

УДК 532.423.4

## **Влияние условий волнообразования на формирование струйного течения в нагреваемых пленках жидкости\***

**Е.А. Чиннов**

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

E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

Выполнено экспериментальное исследование формирования струй на поверхности неизотермической пленки воды, вертикально стекающей по нагревателям с разными размерами и граничными условиями. Измерены расстояния между струями в зависимости от числа Рейнольдса, плотности теплового потока и длины пробега пленки (расстояния между нижним краем сопла пленкоформирователя и местом измерения характеристик пленочного течения). Обнаружен эффект разрушения солитонобразных волн при нагреве пленки жидкости. Выделены четыре зоны влияния длины пробега пленки воды на формирование струй.

**Ключевые слова:** формирование струй, термокапиллярность, пленка, волны.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Известно, что длина пробега пленки жидкости оказывает существенное влияние на волнообразование на ее поверхности и, как следствие, на теплообмен. Однако при разных длинах пробега в основном исследуется течение изотермической пленки [1–4], а теплообмен изучен, главным образом, при высоких числах Рейнольдса пленки и относительно малых значениях теплового потока, когда влияние термокапиллярных сил мало. В работах [5–7] теплоотдача к пленке жидкости исследовалась на вертикальных протяженных трубчатых нагревателях.

Только в девяностых годах прошлого века началось интенсивное исследование проявления термокапиллярных эффектов в пленке жидкости на нагревателях малого размера в области низких чисел Рейнольдса. К настоящему времени открыты различные механизмы формирования струй в неизотермических пленках жидкости, выделено два режима: термокапиллярный А и термокапиллярно-волновой Б [8, 9].

В работах [10–12] впервые обнаружено формирование регулярных подковообразных структур в режиме А на поверхности гладкой пленки жидкости, стекающей по вертикальной плоскости с нагревателями малого размера 6,5×13 мм при малых числах Рейнольдса. Под действием термокапиллярных сил, направленных

---

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

против течения, происходило утолщение пленки. При достижении пороговой плотности теплового потока течение разделялось на вертикальные струи, следующие с определенной длиной волны  $L$ , и тонкую пленку между ними.

Как показано в работе [9], режим Б 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 А и Б различаются уровнем теплового потока, необходимого для их возникновения, величиной и характером зависимости расстояния между струями от плотности теплового потока и числа Рейнольдса.

В работе [13] исследовано влияние длины пробега пленки жидкого азота по теплоотдающей поверхности при разных тепловых потоках и числах Рейнольдса на динамику развития волн. Эксперименты проводились в условиях насыщения. Показана определяющая роль испарения на рост амплитуды волн и интенсификацию теплообмена. Однако из-за выполнения условия насыщения влияние термокапиллярных эффектов в этих экспериментах не проявлялось.

К настоящему времени формирование структур двух типов под действием термокапиллярных сил исследовалось, в основном, при малых длинах пробега пленки. Информация по влиянию расстояния от пленкоформирователя до нагревателя и граничных условий на поверхности нагрева на формирование струйных течений в пленке жидкости практически отсутствовала. От длины пробега зависит как амплитуда, так и волновая структура натекающей на нагреватель пленки. Из работ [14, 15] известно, что параметры волнового режима пленочного течения оказывают существенное влияние на формирование струй.

В настоящей работе представлена первая попытка исследования влияния условий волнообразования (длины пробега пленки) на формирование струй в неизотермической пленке воды, стекающей по нагревателям с разными размерами и граничными условиями на их поверхности в диапазоне чисел Рейнольдса от 1 до 50 ( $Re = \Gamma/\mu$ , где  $\Gamma$  — удельный массовый расход жидкости, кг/(м·с),  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости жидкости, кг/(м·с)).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, в который входили резервуар с электронасосом, рабочий участок и фильтр. Рабочая жидкость с помощью насоса подавалась в пленкоформирователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Схема экспериментальной установки приведена в [9, 16].

