

03

Термокапиллярные эффекты в нагреваемой пленке жидкости при высоких числах Рейнольдса

© Е.А. Чиннов

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

Поступило в Редакцию 13 февраля 2008 г.

Выполнено экспериментальное исследование формирования струй на поверхности нагреваемой пленки вод при значениях числа Рейнольдса от 100 до 250. Измерены расстояния между струями в зависимости от числа Рейнольдса и плотности теплового потока. Обнаружен эффект деформации пленки жидкости в области начального участка теплообмена. Установлено, что искусственные возмущения в определенном диапазоне длин волн вызывают изменение количества струй на нагревателе. Для высоких значений числа Рейнольдса обнаружена интенсификация теплообмена при воздействии искусственных возмущений с „наиболее опасной“ длиной волны.

PACS: 47.20.Ma, 47.55.nb

В работах [1–5] установлено, что при малых и средних значениях чисел Рейнольдса термокапиллярные силы оказывают существенное влияние на гидродинамику и теплообмен в стекающих пленках жидкости и приводят к формированию струй на их поверхности в виде регулярных структур. Обнаружены различные механизмы формирования струй в неизотермических пленках жидкости, выделено два режима: термокапиллярный ($Re \leq 12$) и термокапиллярно-волновой ($5 \leq Re \leq 50$).

В работе [6] показано, что искусственные возмущения в определенном диапазоне длин волн вызывают изменение количества струй на нагревателе. Определена „наиболее опасная длина волны искусственных возмущений“. Однако область исследованных значений чисел Рейнольдса пленки не превышала 50.

До последнего времени считалось, что при высоких числах Рейнольдса влияние термокапиллярных сил на характеристики пленочного течения незначительно. В зависимостях для расчета теплоотдачи

в стекающих пленках жидкости влияние термокапиллярных сил не учитывалось [7,8].

Целью данной работы является исследование влияния термокапиллярных эффектов на гидродинамику и теплообмен в стекающих пленках жидкости при высоких (до 250) числах Рейнольдса.

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. Рабочий участок состоял из несущей плиты из текстолита с расположенными на ней нагревателем, стабилизаторами температуры и пленкоформирователем. Пленкоформирователь располагался в верхней части рабочего участка. Расстояние от нижнего края сопла пленкоформирователя до верхнего края нагревателя составляло 263 mm. Нагреватель представлял собой плоский теплообменник с длиной вдоль течения пленки 100 mm и шириной 150 mm из меди с прямоугольными каналами внутри для движения нагретой жидкости. Температура обращенной к пленке стенки нагревателя измерялась тремя термомпарами, расположенными на вертикальной оси симметрии. На поверхности нагрева реализовывалось граничное условие, близкое к $T = \text{const}$. Средняя плотность теплового потока q на нагревателе определялась по количеству тепла переданного от подогревающей воды. Дополнительная информация о конструкции установки приведена в [9]. Число Рейнольдса пленки изменялось от 100 до 250 ($Re = \Gamma/\mu$, где Γ — удельный массовый расход жидкости, μ — коэффициент динамической вязкости жидкости). Начальная температура жидкости T_0 при выходе из сопла пленкоформирователя составляла 25°C.

Для создания искусственных возмущений использовалась механическая система расположенных в горизонтальную линию цилиндров диаметром $d_w = 3$ mm, которая опускалась в пленку жидкости выше верхнего края нагревателя на 7 mm. Расстояние l_w между цилиндрами изменялось от 5 до 30 mm. Количество струй на поверхности пленки жидкости в зоне нагрева определялось по теневым фотографиям, полученным с помощью цифровых фото и видео камер.

