

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

E. A. Chinnov, E. N. Shatskii, O. A. Kabov, Evolution of the temperature field at the three-dimensional wave front in a heated liquid film, *TVT*, 2012, Volume 50, Issue 1, 104–111

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt235>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.85

April 29, 2025, 14:12:40



**ТЕПЛОМАССООБМЕН
И ФИЗИЧЕСКАЯ ГАЗОДИНАМИКА**

УДК 532.62;536.4

**ЭВОЛЮЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ФРОНТЕ ТРЕХМЕРНОЙ
ВОЛНЫ В НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ**

© 2012 г. Е. А. Чиннов, Е. Н. Шатский, О. А. Кабов

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

Поступила в редакцию 22.09.2010 г.

С использованием скоростной инфракрасной съемки для измерения поля температур на поверхности пленки жидкости и флуоресцентной техники измерения толщины проведено экспериментальное исследование преобразования трехмерных волн в термокапиллярно-волновые структуры при течении пленки воды по вертикальной пластине с нагревателем. Показано, что температурные возмущения возникают в остаточном слое волновой пленки. Далее, по мере течения пленки вдоль нагревателя, на трехмерном фронте волны появляются температурные неоднородности поперек потока, которые за счет действия термокапиллярных сил приводят к деформации пленки жидкости и формированию струй.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование неустойчивости течения пленки жидкости, преобразования трехмерных волн в термокапиллярно-волновые структуры и развития струйных течений представляет интерес как с практической точки зрения для понимания механизма теплообмена, так и в теоретическом плане, являясь основой для построения более точных математических моделей пленочных течений.

Гидродинамические двухмерные волны в изотермических пленках жидкости неустойчивы к трехмерным возмущениям. Установлено, что длина волны неустойчивости к поперечным трехмерным возмущениям убывает с ростом числа Рейнольдса. При распаде двухмерных 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. В работе [3] исследовано распространение двухмерных и трехмерных волн по вертикально стекающей изотермической пленке воды при $Re = 10-100$ ($Re = \Gamma/\rho\nu$, где Γ – удельный массовый расход жидкости, ρ – плотность жидкости, ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости), а также воздействие на них искусственных возмущений. Показано, что при $Re < 20$ длина волны трехмерной неустойчивости возрастает до 30 мм и более. В этом случае по поверхности пленки движутся солитонообразные волны с достаточно большим расстоянием между ними.

Известно, что длина пробега пленки жидкости оказывает существенное влияние на волнообразование на ее поверхности. В [4] экспериментально изучена волновая динамика при течении пленок воды и водных растворов бутанола по плоской

вертикальной поверхности. Течение изучалось на плексигласовой пластине высотой 380 мм и шириной 100 мм. Толщина пленки измерялась датчиками на расстоянии 80, 190, 220, 330 и 360 мм соответственно от сопла пленкоформователя. Выделено три зоны влияния числа Рейнольдса на процесс установления амплитуды волн. При значениях числа Рейнольдса меньше 20 уже на расстояниях 190 мм от пленкоформователя амплитуда волн практически перестает возрастать и незначительно меняется с дальнейшим движением пленки. В работе [5] обнаружены четыре зоны влияния длины пробега пленки воды на волнообразование. Показано, что при расстоянии от пленкоформователя до верхнего края нагревателя более 300 мм и числах Рейнольдса меньше 20 по нагревателю распространялись солитонообразные волны.

При пленочном течении жидкости по нагреваемой поверхности, кроме гидродинамической неустойчивости, приводящей к развитию трехмерных волн, имела место также термокапиллярная неустойчивость, следствием которой являлось возникновение на поверхности пленки системы стационарных трехмерных структур в виде ряда струй с тонкой пленкой между ними. Струи формировались постепенно с ростом плотности теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя под действием термокапиллярных сил, направленных от более горячих областей к холодным. В работах [5–9] показано, что в области достаточно высоких тепловых потоков при $Re > 15$ расстояние между струями слабо зависит от числа Рейнольдса, наклона и длины пробега пленки. Показано, что два термокапиллярных эффекта проявляются в межструйной области по

мере увеличения плотности теплового потока. Поперечные градиенты температуры обуславливают существенное уменьшение толщины пленки жидкости в межструйной области, а продольные градиенты вызывают рост относительной амплитуды волн и числа Марангони по сравнению с изотермическими условиями. Это приводит к интенсификации локального теплообмена, а в конечном итоге — к разрыву пленки и появлению сухих пятен. Трехмерные волны распространяются по гребням струй. Абсолютные значения амплитуд пульсаций толщины и температуры увеличиваются на их поверхности, но относительная амплитуда волн и модифицированное число Марангони убывают с увеличением плотности теплового потока и слабо отличаются от изотермического течения. Основная часть исследований воздействия термокапиллярных сил на волновое движение пленки была выполнена при умеренных числах Рейнольдса ($Re = 15-45$). Изучались, как правило, волны, натекающие на нагреватель в области их формирования (расстояние от сопла пленкоформователя до верхнего края нагревателя изменялось от 40 до 200 мм). В работах [10–13] проводились экспериментальные исследования регулярных струйных течений в пленках жидкостей, стекающих по обогреваемым поверхностям. Изучены их характеристики. Подтверждено существование термокапиллярно-волнового режима течения. С использованием высокоскоростной термографической съемки и конфокального метода измерения распределения локальной толщины [13] показано существование термокапиллярных структур в остаточном слое жидкости между фронтами крупных волн.

