

03

Длина начального термического участка в стекающей пленке жидкости

© Е.А. Чиннов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирский государственный университет
E-mail: chinnov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 5 апреля 2011 г.

С использованием скоростной инфракрасной камеры выполнено экспериментальное исследование изменения длины термического начального участка в стекающей пленке жидкости при высоких числах Рейнольдса. Показано, что в межструйной области, образующейся между гребнями развитых трехмерных синхронных волн, уже при малых тепловых потоках на расстоянии (7 мм) от верхнего края нагревателя формируются зоны с температурой, превышающей начальную температуру пленки. В области струй, формирующихся по гребням трехмерных синхронных волн, длина начального теплового участка больше, но она резко уменьшается с ростом плотности теплового потока.

Длина термического начального участка имеет большое значение при расчете теплообмена к стекающим пленкам жидкости [1] и совершенствовании промышленных аппаратов. В работах [2,3] длина начального теплового участка гладкой ламинарной пленки L_b определена как расстояние между верхней кромкой нагревателя и точкой, где нагретый пограничный слой выходит на поверхность пленки.

В работах [4,5] длина начального теплового участка была измерена для ламинарно-волнового течения пленок. В работе [4] использовался нагреватель длиной 70 мм. Зависимость длины начального теплового участка была получена в диапазоне чисел Прандтля и Рейнольдса $100 < Pr_0 < 180$, $5 < Re_0 < 22.4$. Здесь числа Прандтля $Pr = \nu/\alpha$ и Рейнольдса $Re = \Gamma/\nu\rho$ (Γ — удельный массовый расход жидкости, ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости, α — коэффициент температуропроводности, ρ — плотность жидкости) рассчитаны по начальной температуре пленки T_0 . Для малых значений чисел Рейнольдса ($Re_0 < 3$) и малых тепловых потоков q экспериментальные данные удовлетворительно сочетались с теоретическими зависимостями, предложенными в [2,3]. В работе [5] была получена зависимость для длины

начального теплового участка при ламинарно-волновом течении пленки для случая более длинных нагревателей, обобщающая экспериментальные данные для больших значений температур на поверхности нагрева и чисел Рейнольдса (до $Re = 40$):

$$L_b = a Re_0^b Pr_0 \left(\frac{Pr_0}{Pr_w} \right)^{-0.29} Ka_0^{0.0606} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

$a = 0.8367$, $b = 0.718$ для $Re < 8$, $a = 0.022$, $b = 1.36$ для $Re > 8$, Pr_0/Pr_w — отношение чисел Прандтля пленки в потоке и на стенке нагревателя, $Ka = \sigma^3/gv^4\rho^3$ — число Капицы, σ — коэффициент поверхностного натяжения, g — ускорение силы тяжести.

В [6] было показано, что длина теплового участка для гладкой ламинарной пленки уменьшается с ростом плотности теплового потока за счет влияния термокапиллярных сил, направленных против основного течения. Эффект формирования струй при высоких числах Re (до 250) в верхней части нагревателя был впервые обнаружен в [7].

Задачей данной работы являлось экспериментальное исследование изменения длины начального теплового участка при высоких значениях плотностей тепловых потоков и чисел Рейнольдса в условиях течения развитых трехмерных синхронных волн на поверхности пленки воды вдоль нагревателя.

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с электронасосом, рабочий участок и фильтр. Дистиллированная вода с помощью насоса подавалась в пленкоформирователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Рабочие участки состояли из несущей плиты из текстолита с расположенными на ней нагревателями, стабилизаторами температуры, удлиняющей пластиной и пленкоформирователями. Использовались два рабочих участка с нагревателями размером 100×150 мм, расстоянием $X_n = 263$ мм от сопла пленкоформирователя до верхней кромки нагревателя и нагревателем 150×150 мм, $X_n = 60$ мм. Подобное описание экспериментальной установки, рабочих участков и методик измерений толщины пленки приведено в работах [7–9].