Использовались два рабочих участка. Первый включал нагреватель размером  $150 \times 150$  мм<sup>2</sup>. Исследования проводились на установках, открытых в атмосферу. При высоких длинах пробега пленки для поддержания постоянства температуры пленки до нагревателя необходимо было использование стабилизаторов. Стабилизатор температуры располагался в верхней части несущей пластины под пленкоформирователем и представлял собой отшлифованную пластину из нержавеющей стали с системой каналов, по которым прокачивалась рабочая жидкость. Расстояние от пленкоформирователя до верхней кромки нагревателя  $X_n$  изменялось от 41 до 550 мм. На поверхности нагревателя при течении пленки воды выполнялось условие  $q_{ст} \sim const$  [17].

Второй рабочий участок состоял из несущей плиты из текстолита с расположенными на ней нагревателем, стабилизаторами температуры, удлиняющей пластиной и пленкоформирователем. Пленкоформирователь располагался в верхней части рабочего участка. Расстояние до нагревателя  $X_n$  составляло 63 мм (без удлиняющей пластины) или 396 мм (с удлиняющей пластиной). Нагреватель представлял собой плоский теплообменник размером  $60 \times 120 \text{ мм}^2$  из меди с прямоугольными каналами внутри для движения нагретой жидкости. Температура обращенной к пленке стенки нагревателя измерялась тремя термодатчиками, расположенными на вертикальной оси симметрии. На поверхности нагрева реализовывалось граничное условие, близкое к  $T_{ст} \sim \text{const}$ . Дополнительная информация о конструкции рабочего участка приведена в [18]. Начальная температура жидкости при выходе из сопла пленкоформирователя во всех экспериментах составляла 20–24 °С. Температура поверхности пленки в нижней части нагревателя не превышала 50 °С при максимальных тепловых потоках. Доля теплоты, идущей на испарение, не превышала 10 % от теплоты, передаваемой от нагревателя к пленке жидкости.

Для определения толщины и волновых характеристик пленки использован модифицированный флуоресцентный метод. Возможность использования флуоресцентного метода для диагностики неизотермических пленок качественно была продемонстрирована в [19]. В отличие от традиционных схем в работах [2, 20], источник и приемник излучения располагались с одной стороны от поверхности пленки [21]. 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 основывался на базе стандартного измерителя скорости PIV фирмы “Dantec”. Для возбуждения флуорофора использовался сдвоенный импульсный NdYAG лазер, освещавший на пластине площадку размерами  $120 \times 120 \text{ мм}^2$ . Переизлученный флуорофором свет регистрировался работающей в режиме двойного кадра цифровой PIV-камерой с красным светофильтром. Время экспозиции каждого кадра равнялось длительности лазерного импульса (10 нс). При проведении измерений на площади  $100 \times 100 \text{ мм}^2$  система обеспечивала пространственное разрешение 0,1 мм. Точность определения толщины составляла 5–10 мкм для пленок толщиной 200–400 мкм.

Измерение температуры поверхности пленки жидкости проводилось с помощью инфракрасной камеры СОВА 2-М. Приемник излучения — одноэлементный, охлаждаемый жидким азотом фотодиод КРТ. Регистрируемый диапазон ИК излучения 3,5–5,5 мкм. Инфракрасная термография являлась одним из методов измерения расстояния между струями. В настоящей работе использовались ранее полученные термограммы, которые частично использовались в [16, 17] при изучении теплообмена в стекающих пленках жидкости.

В экспериментах проводились также визуальные наблюдения с регистрацией изображения на стандартные цифровые видео- и фотокамеры. Инфракрасное сканирование наиболее эффективно при регистрации формирования струйного течения при малых числах Рейнольдса на поверхности практически безволновой пленки жидкости, когда малые деформации поверхности пленки трудно обнаружить с использованием цифровых видео- и фотокамер. Флуоресцентный метод, используемый, в основном, при высоких числах Рейнольдса и длинах пробеге пленки, позволял получить мгновенное поле толщин существенно волновой пленки жидкости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены фотографии течения пленок воды, стекающих по нагревателю размером  $60 \times 120 \text{ мм}^2$  ( $T_{ст} \sim \text{const}$ ). При малых значениях  $Re$  на поверхности пленки возникали структуры типа А (рис. 1, а), а затем в верхней части нагревателя

