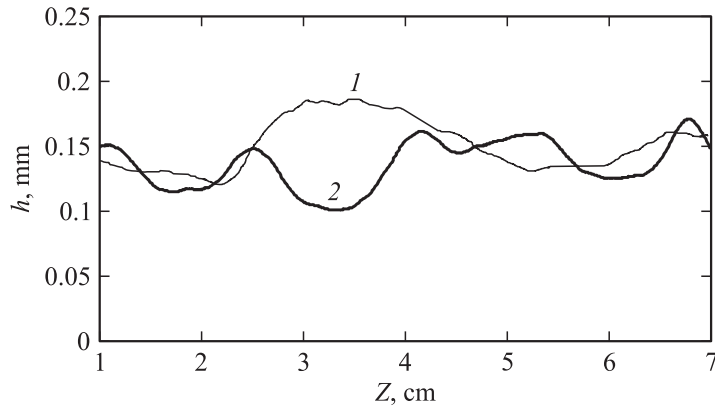


Рис. 2. Характерные мгновенные поперечные профили толщины пленки воды в нижней части нагревателя размером 150×150 мм при $X = 344$ мм ($X_n = 200$ мм) и $Re = 10.5$. 1 — $q = 0$, 2 — $q = 1$ Вт/см².

или подковообразных волн. Так как расстояния между гребнями подковообразных волн изменялись в широком диапазоне от 25 до 55 мм, определялось их среднее значение при обработке 20–30 изображений.

На нагревателе длиной 150 мм с $X_n = 42$ мм волны формировались непосредственно в области нагревателя при распаде двумерных плоских волн на трехмерные. В условиях изотермического течения в этой области происходил рост амплитуды волн. При нагреве пленки формировались струи, причем с увеличением плотности теплового потока расстояние между ними убывало. При относительно высоких значениях числа Рейнольдса (40–50) расстояние между струями слабо зависело от плотности теплового потока (рис. 3). При малых числах Рейнольдса воздействие термокапиллярных сил более существенно, что проявлялось в степени влияния плотности теплового потока на расстояние между струями.

При $X_n = 120$ мм источником гидродинамических возмущений служили уже сформировавшиеся синхронные трехмерные волны, которые наблюдались в верхней части нагревателя. Увеличение плотности теплового потока приводило к формированию струй в режиме Б, с выраженными волнами на их поверхности. Как видно из рис. 3,

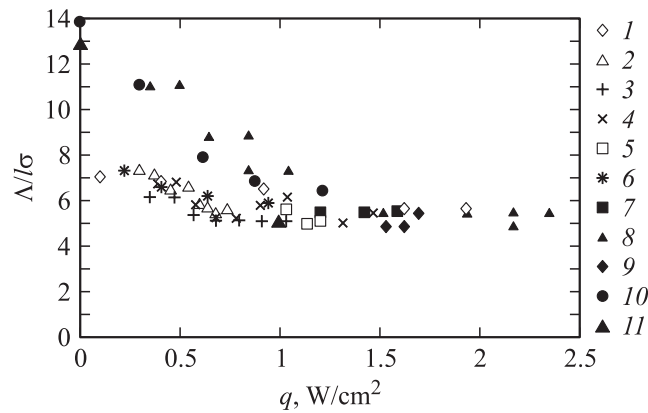


Рис. 3. Зависимость безразмерного расстояния между струями на поверхности пленки воды от плотности теплового потока. Нагреватель размером 150×150 mm [8]: 1 — $Re = 44.2$, $X_n = 42$ mm; 2 — $Re = 10.4$, $X_n = 42$ mm; 3 — $Re = 22$, $X_n = 120$ mm; 4 — $Re = 33$, $X_n = 120$ mm; 5 — $Re = 33$, $X_n = 200$ mm; 6 — $Re = 38$, $X_n = 200$ mm; нагреватель размером 60×120 mm, $X_n = 396$ mm: 7 — $Re = 6.5$, 8 — $Re = 10.5$, 9 — $Re = 15$; нагреватель размером 150×150 mm: 10 — $X_n = 543$ mm, $Re = 10.3$, 11 — $X_n = 200$ mm, $Re = 10.5$.