Температура обращенной к пленке стенки нагревателей измерялась термопарами, расположенными на вертикальной оси симметрии. Тепловой поток варьировался в пределах $1.5–10$ Вт/см². Начальная температура воды при выходе из сопла пленкоформирователя T_0 составляла 22 или 30°C. Число Рейнольдса пленки воды равнялось 300.

Для регистрации поля температур на поверхности пленки жидкости использовался высокоскоростной инфракрасный сканер Titanium HD 570M. Поле температур на поверхности пленки измерялось с разрешением до 640×512 pix, частотой полных кадров 100 Hz и чувствительностью 18 mK. Приемником излучения является КРТ-детектор (кадмий–ртуть–теллур), охлаждаемый до азотной температуры встроенной системой, работающей по циклу Стирлинга. Спектральный диапазон работы детектора от 3.7 до $4.8 \mu\text{m}$. Для пленок воды в этом диапазоне коэффициент излучения близок к единице (черное тело). Сканирование поверхности пленок производилось с расстояния, не превышающего 1 m, что позволяло не учитывать ослабление излучения атмосферой. Предполагалось, что основное излучение принималось приемником с верхнего тонкого слоя пленки жидкости толщиной $10 \mu\text{m}$.

В отсутствие теплового потока по поверхности пленки воды распространялись трехмерные волны. Формирование регулярных структур в виде струй на поверхности пленки с $Re = 300$ происходило уже при малых тепловых потоках $q = 1.5 \text{ W/cm}^2$. Граница зон повышенной температуры на поверхности, принадлежащих межструйным областям, начиналась на небольшом расстоянии от верхней кромки нагревателя. При этих тепловых потоках уже наблюдалось формирование струйных течений. Расстояние между струями слабо возрастало с увеличением плотности теплового потока, что согласуется с данными работы [7]. На рис. 1, *a* и *b* приведены мгновенное распределение температуры и усредненная по 100 кадрам термограмма для плотности теплового потока $q = 9.4 \text{ W/cm}^2$. На рис. 1, *c* представлено мгновенное распределение толщин в нагреваемой пленке жидкости при $Re = 300$, $q = 5.95 \text{ W/cm}^2$. Видно, что на мгновенных распределениях толщины и температуры на поверхности стекающей пленки жидкости движутся трехмерные волны с высокой амплитудой. Наблюдалось неравномерное распределение температуры вдоль потока. На осредненном кадре неоднородность распределения температуры вдоль потока практически исчезала.

Длина начального теплового участка L_b определялась отдельно для каждой струи и межструйной области на усредненном тепловизионном кадре. За границу выхода теплового пограничного слоя на поверхность, как и в предшествующих работах, была взята условная точка $T/T_0 = 1.01$, когда температура на поверхности пленки превышала начальную на один процент (рис. 2). Было проанализировано влияние числа усредняемых кадров на среднее значение длины начального участка, проведено сравнение двух величин L_b , полученных при различных