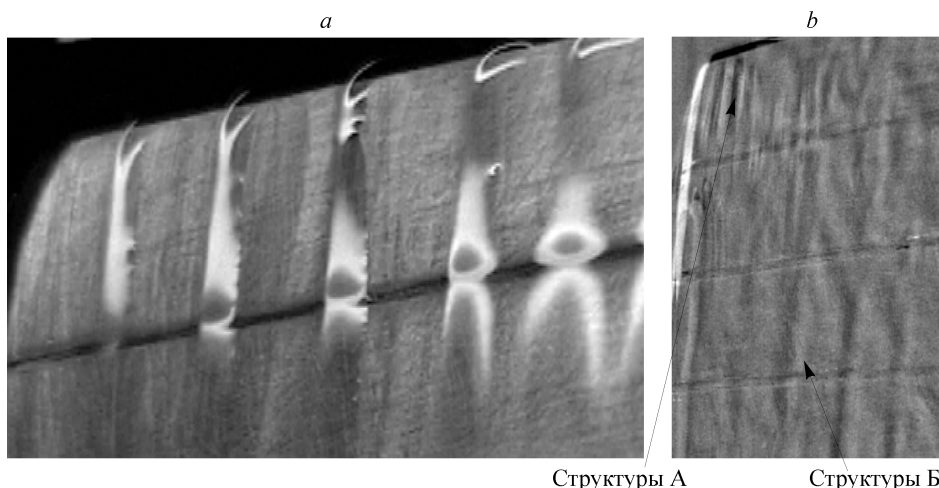


Рис. 1. Фотографии течения пленок воды на нагревателе размером  $60 \times 120 \text{ мм}^2$  ( $T_{\text{ст}} \sim \text{const}$ ),  $X_n = 63 \text{ мм}$ .  
 $\text{Re} = 4$  (a), 22,3 (b),  $q = 0,6$  (a), 2,1 (b) Вт/см<sup>2</sup>.

формировались сухие пятна. На пленках воды структуры в режиме А впервые получены именно на указанном нагревателе.

При числах Рейнольдса менее 10 при  $X_n = 63 \text{ мм}$  на нагревателе размером  $60 \times 120 \text{ мм}^2$  струи формировались только в режиме А. Среднее расстояние между струями при малых тепловых потоках составляло 8–11 мм.

При  $\text{Re} > 10$  на поверхности пленки в нижней части нагревателя образовывались трехмерные волны, которые с ростом теплового потока превращались в струи в режиме Б (см. рис. 1, b). При более высоких плотностях тепловых потоков в верхней части нагревателя на поверхности пленки жидкости формировались неоднородности, соответствующие структурам типа А (см. рис. 1, b), но дальнейшего их развития не происходило. При увеличении теплового потока пленка в нижней части нагревателя разрывалась на несколько нерегулярных струй.

При нагреве пленки происходило формирование струй, причем с увеличением плотности теплового потока расстояние между ними в режиме А возрастало, рис. 2, ( $l_s = (\sigma / (\rho \cdot g))^{1/2}$ ,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho$  — плотность воды). При высоких длинах пробега пленки жидкости ( $X_n = 396 \text{ мм}$ ) структуры типа А наблюдались при достаточно высоких тепловых потоках и имели фрагментальный характер как и на рис. 1, b. Развитию структур в режиме А мешало волновое течение и разрывы пленки. Расстояния между струями были несколько выше, чем при малых длинах пробега пленки.

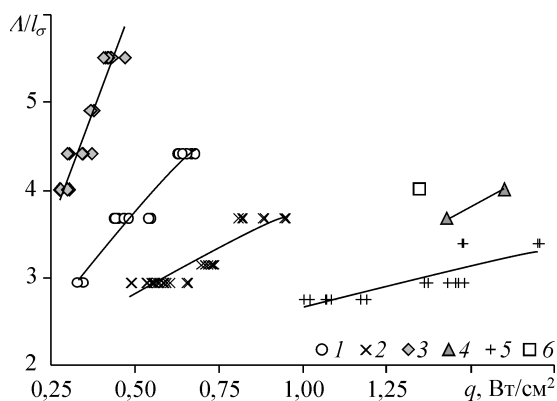


Рис. 2. Зависимость безразмерного расстояния между струями на поверхности пленки воды от плотности теплового потока в режиме А. Нагреватель размером  $60 \times 120 \text{ мм}^2$ .

