

УДК 536.423.4

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ВОЛНОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ\***

**Е.А. ЧИННОВ, А.Д. НАЗАРОВ, А.В. САПРЫКИНА, А.Ф. СЕРОВ**

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

Исследованы волновые характеристики течения пленки воды по вертикальной пластине с нагревателем. В отсутствие теплового потока полученные данные хорошо согласуются с результатами других исследователей для изотермической пленки жидкости. При нагреве стекающей жидкости термокапиллярные силы приводят к формированию струй и тонкой пленки между ними. Установлено, что увеличение плотности теплового потока вызывает рост фазовой скорости и уменьшение частоты трехмерных волн. Показано, что, в отличие от известных данных для изотермической пленки жидкости, при достаточно высоких плотностях теплового потока в межструйной области нагреваемой пленки средняя относительная амплитуда волн возрастает с уменьшением безразмерного комплекса  $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$ . Обнаружен эффект роста амплитуды волны в межструйной области под действием термокапиллярных сил, что согласуется с расчетными данными.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В промышленности широко используются нагреваемые и реагирующие пленки жидкости, в то время как исследуются в основном волновые характеристики изотермических пленок. Полученные данные используются для описания неизотермических пленок, что часто неправильно. Важно установить, насколько изменяются волновые характеристики течения и какова деформация пленок при их нагреве.

В работах [1, 2] обнаружен и исследован термокапиллярно-волновой механизм образования струй. В этом случае вертикальные струи формировались на неоднородностях в пленке по гребням двумерных волн, при их распаде на трехмерные или на развитых синхронных трехмерных волнах.

В работах [3, 4] волоконно-оптическим датчиком отражательного типа, установленным со стороны свободной поверхности пленки, выполнено измерение толщины пленки жидкости в межструйной области. Обнаружено, что при увеличении теплового потока пленка между струями становится тоньше и к моменту разрыва составляет 50-60 % от нуссельтовской толщины. Волновое течение сохраняется вплоть до разрыва, но амплитуда волн снижается в 3-4 раза. Показано, что полученные данные по зависимости амплитуды волн от локального числа Рейнольдса согласуются с результатами, приведенными в [5] для изотермической пленки.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ РФФИ (проекты № 05-08-33325-а, 06-01-00360-а), ФЦНТП (Гос. контракт № 02.438.11.7002), № НШ-6749.2006.8) и СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 111).

В работе [6] емкостный метод применен для исследования волновых характеристик пленки воды при формировании струй на вертикальном нагревателе размером  $150 \times 150$  мм для  $Re = 22$  при разных длинах пробега пленки от сопла до верхнего края нагревателя ( $X_n = 120$  и  $200$  мм). Использовались четыре емкостных датчика, которые располагались в шахматном порядке. При нагреве пленки и формировании струй пара датчиков располагалась в межструйной области, а другая пара — в зоне движения гребня струи или его окрестности. Анализ данных не позволил установить влияние термокапиллярных эффектов на изменение относительной амплитуды волны.

Теоретическое исследование влияния термокапиллярных сил на двумерные волны выполнено в работах [7, 8]. Показано, что при нагреве подложки термокапиллярные силы вызывают рост амплитуды двумерных волн.

Измерения волновых характеристик пленки одиночными оптоволоконным и емкостным датчиками не позволили сделать вывод об увеличении амплитуды волн при нагреве пленки, что не согласуется с теоретическими положениями [7] и наблюдениями [8] для двумерных волн. Одной из возможных причин этого противоречия было использование одиночных датчиков и невозможность точной идентификации их расположения относительно формирующихся на поверхности пленки структур. Другая причина заключалась в недостаточности экспериментальных данных по характеристикам изотермической пленки жидкости при соответствующих длинах пробега пленки, что затрудняло сравнение. Подробные исследования волновой динамики вертикальных пленочных течений при постоянной температуре были выполнены в [9].

