

Е. А. Чиннов, С. С. Абдуракипов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: chinнов@itp.nsc.ru

ТЕРМИЧЕСКИЙ НАЧАЛЬНЫЙ УЧАСТОК В СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ВЫСОКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА *

С использованием полевых методов измерения толщины и температуры выполнено экспериментальное исследование длины термического начального участка в стекающей пленке жидкости при высоких числах Рейнольдса. Показано, что сочетание сильных волновых и термокапиллярных эффектов приводит к значительному уменьшению длины начального термического участка.

Ключевые слова: стекающая пленка жидкости, термический начальный участок, большие числа Рейнольдса.

Протяженность начального термического участка имеет большое значение при расчете теплообмена к стекающим пленкам жидкости [1] и совершенствовании промышленных аппаратов. Теоретически теплообмен на начальном участке ламинарно стекающей гладкой пленки рассмотрен в работе [2]. Длина начального термического участка гладкой ламинарной пленки L_b определена как расстояние между верхней кромкой нагревателя и точкой, где нагретый пограничный слой выходит на поверхность пленки. В работе [3] получена экспериментальная зависимость длины начального термического участка при ламинарно-волновом течении пленки для чисел Рейнольдса до 40.

Задачей данной работы являлось экспериментальное исследование изменения длины начального термического участка при $Re = 300$ 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 нагревателем 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. Подробное описание экспериментальной установки, рабочих участков и методик измерений толщины пленки приведено в [4; 5]. Для определения мгновенного поля толщины и волновых харак-

* Работа выполнена в рамках программы Правительства России для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (№ 11.G34.31.0035), и Фонда содействия развитию МФП в НТС (ГК № р/15073).

Авторы выражают благодарность С. М. Харламову и В. В. Гузанову за помощь в проведении экспериментальных исследований.

теристик пленки использован флуоресцентный метод [5]. Для регистрации поля температур на поверхности пленки жидкости использовался высокоскоростной инфракрасный сканер Titanium HD 570M.

В отсутствие теплового потока по поверхности пленки воды распространялись трехмерные волны. С увеличением плотности теплового потока происходило формирование регулярных структур в виде струй на поверхности пленки. На рис. 1 приведено усредненное распределение температуры для $q = 6,3 \text{ Вт/см}^2$. Длина начального термического 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 (обозначены треугольниками на рис. 1) На рис. 2 представлено среднее распределение толщин в нагреваемой пленке жидкости при $q = 6 \text{ Вт/см}^2$.

На рис. 3 приведены зависимости средней длины начального термического участка для струй и межструйных областей от величины теплового потока. Видно, что в межструйной области, образующейся между гребнями развитых трехмерных синхронных волн, уже при малых тепловых потоках длина начального термического участка составляет 7–10 мм. Далее L_b слабо убывает с увеличением теплового потока. В области струй, формирующихся по гребням трехмерных синхронных волн, длина начального термического участка больше. Эта длина совпадает с L_b , определяемой по экспериментальной зависимости из [3] при малых q (L_b рассчитывалось по среднему начальному значению числа Рейнольдса $Re = \Gamma/\mu$, где Γ – удельный массовый расход жидкости, μ – коэффициент динамической вязкости жидкости). Длина начального термического участка резко уменьшается с ростом плотности теплового потока, и при высоких q существенно меньше величины, определяемой по той же зависимости. Этот факт можно объяснить тем, что данная зависимость