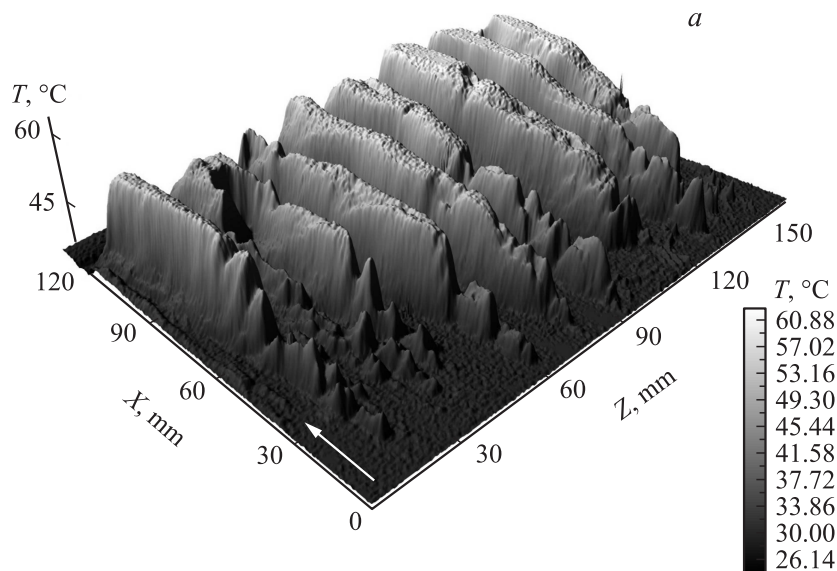


Рис. 1. Распределение температуры по поверхности и толщины в вертикально стекающей пленке воды на нагревателе размером 100×150 mm, $X_n = 263$ mm. *a* — мгновенное распределение температуры, X — координата вдоль потока, отсчитываемая от верхней кромки нагревателя, Z — координата поперек потока, отсчитываемая от правого края нагревателя ($q = 9.4$ W/cm²); *b* — распределение температуры, усредненное по 100 измерениям. Линия 1 ($X = 13$ mm) соответствует средней границе начального теплового участка ($q = 9.4$ W/cm²); *c* — мгновенное распределение толщин в нагреваемой пленке жидкости при $q = 5.95$ W/cm². Стрелками показано направление течения.

способах усреднения. С увеличением числа кадров возрастает точность определения среднего значения длины начального теплового участка. Полученная зависимость величины L_b от номера кадра качественно схожа с представленной в работе [5] для $Re = 13.9$, $q = 2.5$ W/cm², числа и скорости кадров $n = 900$, $v = 450$ fps.

На рис. 3 приведены зависимости средней длины начального теплового участка для струй и межструйных областей от величины теплового потока. Видимо, что в межструйной области, образующейся между гребнями развитых трехмерных синхронных волн, уже при малых

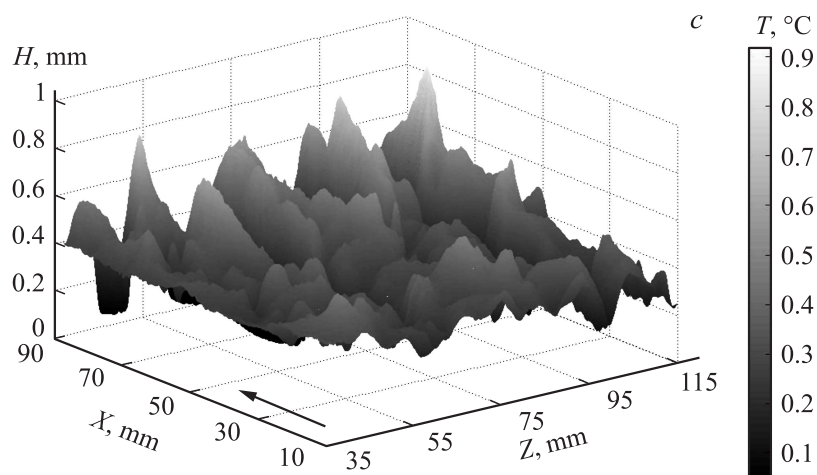
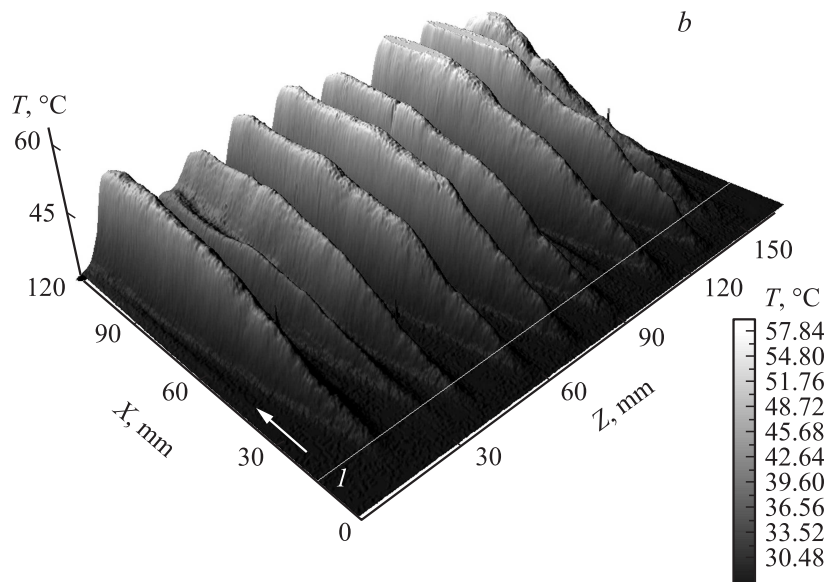


Рис. 1 (продолжение).

