

Е.А. Чиннов, С.М. Харламов, О.В. Жуковская, А.В. Сапрыкина

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ ТОЛЩИН НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫМ МЕТОДОМ

АННОТАЦИЯ

Для измерения поля толщин стекающей пленки использован флуоресцентный метод. Суть его заключается в том, что мгновенное распределение толщины пленки вдоль поверхности пластины определяется по интенсивности флуоресцентного излучения, испускаемого растворенным в рабочей жидкости красителем. Метод адаптирован для измерения поля толщин неизотермической пленки жидкости в области нагревателя. Зарегистрирован процесс формирования струй в нагреваемой пленке. Осреднение измерений позволило определить расстояние между струями и степень поперечной деформации пленки. Данные, полученные флуоресцентным методом, согласуются с результатами, полученными другими способами.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для изучения механизма теплообмена в стекающих пленках жидкости необходима новая информация о динамике деформированной поверхности.

В [1] в длинноволновом приближении исследовалась трехмерная неустойчивость стекающей неизотермической пленки жидкости. Показано, что двумерные волны всегда неустойчивы. Теоретически предсказано существование трехмерных синхронных и субгармонических волн. Исследование течения пленки 31%-го раствора глицерина в воде по наклонной поверхности, формирования и развития трехмерных волн содержится в работе [2]. Использовался флуоресцентный метод. Двухмерные волны на поверхности пленки формировались искусственным образом за счет возмущений давления с определенной частотой в пленкоформирователе. Экспериментально зарегистрированы теоретически предсказанные в [1] трехмерные синхронные и субгармонические волны.

В работах [3, 4] обнаружено два механизма формирования струй в неизотермической стекающей пленке жидкости. Как показано в [5], термокапиллярно-волновой режим является следствием наложения двух механизмов термокапиллярной неустойчивости и гидродинамической трехмерной неустойчивости. 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. При течении пленки жидкости по протяженным нагревателям достаточ-

ной ширины струи развиваются в области трехмерной неустойчивости волн. Причем формирование струйного течения происходит постепенно с ростом теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя. Неоднородности в толщине пленки жидкости поперек потока приводят к неоднородностям температуры на поверхности пленки жидкости. В области утончения пленки жидкости температура выше. Возникает поперечный градиент температуры, приводящий к появлению термокапиллярных касательных напряжений и увеличению деформации толщины пленки жидкости.

Измерения волновых характеристик неизотермической пленки одиночными оптоволоконным [6] и емкостным [7] датчиками позволили получить только локализованные в пространстве данные. Информация о поле толщин в нагреваемой пленке жидкости практически отсутствует.

2. УСТАНОВКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с насосом, рабочий участок, фильтр, ротаметры, трубопроводы и запорную арматуру. Подробное описание экспериментальной установки приведено в [8]. Экспериментальное исследование формирования струй в пленке воды проводилось на вертикальной пластине с нагревателем размером 150×150 мм. При течении пленок воды в области исследуемых значений Re на поверхности нагревателя реализовывалось условие $q = \text{const}$. Расстояние от распределительного устройства до нагревателя X_n составляло 200 мм. Число Рейнольдса пленки равнялось 33. Толщина пленки, рассчитанная по зависимости Нуссельта, составляла $h_{ms} = 0.203$ мм. Начальная температура жидкости равнялась $T_0 = 24$ °С.

Для определения толщины и волновых характеристик пленки использован модифицированный флуоресцентный метод измерения толщины. Этот метод впервые использован для нагреваемых пленок жидкости. В отличие от традиционных схем [2, 9] источник и приемник излучения расположены с одной стороны от поверхности пленки, рис. 1. В качестве красителя применялся Родамин 6Ж, который не является сурфактантом и флуоресцентные свойства которого не зависят от температуры при низких концентрациях раствора. Аппаратный комплекс системы основан на базе стандартного PIV

измерителя скорости фирмы “Dantec”. Для возбуждения флуорофора используется сдвоенный импульсный NdYAG лазер, освещающий на пластине площадку размерами 120×120 мм. Переизлученный флуорофором свет регистрируется работающей в режиме двойного кадра цифровой PIV- камерой с красным светофильтром. В таком режиме рабочий цикл камеры состоит из регистрации двух изображений через заданный интервал времени, который может программно задаваться в диапазоне от 2 мкс до 56 мс. Время экспозиции каждого кадра равно длительности лазерного импульса (10 нс). Максимальная частота повторения циклов при работе системы в непрерывном режиме – 7.5 Гц. При проведении измерений на площади 100×100 мм, система обеспечивает пространственное разрешение 0.1 мм. Точность определения толщины составляет 5 – 10 мкм для пленок толщиной 200 – 400 мкм.

