

03

Влияние искусственных возмущений на формирование структур в неизотермической пленке жидкости

© Е.А. Чиннов, О.В. Жуковская

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 13 декабря 2005 г.

Проведено экспериментальное исследование влияния искусственных возмущений на формирование структур при течении пленки воды по вертикальной пластине с нагревателем размером 150×150 mm. Воздействие теплового потока на волновое течение приводит к формированию периодически стекающих струй и тонкой пленки между ними. Установлено, что искусственные возмущения в определенном диапазоне длин волн вызывают изменение количества струй на нагревателе. Определена „наиболее опасная длина волны искусственных возмущений“.

PACS: 47.15.gm

Введение. Исследование неустойчивости течения пленки жидкости, возникновения трехмерных деформаций и развития струйных течений на ее поверхности важно для понимания механизма теплообмена и кризисных явлений при теплоотдаче к пленке.

В предшествующих работах изучалось, как правило, естественное формирование струй на поверхности нагреваемой пленки жидкости. Обнаружены различные механизмы формирования струй в неизотермических пленках жидкости [1,2], выделено два режима *A* и *B*.

В режиме *A* под действием термокапиллярных сил, направленных против течения, происходило утолщение пленки. При достижении пороговой плотности теплового потока течение разделялось на вертикальные струи, следующие с определенной длиной волны Λ , и тонкую пленку между ними. Происходило формирование регулярных структур в режиме *A*, обнаруженных и исследованных в [3–5].

Как показано в [2], режим *B* является следствием наложения двух механизмов неустойчивости: трехмерной гидродинамической и

термокапиллярной. Деформации на поверхности пленки появляются в результате развития гидродинамической неустойчивости на нагревателях достаточной ширины и длины при $Re > 5$ в области формирования двумерных или трехмерных волн. Под действием термокапиллярных сил, направленных от более горячих областей к холодным, происходит рост деформации поверхности пленки. Формирование струйного течения происходит постепенно с ростом теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя.

Структуры двух типов A и B различаются уровнем теплового потока, необходимого для их возникновения, величиной и характером зависимости расстояния между струями от плотности теплового потока и числа Рейнольдса.

К настоящему времени структуры A обнаружены экспериментально только при $Re \leq 12$ (имеется только 2 точки $Re = 22$ и $Re = 24$, указывающие на возможность их существования при больших Re). Теоретические исследования ограничены анализом течения неизотермической безволновой пленки жидкости при малых числах Рейнольдса. Подтверждено существование структур A при $Re \leq 2$, а формирование структур в режиме B еще не изучалось. В большинстве теоретических работ рассматривалось формирование структур в пленках на нагревателях фиксированной длины в направлении течения пленки и с бесконечной шириной. Исследовалось развитие малых периодических возмущений в поперечном направлении на поверхности пленки, в то время как экспериментально структуры A были получены в результате развития возмущений, образующихся на боковых краях локальных нагревателей.

Существует необходимость более глубокого понимания природы возникновения структур. В работе выполнено исследование влияния искусственных стационарных трехмерных возмущений на формирование струй на поверхности неизотермической пленки жидкости. Изменение расстояния между возмущаемыми цилиндрами позволило определить наиболее опасную длину волны возмущений для различных чисел Рейнольдса пленки.

Экспериментальная установка. Экспериментальное исследование влияния искусственных возмущений на формирование структур в пленке воды проводилось на экспериментальном стенде, включающем рабочий участок с нагревателем размером 150×150 mm, расположенным на вертикальной пластине. Подробное описание экспериментальной установки приведено в [6]. Расстояние от распределительного устройства

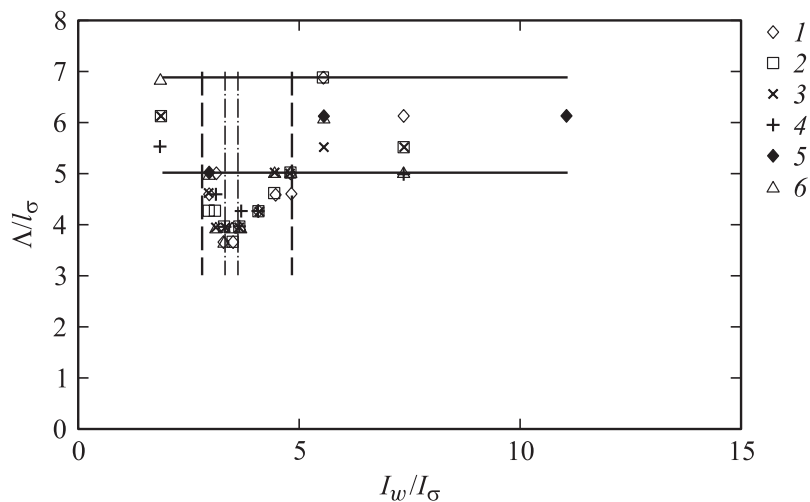


Рис. 1. Зависимость безразмерного расстояния между струями на поверхности пленки воды от безразмерного расстояния между цилиндрами: 1 — $Re = 7.7$, 2 — $Re = 14.4$, 3 — $Re = 28.2$, 4 — $Re = 38.2$, 5 — $Re = 22$, 6 — $Re = 20.7$.