Первые исследования естественной эволюции развитых трехмерных волн в термокапиллярно-волновые струи при нагреве вертикально стекающей пленки воды выполнены в [14, 15]. Зарегистрирован факт деформации подковообразных гидродинамических волн при их прохождении через нагреваемую область. Показано, что на фронте трехмерной волны при ее прохождении вдоль нагревателя появлялись температурные неоднородности, которые за счет действия термокапиллярных сил приводили к деформации пленки жидкости и формированию струй. Измерены расстояния между трехмерными волнами и струями в зависимости от плотности теплового потока.

Задачей данной работы являлось детальное экспериментальное исследование механизма преобразования развитых солитонобразных волн (расстояние от сопла пленкоформователя до верхнего края нагревателя X_n составляло 543 мм) в термокапиллярно-волновые структуры при гравитационном стекании нагреваемой пленки воды для $Re = 10.5$.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

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 мм, стабилизаторами температуры, удлиняющей пластиной и пленкоформователем. Подробное описание экспериментальной установки приведено в [7, 9]. Дистиллированная вода с помощью насоса подавалась в пленкоформователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Пленка стекала вертикально. Начальная температура воды T_0 при выходе из сопла пленкоформователя составляла 22°C . Число Рейнольдса пленки воды равнялось 10.5. В экспериментах проводились визуальные наблюдения с регистрацией изображения на цифровые видео- и фотокамеры. Мгновенное поле толщин пленки жидкости измерялось флуоресцентным методом [9].

В ходе визуальных наблюдений течения пленок воды проводилось мгновенное фотографирование течения на фотокамеру при различных значениях плотности теплового потока на нагревателе. Для калибровки снимков на нагревателе были отмечены отрезки с заданным расстоянием. По полученным фотографиям определялась функция распределения расстояний между гребнями трехмерных волн в направлении поперек потока. Рассматривались волны, гребни которых были расположены на одной прямой (поперек потока) или смещены по вертикали не более чем на 20 мм. Выбирались соседние гребни волн, и измерялось поперечное расстояние между ними.

Для регистрации поля температур на поверхности пленки жидкости использовался высокоскоростной инфракрасный сканер Titanium HD 570M. Он позволял измерять поле температур с разрешением до 640×512 пикселей, с частотой полных кадров до 115 Гц и чувствительностью 18 мК. Приемником излучения являлся КРТ-детектор, охлаждаемый до азотной температуры встроенной системой, работающей по циклу Стирлинга. Спектральный диапазон работы детектора составлял от 3.7 мкм до 4.8 мкм. Для пленок воды в этом диапазоне коэффициент излучения был близок к единице (черное тело). Сканирование поверхности пленок производилось с расстояния, не превышающего 1 м, что позволяло не учитывать ослабление излучения атмосферой. Предполагалось, что основное излучение принималось приемником с верхних 10 мкм толщины пленки жидкости [16].