В настоящей работе для измерения толщины и частотных характеристик пленки жидкости в области ее нагрева емкостные датчики расположены в линию поперек течения, что позволило исследовать динамику поверхности трехмерных волновых течений и изменение поперечного профиля пленки.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с насосом, рабочий участок, фильтр, ротаметры, трубопроводы и запорную арматуру. Подробное описание экспериментальной установки приведено в [2, 6, 10]. Для изменения расстояния от выхода пленки из щелевого сопла до нагревателя использовался специально сконструированный перемещающийся в вертикальном направлении пленкоформирователь. Экспериментальное исследование формирования струй в пленке воды проводилось на вертикальной пластине с нагревателем размером  $150 \times 150$  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  $120$  и  $200$  мм. Число Рейнольдса пленки изменялось от  $22$  до  $38$  ( $Re = \Gamma/\mu$ , где  $\Gamma$  — удельный массовый расход жидкости,  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости). Начальная температура жидкости  $T_0$  равнялась  $24$  °С.

Для вычисления локальных параметров пленочного течения определялась среднемассовая температура пленки жидкости  $T_F$ . При малых тепловых потоках в отсутствие деформации пленки жидкости среднемассовая температура вычислялась по известным балансовым соотношениям. При высоких тепловых потоках были выполнены прямые измерения  $T_F$  с помощью термпар, расположенных в специальных “ловушках”, имеющих форму полуцилиндра диаметром  $2$ – $4$  мм. Устанавливались две ловушки. Одна — в области течения струи, а другая — в межструйной области.

Использовались четыре емкостных датчика, которые располагались в линию на 6 мм выше нижнего края нагревателя. Длина пробега пленки  $X$  до точки измерений равнялась 264 и 344 мм. Расстояние между датчиками составляло 2,5 мм и существенно превосходило размер самого датчика 0,5 мм. Для измерения фазовой скорости волн перед линией датчиков на расстоянии 12 мм выше по потоку устанавливался дополнительный одиночный датчик. В экспериментах использовалась аппаратура и программное обеспечение, разработанные в Институте теплофизики СО РАН с оригинальной тарировкой емкостного метода, которые подробно описаны в работе [11]. В [12] показано, что электрические поля локализовались в измерительной области датчика и не оказывали влияния на характеристики соседнего. Пространственное разрешение метода не хуже 1 мм.

Особенностью измерения толщины нагреваемой пленки жидкости являлась неравномерность температуры. Диэлектрическая проницаемость воды зависит от температуры, что может привести к дополнительной погрешности при измерении параметра. Однако для воды, диэлектрическая проницаемость которой намного выше диэлектрической проницаемости воздуха, основной вклад в измеряемую емкость датчика вносит емкость воздушного зазора. При увеличении температуры пленки жидкости изменялась также концентрация паров воды в воздушном зазоре. Однако диэлектрическая проницаемость паров воды при атмосферном давлении ( $\varepsilon = 1,006$  [13]) незначительно отличалась от диэлектрической проницаемости воздуха. Дополнительная погрешность измерения толщины 100 микронной пленки воды при 100 °С составляла 0,8 %. Погрешность метода зависит от толщины пленки жидкости и расстояния от поверхности пленки до датчика. Для примененного типа датчиков точность измерения толщины изотермической пленки при  $Re = 20-40$  составляла 2 % [12]. Специальные тарировочные эксперименты показали, что измеряемая безразмерная средняя толщина пленки воды практически не зависит от температуры. Общая погрешность измерения толщины нагреваемой пленки воды не превышала трех процентов.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 2.1. Динамика толщины и волновые характеристики пленки

Характерная динамика толщины пленки жидкости на гребне струи и в межструйной области во времени показана на рис. 1. Видно, что изменение толщины