возрастание X_n до 120–200 mm вызывало уменьшение расстояния между струями по сравнению с $X_n = 42$ mm.

Для $X_n \geq 200$ mm и $Re < 15$ процесс формирования струй иной, чем при малых значениях X_n . На нагреватель поступали подковообразные волны с большим расстоянием между ними, чем это характерно для формирования струй типа Б. В нижней половине нагревателя они преобразовывались в вертикальные неоднородности, из которых формировались струи. При достаточно высоких плотностях тепловых потоков расстояние между ними становилось таким же, как и для струй типа Б, формирующихся при распаде двумерной волны на трехмерные при $X_n = 42$ mm или на синхронных трехмерных волнах при $X_n = 120$ –200 mm.

Хотя возмущения гидродинамической природы, по-видимому, являются источником начальной деформации пленки, которая в дальнейшем развивается под действием термокапиллярных сил, они не оказывают

принципиального влияния на конечное расстояние между струями. Определяющим процесс фактором являются не начальные гидродинамические условия, а термокапиллярно-волновые эффекты, приводящие к конечному состоянию системы с определенным расстоянием между струями.

Работа поддержана грантами РФФИ (проекты № 05-08-33325-а, 06-01-00360-а), СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 111) и президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-6749.2006.8.

Список литературы

- [1] *Алексеев С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г.* Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. 255 с.
- [2] *Joo S.W., Davis S.H.* // J. Fluid Mech. 1992. V. 242. P. 529–547.
- [3] *Liu J., Schneider J.B., Golub J.P.* // Phys. Fluids. 1995. V. 7. N 1. P. 55–67.
- [4] *Vlachogiannis M., Bontozoglou V.* // J. Fluid Mech. 2001. V. 435. P. 191–215.
- [5] *Drosos E.I.P., Paras S.V., Karabelas A.J.* // Int. J. Mult. Flow. 2004. V. 30. P. 853–876.
- [6] *Chang H.-C.* // Annu. Rev. Fluid Mech. 1994. V. 26. P. 103–136.
- [7] *Chang H.-C., Demekhin E.A., Kalaidin E.* // J. Fluid Mech. 1995. V. 294. P. 123–154.
- [8] *Алексеев С.В., Антипин В.А., Гузанов В.В. и др.* // ДАН. 2005. Т. 405. № 2. С. 193–195.
- [9] *Демехин Е.А., Калайдин Е.Н., Шапарь С.М. и др.* // ДАН. 2007. Т. 413. № 2. С. 193–197.
- [10] *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 128–137.
- [11] *Кабов О.А.* // Труды Первой Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 1994. Т. 6. С. 90–95.
- [12] *Kabov O.A., Chinnov E.A.* // Russian Journal Engineering Thermophysics. 1997. V. 7. N 1–2. P. 1–34.
- [13] *Кабов О.А.* // Теплофизика и аэродинамика. 1998. Т. 5. № 4. С. 597–602.
- [14] *Frank A.M., Kabov O.A.* // Phys. Fluids. 2006. V. 18. P. 032107-1–032107-10.
- [15] *Чиннов Е.А., Жуковская О.В.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 9. С. 87–94.
- [16] *Чиннов Е.А., Жуковская О.В., Шарина И.А. и др.* // ТВТ. 2006. Т. 44. № 6. С. 903–912.
- [17] *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* // ТВТ. 2004. Т. 42. № 2. С. 269–278.
- [18] *Чиннов Е.А., Харламов С.М., Сапрыкина А.В. и др.* // Теплофизика и аэродинамика. 2007. Т. 14. № 2. С. 249–255.