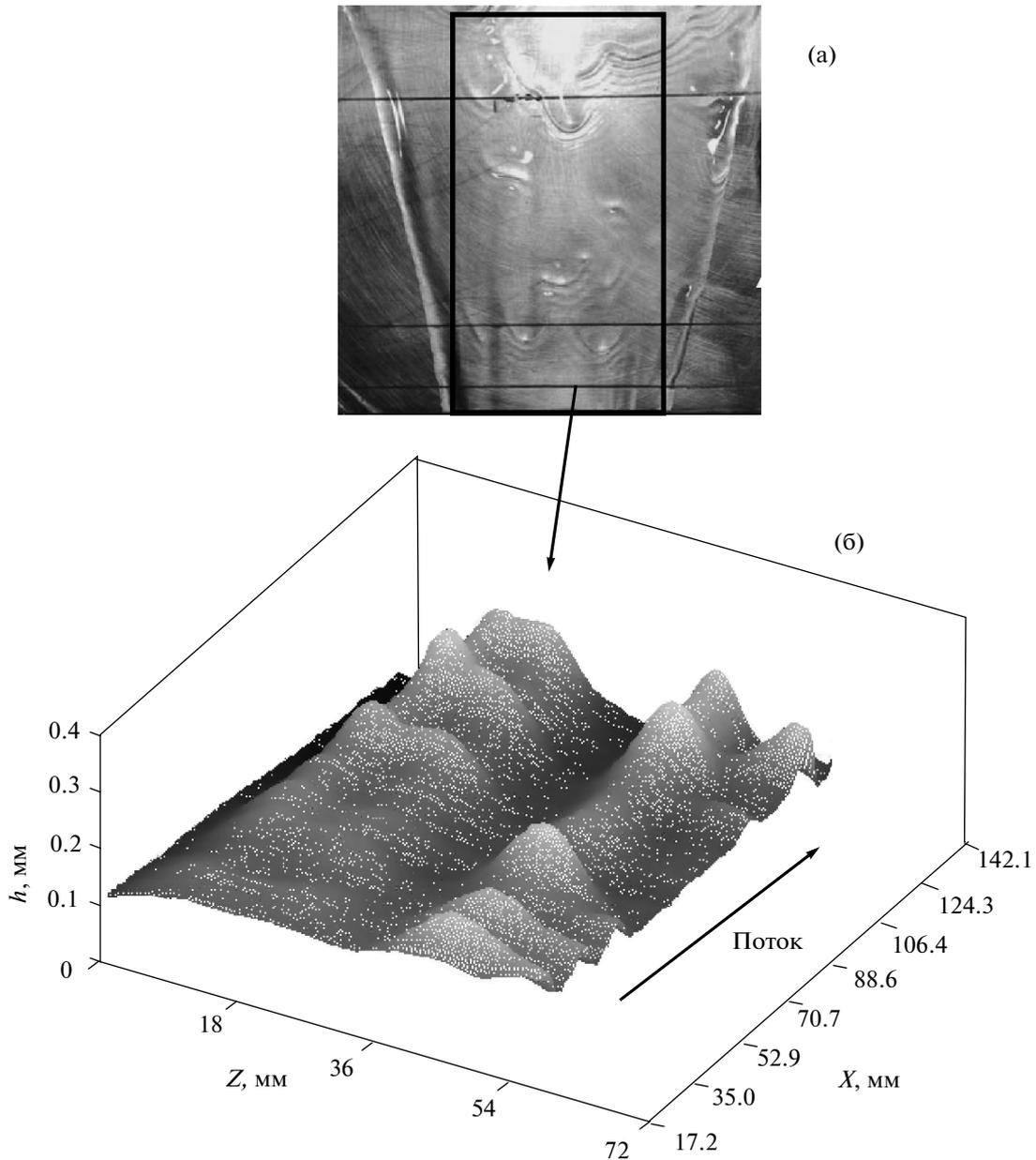


Рис. 1. Характерная картина течения пленки воды по нагревателю 150×150 мм, $q = 0.79$ Вт/см², $Re = 10.5$: (а) – цифровая фотография, (б) – восстановленное с помощью флуоресцентного метода поле толщины.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а представлен характерный режим течения пленки воды по нагревателю при величине плотности теплового потока 0.79 Вт/см². В этом режиме течение можно разделить на две части: течение волновой пленки, только поступившей на нагреватель, и струйное течение в нижней части нагревателя. Расстояние от пленкоформователя до нагревателя выбиралось таким образом, чтобы по нагревателю распространялись трехмерные солитообразные волны постоянной амплитуды [4, 5] ($X_n = 543$ мм). В нижней части

нагревателя течение разделось на струи, по которым происходило основное движение жидкости, и тонкую пленку между ними. На рис. 1 видно натекание крупного солитона на нагреватель в верхней части фотографии. По бокам расположены осушенные области, возникающие вследствие конечной ширины нагревателя и появления больших температурных градиентов на границе нагреватель–текстолит. В нижней части фотографии представлен ряд струй на поверхности пленки, по которым распространялись волны. Темной линией отмечено расстояние между струями.