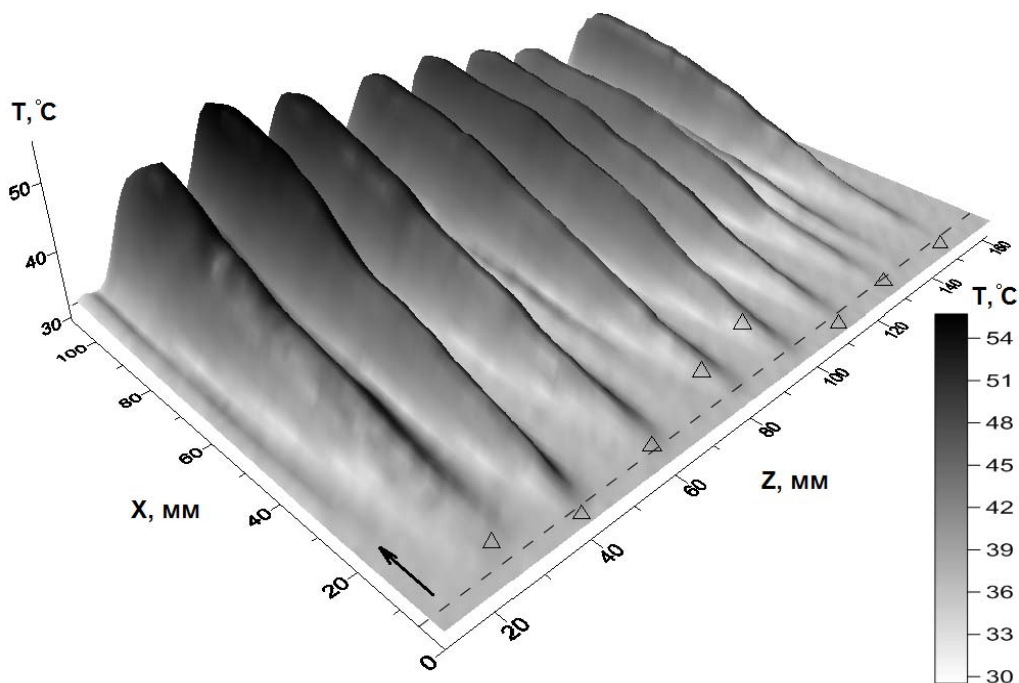


Рис. 1. Усредненное распределение температуры по поверхности в вертикально стекающей пленке воды (нагреватель размером $100 \times 150 \text{ мм}$, $X_n = 263 \text{ мм}$, $q = 6,3 \text{ Вт/см}^2$). X – координата вдоль потока от верхней кромки нагревателя, Z – координата поперек потока от правого края нагревателя; пунктирная линия ($X = 5,7 \text{ мм}$) – средняя граница начального теплового участка в межструйных областях. Отметками обозначены границы L_b в межструйных областях. Стрелкой показано направление течения

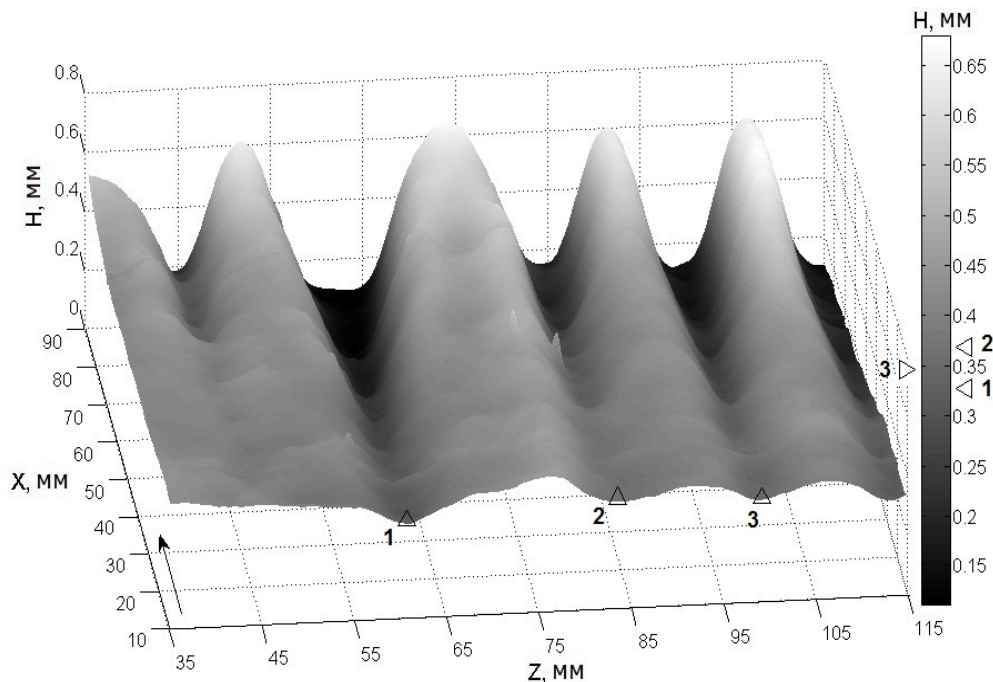


Рис. 2. Усредненное распределение толщины в вертикально стекающей пленке воды (нагреватель размером 100×150 мм, $X_n = 263$ мм, $q = 6$ Вт/см²). Отметками показаны толщины остаточного слоя в межструйных областях