до нагревателя составляло 120 мм. Число Рейнольдса изменялось от 10 до 40 ($Re = \Gamma/\mu$, где Γ — удельный массовый расход жидкости, μ — коэффициент динамической вязкости жидкости). Начальная температура жидкости равнялась $T_0 = 24^\circ\text{C}$. Для создания возмущений использовалась механическая система расположенных в горизонтальную линию цилиндров диаметром 2 мм, которая опускалась в пленку жидкости выше верхнего края нагревателя на 10–17 мм. Расстояние l_w между цилиндрами изменялось от 5 до 30 мм. Количество струй на поверхности пленки жидкости в зоне нагрева регистрировалось с помощью цифровых фото- и видеокамер.

Результаты. В отсутствие теплового потока изменение картины распространения трехмерных волн по поверхности пленки при различных значениях l_w не наблюдалось. При нагреве пленки на структуру течения (количество струй и соответственно расстояния между ними) существенное влияние оказывает величина l_w .

На рис. 1 представлена зависимость безразмерного расстояния Δ/l_σ между струями на поверхности пленки жидкости в области нагрева-

теля от безразмерного расстояния между возмущающими цилиндрами l_w/l_σ (l_σ — капиллярная постоянная = $[\sigma/(g\rho)]^{1/2}$, σ — коэффициент поверхностного натяжения, g — ускорение свободного падения, ρ — плотность жидкости). Видно, что существует область $2.8 < l_w/l_\sigma < 4.8$, ограниченная штриховыми вертикальными линиями, где искусственные возмущения могут значительно уменьшать расстояние между струями. Вне этой области возмущения не оказывают влияния на формирование струй. Безразмерное расстояние между струями ограничено диапазоном $5 < \Lambda/l_\sigma < 7$ (горизонтальные сплошные линии, рис. 1).

При $2.8 < l_w/l_\sigma < 4.8$ безразмерное расстояние между струями уменьшается от 5 до 3.6. При $3.3 < l_w/l_\sigma \leq 3.6$ (штрихпунктирные вертикальные линии, рис. 1) на поверхности пленки формировалось максимальное число струй с минимальным расстоянием между ними $\Lambda/l_\sigma = 3.6$. Реализовывалась „наиболее опасная“ длина волны возмущений. Существующий на поверхности пленки режим развития естественно образующейся неустойчивости (B) полностью подавлялся.

На рис. 2 показана зависимость безразмерного расстояния между струями от плотности теплового потока q на поверхности нагревателя для двух режимов их формирования A и B . Приведены данные для нагревателей размером 150×150 и 60×120 мм при разных длинах пробега пленки до верхнего края нагревателя X_n и числах Рейнольдса. Штрихпунктирными линиями показаны тренды, описывающие влияние теплового потока на расстояние между струями для режимов A и B . Видно, что диапазоны изменения расстояний между струями и характер влияния плотности теплового потока для указанных режимов различны. Область характерных расстояний между струями в режиме B , выделенная сплошными горизонтальными линиями, соответствует области невозмущенного течения (рис. 1). Диапазон изменения расстояния между струями $3.6 < \Lambda/l_\sigma < 5$ за счет искусственных возмущений показан в нижней части рис. 2. Видно, что этот диапазон располагается в области формирования регулярных структур в режиме A .

На рис. 3 представлено обобщение опытных данных по влиянию Re на безразмерное расстояние между струями. Кроме вышеуказанных нагревателей приведены данные по формированию структур A на нагревателях размером 6.5×13 и 2.2×68 мм. Сплошной линией

