

УДК 536.423.4

## **Волновые характеристики нагреваемой пленки при воздействии внешних возмущений\***

**Е.А. Чиннов, А.Д. Назаров, А.Ф. Серов**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: nazarov@itp.nsc.ru

Экспериментально исследовано влияние искусственных возмущений на формирование структур при течении пленки воды по вертикальной пластине с нагревателем. Для измерения толщины пленки применен восьмиканальный емкостный датчик. Показано, что искусственные возмущения на поверхности пленки жидкости могут существенно изменять расстояние между струями от значений, соответствующих термокапиллярно-волновому режиму формирования струй, до значений, близких к термокапиллярному режиму. При этом расстояние между струями может быть изменено при более высоких по сравнению с термокапиллярным режимом значениях чисел Рейнольдса. Искусственные возмущения не приводят к существенному изменению относительной амплитуды крупных волн, но оказывают влияние на характер ее зависимости от плотности теплового потока.

**Ключевые слова:** интенсификация теплообмена, волновые характеристики, искусственные возмущения на поверхности пленки, термокапиллярно-волновой режим формирования струй, изменения относительных амплитуд крупных волн.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В предшествующих работах изучалось, как правило, естественное формирование струй на поверхности нагреваемой пленки жидкости. Обнаружены различные механизмы формирования струй в неизотермических пленках жидкости [1], выделено два режима: термокапиллярный (А) и термокапиллярно-волновой (Б).

В режиме А под действием термокапиллярных сил, направленных против течения, образовывалось утолщение пленки в виде горизонтального вала. При достижении пороговой плотности теплового потока течение разделялось на вертикальные струи, вытекающие из вала, с определенной длиной волны  $\Lambda$  и тонкую пленку между ними. Происходило формирование регулярных структур в режиме А, обнаруженных и исследованных в работах [2, 3].

Термокапиллярно-волновой режим Б возникает на нагревателе, расположенном на расстоянии от истока жидкости, при котором на поверхности пленки при  $Re > 5$  развивается гидродинамическая неустойчивость в виде двумерных и трехмерных волн. Под действием термокапиллярных сил, направленных от более горячих областей к холодным, происходил рост деформации поверхности пленки. Формирование струйного течения осуществлялось постепенно с ростом теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя [4, 5]. В этих работах использован

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 05-08-33325-а, 06-01-00360-а) и СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 111).

восьмиканальный емкостный датчик локальной толщины пленки жидкости, позволяющий исследовать динамику трехмерных волновых течений и изменение поперечного профиля неизотермической пленки жидкости при формировании струй в режиме Б. Обнаружено, что в межструйной области толщина пленки и амплитуда волн уменьшались с увеличением плотности теплового потока. На гребнях струй распространяются трехмерные волны, где с ростом плотности теплового потока толщина пленки и амплитуда волн увеличиваются.

В межструйной области нагреваемой пленки средняя относительная амплитуда волн возрастала с уменьшением средней толщины, а на гребнях струй — убывала. Сравнение полученных результатов при одинаковых значениях безразмерного комплекса  $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$  [4] с опытными данными для изотермической пленки показало, что в межструйной области при высоких плотностях тепловых потоков величины относительной амплитуды значительно отличаются. Поперечные градиенты температуры вызывали уменьшение толщины пленки жидкости, а продольные градиенты — рост относительной амплитуды волн по сравнению с изотермическими течениями, что в конечном итоге приводило к появлению сухих пятен и разрыву пленки. На поверхности струй относительная амплитуда волн убывала с увеличением плотности теплового потока, т. к. в этих областях увеличивается средняя толщина пленки. Эффект уменьшения относительной амплитуды волн с увеличением средней толщины пленки наблюдается и при изотермическом течении в области исследуемых толщин пленки.

В работах [6, 7] на основании визуальных наблюдений и обработки видео- и фотоизображений получены первые данные по влиянию внешних возмущений в виде расположенных в горизонтальный ряд цилиндров на количество струй на нагревателе. Обнаружено, что искусственные возмущения на поверхности пленки жидкости могут существенно изменять расстояние между струями, а сценарий развития возмущений зависит от интенсивности, которая тем больше, чем больше диаметр цилиндра. Показано, что искусственные возмущения на поверхности пленки уменьшают расстояние между струями от значений, соответствующих течению типа Б, до значений, близких к типу А.

Однако в этих работах отсутствуют количественные характеристики волновых пленочных течений (толщины пленки, амплитуды волн и т. д.) при нагреве пленки и воздействии внешних возмущений.