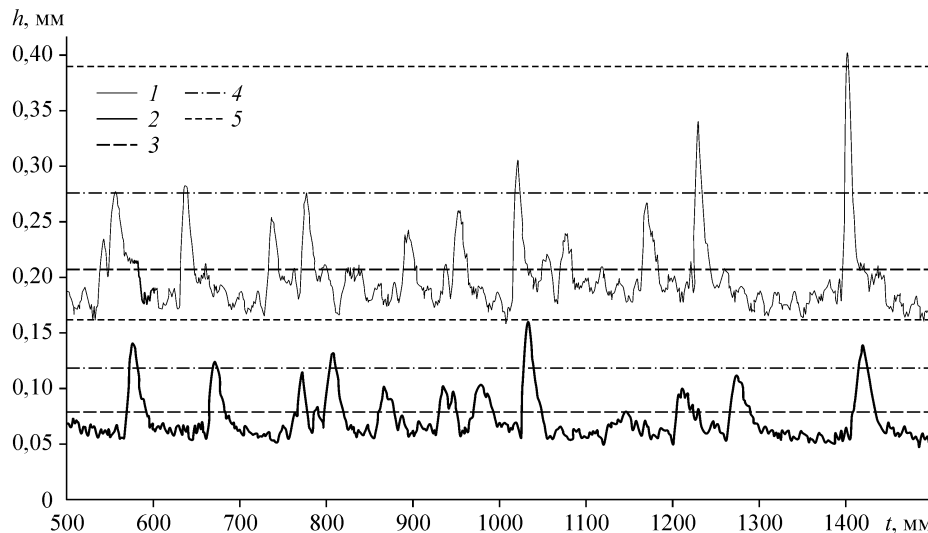


Рис. 1. Изменение толщины пленки воды во времени для  $Re = 22$ ,  $X_n = 120$  мм,  $q = 0,92$  Вт/см<sup>2</sup>.

Струя (1), межструйная область (2), среднее значение толщины (3),  $(h_{\max})_{\text{сп}}$  (4),  $(h_{\max})_{\text{макс}}$  (5).

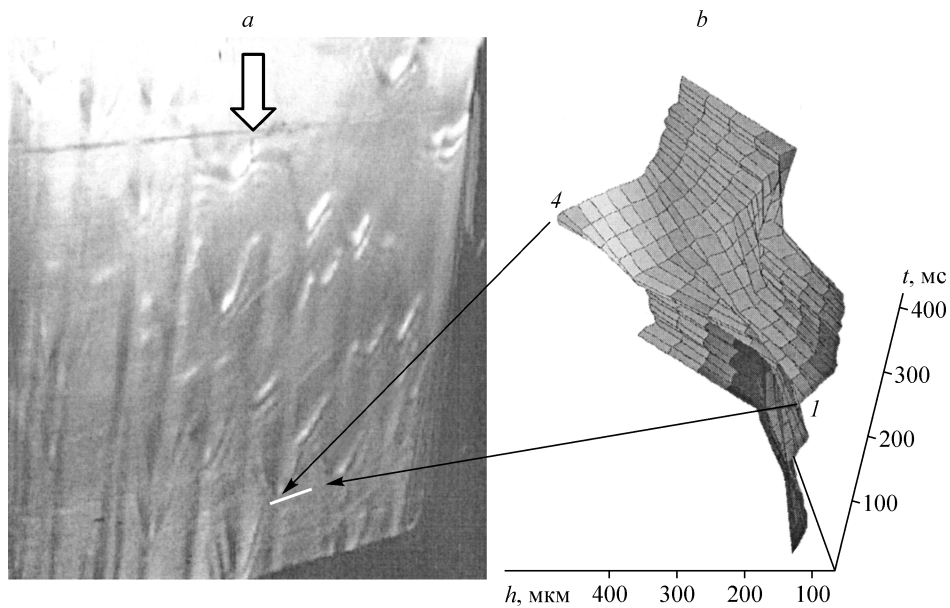
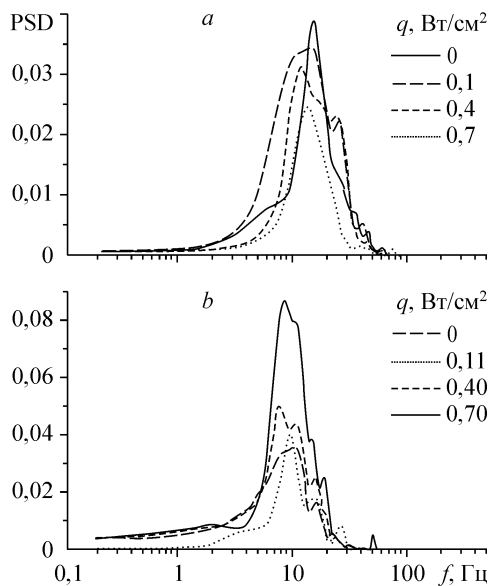