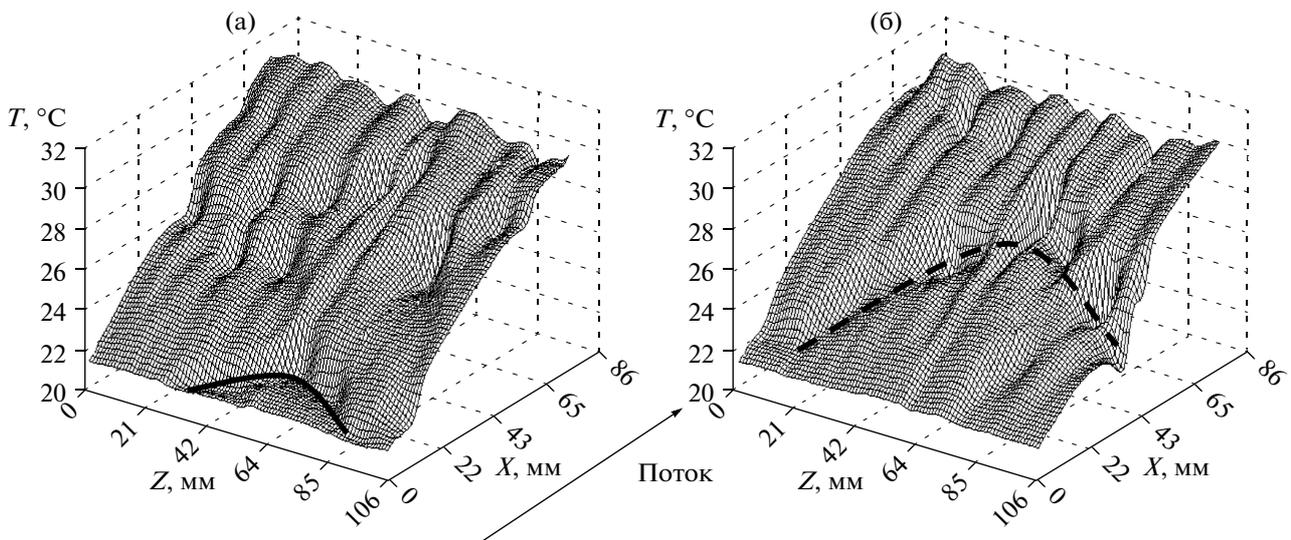


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности пленки при протекании крупной солитонобразной волны по нагревателю через 0.05 с (а) и 0.17 с (б) после прохождения верхней кромки нагревателя.

На рис. 1б показано распределение толщины при течении пленки воды по нагревателю, полученное флуоресцентным методом. Представлено течение в средней части нагревателя (выделено рамкой на рис. 1а). Направление потока показано стрелкой, X – продольная координата на нагревателе с отсчетом от верхней кромки нагревателя, Z – поперечная координата на нагревателе. Видно, что в межструйной области практически отсутствует волновое движение, в то время как по струям распространяются волны.

Можно выделить два типа волн на нагревателе: волны средних размеров и крупные солитоны. По данным измерения флуоресцентным методом средняя ширина волн среднего размера составляла 14 мм, а амплитуда (максимальная толщина) – 0.18 мм. Перепад температуры между гребнем волны и межструйной областью – 1.5–3 К. Перепад температуры между гребнем крупной волны и межструйной областью – 3–5 К. Ширина фронта крупного солитона составляла 25–35 мм, а амплитуда – 0.22–0.27 мм.

На рис. 2 показано изменение температурного поля на поверхности пленки жидкости при движении крупной солитонобразной волны вдоль нагревателя. Идентификация гребня волны происходила по неоднородностям температуры натекающей пленки. Так как толщина на гребне волны больше, соответственно температура его будет ниже температуры остаточного слоя [13]. Направление потока показано стрелкой, а верхняя кромка нагревателя соответствовала началу отсчета.

Движение волны по нагревателю можно разбить на 4 интервала. Отсчет времени происходил от момента пересечения гребнем волны верхней кромки нагревателя ($t_0 = 0$ с). Следующий момент

времени (t_1) наступал, когда ширина волны в области нагревателя достигала максимальной величины, т.е. волна полностью находилась на нагревателе. Затем следовал момент первого деформирования фронта (t_2), который определялся, когда на фронте возникали силы, не перпендикулярные линии фронта. Последний момент (t_3) соответствовал распаду фронта волны на струи.

На рис. 2а сплошной линией обозначен фронт натекающей волны в момент $t_1 = 0.05$ с ($Re = 10.5$, $q = 0.79$ Вт/см²). Перед фронтом наблюдались периодические температурные неоднородности с характерными температурными градиентами 0.05 К/мм. Градиенты температуры, возникавшие на самом фронте, имели величину 0.12 К/мм. Видно, что фронт волны практически не деформирован.

На рис. 2б показана температура поверхности пленки в $t_3 = 0.17$ с. Фронт прошедшей волны отмечен пунктирной линией. Видны неоднородности температуры, проходящие через фронт волны. Соответственно, толщина пленки на фронте изменялась и течение разбивалось на несколько волн, протекающих по гребням струй. Положение этих волн характеризовалось локальным минимумом температуры.

На рис. 3а представлена карта поверхностных термокапиллярных напряжений (показаны стрелками) при натекании крупной солитонобразной волны на нагреватель в момент времени $t_1 = 0.05$ с, которые пропорциональны градиентам температуры ($\tau_{sur} = -grad\sigma = -\frac{\partial\sigma}{\partial T} grad T$) на поверхности пленки, и изолинии температуры поверхности пленки. Фронт выделен сплошной ли-