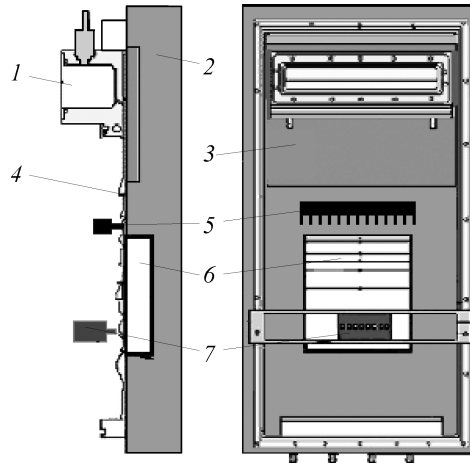
В настоящей работе с использованием восьмиканального емкостного измерителя локальной толщины пленки жидкости выполнено систематическое исследование влияния искусственных возмущений на волновые характеристики неизотермической пленки жидкости, стекающей по вертикальной поверхности с нагревателем размером 150×150 мм.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальное исследование влияния искусственных возмущений на формирование структур в пленке воды проводилось на стенде, подробно описанном в [8], включающем рабочий участок с нагревателем размером 150×150 мм, расположенным на вертикальной пластине, рис. 1. Пленкоформирователь 1, перемещаемый в вертикальной плоскости по пластине 2, использовался для создания пленки 4. Начальная температура жидкости поддерживалась термостабилизатором 3 и равнялась  $T_0 = 24$  °С. Расстояние от сопла распределительного устройства до верхнего края нагревателя  $X_n$  изменялось от 120 до 200 мм. Число Рейнольдса пленки имело диапазон от 7 до 40 ( $Re = \Gamma/\mu$ , где  $\Gamma$  — удельный массовый расход жидкости,  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости жидкости). На поверхности нагревателя выполнялось граничное условие  $q = \text{const}$ . Для создания возмущений

Рис. 1. Схема рабочего участка.

1 — пленкоформирователь, 2 — пластина, 3 — стабилизатор температуры, 4 — пленка жидкости, 5 — механическая система цилиндров, 6 — нагреватель, 7 — линейка емкостных датчиков.



использовалась механическая система образующих горизонтальную линию цилиндров 5, которая опускалась в пленку жидкости выше верхнего края нагревателя 6 на 10–17 мм. В экспериментах использовались цилиндры диаметров  $d_w = 1,5$  и 2 мм. Интенсивность возмущений считалась тем выше, чем больше диаметр цилиндров. 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.

Для измерения локальных характеристик пленки воды использовался многоканальный емкостный измеритель локальной толщины пленки жидкости, который основан на изменении емкости зонда от диэлектрической проницаемости рабочей жидкости. Принцип работы емкостного метода детально описан в литературе [9]. В эксперименте применены круглые коаксиальные датчики размером 0,5 мм, расположенные над поверхностью пластины с пленкой жидкости. В работе использовалось 8 датчиков, расположенных в линию на расстоянии  $X_t = 144$  мм от верхнего края нагревателя 7 (см. рис. 1). Расстояние между центрами датчиков составляло 2,57 мм и существенно превосходило размер самого датчика. Пространственное разрешение метода не хуже 1 мм. Погрешность измерения толщины пленки составляла 3 %. Обоснование использования емкостного метода для измерения толщины неизотермических пленок жидкости содержится в работе [10].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлена зависимость безразмерного расстояния  $\Lambda/l_\sigma$  между струями на поверхности пленки жидкости в области нагревателя от безразмерного расстояния между возмущающими цилиндрами  $l_w/l_\sigma$  ( $l_\sigma = [\sigma/(g\rho)]^{1/2}$  — капиллярная постоянная,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\rho$  — плотность жидкости).

В отсутствие теплового потока изменение картины распространения трехмерных волн по поверхности пленки воды при различных значениях  $d_w$  и  $l_w$  не наблюдалось. При нагреве пленки в области значений плотности тепловых потоков  $q > 0,4 q_b$  на структуру течения (количество струй и, соответственно, расстояния между ними) существенное влияние оказывают значения величин  $d_w$  и  $l_w$ ,  $q_b$  — плотность теплового потока,

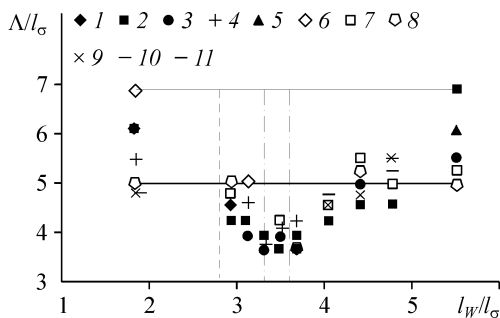


Рис. 2. Зависимость безразмерного расстояния между струями на поверхности пленки жидкости от безразмерного расстояния между цилиндрами.