На нагревателе размером  $150 \times 150 \text{ мм}^2$  в пленках воды структуры в режиме А не наблюдались. Этот факт может быть

Рис. 2. Зависимость безразмерного расстояния между струями на поверхности пленки воды от плотности теплового потока в режиме А. Нагреватель размером  $60 \times 120 \text{ мм}^2$ .

$\text{Re} = 2,05$  (1), 4 (2), 1,07 (3), 6,5 (4), 7,23 (5), 11,2 (6),  $X_n = 63$  (1–3, 5), 396 (4, 6) мм.

объяснен тем, что при  $T_{ст} \sim const$  происходит значительное перераспределение теплового потока в верхнюю часть нагревателя, что приводит к более высоким локальным тепловым потокам и градиентам температуры вблизи верхней кромки нагревателя. В результате при течении пленок воды на нагревателе размером  $150 \times 150 \text{ мм}^2$ , где реализовывалось условие  $q_{ст} \sim const$ , вплоть до разрыва пленки на ее поверхности не возникали необходимые градиенты температуры для формирования структур А.

При движении пленки жидкости при  $Re > 10$  преимущественно образовывались структуры типа Б. При малых значениях длины пробега  $X_n < 100 \text{ мм}$  на нагреватель поступала гладкая пленка жидкости [1]. На рис. 3 приведен результат обработки термограммы, показывающий усредненное изменение температуры на поверхности пленки воды, при  $X_n = 42 \text{ мм}$ ,  $q = 0,64 \text{ Вт/см}^2$  и числе Рейнольдса  $Re = 10,4$ , стекающей по нагревателю размером  $150 \times 150 \text{ мм}^2$  ( $X_t$  — расстояние от верхнего края нагревателя,  $Z$  — координата поперек потока). Сравнение термограмм показало, что при малых тепловых потоках  $q < 0,2 \text{ Вт/см}^2$  поле температур на поверхности пленки жидкости однородно. При  $q > 0,3 \text{ Вт/см}^2$  на термограммах заметны периодические изменения температуры на поверхности пленки жидкости в поперечном направлении. Эволюция поля температур на поверхности пленки с увеличением теплового потока связана с формированием ривулетных образований в режиме Б. Формирование струй происходило в конце гладкой зоны на расстоянии 70–80 мм от сопла пленкоформирователя, где возникало волновое движение на поверхности пленки. Среднее расстояние между струями уменьшалось (рис. 4).

На нагревателях длиной 150 мм ( $X_n = 42 \text{ мм}$ ) и 60 мм ( $X_n = 63 \text{ мм}$ ) волны возникали непосредственно в области нагрева. Расстояние между струями убывало с ростом плотности теплового потока. При относительно высоких значениях  $Re$  (см. рис. 4, *с*) в режиме Б расстояние между струями зависело от плотности теплового потока гораздо слабее, чем при малых (показатель степени изменялся от  $-0,35$  при  $Re = 10,4$  до  $-0,08$  при  $Re = 44$ ). При малых числах Рейнольдса воздействие термокапиллярных сил более существенно, что проявлялось в степени влияния плотности теплового потока на расстояние между струями.

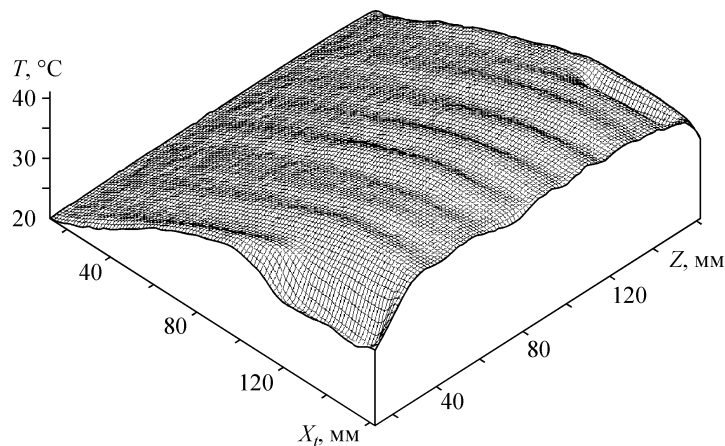


Рис. 3. Распределение температуры на поверхности пленки воды при  $q = 0,64 \text{ Вт/см}^2$  и числе Рейнольдса  $Re = 10,4$  (нагреватель  $150 \times 150 \text{ мм}^2$ ,  $q_{ст} \sim const$ ).