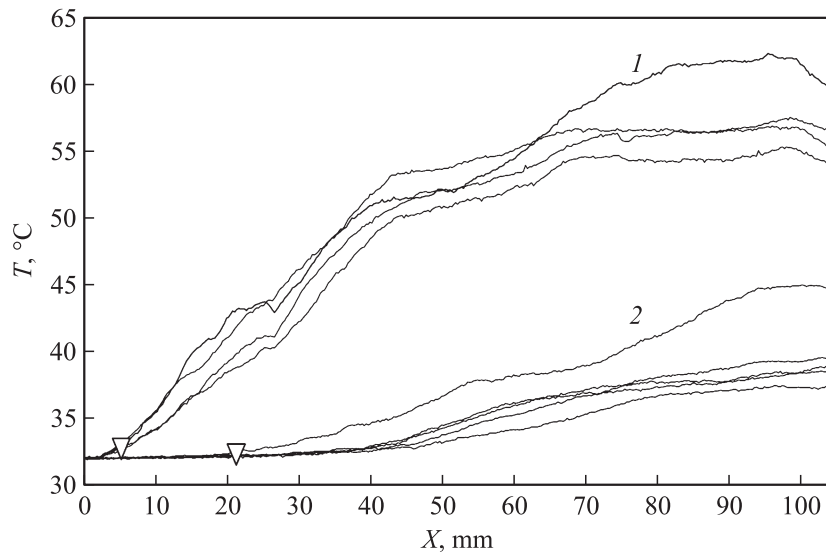


Рис. 2. Зависимость температуры на поверхности пленки от расстояния вдоль потока X , отсчитываемого от верхней кромки нагревателя размером 100×150 mm, $X_n = 263$ mm, $q = 9.4$ W/cm². Кривые 1 соответствуют профилям температуры для межструйной области, кривые 2 — для струй. Отметками показан выход теплового пограничного слоя на поверхность.

тепловых потоках длина начального теплового участка составляет 7 mm. В области струй, формирующихся по гребням трехмерных синхронных волн, длина начального теплового участка больше. Эта длина уменьшается с ростом плотности теплового потока, и при высоких q существенно меньше величины, определяемой по зависимости (1). На изменение длины начального теплового участка наибольшее влияние оказывают волновые и термокапиллярные эффекты. При больших длинах пробега пленки (263 mm) по нагревателю распространяются трехмерные синхронные волны с высокой амплитудой (рис. 1, *c*). Между гребнями трехмерных волн средняя толщина пленки меньше. В этих местах уже при относительно малых тепловых потоках проявляется влияние термокапиллярных сил. В [6] было показано, что длина теплового участка для гладкой ламинарной пленки уменьшается с