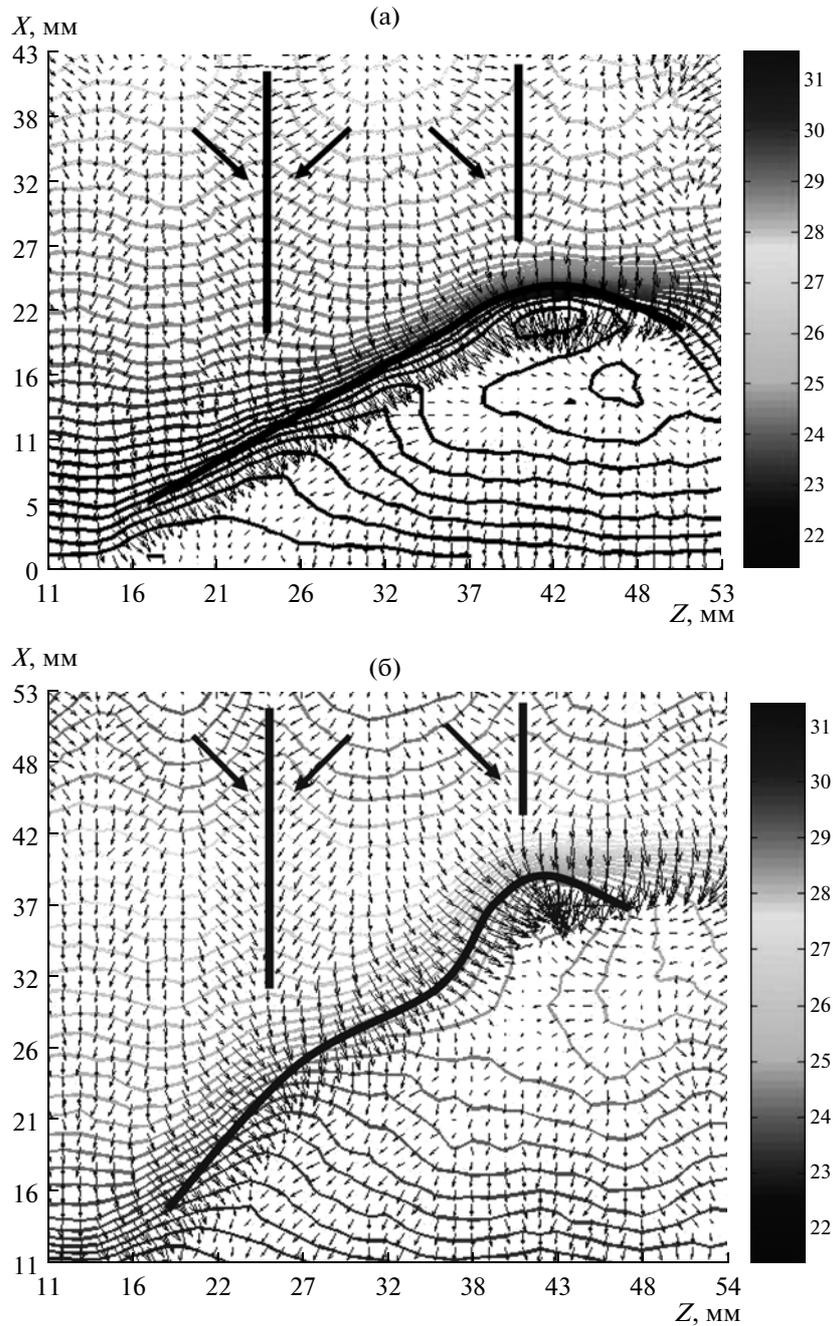


Рис. 3. Касательные напряжения на поверхности пленки в моменты времени: (а) – $t_1 = 0.05$ с, (б) – $t_4 = 0.17$ с.

нией. Перед фронтом наблюдалось уплотнение изолиний, так как перепад температур на фронте волны и в остаточном слое перед фронтом значителен. Напряжения направлены перпендикулярно линии фронта волны и не вызывают его деформацию. Перед фронтом видны температурные неоднородности с постоянным расстоянием между ними. Вертикальными линиями показаны гребни этих неоднородностей. К ним направлены векторы касательных напряжений. Это расстоя-

ние совпадает с расстоянием между струями, формирующимися при более высоких числах Рейнольдса ($Re = 15-45$) [5, 6]. На фронте возмущения не наблюдаются. Характерные градиенты температуры в остаточном слое имеют величину 0.1 К/мм.

Следующий момент движения волны показан на рис. 3б. Карта касательных напряжений построена в момент времени $t_3 = 0.17$ с. На рисунке выделены фронт волны и гребни температурных