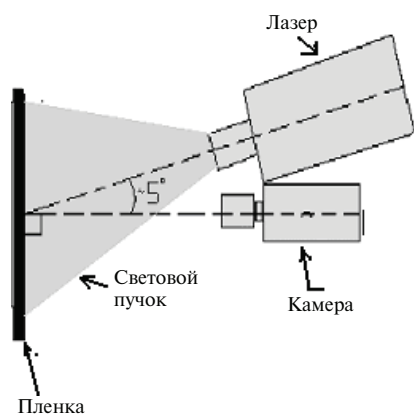


Рис. 1. Схема модифицированного флуоресцентного метода

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Профили мгновенных толщин пленки жидкости в горизонтальном сечении, расположенном на 6 мм выше нижнего края нагревателя, при разных плотностях теплового потока показаны на рис. 2 тонкими сплошными линиями. Выделена область шириной 30 мм в центральной части нагревателя. Жирной линией показано осредненное по 30 измерениям значение толщины пленки. На рис. 3 показаны фотографии распределения толщины пленки на нагревателе в области шириной 69 и высотой 131 мм. Сплошной горизонтальной линией выделены сечения, для которых построены соответствующие графики.

При увеличении плотности теплового потока динамика трехмерных волн (значения максимальных толщин пленки) возрастает. При $q = 0.64 \text{ Вт/см}^2$ наблюдается формирование струйных течений. Хотя на мгновенных фотографиях формирование струй еще нельзя обнаружить, усредненное значение толщины становится неравномерным. При $q = 1.15 \text{ Вт/см}^2$ струи четко различимы как в нижней части фотографий, так и на графике. Среднее и

максимальное (амплитуда крупных волн) значения толщин пленки на гребне струи возрастает, а в межструйной зоне убывает. Из фотографий также видно, что по гребню струи распространяются волны с большой амплитудой, а в межструйной зоне амплитуда волн существенно меньше. Ширина крупных трехмерных волн может существенно отличаться. В результате в межструйной области так же могут проходить отдельные волны с относительно высокой амплитудой.