Рис. 2. Фотография течения пленки воды,  $Re = 22$ ,  $X_n = 120$  мм,  $q = 0,92$  Вт/см<sup>2</sup> (а) и профиль волны в струе (б), построенный по четырем датчикам.

пленки во времени на гребне струи и в межструйной области происходит синхронно с задержкой 20–40 мкс. Штриховыми линиями показаны средние значения толщины пленок. В результате обработки зависимости толщины от времени определялись два типа амплитуды волн. В каждом периоде следования крупных волн определялось максимальное и минимальное значение толщины. Значения  $(h_{\max})_{\text{cp}}$  (штрихпунктирные линии) и  $(h_{\min})_{\text{cp}}$  вычислялись как средние значения измерений по 20 периодам. Аналогично работе [9] определялась также величина  $(h_{\max})_{\max}$ , характеризующая волны максимальной амплитуды. Для этого были построены гистограммы распределения  $h_{\max}$  для области струи и межструйной области.

Характерный профиль волны на поверхности между гребнем струи и межструйной областью, построенный по аппроксимации данных измерений четырех датчиков, приведен на рис. 2, б. На фотографии (рис. 2, а) показана волновая структура течения пленки жидкости при формировании струй и область измерения толщины пленки.



Видно, что по гребню струи распространяются волны с большой амплитудой, достигающей величины 0,4 мм, а в межструйной зоне амплитуда волн существенно меньше. Ширина крупных трехмерных волн может существенно отличаться. В результате в межструйной области также могут проходить отдельные волны с относительно высокой амплитудой.

Рис. 3. Спектральная плотность мощности толщины пленки,  $Re = 22$ . Межструйная область (а), струя (б).

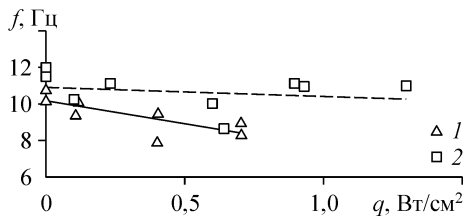


Рис. 4. Зависимость частоты следования крупных волн от плотности теплового потока,  $Re = 22$  (1), 38 (2).

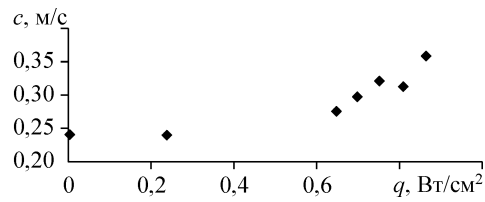


Рис. 5. Зависимость фазовой скорости течения пленки от плотности теплового потока,  $Re = 22$ ,  $X = 264$  мм.

Так же, как и в работе [9], определялась спектральная плотность мощности толщины пленки жидкости (PSD — Power Spectrum Density, рис. 3). В отсутствие нагрева пленки полученные данные совпадали с результатами [9] для изотермической пленки жидкости. Наблюдалось уменьшение частоты следования крупных волн с ростом плотности теплового потока для всего исследуемого диапазона чисел Рейнольдса как в межструйной области, так и на гребне струи (рис. 4). На рис. 4 данные по струе и межструйной области объединены, поскольку существенного различия между ними не наблюдалось. Эти результаты согласуются с данными, полученными в [6] для межструйной области. Уменьшение частоты с ростом  $q$  связано с влиянием термокапиллярных сил. Некоторые волны исчезают, что можно рассматривать как уменьшение их частоты.