В отсутствие теплового потока по поверхности пленки воды распространялись трехмерные волны. При нагреве пленки происходило формирование струй (рис. 1, а). При течение пленок воды для $Re = 110$

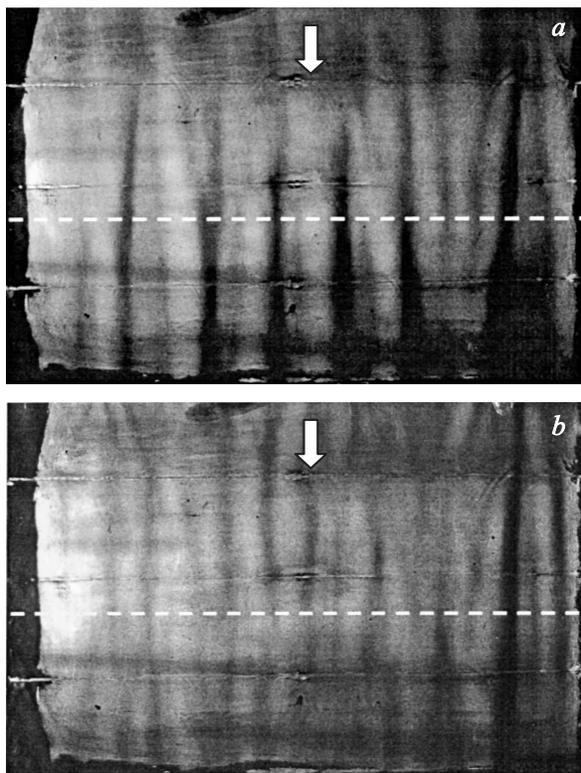


Рис. 1. Фотографии течения пленки при формировании струй, $Re = 250$ (стрелками показано направление течения). *a* — без возмущений, $q = 5.5 \text{ W/cm}^2$, $\Lambda = 15 \text{ mm}$; *b* — возмущения $l_w = 10 \text{ mm}$, $q = 5.6 \text{ W/cm}^2$, $\Lambda = 11 \text{ mm}$.

в отсутствие возмущений расстояние между струями Λ слабо убывало от 15 до 12 mm с увеличением плотности теплового потока (рис. 2), что согласуется с данными для воды при меньших числах Рейнольдса [3]. При $Re = 250$ в отсутствие внешних возмущений расстояние между струями слабо возрастало от 13.5 до 16 mm с увеличением плотности теплового потока, что противоречило данным для воды при меньших числах Рейнольдса, но согласовывалось с результатами для жидкости FC-72 при высоких Re [10]. Закономерности естественного формирования струй на поверхности нагреваемой пленки жидкости

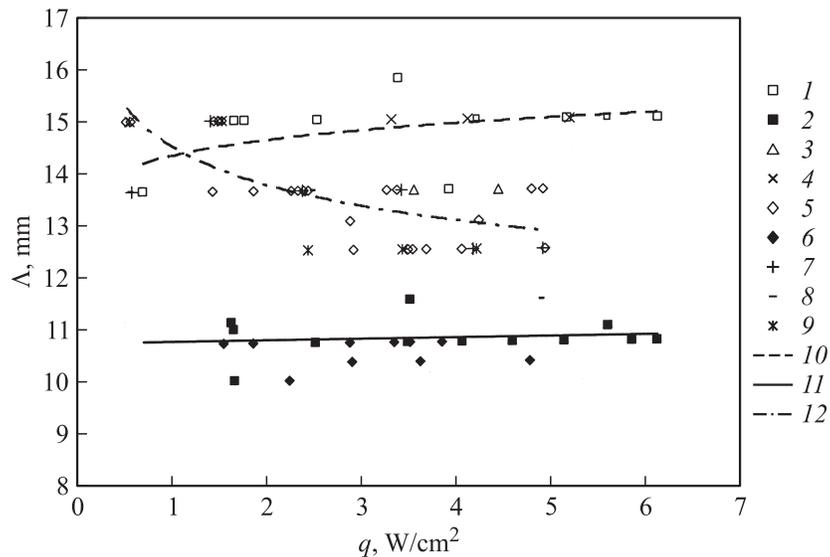


Рис. 2. Зависимость расстояния между струями от плотности теплового потока: 1 — $Re = 250$ без возмущений, 2 — $Re = 250$, $l_w = 10$ mm, 3 — $Re = 250$, $l_w = 5$ mm, 4 — $Re = 250$, $l_w = 30$ mm, 5 — $Re = 110$ без возмущений, 6 — $Re = 110$, $l_w = 10$ mm, 7 — $Re = 110$, $l_w = 5$ mm, 8 — $Re = 110$, $l_w = 15$ mm, 9 — $Re = 110$, $l_w = 20$ mm, 10 — линия, усредняющая данные для $Re = 250$ без возмущений, 11 — линия, усредняющая данные для $Re = 250$ с возмущением $l_w = 10$ mm, 12 — линия, усредняющая данные для $Re = 110$ без возмущений.