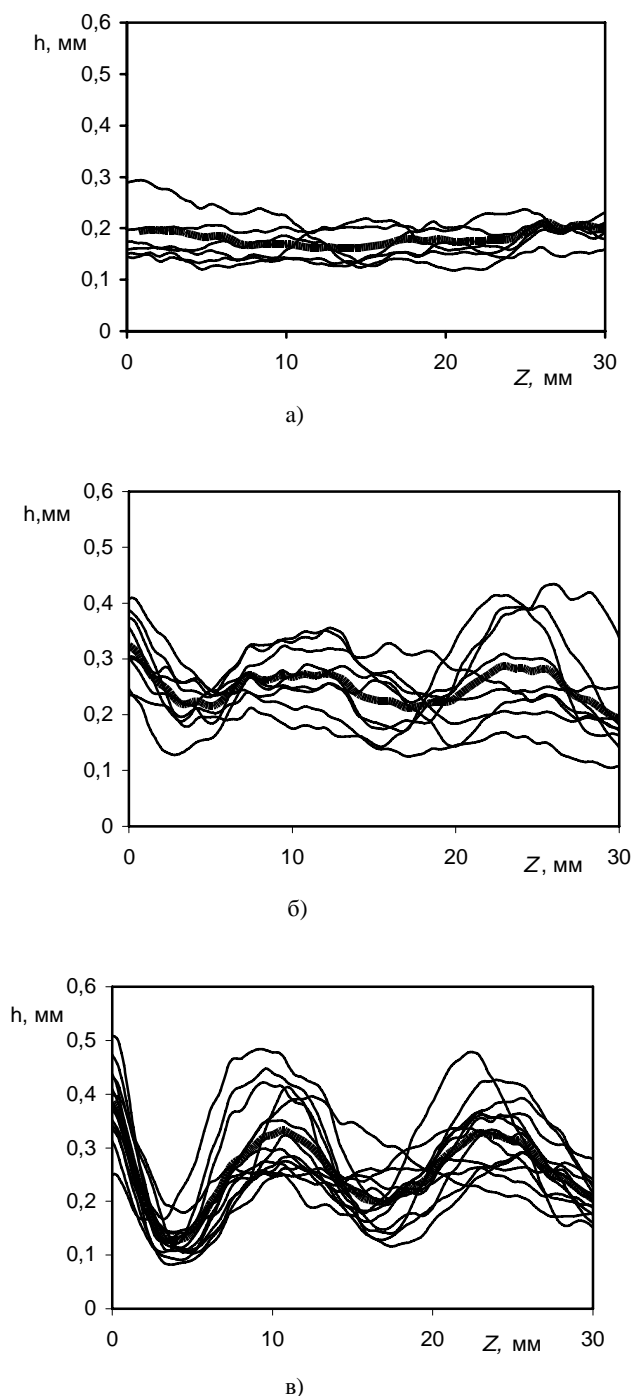


Рис. 2. Поперечные сечения пленки: а – $q = 0$; б – $q = 0.64 \text{ Вт/см}^2$; в – $q = 1.15 \text{ Вт/см}^2$

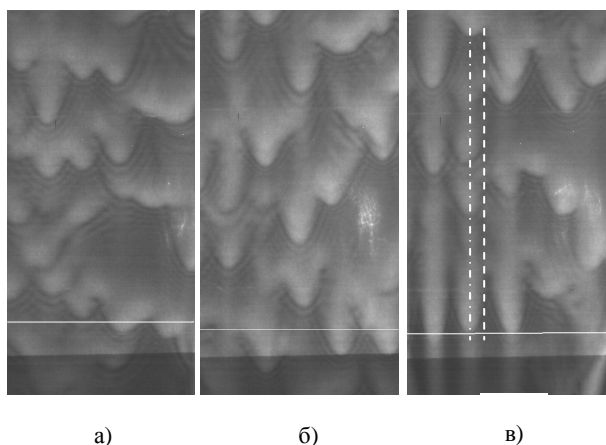
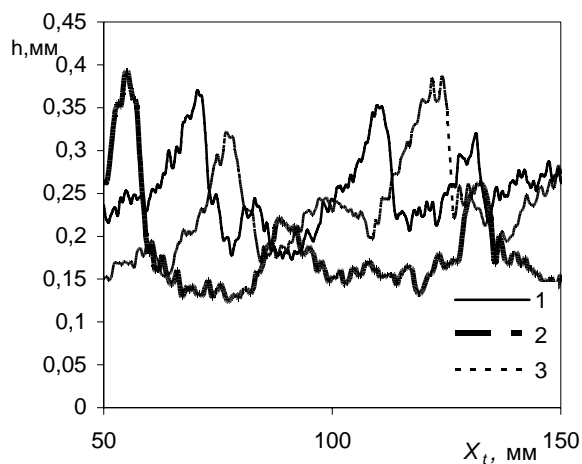
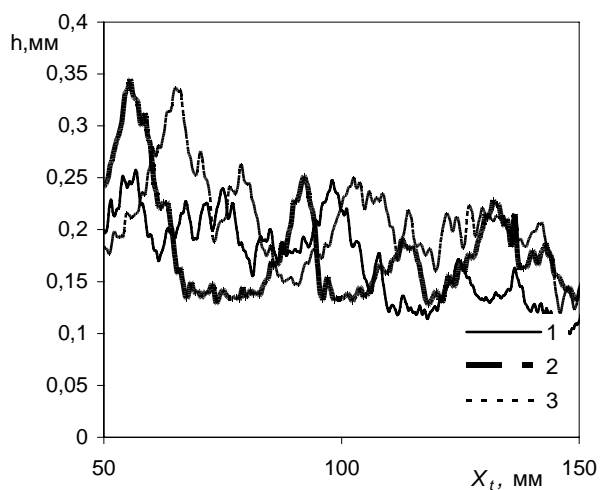