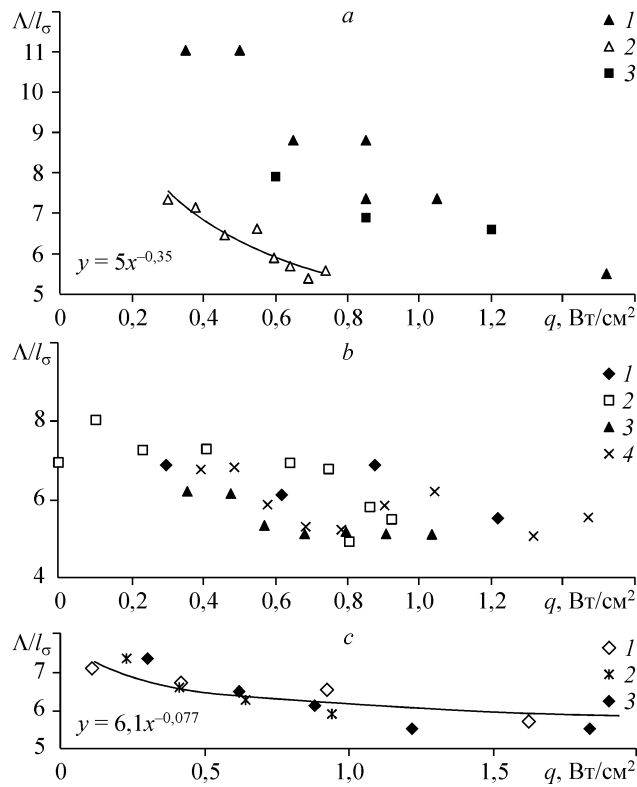


Рис. 4. Зависимость безразмерного расстояния между струями на поверхности пленки воды от плотности теплового потока в режиме Б.

*a* —  $Re = 10,4$ ,  $X_n = 396$  (1), 42 (2), 543 (3) мм, нагреватели:  $60 \times 120$  мм<sup>2</sup> (1),  $150 \times 150$  мм<sup>2</sup> (2, 3);  
*b* — средние значения числа Рейнольдса, нагреватель  $150 \times 150$  мм<sup>2</sup>,  $Re = 22$  (1–3), 33 (4),  $X_n = 543$  (1),  
 132 (2), 120 (3, 4) мм<sup>2</sup>; *c* — высокие значения числа Рейнольдса, нагреватель  $150 \times 150$  мм<sup>2</sup>,  $Re = 44,2$  (1),  
 38 (2), 42 (3),  $X_n = 42$  (1), 200 (2), 543 (3) мм.

Увеличение длины пробег пленки приводило к изменению волнового режима течения. Течение пленки воды и распределение толщины пленки для  $Re = 33$  показаны на рис. 5, на котором выделена область измерения поля толщин пленки. Видно, что на верхнюю часть нагревателя поступали двумерные волны.

При отсутствии нагрева и при малых плотностях тепловых потоков двумерные волны деформировались, проходя по нагревателю, но их трехмерность была выражена слабо. При высоких плотностях тепловых потоков в нижней части

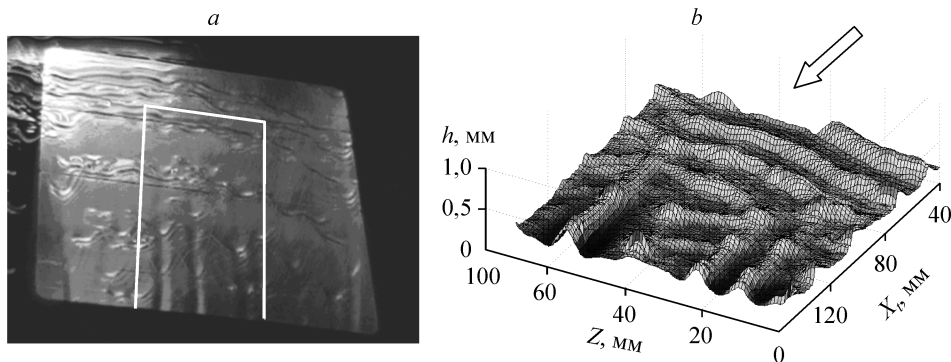


Рис. 5. Фотография (а) и распределение толщины, полученное флуоресцентным методом (b), в нагреваемой пленке воды.