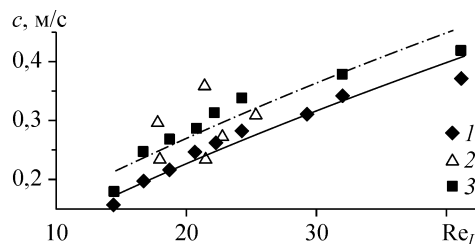
Фазовая скорость поверхностных волн измерялась с помощью взаимной корреляции двух сигналов. Два датчика располагались на расстоянии 12 мм друг от друга вниз по течению. На рис. 5 приведена зависимость фазовой скорости пленки от плотности теплового потока для межструйной области при  $Re = 22$ . Видно, что до значения плотности теплового потока  $q = 0,65$  Вт/см<sup>2</sup> существенного увеличения фазовой скорости от теплового потока не наблюдается, а при больших значениях  $q$  скорость увеличивается с повышением плотности теплового потока.

## 2.2. Сравнение волновых характеристик неизотермической и изотермической пленок жидкости

На рис. 6 приведена зависимость фазовой скорости изотермической (1, 3) и неизотермической (2) пленок жидкостей от локального числа Рейнольдса. Для обеих жидкостей с повышением локального числа Рейнольдса фазовая скорость волн на поверхности пленки увеличивается. Наблюдаемое увеличение можно объяснить взаимодействием волн и развитием крупных волн, распространяющихся быстрее вниз по потоку по длине свободного пробега. Причем, данные для неизотермической пленки жидкости (2), полученные при  $X = 264$  мм, располагаются между данными для изотермической пленки при  $X = 360$  (3) и 190 (1) мм, взятыми из [9]. Только при максимальной плотности теплового потока ( $q > 0,7$  Вт/см<sup>2</sup>) скорость волны выше, чем для неизотермической жидкости (на рис. 6 — это две точки в районе  $Re_f = 20$ ).

На рис. 7 приведено сравнение результатов по амплитуде волн в нагреваемой пленке жидкости с обобщением данных из работы [5] для амплитуды естественных и возбужденных волн при изотермическом течении с малыми длинами пробега пленки ( $X = 75-120$  мм).

Рис. 6. Сравнение неизотермической пленки жидкости с изотермической. Изотермическая пленка,  $X = 190$  мм [9] (1), неизотермическая пленка,  $Re = 22$ ,  $X = 264$  мм (2), изотермическая пленка,  $X = 360$  мм [9] (3).



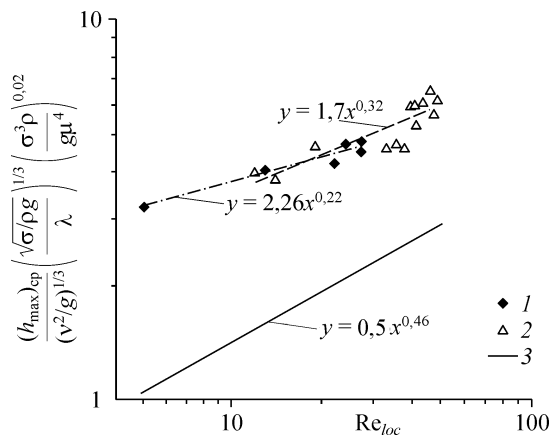


Рис. 7. Сравнение данных по амплитуде волн в нагреваемой пленке жидкости с обобщением для изотермического течения при малых длинах пробега.

Нагреваемая пленка:  $Re = 22$  (1),  $33$  (2). Изотермическая пленка: обобщение данных [5] (3) ( $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\nu = \mu/\rho$  — кинематическая вязкость жидкости,  $\rho$  — плотность воды,  $\lambda$  — средняя длина волны,  $g$  — ускорение силы тяжести).