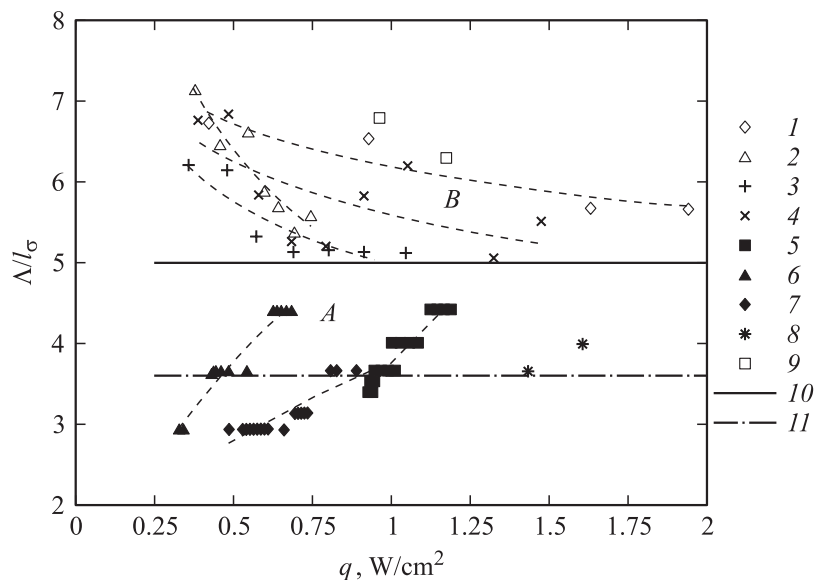


Рис. 2. Сопоставление области искусственных возмущений с естественно возникающими структурами *A* и *B* для пленок воды: *1* — размер нагревателя 150×150 mm, $X_n = 41$ mm, $Re = 44.2$, [1]; *2* — 150×150 mm, $X_n = 41$ mm, $Re = 10.4$, [1]; *3* — 150×150 mm, $X_n = 120$ mm, $Re = 22$, [2]; *4* — 150×150 mm, $X_n = 120$ mm, $Re = 33$, [2]; *5* — 60×120 mm, $X_n = 63$ mm, $Re = 5.5$, [2]; *6* — 60×120 mm, $X_n = 63$ mm, $Re = 2.05$, [2]; *7* — 60×120 mm, $X_n = 63$ mm, $Re = 4$, [2]; *8* — 60×120 mm, $X_n = 396$ mm, $Re = 6.5$; *9* — 60×120 mm, $X_n = 63$ mm, $Re = 22$, [2]; *10* — граница области струйных течений в режиме *B*; *11* — наиболее опасные возмущения.

показаны границы между режимами при естественном формировании струй. Для естественно образующихся возмущений при $Re < 4$ зарегистрирован только режим *A*, а при $Re > 25$ только *B*. При $4 < Re < 25$ на протяженных нагревателях с длиной по потоку $L = 60, 150$ mm наблюдалось сосуществование двух режимов неустойчивости. Штриховой линией выделена область искусственных возмущений, с помощью которых можно воздействовать на структуры типа *B*, изменяя длину волны, а штрихпунктирной линией показана длина волны „наиболее опасных возмущений“. Видно, что диапазон длин

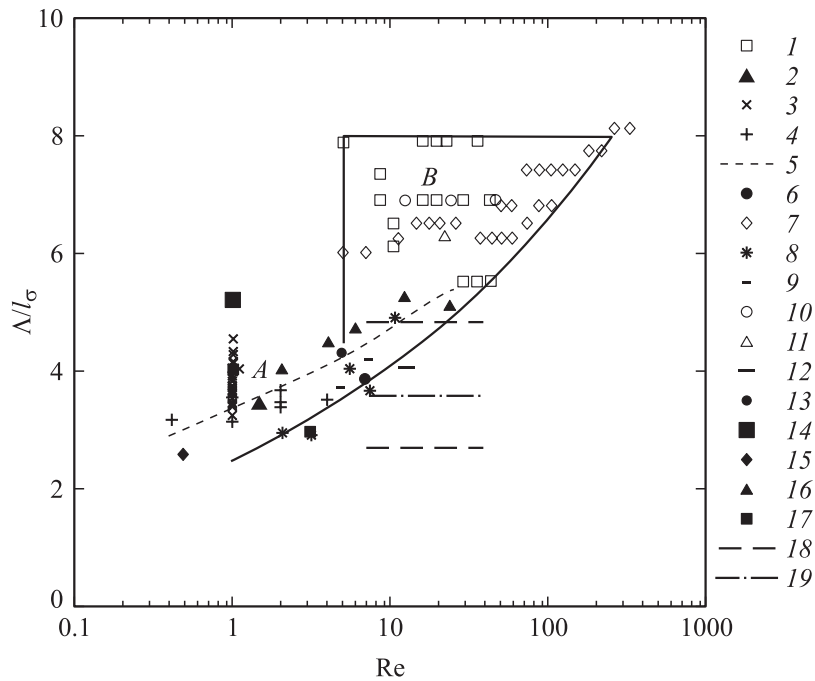


Рис. 3. Обобщение опытных данных по влиянию числа Рейнольдса пленки на безразмерное расстояние между струями: 1 — вода, размер нагревателя 150×150 mm, [1]; 2 — МД-3Ф, 6.5×13 mm, [5]; 3 — МД-3Ф, 2.2×68 mm, 4×68 mm, [2]; 4 — 25%-ный раствор спирта, 6.5×13 mm, [3]; 5 — подковообразные структуры, режим А, [5]; 6 — FC-72, 150×150 mm, [1]; 7 — FC-72, 150×150 mm, [1]; 8 — вода, 60×120 mm, [2]; 9 — FC-72, 60×120 mm, [2]; 10 — FC-72, 60×120 mm, [2]; 11 — вода, 60×120 mm, [2]; 12 — вода, 6.55×22 mm, [2]; 13 — расчет из [10]; 14 — расчет из [9]; 15 — расчет из [11]; 16 — расчет из [8]; 17 — вода, проволока диаметром $30 \mu\text{m}$, [2]; 18 — граница влияния искусственных возмущений; 19 — наиболее опасные возмущения.