$Re = 33$ ,  $X_n = 120$  мм (нагреватель размером  $150 \times 150$  мм<sup>2</sup>,  $q_{ст} \sim const$ );  $q = 1,47$  (а), 1,3 (b) Вт/см<sup>2</sup>.

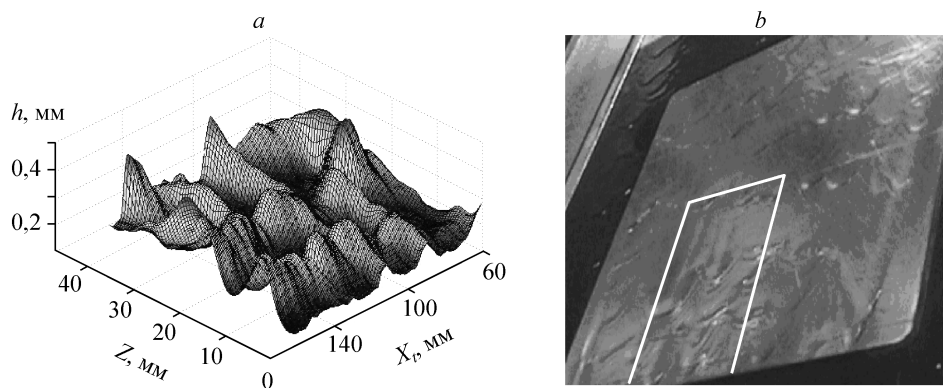


Рис. 6. Распределение толщины, полученное флуоресцентным методом (а) и фотографически (b), в нагреваемой пленке воды.

$X_n = 200$  мм (нагреватель размером  $150 \times 150$  мм<sup>2</sup>,  $q_{ст} \sim \text{const}$ );  $Re = 22$  (a), 33 (b),  $q = 0,92$  (a), 1,15 (b) Вт/см<sup>2</sup>.

нагревателя на поверхности пленки развивались трехмерные волны, причем с увеличением  $q$ , как и при  $X_n = 42$  мм, расстояние между гребнями трехмерных волн уменьшалось (см. рис. 4, b). Формировались струи жидкости, по которым распространялись трехмерные волны. Аналогичная картина наблюдалась при  $Re = 22$ .

При увеличении  $X_n$  до 200 мм при  $Re = 22$  течение волн становилось трехмерным с более сложной структурой (рис. 6). Трехмерные волны появлялись уже и в верхней части нагревателя. Увеличение плотности теплового потока приводило к формированию струй в режиме Б с волнами на их поверхности. Можно отметить, что увеличение длины пробега пленки жидкости при постоянном числе  $Re = 22$  приводило к незначительному увеличению расстояния между струями (см. рис. 4, b).

Увеличение  $X_n$  до значения 396 мм на рабочем участке с нагревателем размером  $60 \times 120$  мм<sup>2</sup> приводило к изменению волновых характеристик стекающих пленок жидкости. Как видно на рис. 7, a в отсутствие нагрева при  $Re = 10,5$  на поверхности пленки наблюдались трехмерные солитообразные волны. На нагреватель натекали от двух до четырех волн. При малых плотностях тепловых потоков структура волн не изменялась при прохождении вдоль нагревателя и струи не образовывались. При высоких плотностях тепловых потоков на рис. 7, b видно,