$Re = 7,7$  (1), 14,4 (2, 8), 28,2 (3, 10), 38,2 (4, 11), 22 (5), 20,7 (6, 9), 7,7 (7),  $d_w = 2$  (1–6), 1,5 (7–11) мм.

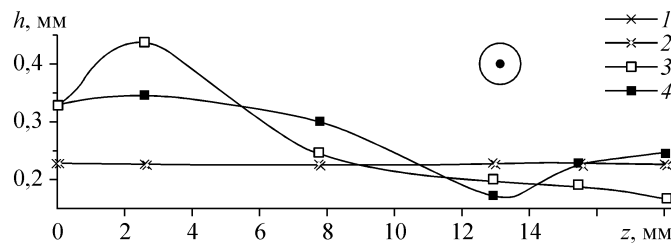


Рис. 3. Профиль толщины пленки жидкости для  $Re = 38$ : без теплового потока и возмущений (1), без теплового потока, с возмущением  $d_w = 2$  мм и  $l_w = 10$  мм (2),  $q = 1,26$  Вт/см<sup>2</sup> без возмущений (3),  $q = 1,26$  Вт/см<sup>2</sup> с возмущением  $d_w = 2$  мм и  $l_w = 10$  мм (4).

соответствующая разрыву пленки. На рис. 2 приведены данные для плотностей тепловых потоков в диапазоне  $0,7 q_b < q < q_b$ .

Видно, что существует область, ограниченная штриховыми линиями, где искусственные возмущения могут значительно уменьшать расстояние между струями. Для возмущений с  $l_w/l_\sigma < 2,8$  и  $l_w/l_\sigma > 4,8$  безразмерное расстояние между струями ограничено диапазоном  $5 < \Lambda/l_\sigma < 7$  (сплошные линии, см. рис. 2), что соответствует формированию струй в режиме Б без искусственных возмущений. При  $2,8 < l_w/l_\sigma < 4,8$  безразмерное расстояние между струями изменяется от 5 до 3,6. При  $3,3 < l_w/l_\sigma \leq 3,6$  (штрихпунктирные линии, рис. 2) на поверхности пленки формируется максимальное число струй с минимальным расстоянием между ними  $\Lambda/l_\sigma = 3,6$ . Реализуется наиболее опасная длина волны возмущений, которые полностью подавляют существующий на поверхности пленки режим (Б) развития естественно образующейся неустойчивости. В дальнейшем анализе рассматриваются только возмущения с наиболее опасной длиной волны.

На рис. 3 представлен профиль толщин для  $Re = 38$  и  $X_n = 200$  мм в нижней части нагревателя ( $X_t = 144$  мм), измеренный многоканальным емкостным измерителем. Приведены усредненные поперечные профили сечения пленки жидкости. Первый емкостный датчик располагался в точке  $Z = 0$ . Остальные датчики на расстоянии 2,57 мм по координате  $Z$ , направленной поперек течения пленки. В этом эксперименте датчики 3 и 5 не использовались. Кривые 1, 3 соответствует естественному формированию волн, 2, 4 — с возмущением  $d_w = 2$  мм,  $l_w = 10$  мм. При этом, кривые 3, 4 получены при тепловом потоке  $q = 1,26$  Вт/см<sup>2</sup>. В левой части графика в области второго датчика формировалась струя. Увеличение плотности теплового потока не влияло на расположение гребня струи, но приводило к росту деформации поверхности пленки. Данные при стационарном воздействии возмущения (2), показывают, что в отсутствие теплового потока искусственные возмущения не оказывают влияния на деформацию пленки жидкости.

При  $q = 1,26$  Вт/см<sup>2</sup> эти возмущения приводят к появлению струи в межструйной области.

Характерная динамика толщины пленки жидкости в межструйной области (датчик № 6,  $Z = 12,85$  мм) во времени приведена на рис. 4. Штриховыми линиями

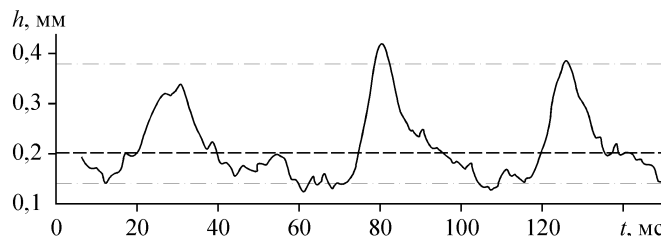


Рис. 4. Зависимость толщины пленки жидкости от времени,  $Re = 38$ .