волн искусственных возмущений, приводящих к изменению расстояния между струями, и „наиболее опасная“ длина волны возмущений не зависят от числа Re (рис. 1,3). На рис. 3 выполнено сопоставление полученных экспериментальных данных с известными теоретическими работами. Авторы работ [7,8] пренебрегли левой частью уравнения

энергии. Для многих экспериментов по формированию струй в режиме $A\varepsilon = h_0/\Lambda_A = 10^{-2}-10^{-1}$, $Pr = 6-14$, $Pr\varepsilon = 10^{-1} - 1$ и пренебрежение левой частью уравнения энергии не обосновано (h_0 — начальная толщина пленки). В [9] использовалось линейное распределение температуры поперек пленки. Однако рассматривая уравнение энергии для плоской пленки, легко показать, что при адиабатических условиях на поверхности пленки при $q = \text{const}$, распределение температуры поперек пленки будет описываться полиномом 4 степени. В работе [10] исследовалась устойчивость течения двумерной пленки жидкости с неравномерным распределением температуры на свободной границе и определены условия перехода к трехмерному струйному течению. Формирование структур на поверхности пленки в режиме A под действием термокапиллярных сил исследовано в [11], где численно решались уравнения Навье–Стокса в полной постановке. Несмотря на указанные недостатки работ и то обстоятельство, что расчеты выполнены для другого диапазона чисел Рейнольдса ($Re = 0.5-2$), теоретические данные соответствуют экспериментально определенному диапазону волн неустойчивости.

Полученные экспериментальные результаты дают новый материал для построения новых более точных математических моделей процесса. Знания о механизмах и способах управления формированием структур позволяет достигнуть максимальной интенсивности теплоотдачи в стекающих пленках жидкости. В дальнейших исследованиях планируется изучить влияние искусственных возмущений разной интенсивности на формирование структур в более широком диапазоне чисел Рейнольдса пленки.

Заключение. Обнаружена область, в которой искусственные возмущения в неизотермической стекающей пленке жидкости изменяют расстояние между струями. Диапазон длин волн в этой области соответствует ранее исследуемой зоне формирования регулярных структур в режиме A . Однако в отличие от режима A длина волны наиболее опасных искусственных возмущений не зависит от числа Рейнольдса пленки. Искусственные возмущения могут изменять расстояние между струями при более высоких по сравнению с режимом A значениях чисел Рейнольдса, что позволяет осуществлять управление процессом в более широком диапазоне параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 05-08-33325, и ФЦНТП, Государственный контракт № 002.

Список литературы

- [1] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 128–137.
- [2] Чиннов Е.А. Гидродинамика и теплообмен в капиллярных течениях с естественной циркуляцией. Дис. . . . докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2004. 347 с.
- [3] Kabov O.A., Diatlov A.V., Marchuk I.V. // Proc. of the First Int. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. 1995. V. 1. P. 203–210.
- [4] Kabov O.A., Marchuk I.V., Chupin V.M. // Russ. J. Engng Thermophys. 1996. V. 6. N 2. P. 104–138.
- [5] Kabov O.A., Chinnov E.A. // Russ. J. Engng Thermophys. 1997. V. 7. N 1/2. P. 1–34.
- [6] Chinnov E.A., Kabov O.A., Marchuk I.V., Zaitsev D.V. // Intern. J. Heat Technol. 2002. V. 20. N 1. P. 69–78.
- [7] Scheid B., Oron A., Colinet P. et al. // Physics of Fluids. 2002. V. 14. P. 4130–4151.
- [8] Skotheim J.M., Thiele U., Scheid B. // J. Fluid Mech. 2003. V. 475. P. 1–19.
- [9] Kalliadasis S., Kiyashko A., Demekhin E.A. // J. Fluid Mech. 2003. V. 475. P. 377–408.
- [10] Sharyпов O.V., Medvedko K.A. // Russ. J. Engng Thermophys. 2000. V. 10. N 4. P. 315–336.
- [11] Frank A.M. // European Journal of Mechanics B/Fluids. 2003. V. 22. P. 445–471.