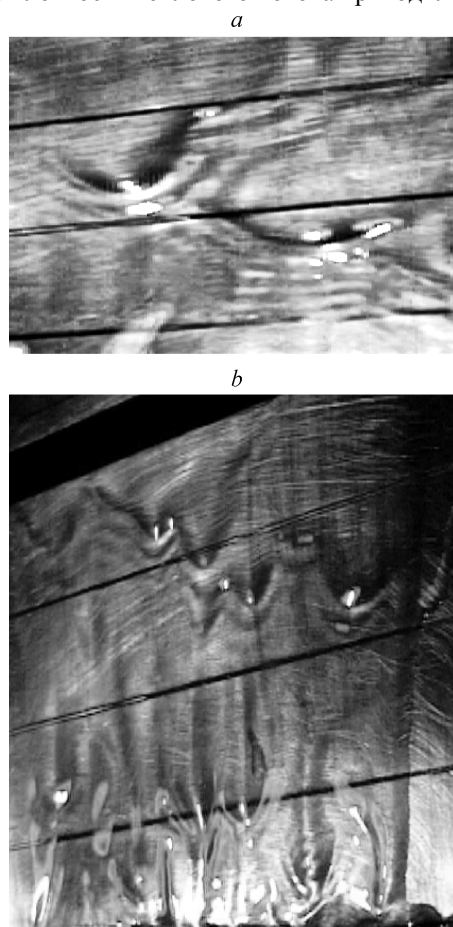


Рис. 7. Фотографии стекающих пленок воды,  $Re = 10,5$ ,  $X_n = 396$  мм, на нагревателе размером  $60 \times 120$  мм<sup>2</sup> ( $T_{ст} \sim \text{const}$ ). Расстояние между горизонтальными полосами 15 мм;  $q = 0$  (a), 1,5 (b) Вт/см<sup>2</sup>.

как происходил процесс формирования струй. Солитообразные волны деформировались, преобразовывались в вертикальные динамические неоднородности, из которых формировались струи в режиме Б.

Данные по безразмерному расстоянию между струями воды для нагревателя размером  $60 \times 120 \text{ мм}^2$  при  $X_n$ , равном 396 мм, также приведены на рис. 4, а. Видно, что при  $Re = 10,5$  и невысоких значениях плотностей тепловых потоков увеличение  $X_n$  приводило к увеличению значения  $\Lambda/l_\sigma$  при формировании струй типа Б, образующихся в нижней половине нагревателя. В этом случае на нагреватель натекали солитообразные волны со значительно большим расстоянием между ними, чем это характерно для формирования струй типа Б.

С увеличением числа Рейнольдса расстояние между гребнями солитообразных волн уменьшалось. При  $Re = 38\text{--}44$  изменение длины пробега пленки жидкости не приводило к заметному изменению расстояния между струями (см. рис. 4, с).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований обнаружено 4 зоны влияния длины пробега пленки воды (условий волнообразования) на формирование струй.

При значениях параметра  $X_n < 100$  мм на нагреватель поступала гладкая пленка. Если нагреватель имел малую длину и целиком располагался в указанной зоне пробега пленки, то волны на поверхности пленки не регистрировались, а при пороговом увеличении плотности теплового потока для  $Re \leq 24$  возникали структуры термокапиллярной природы в режиме А на нагревателях с граничным условием, близким к  $T_{ct} \sim \text{const}$ . На нагревателе длиной 60 мм при  $Re > 5$  регистрировались структуры двух типов. При выполнении условия  $q_{ct} \sim \text{const}$  термокапиллярные структуры в режиме А зарегистрированы не были.

При  $100 < X_n < 200$  мм на нагреватель натекала пленка жидкости с двумерными волнами. На достаточно протяженных нагревателях в указанных зонах регистрировались структуры двух типов. В его верхней части при выполнении граничного условия, близкого к  $T_{ct} \sim \text{const}$ , и  $Re \leq 22$  регистрировались структуры А, а в нижней части нагревателя, как при  $T_{ct} \sim \text{const}$ , так и при  $q_{ct} \sim \text{const}$  ( $Re > 5$ ) струи формировались в режиме Б.

При  $200 < X_n < 300$  мм в верхней части нагревателя распространялись трехмерные волны. В этих условиях структуры А наблюдались только на отдельных участках верхней части нагревателя, как правило, вблизи боковых краев при условиях  $T_{ct} \sim \text{const}$  и  $Re \leq 11$ . Струи в режиме Б формировались на трехмерных волнах.