показаны средние значения толщины пленок. Штрихпунктирными — значения  $(h_{\max})_{\text{cp}}$  и  $(h_{\min})_{\text{cp}}$ , которые были получены в результате статистической обработки зависимости локальной толщины от времени: измерялся период следования крупных волн, бралась произвольная выборка из 20 периодов, в каждом периоде определялись максимальная и минимальная толщина и вычислялись средние значения.

На рис. 5 представлены опытные данные для невозмущенной пленки жидкости в виде зависимости относительной амплитуды  $A$  от безразмерной плотности теплового потока  $q/q_b$ . Относительная безразмерная амплитуда  $A = ((h_{\max})_{\text{cp}} - (h_{\min})_{\text{cp}})/h_{\text{cp}}$  является отношением разницы между средними максимальной и минимальной толщинами пленки к средней толщине в области измерений. Линии усредняют опытные данные. Видно, что для исследуемых чисел Рейнольдса  $A$  возрастает в зависимости от плотности теплового потока в межструйной области (см. рис. 5, *a*) и убывает на гребне струи (см. рис. 5, *b*).

На рис. 6 представлено сравнение зависимостей относительных амплитуд крупных волн от безразмерной плотности теплового потока в разных точках измерений. Характерные относительные амплитуды волн на гребне струи (датчик № 2,  $Z = 2,57$  мм) для невозмущенного течения 1 и при погруженных цилиндрах 2 приведены на рис. 6, *a*. Относительная амплитуда крупных волн здесь убывает с увеличением плотности теплового потока, что соответствует закономерности распространения волн по гребням естественно образующихся струй. Влияние искусственных возмущений на величину и характер изменения относительной амплитуды крупных волн не проявляется.

В зоне измерения датчика № 6 ( $Z = 12,85$  мм) при воздействии внешних возмущений происходит утончение пленки жидкости. В этом месте межструйная область течения пленки сохраняется. Характер поведения относительной амплитуды волн от плотности теплового потока не изменяется (см. рис. 6, *b*) и соответствует

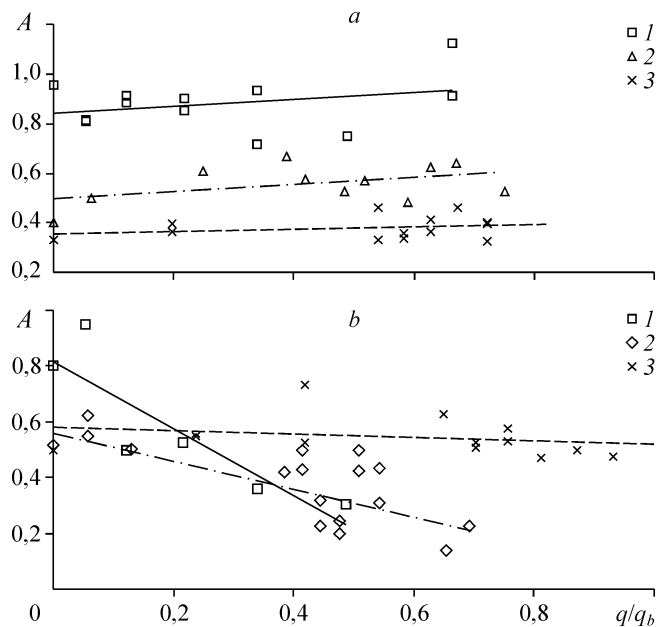


Рис. 5. Зависимость относительной амплитуды  $A$  от безразмерной плотности теплового потока.

$Re = 38$  (1), 33 (2), 22 (3), *a* — межструйная область, *b* — гребень струи.

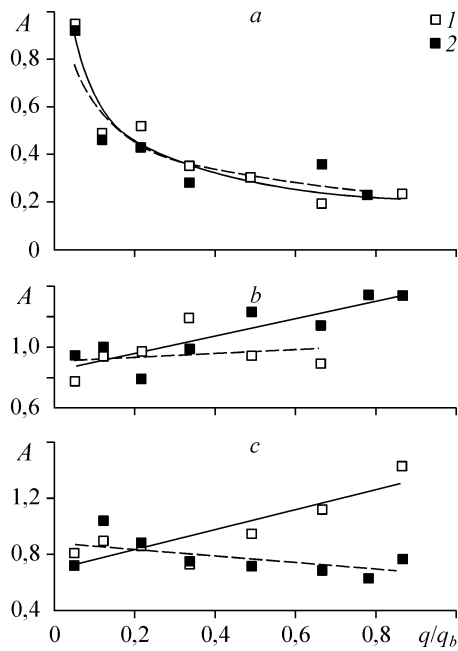


Рис. 6. Зависимость относительной амплитуды волн от безразмерной плотности теплового потока при  $Re = 38$  для разных емкостных датчиков: *a* — датчик № 2, *b* — датчик № 6, *c* — датчик № 8 (*1* — без возмущения, *2* — возмущение  $d_w = 2$  мм и  $l_w = 10$  мм).