существенно отличаются для различных диапазонов чисел Рейнольдса. По-видимому, кроме хорошо изученных термокапиллярного ($Re \leq 12$) и термокапиллярноволнового ($5 \leq Re \leq 50$) режимов формирования струй существует новый режим при высоких числах Рейнольдса.

Наблюдались значительные деформации на поверхности пленки жидкости (рис. 1, а). Струи распространялись вверх по нагревателю в область начального теплового участка, где в условиях гладкой пленки жидкости тепловой пограничный слой еще не должен был выйти на поверхность. На рис. 1 граница начального теплового участка L_b в стекающей пленке жидкости, рассчитанная по данным работы [8], обозначена штриховой линией. Следует отметить, что эффект формирования струй при высоких Re в верхней части нагревателя до

выхода теплового пограничного слоя на поверхность пленки жидкости обнаружен впервые.

В отсутствие нагрева пленки влияние внешних возмущений на волновые характеристики не наблюдалось. В диапазоне чисел Рейнольдса от 100 до 250 при $q > 1 \text{ W/cm}^2$ и воздействии искусственных возмущений с $l_w = 10 \text{ mm}$, $d_w = 3 \text{ mm}$ расстояние между струями уменьшалось до 10–10.7 mm (рис. 1, *b*) и не зависело от плотности теплового потока, рис. 2. Возмущения с „наиболее опасной“ длиной волны были зарегистрированы при $l_w = 10 \text{ mm}$, что соответствовало ранее полученным данным для $Re = 10 - 40$ [6]. Как и в работе [6], „наиболее опасная“ длина волны возмущений соответствовала такому расстоянию l_w между цилиндрами, при котором на поверхности нагреваемой пленки жидкости происходили наибольшие изменения, то есть образовывалось максимальное количество струй. Возмущения с $l_w = 5, 15, 20 \text{ mm}$, $d_w = 3 \text{ mm}$ не приводили к существенному изменению расстояния между струями. Из рис. 2 видно, что расстояние между струями при воздействии возмущений с „наиболее опасной“ длиной волны не зависит от Re и практически совпадает с длиной этого возмущения. Диапазон чисел Рейнольдса, в котором искусственные возмущения в неизотермической стекающей пленке жидкости изменяют расстояние между струями существенно шире, чем это предполагалось ранее.

Неожиданным фактом стало обнаружение интенсификации теплообмена в отсутствие испарения для высоких значений $Re > 200$, при воздействии внешних стационарных возмущений с $l_w = 10 \text{ mm}$ и $d_w = 3 \text{ mm}$. На рис. 3 показана зависимость безразмерного среднего коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока. Безразмерный коэффициент теплоотдачи представлял собой отношение среднего коэффициента теплоотдачи α при воздействии внешних возмущений с „наиболее опасной“ длиной волны к среднему коэффициенту теплоотдачи α_0 при естественном формировании струй. Средний коэффициент теплоотдачи рассчитывался по зависимости $\alpha = q(T_w - T_0)$, где T_w — средняя температура (определяемая по трем термопарам) на поверхности нагревателя. Видно, что искусственные стационарные возмущения с $l_w = 10 \text{ mm}$ и $d_w = 3 \text{ mm}$ по мере увеличения плотности теплового потока приводят к интенсификации теплообмена до 20%. При $Re = 110$ искусственные возмущения с $l_w = 10 \text{ mm}$ не вызывают заметную интенсификацию теплообмена. При возмущениях с $l_w = 5, 15, 20, 30 \text{ mm}$ средний коэффициент теплоотдачи для $Re = 110$ также