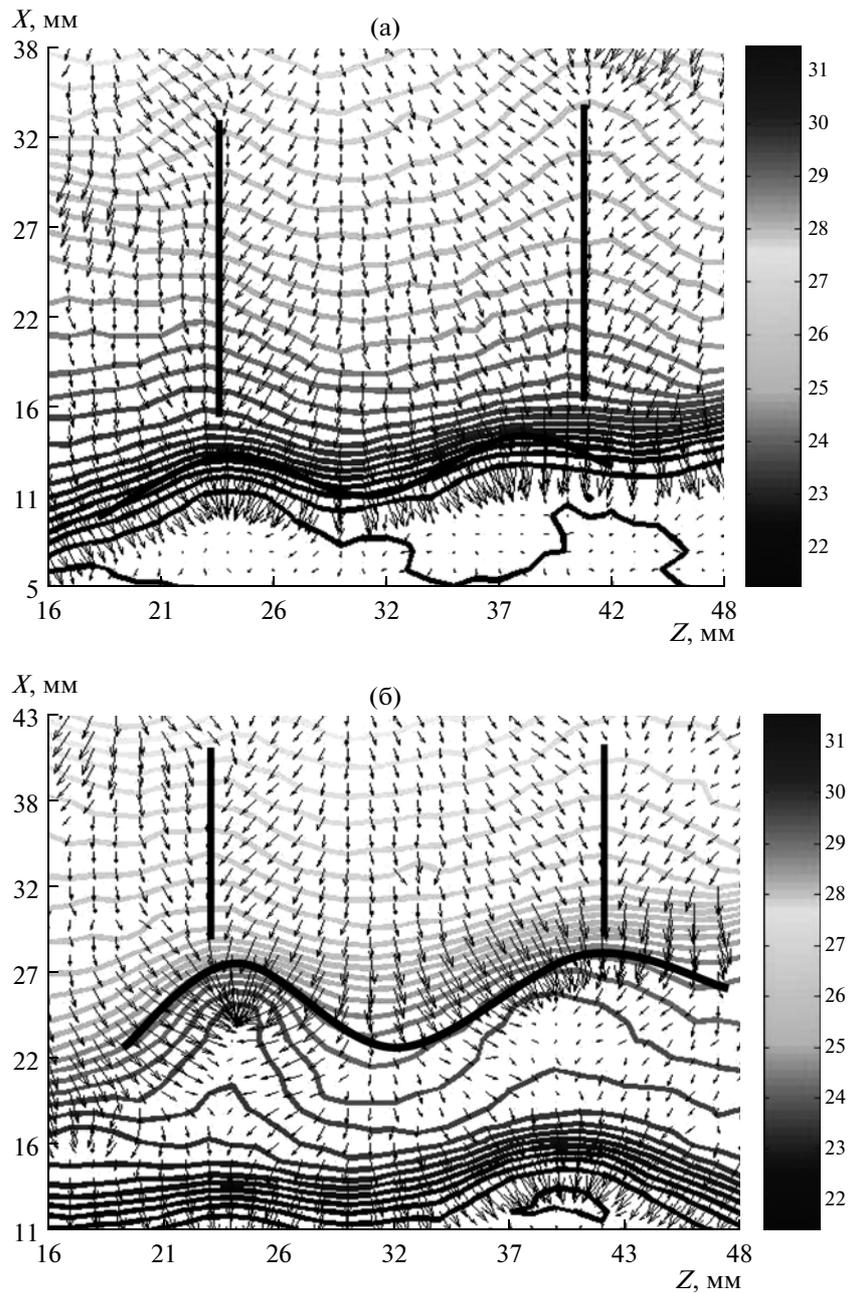


Рис. 4. Касательные напряжения на поверхности пленки в моменты времени: (а) – $t_1 = 0.03$ с, (б) – $t_4 = 0.11$ с.

неоднородностей (тепловые струи). Как видно, произошла деформация волны в промежутке между температурными неоднородностями. При натекании волны на температурные возмущения в остаточном слое происходило перераспределение касательных напряжений таким образом, что по длине фронта силы начинали действовать неоднородно. Справа от тепловой струи происходило укручение фронта, так как направление действия сил на фронте волны и в тепловой струе совпадало, в то время как слева от струи фронт выполаживался.

При движении трехмерных волн среднего размера процесс формирования струй аналогичен крупной волне, на фронте возникали силы, разбивающие его. Отличие состоит в том, что форма фронта способствовала более быстрому образованию струи. Пример представлен на рис. 4. На нагреватель поступал фронт трехмерной волны (рис. 4а, $t_1 = 0.03$ с), выделенный сплошной кривой линией, с длиной волны меньше, чем расстояние между тепловыми струями (показаны сплошными вертикальными линиями). Расположение фронта волны относительно температур-

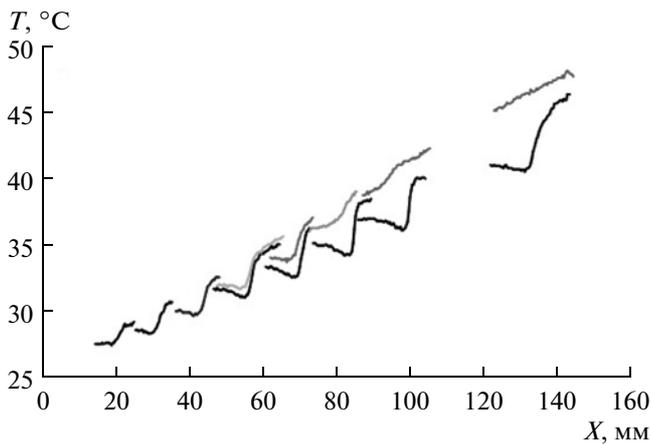


Рис. 5. Эволюция распределения температуры на фронте волн: нижние (жирные) линии – распространение волн в струе, верхние – в межструйной области. Распределения температуры – с временным интервалом 0.05 с (правая пара кривых – с интервалом 0.1 с).