Так же, как и в [5], использовалось среднее значение амплитуды волн  $(h_{\max})_{cp}$ . Полученные данные для естественных волн (в том числе и при  $q = 0$ ) лежат значительно выше данных для возбужденных волн (3), что объясняется более высоким значением длины пробега пленки. Показатель степени при  $Re_{loc}$  для естественных волн (1, 2) (нагреваемая пленка) меньше, чем для возбужденных (0,46). То есть при увеличении теплового потока уменьшение локального расхода жидкости приводит к существенно более слабому уменьшению амплитуды волн, чем этого требуют законы холодной гидродинамики.

Следует отметить, что отклонения характеристик волнового движения нагреваемой пленки от характеристик волнового движения изотермических пленок жидкости наблюдаются также при интенсивном испарении с поверхности пленки. В [14, 15] представлено исследование волновых характеристик и теплообмена при тчении пленки азота по вертикальной нагреваемой поверхности в условиях насыщения. Показано, что при ламинарно-волновом режиме течения интенсивное пленочное испарение может приводить к существенному возрастанию амплитуды крупных волн, снижению их частоты и интенсификации теплообмена. В настоящей работе в исследуемом диапазоне плотностей тепловых потоков и чисел Рейнольдса на испарение воды расходовалось менее 15 % подведенного к пленке тепла, что согласно работе [16] не оказывает заметного влияния на характеристики течения и теплообмен.

На рис. 8 показана зависимость максимальной безразмерной амплитуды  $A_{\max}$  от комплекса  $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$ ,  $A_{\max} = ((h_{\max})_{\max} - (h_{\min})_{\max})/h_{cp}$ . Локальные числа Рейнольдса и Капицы в точке измерений рассчитаны с учетом изменения локальной

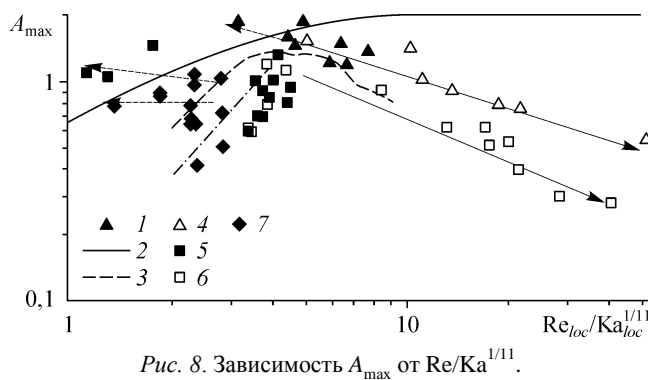


Рис. 8. Зависимость  $A_{\max}$  от  $Re/Ka^{1/11}$ .

Межструйная область,  $Re = 38$ ,  $X = 344$  мм (1), зависимость из [16] (2), изотермическая пленка,  $X = 360$  мм [9] (3), струя,  $Re = 38$ ,  $X = 344$  мм (4), межструйная область,  $Re = 33$ ,  $X = 264$  мм (5), струя,  $Re = 33$ ,  $X = 264$  мм (6), межструйная область,  $Re = 22$ ,  $X = 264$  мм (7).

средней толщины пленки и температурной зависимости свойств жидкости  $Re_{loc}/Re = (h_{loc}/h_{q=0})^3 (v_{q=0}/v_{loc})^2$ ,  $Ka_{loc} = \sigma_{loc}^3 / (g v_{loc}^4 \rho^3)$ ,  $\sigma_{loc}$  и  $v_{loc}$  — коэффициенты поверхностного натяжения и кинематической вязкости воды в зоне измерения соответственно. До формирования струй среднemasсовая температура пленки в точке измерений определялась по балансу тепла. Когда в пленке формировались струи, и локальный расход жидкости изменялся, среднemasсовая температура определялась по данным измерений температуры поверхности пленки и поверхности нагревателя, а также в результате прямых измерений. На рис. 8 видно, что для межструйной области при максимальных длинах пробега пленки  $X = 344$  мм ( $Re = 38$ ) величина относительной амплитуды волн  $A_{max}$  при малых тепловых потоках согласуется с полученными в [9] данными и с расчетами по зависимости из [16]. Линией 2 на рис. 8 обобщены данные для  $Re = 22$  и  $33$  при малых тепловых потоках. Наклон этой линии совпадает с наклоном кривой из [9] в рассматриваемом диапазоне параметров.