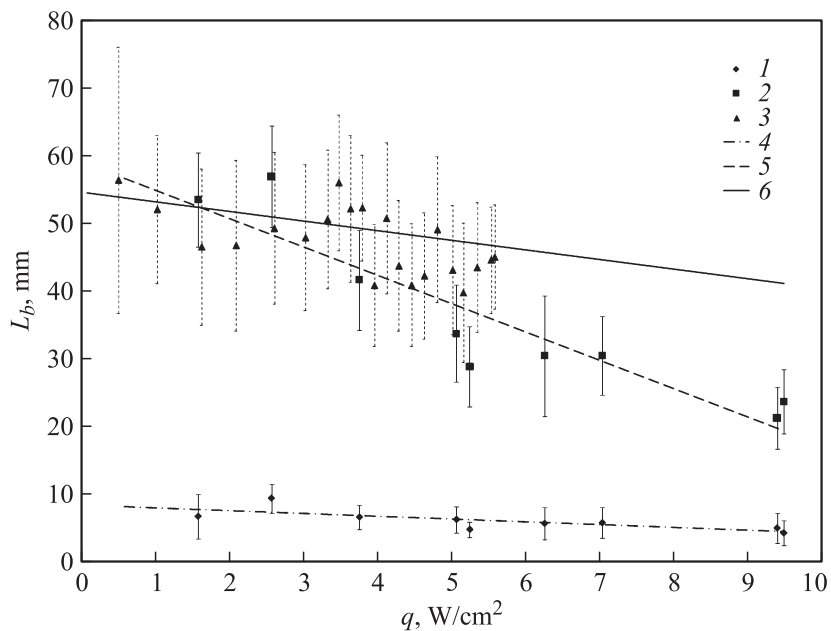


Рис. 3. Зависимость длины начального теплового участка L_b от плотности теплового потока: нагреватель размером 100×150 mm, $X_n = 263$ mm: 1 — для межструйной области, 2 — для струй, 4 и 5 — линии, усредняющие данные для межструйной области и струй. Нагреватель размером 150×150 mm, $X_n = 60$ mm: 3 — среднее значение по 20 сечениям, 6 — теоретические расчеты из работы [5] по формуле (1).

тепловым потоком, потому что конвекция Марангони осуществляется в направлении, противоположном к основному течению.

На нагревателе размером 150×150 mm для тех же чисел Рейнольдса пленки ($Re = 300$) эксперимент проводился при малых длинах пробега пленки (60 mm). Был реализован слабоволновой случай, при котором в верхней части нагревателя наблюдалась практически гладкая, ламинарная пленка жидкости. Волны на поверхности нагревателя находились в области их начального роста, т.е. характеризовались малой амплитудой. Струи были отчетливо видны в нижней части нагревателя при $q > 3$ W/cm², а расстояние между ними достигало 30–40 mm.

В межструйной области зоны повышенной температуры начинались на большем расстоянии от верхней кромки нагревателя и имели меньший размер по сравнению с предыдущим экспериментом. Длина начального теплового участка определялась путем усреднения по 20 профилям. Из рис. 3 видно, что при малой интенсивности волн ($X_n = 60 \text{ mm}$) и невысоких тепловых потоках значения длины начального теплового участка совпадают с расчетами по формуле (1).

Можно заключить, что сочетание сильных волновых и термокапиллярных эффектов может приводить к значительному уменьшению начального термического участка. В результате ставится под сомнение использование для расчета теплообмена в указанных условиях формул из работы [1], основанных на гипотезе существенного влияния начального термического участка.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Правительства России для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах № 11.G34.31.0035 (ГОУ ВПО „Новосибирский государственный университет“).

Список литературы

- [1] Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Моклас, 1988.
- [2] Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. // Теорет. основы хим. технологии. 1980. Т. 14. N 4. С. 483–488.
- [3] Mitrovic J. Der Wärmeaustausch am Berieselungskühler? Brenns. Wärme. Kraft. 1988. V. 40(6). P. 243–249.
- [4] Lel V.V., Dietze G.F., Stadler H., Al-Sibai F., Kneer R. Microgravity Sci. Technol. 2007. XIX-3/4. P. 66–68.
- [5] Lel V.V., Al-Sibai F., Kneer R. // Microgravity Sci. Technol. 2009. V. 21. Suppl. 1. P. 215–220.
- [6] Kabov O.A., Marchuk I.V., Chupin V.M. Russ. J. Eng. Thermophys. 1996. 6 (2). P. 104–138.
- [7] Чиннов Е.А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. N 19. С. 27–33.
- [8] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // ТВТ. 2004. Т. 42. № 2. С. 269–278.
- [9] Чиннов Е.А., Харламов С.М., Назаров А.Д. и др. // ТВТ. 2008. Т. 46. № 5. С. 821–828.