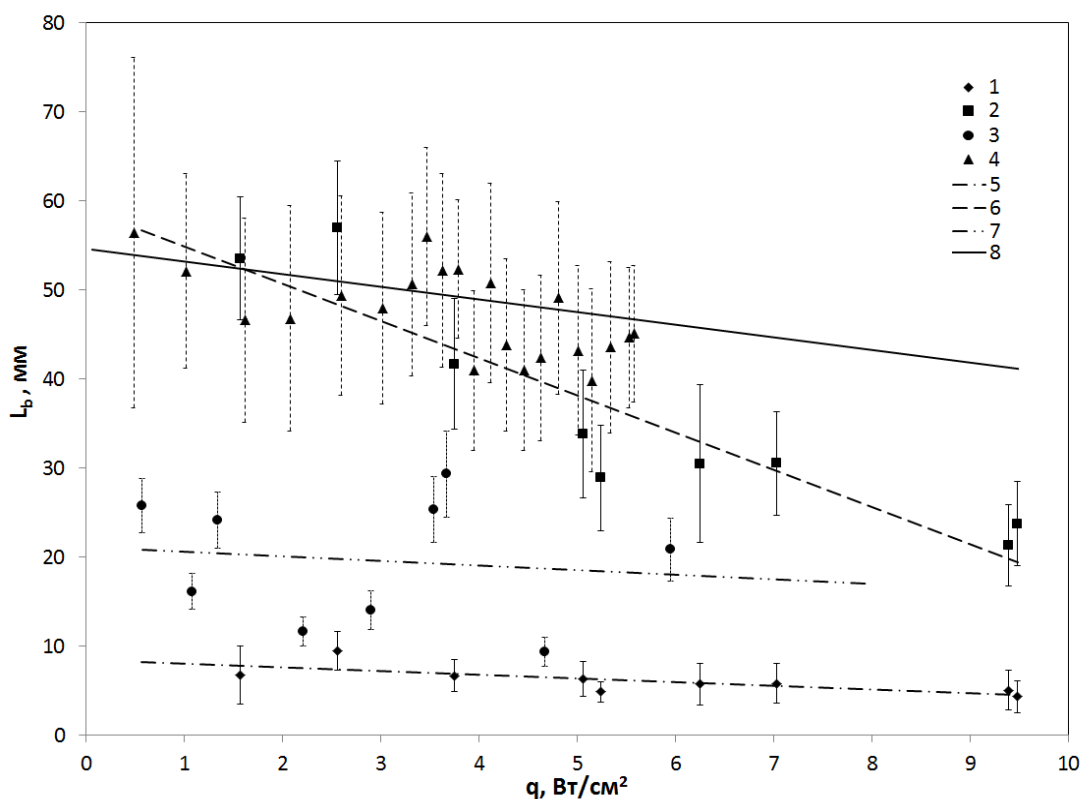


Рис. 3. Зависимость длины начального теплового участка L_b от плотности теплового потока: нагреватель размером 100×150 мм, $X_n = 263$ мм: 1 – для межструйной области; 2 – для струй; 3 – расчет по измерениям толщины остаточного слоя; 5, 6 – линии, усредняющие данные для межструйной области и струй; 7 – линия, усредняющая расчет по толщине. Нагреватель размером 150×150 мм, $X_n = 60$ мм: 4 – среднее значение по 20 сечениям; 8 – расчеты по экспериментальной зависимости из работы [3]

не учитывает влияние термокапиллярного эффекта, который, исходя из полученных авторами работы данных по распределению термокапиллярных касательных напряжений, играет существенную роль при больших тепловых потоках. При малом значении X_n 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. Из рис. 3 следует, что при малой интенсивности волн ($X_n = 60$ мм) и относительно невысоких тепловых потоках значения длины начального термического участка совпадают с расчетами по зависимости из [3]. Как видно из рис. 2, между гребнями трехмерных волн средняя толщина пленки меньше. По этой толщине в области выхода теплового пограничного слоя по зависимости Нуссельта вычислялось локальное число Рейнольдса. Длина начального участка L_b по данным о толщине рассчитывалась аналогично. Это значение L_b , приведенное на рис. 3, выше измеренного. Зависимость L_b , построенная по остаточному слою в межструйной области, качественно показывает, что «сильный волновой эффект» (развитые трехмерные синхронные волны) приводит к уменьшению L_b , но его недостаточно для объяснения наблюдаемого явления. Отсутствие зависимости от q подтверждает его гидродинамическую природу. Вторым фактором – это термокапиллярный эффект. В межструйных областях уже при относительно

малых тепловых потоках проявляется влияние термокапиллярных сил.

Таким образом, сочетание сильных волновых и термокапиллярных эффектов может приводить к значительному уменьшению длины начального участка термической стабилизации.

Список литературы

1. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Моклас, 1988. 233 с.
2. Накоряков В. Е., Григорьева Н. И. Расчет тепломассообмена при неизотермической абсорбции на начальном участке стекающей пленки // Теорет. основы хим. технологии. 1980. Т. 14, № 4. С. 483–488.
3. *Lel V. V., Al-Sibai F., Kneer R.* Thermal Entry Length and Heat Transfer Phenomena in Laminar Wavy Falling Films // *Microgravity Sci. Technol.* 2009. Vol. 21. Suppl. 1. P. 215–220.
4. Чиннов Е. А. Термокапиллярные эффекты в нагреваемой пленке жидкости при высоких числах Рейнольдса // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, № 19. С. 27–33.
5. Чиннов Е. А., Харламов С. М., Назаров А. Д. и др. Комплексное измерение волновых характеристик нагреваемой пленки жидкости емкостным и флуоресцентным методами // ТВТ. 2008. Т. 46, № 5. С. 821–828.

Материал поступил в редколлегию 01.06.2011

E. A. Chinnov, S. S. Abdurakipov

THERMAL ENTRY IN FALLING LIQUID FILMS AT HIGH REYNOLDS NUMBERS

An experimental study of thermal entry length in falling liquid films at high Reynolds numbers was performed with the use of field methods for thickness and temperature measuring. It was shown that the combination of the strong wave and thermocapillary effects leads to a significant decrease of thermal entry length.

Keywords: falling liquid films, thermal entry, high Reynolds numbers.