При увеличении теплового потока в области его слабого влияния на формирование струй происходит рост параметров  $Re_{loc}$  и  $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$  за счет увеличения температуры пленки. Относительная амплитуда волн  $A_{max}$  изменяется слабо, занимая промежуточное положение между данными из [9] и зависимостью из [16]. В области интенсивного формирования струй толщина пленки и величина амплитуды волн сильно зависят от изменения плотности теплового потока. Параметры  $Re_{loc}$  и  $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$  резко уменьшаются, а относительная амплитуды волн в межструйной области возрастает. В этом случае закономерности изменения относительной амплитуды волн существенно отличаются от изотермической пленки жидкости.

При малых длинах пробега пленки  $X = 264$  мм ( $Re = 22, 33$ ) данные, полученные при малых тепловых потоках, расположены ниже результатов из работ [9] и [16]. Как и в предыдущем случае, при слабом влиянии теплового потока на формирование струй тенденция изменения  $A_{max}$  соответствует изотермическому течению. Тенденция меняется на противоположную в области интенсивного формирования струй (пунктирные стрелки).

Зависимость  $A_{max}$  от  $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$  для струй хорошо согласуется с данными, полученными в [9] для изотермической пленки жидкости при приблизительно одинаковых длинах пробега пленки  $X = 344$  и  $360$  мм. В диапазоне значений  $3 < Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11} < 6$ , полученные в работе данные для струй и межструйной области при малых тепловых потоках, как и результаты [9], достигают значений, близких к описываемым зависимостью из [16] для стабилизированного волнового течения. Такое течение изотермической пленки жидкости, характеризующееся отсутствием зависимости относительной амплитуды волн от длины пробега пленки, наступает, согласно [16], при  $X = 600-4000$  мм. Для исследуемых длин пробега пленки полученные значения относительной амплитуды волн меньше, чем рассчитанные по зависимости из [16]. Только для межструйной области при максимальных тепловых потоках наблюдаются более высокие значения  $A_{max}$ .

Существует два механизма влияния термокапиллярных сил на движение волновой пленки жидкости. При ее движении с двумерными волнами по нагретой поверхности с положительным градиентом температуры вдоль течения увеличение нагрева должно приводить к росту амплитуды волн, поскольку в этом случае термокапиллярные силы направлены от впадины к вершине волны [7, 8]. Этот эффект проявляется в межструйной области, где амплитуда волн возрастает с увеличением плотности теплового потока (уменьшением толщины пленки или комплекса  $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$ ).

С другой стороны двумерные волны неустойчивы и распадаются на трехмерные. Возникающие неоднородности толщины пленки и температуры вызывают появление градиента температуры на поверхности пленки поперек потока жидкости.

Два рассмотренных термокапиллярных эффекта в полной мере проявляются в межструйной области. Поперечные градиенты температуры вызывают существенное уменьшение толщины пленки жидкости, а продольные градиенты — рост относительной амплитуды волн по сравнению с холодной гидродинамикой. На поверхности струй относительная амплитуда волн убывает с увеличением плотности теплового потока (толщины пленки или комплекса  $Re_{loc}/Ka_{loc}^{1/11}$ ), что согласуется с данными работы [9] для соответствующих длин пробега изотермической пленки.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При высоких тепловых потоках термокапиллярные силы приводят к формированию струй и тонкой пленки между ними. Фазовая скорость крупных волн растет с увеличением плотности теплового потока. Для частоты следования крупных волн характерна обратная зависимость: с увеличением плотности теплового потока  $f$  уменьшается.