Рис. 3. Фотографии течения пленки жидкости при разных тепловых потоках: а - $q = 0$; б - $q = 0.64 \text{ Вт/см}^2$; в - $q = 1.15 \text{ Вт/см}^2$



а)



б)

Рис. 4. Сравнение волновых характеристик в струе (а) и межструйной области (б) при разных плотностях тепловых потоков: 1 - 1.21 Вт/см^2 ; 2 - 1.15 Вт/см^2 ; 3 - 1.04 Вт/см^2

На рис. 4 показаны волновые характеристики течения пленки в межструйной области и на гребне

струи вдоль течения пленки. Соответствующие сечения показаны на фотографии рис. 3, в штриховыми и штрихпунктирными вертикальными линиями. Видно, что среднее значение толщины и величина амплитуды крупных волн вдоль течения пленки убывает в межструйной зоне. Возрастание толщины и величина амплитуды крупных волн вдоль течения пленки на гребне струи не так выражено. В зависимости от начальной амплитуды крупных волн сценарии их развития могут быть различны. Можно выделить только преобладающие тенденции. Трудности вызывает определение средней амплитуды крупных волн в локальной области. Требуется слишком большое количество кадров через достаточно малые промежутки времени.

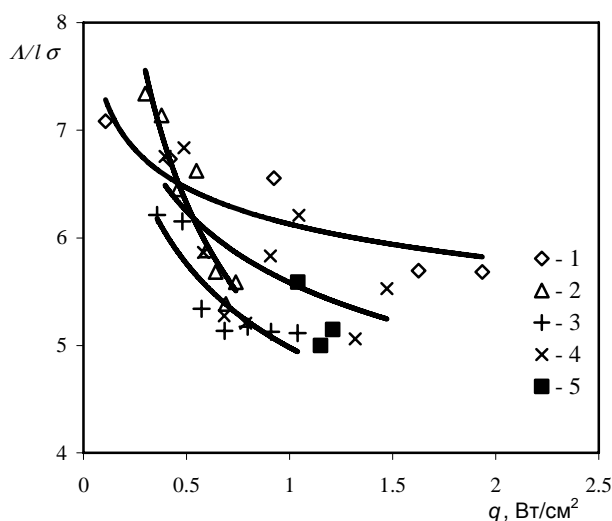


Рис. 5. Зависимости безразмерного расстояния между струями на поверхности пленки воды от плотности теплового потока: 1 - $Re = 44.2$, $X_n = 42 \text{ мм}$; 2 - $Re = 10.4$, $X_n = 42 \text{ мм}$; 3 - $Re = 22$, $X_n = 120 \text{ мм}$; 4 - $Re = 33$, $X_n = 120 \text{ мм}$; 5 - Вода, $Re = 33$, $X_n = 200 \text{ мм}$

Зависимость среднего безразмерного расстояния между струями, определенная на основании расчета термограмм [3, 5] от q , показана на рис. 5 (данные 1 - 4). При умеренных числах Рейнольдса $Re = 10.4$ ($X_n = 42 \text{ мм}$) наблюдалась значительная зависимость расстояния между струями от теплового потока, при высоких числах Рейнольдса $Re = 44.2$ влияние теплового потока ослабевало. Увеличение длины пробег пленки X_n приводило к снижению значения $A/l\sigma$. Данные, полученные флуоресцентным методом, обозначены цифрой 5.

Поперечные деформации, определяемые как разница между средней толщиной пленки на гребне струи и в межструйной области деленная на начальную толщину пленки $Def = (h_{стр} - h_{впад})/h_0$ (рис. 6), увеличиваются с ростом плотности теплового потока. Цифрами 1, 2 обозначены данные, полученные емкостным методом [5], а цифрой 3 флуоресцентным методом. Из рис. 5, 6 видно, что данные, полученные флуоресцентным методом, согласуются с результатами предыдущих исследований.