В случае  $X_n > 300$  мм на нагреватель поступали солитообразные волны. С увеличением плотности теплового потока в нижней половине нагревателя солитообразные волны разрушались и преобразовывались в вертикальные неоднородности, из которых формировались струи с расстоянием между ними, близком к режиму Б.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волны на поверхности вертикально стекающей пленки жидкости. — Новосибирск: ИТФ СО РАН СССР, 1979. — Препринт № 36–79. — 51 с.
2. Liu J., Schneider J. B., Golub J.P. Three-dimensional Instabilities of Film Flows // Phys. Fluids. — 1995. — Vol. 7, No. 1. — P. 55–67.
3. Adomeit P., Renz U. Hydrodynamics of three-dimensional waves in laminar falling films // Inter. J. Multiphase Flow. — 2000. — Vol. 26. — P. 1183–1208.
4. Drosos E.I.P., Paras S.V., Karabelas A.J. Characteristics of Developing Free Falling Films at Intermediate Reynolds and High Kapitza Numbers // Inter. J. Multiphase Flow. — 2004. — Vol. 30. — P. 853–876.



5. **Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М.** Теплообмен в жидкостных пленках. — Киев: Техника, 1972. — 194 с.
6. **Ганчев Б.Г.** Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими пленками. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 192 с.
7. **Гимбутис Г.** Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. — Вильнюс: Мокслас, 1988. — 232 с.
8. **Чиннов Е.А., Кабов О.А.** Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // ПМТФ. — 2003. — Т. 44, № 5. — С. 128–137.
9. **Чиннов Е.А.** Гидродинамика и теплообмен в капиллярных течениях с естественной циркуляцией / Дисс. докт. физ.-мат. наук. — Новосибирск, 2004. — 347 с.
10. **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. Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. — 1995. — Vol. 1. — P. 203–210.
11. **Kabov O.A., Marchuk I.V., Chupin V.M.** Thermal imaging study of the liquid film flowing on vertical surface with local heat source // Russian J. of Engng. Thermophysics. — 1996. — Vol. 6, No. 2. — P. 104–138.
12. **Kabov O.A., Chinnov E.A.** Heat transfer from a local heat source to subcooled falling liquid film evaporating in a vapor-gas medium // Russian J. Engng Thermophysics. — 1997. — Vol. 7, No. 1–2. — P. 1–34.
13. **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 // Russian J. of Engng. Thermophysics. — 2002. — Vol. 11, No. 1. — P. 7–43.
14. **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. 71–79.
15. **Chinnov E.A., Kabov O.A.** Marangoni Effect on Wave Structure in Liquid Films // Micro gravity science and technology. — 2007. — XIX-3/4. — P. 18–22.
16. **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 // Inter. J. Heat and Technology. — 2002. — Vol. 20, No. 1. — P. 69–78.
17. **Чиннов Е.А., Кабов О.А.** Неоднородный нагрев стекающей пленки жидкости с трехмерными деформациями // Теплофизика высоких температур. — 2004. — Т. 42, № 2. — С. 269–278.
18. **Чиннов Е.А., Жуковская О.В., Шарина И.А., Кабов О.А.** Теплообмен в недогретой до температуры насыщения испаряющейся пленке жидкости // Теплофизика высоких температур. — 2006. — Т. 44, № 6. — С. 903–912.
19. **Johnson M. F. G., Schluter R. A., Bankoff S. G.** Fluorescent imaging system for global measurement of liquid film thickness and dynamic contact angle in free surface flows // Rev. Sci. Instrum. — 1997. — Vol. 68, No. 11. — P. 4097–4102.
20. **Алексеев С.В., Антипин В.А., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М.** Стационарные уединенные трехмерные волны на вертикально стекающей пленке жидкости // ДАН. — 2005. — Т. 405, № 2. — С. 193–195.
21. **Чиннов Е.А., Харламов С.М., Сапрыкина А.В., Жуковская О.В.** Измерение деформации нагреваемой пленки жидкости флуоресцентным методом // Теплофизика и аэромеханика. — 2007. — Т. 14, № 2. — С. 249–255.

*Статья поступила в редакцию 12 декабря 2008 г.*