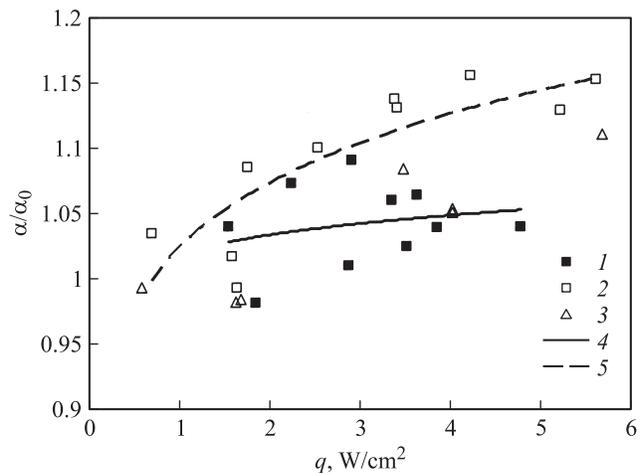


Рис. 3. Интенсификация среднего коэффициента теплоотдачи при воздействии внешних возмущений с $l_w = 10$ mm: 1 — $Re = 110$, 2 — $Re = 250$, 3 — $Re = 200$, 4 — линия, усредняющая данные для $Re = 110$, 5 — линия, усредняющая данные для $Re = 250$.

не изменяется. Для $Re = 250$ при увеличении плотности теплового потока возмущения с $l_w = 5, 15, 20, 30$ mm приводили к незначительной интенсификации теплообмена по сравнению с невозмущенной пленкой, в пределах 5%. По-видимому, различие во влиянии внешних возмущений для указанных Re связано с разными режимами теплообмена. При $Re \leq 110$ длина начального участка теплообмена для пленок воды не превышала 20 mm и теплоотдача от нагревателя происходила в основном в области стабилизированного теплообмена. При $Re = 250$ начальный участок теплообмена составлял 60 mm, занимал более половины длины нагревателя и определял теплоотдачу. Формирование струй, по-видимому, не приводило к существенному изменению стабилизированного теплообмена, но значительная деформация поверхности пленки оказывала влияние на теплообмен на начальном участке. Для выяснения закономерностей данного явления необходимы дальнейшие исследования.

Таким образом, обнаружено, что термокапиллярные эффекты оказывают значительное влияние на гидродинамику и теплообмен в нагреваемой стекающей пленке жидкости при высоких числах Рейнольдса.

Показано, что закономерности формирования струй при высоких числах Рейнольдса отличаются от ранее исследованных режимов.

Обнаружен эффект формирования струй верхней части нагревателя, выше предполагаемого выхода теплового пограничного слоя на поверхность пленки жидкости.

Установлено, что искусственные возмущения с „наиболее опасной“ длины волны в неизотермической стекающей пленке жидкости изменяют расстояние между струями в диапазоне чисел Рейнольдса от 100 до 250.

Для чисел Рейнольдса более 200 обнаружена интенсификация теплообмена при воздействии искусственных возмущений с „наиболее опасной“ длиной волны.

Работа поддержана грантами РФФИ (проекты №№ 05-8-33325-а, 06-01-00360-а), СО РАН Междисциплинарный интеграционный проект № 111) и Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-6749.2006.8.

Список литературы

- [1] *Kabov O.A., Diatlov A.V., Marchuk I.V.* // Proc. of the First Int. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. 1995. V. 1. P. 203–210.
- [2] *Kabov O.A., Chinnov E.A.* // Russian Journal Engineering Thermophysics. 1997. V. 7. N 1,2. P. 1–34.
- [3] *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* // ПМТФ. 2003. Т. 44. N 5. С. 128–137.
- [4] *Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Сапрыкина А.В.* и др. // ТВТ. 2007. Т. 45. Т. 45. N 5. С. 725–732.
- [5] *Chinnov E.A., Kabov O.A.* // Microgravity science and technology. 2007. XIX. N 3/4. P. 18–22.
- [6] *Чиннов Е.А., Жуковская О.В.* // Письма ЖТФ. 2006. Т. 32. N 9. С. 7–94.
- [7] *Ганчев Б.Г.* Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими пленками. М.: Энергоатомиздат, 1987. 192 с.
- [8] *Гимбутис.* Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Моксклас, 1988. 232 с.
- [9] *Чиннов Е.А., Жуковская О.В., Шарина И.А.* и др. // ТВТ. 2006. Т. 44. № 6. С. 903–912.
- [10] *Чиннов Е.А.* Гидродинамика и теплообмен в капиллярных течениях с естественной циркуляцией. Дис. докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2004. 347 с.