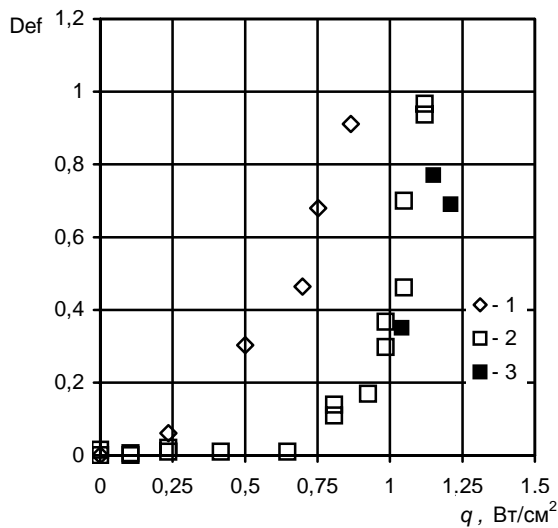


Рис. 6. Зависимости поперечной деформации для пленки воды от плотности теплового потока: 1 - $Re = 22$, $X_n = 120$ мм; 2 - $Re = 33$, $X_n = 120$ мм; 3- $Re = 33$, $X_n = 200$ мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены измерения поля толщин стекающей пленки жидкости с использованием флуоресцентного метода. Зарегистрирован процесс формирования струй в неизотермической пленке жидкости. Осреднение измерений позволило определить расстояние между струями и степень поперечной деформации пленки. Данные, полученные флуоресцентным методом, согласуются с ранее полученными результатами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-08-33325-а), ФЦНТП (Гос. контракт № 02.438.11.7002), гранта Президента РФ (поддержка ведущих научных школ № НШ-6749.2006.8) и СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 111).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$Def = (h_{стр} - h_{впад}) / h_0$ – критерий поперечных деформаций пленки;
 g – ускорение свободного падения, m/s^2 ;
 h – толщина пленки, мм;
 h_0 – начальная толщина пленки, мм;
 q – средняя плотность теплового потока, $Вт/см^2$;

l_σ – капиллярная постоянная, $= [\sigma / (g \rho)]^{1/2}$, мм;
 Re – число Рейнольдса пленки, $Re = \Gamma / \mu$;
 T_0 – начальная температура пленки, °C;
 X_n – расстояние от сопла до верхнего края нагревателя, мм;
 X_l – расстояние от верхнего края нагревателя, мм;
 Z – координата, направленная поперек течения пленки, мм;
 Γ – удельный массовый расход жидкости, кг/мс;
 μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, кг/мс;
 Λ – расстояние между гребнями струй, мм;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;
 ρ – плотность жидкости, $кг/м^3$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Joo S. W., Davis S.H. Instabilities of three-dimensional viscous falling films // J. Fluid Mech. 1992. V. 242. P. 529-547.
2. Liu J., Schneider J. B., Golub J.P. Three-dimensional Instabilities of Film Flows // Phys. Fluids. 1995. V. 7. No 1. P. 55-67.
3. Чиннов Е.А., Кабов О.А., Марчук И.В. Формирование струйных течений при стекании нагреваемой пленки жидкости // Третья Российская национальная конференция по теплообмену, Москва. М.: Изд-во Мэи, 2002. Т. 4. С. 331 – 334.
4. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 128 – 137.
5. Чиннов Е. А. Гидродинамика и теплообмен в капиллярных течениях с естественной циркуляцией: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2004. 347 с.
6. Зайцев Д.В., Чиннов Е. А., Кабов О.А., Марчук И.В. Экспериментальное исследование волнового течения пленки жидкости по нагреваемой поверхности // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 6. С. 31 – 37.
7. Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Кабов О.А., Серов А.Ф. Измерение волновых характеристик неизотермической пленки жидкости емкостным методом // Теплофизика и Аэромеханика. 2004. Т. 11. № 3. С. 441-447.
8. Chinnov E.A., Kabov O.A., Marchuk I.V., Zaitsev D.V. Heat transfer and breakdown of subcooled falling liquid film on a vertical middle size heater // Intern. J. Heat Technol. 2002. V. 20. No 1. P. 69 – 78.
9. Алексеенко С.В., Антипин В.А., Маркович Д.М., Харламов С.М. Уединенные трехмерные волны на вертикально стекающей пленке жидкости // Всероссийская конференция «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения», Бийск, 4-8 июля 2005 г.: Тез. док. С. 5-6.