ных неоднородностей в остаточном слое такое, что левый гребень волны двигался по линии “тепловой струи”, правый гребень смещался от тепловой струи на 3 мм и область между гребнями фронта соответствовала минимуму температурных неоднородностей в остаточном слое. Расстояние между гребнями трехмерных волн составляло 14 мм, расстояние между тепловыми струями – 17 мм. Далее при продвижении фронта в области гребней волны наблюдалось уплотнение как изотерм, так и векторов касательных напряжений. При этом на правый гребень силы действовали не скомпенсированно по его ширине, большее воздействие происходило слева от гребня. На рис. 4б показан фронт волны через 0.08 с ($t_4 = 0.11$ с). Видно, что вокруг гребней волны изотермы располагались также плотно, но в области между гребнями изотермы проходили не так плотно. Происходило продавливание фронта. Касательные напряжения вокруг гребней волны сворачивали их в “капли”, которые далее продолжали двигаться по “тепловым струям”.

Эволюция распределения температуры в струе и межструйной области при движении крупной волны представлена на рис. 5. Распределение температуры на фронте волны, одинаковое в верхней части нагревателя, разделялось при X_i более 15–20 мм на два – на струе и в межструйной области, что объясняется более высоким значением амплитуды волны по сравнению со средним значением. Градиент температуры на фронте движущейся по струе волны возрастал от 0.5 К/мм до 2.3 К/мм. Скорость распространения волн по струям вдоль нагревателя возрастала от 0.25 м/с до 0.4 м/с. Фронт волны в межструйной области сначала становился более пологим (градиент тем-

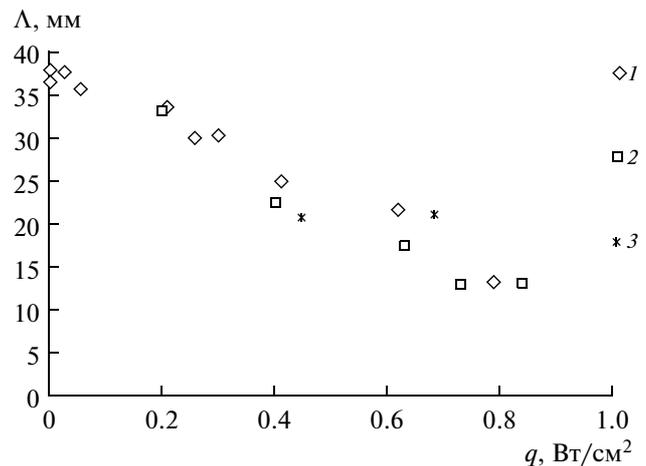


Рис. 6. Зависимость расстояния между гребнями волн или струями от плотности теплового потока в нижней части нагревателя при $X = 130$ мм: 1 – обработки цифровых фотографий, 2 – обработки тепловизионных изображений, 3 – обработки данных флуоресцентного метода.

пературы уменьшался), а затем увеличивался. При этом в межструйной области градиент температуры на фронте волны изменялся незначительно от 0.4 К/мм до 0.6 К/мм.

Для исследования гидродинамической неустойчивости производилась статистическая обработка расстояния между гребнями трехмерных волн. Распределение имело максимум в районе 37 мм и соответствовало наиболее вероятному расстоянию между гребнями. Однако у распределения имеется большой разброс. В потоке также можно найти волны, расположенные на расстоянии от 10 мм до 55 мм друг от друга.

Для сравнения использовались данные работы [3], где рассмотрена эволюция волн на поверхности изотермической пленки при течении воды вдоль вертикальной поверхности в диапазоне чисел Рейнольдса от 10 до 100. Но формирование фронта трехмерных волн создавалось искусственно, с помощью ряда иголок, расположенных на выходе пленкоформователя. В проведенных экспериментах было установлено, что расстояние между гребнями трехмерных волн для числа Рейнольдса порядка 10 составляет 30–35 мм.

Зависимость расстояния между струями от плотности теплового потока в нижней части нагревателя при $X = 130$ мм показана на рис. 6. Обработывались данные по распределению температуры и толщины (полученные флуоресцентным методом). В отсутствие нагрева и при малых плотностях тепловых потоков параметр Λ определялся как расстояние между гребнями волн. В отсутствие нагрева полученные данные согласуются с результатами работы [3], а при высоких тепловых потоках совпадают с ранее полученными данными.