Сравнение опытных данных с результатами для изотермической пленки показывает, что при достаточно высоких тепловых потоках, в отличие от холодной гидродинамики, относительная амплитуда волн в межструйной области нагреваемой пленки возрастает с уменьшением комплекса  $Re/Ka^{1/11}$ . Закономерность изменения безразмерной амплитуды волн отличается от изотермической пленки жидкости. Два термокапиллярных эффекта проявляются в межструйной области. Поперечные градиенты температуры вызывают уменьшение толщины пленки жидкости, а продольные градиенты рост относительной амплитуды волн по сравнению с холодной гидродинамикой, что в конечном итоге приводит к появлению сухих пятен и разрыву пленки.

Трехмерные волны распространяются по гребням струй, где относительная амплитуда волн убывает с увеличением плотности теплового потока (толщины пленки), это согласуется с холодной гидродинамикой для соответствующих длин пробега пленки. Отличие величины фазовой скорости крупных волн от изотермического течения наблюдается только при максимальных значениях 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. 128–137.
2. **Чиннов Е.А.** Гидродинамика и теплообмен в капиллярных течениях с естественной циркуляцией. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. — Институт теплофизики СО РАН. — Новосибирск, 2004. — 347 с.
3. **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.
4. **Zaitsev D.V., Kabov O.A.** Study of the Thermocapillary Effect on a Wavy Falling Film Using a Fiber Optical Thickness Probe // Experiments in Fluids. — 2005. — Vol. 39, No. 4. — P. 712.
5. **Алексеев С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г.** Волновое течение пленок жидкости. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1992. — 255 с.
6. **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.
7. **Miladinova S., Slavtchev S., Lebon G., Legros J.C.** Long-wave instabilities of nonuniformly heated falling films // J. Fluid Mech. — 2002. — Vol. 453. — P. 153–175.



8. **Ito A., Masunaga N., Baba K.** Marangoni effects on wave structure and liquid film breakdown along a heated vertical tube // *Advances in Multiphase Flow*, A. Serizawa, T. Fukano and J. Bataille editors, Elsevier Science. — 1995. — P. 255–265.
9. **Drosos E.P., Paras S.V., Karabelas A.J.** Characteristics of developing free falling films at intermediate Reynolds and high Kapitza numbers // *International Journal of Multiphase Flow*. — 2004. — Vol. 30. — P. 853.
10. **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. — Vol. 20, No. 1. — P. 69–78.
11. **Кротов С.В., Назаров А.Д., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Серов А.Ф., Чехович В.Ю.** Емкостный измеритель локальной толщины пленки азота // *Приборы и техника эксперимента*. — 1997. — № 1. — С. 149–152.
12. **Назаров А.Д.** Разработка аппаратно-программных средств емкостного измерителя для экспериментального исследования пленочного течения криогенной жидкости. Дисс. ... к.т.н. — Институт теплофизики СО РАН. — Новосибирск, 2002. — 125 с.
13. **Кэй Д., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. — М: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1962. — 247 с.
14. **Павленко А.Н., Лель В.В., Серов А.Ф., Назаров А.Д.** Динамика течения интенсивно испаряющейся волновой пленки жидкости // *ПМТФ*. — 2001. — Т. 42, № 3. — С. 107–115.
15. **Pavlenko A. N., Lel V.V., Serov A.F., Nazarov A.D., Matsekh A.M.** The growth of wave amplitude and heat transfer in falling intensively evaporating liquid films // *J. of Engin. Thermophysics*. — 2002. — Vol. 11, No. 1. — P. 7–43.
16. **Гимбутис Г.** Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. — Вильнюс: Моксклас, 1988. — 232 с.

*Статья поступила в редакцию 6 сентября 2006 г.*