зависимости для межструйной области при течении невозмущенной пленки жидкости (см. рис. 5, *a*). Однако за счет локального утончения пленки и возрастания влияния термокапиллярных сил при внешнем возмущении рост безразмерной амплитуды волн в зависимости от плотности теплового потока более значителен 2 по сравнению с невозмущенной пленкой 1 (см. рис. 6, *b*).

В районе  $Z = 18$  мм (рис. 6, *c*), в области минимального значения толщины пленки при искусственном возмущении происходит рост толщины пленки и формирование новой струи. Соответственно изменяется характер зависимости относительной амплитуды волн с увеличением плотности теплового потока. Характерное для межструйной области при естественном формировании возрастание амплитуды изменяется на наблюдаемое для струи убывание 2.

Как для невозмущенной, так и для возмущенной пленок жидкости максимальный рост относительной амплитуды волн наблюдается в области минимального значения толщины пленки жидкости, а наибольший спад, соответственно, в области максимального значения толщины. Значения относительной амплитуды волн за счет внешних возмущений при этом существенно не изменяются.

### ВЫВОДЫ

Установлено, что стационарные искусственные возмущения на поверхности пленки жидкости могут существенно изменять расстояние между струями.

Определен диапазон расстояний между возмущающими цилиндрами, в котором искусственные возмущения в неизотермической стекающей пленке жидкости изменяют расстояние между струями. Определена наиболее опасная длина волны искусственных возмущений.

С помощью многоканального емкостного измерителя получены характеристики пленочного течения: локальные толщины пленки, формы и амплитуды волн на струе и в межструйной области.

Показано, что искусственные возмущения не приводят к значительному изменению величины относительной амплитуды крупных волн, но оказывают влияние на характер ее зависимости от плотности теплового потока.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // ПМТФ. — 2003. — Т. 44, № 5. — С. 128.
2. Kabov O.A., Diatlov A.V., Marchuk I.V. Heat transfer from a vertical heat source to falling liquid film // Proc. of the First Inter. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. — 1995. — Vol. 1. — P. 203 c.

3. Кабов О.А., Чиннов Е.А. Heat transfer from a local heat source to a subcooled falling liquid film evaporating in a vapor-gas medium // Russ. J. Engng Thermophys. — 1997. — Vol. 7, No. 1/2. — P. 1.
4. Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Сапрыкина А.В., Серов А.Ф. Влияние термокапиллярных эффектов на волновые характеристики нагреваемой пленки жидкости // Теплофизика и аэромеханика. — 2007. — Т. 14, № 1. — С. 71.
5. Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Сапрыкина А.В., Жуковская О.В., Серов А.Ф. Волновые характеристики неізотермической пленки жидкости при формировании струй на ее поверхности // Теплофизика высоких температур. — 2007. — Т. 45, № 5. — С. 725.
6. Чиннов Е.А., Жуковская О.В. Влияние искусственных возмущений на формирование структур в неізотермической пленке жидкости // Письма ЖТФ. — 2006. — Т 32, № 9. — С. 87.
7. Чиннов Е.А., Жуковская О.В. Влияние интенсивности искусственных возмущений на формирование структур в нагреваемой пленке жидкости // Тр. IV Росс. нац. конф. по теплообмену, 23-27 октября 2006 года, Москва, в 8 томах. — М.: Изд-во МЭИ. — 2006. — Т. 5. — С. 195.
8. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Влияние трехмерных деформаций на локальный теплообмен к неоднородно нагреваемой стекающей пленке жидкости // Теплофизика высоких температур. — 2004. — Т. 42, № 2. — С. 269.
9. Алексеенко С.В., Назаров А.Д., Павленко А.Н., и др. Течение пленки жидкости по вертикальной поверхности // Теплофизика и аэромеханика. — 1997. — Т. 4, № 3. — С. 307.
10. Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Кабов О.А., Серов А.Ф. Измерение волновых характеристик неізотермической пленки жидкости емкостным методом // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Т. 11, № 3. — С. 247.

*Статья поступила в редакцию 29 мая 2008 г.*