ми для формирования термокапиллярных структур в режиме Б [7–9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование эволюции поля температуры на поверхности нагреваемых пленок воды с использованием современного высокоскоростного инфракрасного сканера Titanium HD 570M.

Установлено, что в остаточном слое пленки жидкости после прохождения волнового фронта возникают температурные неоднородности с характерной длиной волны неустойчивости, соответствующей расстоянию между термокапиллярно-волновыми структурами в режиме Б.

Показано, что вследствие действия термокапиллярных сил на поверхности происходит деформация трехмерных волн и переход к струйному течению. При движении крупных солитонобразных волн деформация фронта волны начинается в области, примыкающей к наиболее нагретой зоне остаточного слоя пленки (между формирующимися струями). Далее, по мере прохождения волны вдоль нагревателя, деформация распространяется в глубь волны, разделяя ее на струи. При движении волн среднего размера термокапиллярные силы изменяют расстояние между их гребнями, приводя в соответствие с расстоянием между формирующимися структурами в остаточном слое.

Полученные данные показывают, что в рассматриваемых условиях термокапиллярная неустойчивость изначально не связана с трехмерной неустойчивостью гидродинамических волн. Они возникают и развиваются независимо, а потом начинают взаимодействовать.

Работа поддержана РФФИ (проект № 09-01-00765-а) и молодежным научно-исследовательским проектом ИТ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Joo S.W., Davis S.H.* Instabilities of Three-Dimensional Viscous Falling Films // *J. Fluid Mech.* 1992. V. 242. P. 529.
2. *Liu J., Schneider J.B., Golub J.P.* Three-dimensional Instabilities of Film Flows // *Phys. Fluids.* 1995. V. 7. № 1. P. 55.
3. *Park C.D., Nosoko T.* Three-Dimensional Wave Dynamics on a Falling Film and Associated Mass Transfer // *AIChE J.* 2003. V. 49. № 11. P. 2715.
4. *Drosos E.I.P., Paras S.V., Karabelas A.J.* Characteristics of Developing Free Falling Films at Intermediate Reynolds and High Kapitza Numbers // *Int. J. Multiphase Flow.* 2004. V. 30. № 7. P. 853.
5. *Чиннов Е.А.* Влияние условий волнообразования на формирование струйного течения в нагреваемых пленках жидкости // *Теплофизика и аэромеханика.* 2009. Т. 16. № 1. С. 69.
6. *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // *ПМТФ.* 2003. Т. 44. № 5. С. 128.
7. *Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Сапрыкина А.В., Жуковская О.В., Серов А.Ф.* Волновые характеристики неизотермической пленки жидкости при формировании струй на ее поверхности // *ТВТ.* 2007. Т. 45. № 5. С. 725.
8. *Chinnov E.A., Kabov O.A.* Marangoni Effect on Wave Structure in Liquid Films // *Micro Gravity Science and Technology.* 2007. V. 19. № 3-4. P. 18.
9. *Чиннов Е.А., Харламов С.М., Назаров А.Д., Соколов Е.Э., Серов А.Ф., Маркович Д.М., Кабов О.А.* Комплексное измерение волновых характеристик нагреваемой пленки жидкости емкостным и флуоресцентным методами // *ТВТ.* 2008. Т. 46. № 5. С. 821.
10. *Pavlenko A.N., Lel V.V.* Heat Transfer and Crisis Phenomena in a Falling Films of Cryogenic Liquid // *Rus. J. Eng. Thermophys.* 1997. V. 7. № 3-4. P. 177.
11. *Pavlenko A.N., Lel V.V., Serov A.F., Nazarov A.D., Matsekh A.D.* The Growth of Wave Amplitude and Heat Transfer in Falling Intensively Evaporating Liquid Films // *J. Eng. Thermophys.* 2002. V. 11. № 1. P. 7.
12. *Lel V.V., Stadler X., Pavlenko A.N., Kneer R.* Evolution of Metastable Quasi-regular Structures in Heated Wave Liquid Films // *Heat Mass Transfer.* 2007. V. 43. № 11. P. 1121.
13. *Lel V.V., Kellerman A., Deitze G., Kneer R., Pavlenko A.N.* Investigation of the Marangoni Effect on the Regular Structures in Heated Wavy Liquid Films // *Experiments in Fluids.* 2008. V. 44. № 2. P. 341.
14. *Чиннов Е.А.* Деформация подковообразных волн при нагреве пленки жидкости // *Письма в ЖТФ.* 2008. Т. 34. № 14. С. 40.
15. *Чиннов Е.А., Шатский Е.Н.* Воздействие термокапиллярных возмущений на волновое движение нагреваемой пленки жидкости // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36. № 2. С. 7.
16. *Kabov O.A., Marchuk I.V., Chupin V.M.* Thermal Imaging Study of the Liquid Film Flowing on Vertical Surface with Local Heat Source // *Rus. J. Eng. Thermophys.* 1996. V. 6. № 2. P. 104.