

03

Развитие пульсаций температуры в нагреваемой пленке жидкости

© Е.А. Чиннов

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

Поступило в Редакцию 20 февраля 2015 г.

Выполнен анализ динамики пульсаций температуры на поверхности вертикально стекающей нагреваемой пленки воды при значении числа Рейнольдса, равном 500, в условиях движения развитых трехмерных волн. Показано, что высокочастотная составляющая пульсаций температуры затухает по мере движения пленки в нижней части нагревателя. Часть температурных возмущений сносится в область струй за счет поперечных термокапиллярных сил. При высоких плотностях тепловых потоков нижней границы нагревателя достигают только максимальные пульсации температуры, создаваемые наиболее крупными волнами. При этом происходит снижение усредненной интегральной энергии пульсаций температуры в межструйной области.

Анализ волновой динамики и пульсаций температуры в нагреваемых пленках жидкости важен для понимания механизмов интенсификации теплообмена и разрыва пленки. Исследования влияния термокапиллярных сил на характеристики гидродинамических волн содержатся в работах [1–5]. Исследование нестационарного теплообмена при кипении в стекающих волновых пленках жидкости выполнено в [6].

В статье [7] показано, что для нагреваемой пленки жидкости при умеренных числах Рейнольдса ($Re = 22$) снижение амплитуды волн в межструйной области при уменьшении локального расхода жидкости происходит более быстро, чем этого требуют законы „холодной гидродинамики“. С другой стороны, максимальные относительные амплитуды волн [8] и пульсации температуры, характеризующие модифицированным числом Марангони [9], увеличиваются по мере нагрева пленки в межструйной области и практически не изменяются на гребне струи. Показано, что этот эффект возрастает с увеличением числа Рейнольдса.

Однако детальный анализ эволюции разночастотных пульсаций температуры в нижней области нагревателя к настоящему моменту не

выполнен. Неясно, каким образом ведут себя пульсации температуры, вызванные гидродинамическими волнами с разной начальной амплитудой. Результаты такого анализа для $Re = 500$ представлены в данной работе.

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий в себя 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 расположенным на ней нагревателем, стабилизатором температуры и пленкоформирователем. Использовался нагреватель размером 100×150 mm. Расстояние X_n от нижнего края сопла пленкоформирователя до верхней кромки нагревателя составляло 263 mm. Подробное описание экспериментальной установки и рабочего участка приведено в [10].

Температура обращенной к пленке стенки нагревателя измерялась термопарами, расположенными на вертикальной оси симметрии. Плотность теплового потока q варьировалась в пределах $1.3\text{--}13$ W/cm². Начальная температура воды при выходе из сопла пленкоформирователя T_0 составляла 26°C. Число Рейнольдса пленки воды определялось по формуле $Re = \Gamma/\mu$, где Γ — удельный массовый расход жидкости на единицу ширины пленки, μ — коэффициент динамической вязкости жидкости.

В экспериментах использовался инфракрасный сканер Titanium HD 570M, позволяющий измерять поле температуры на поверхности пленки с разрешением до 640×512 пикселей, частотой полных кадров до 115 Hz и чувствительностью 18 mK.

Для исследованных условий течения пленки жидкости наблюдалось формирование струй и распространение развитых трехмерных синхронных волн по поверхности вдоль нагревателя. В работе [11] показано, что для изотермического случая переход от двумерного к трехмерному волновому движению на вертикально стекающих пленках жидкости сопровождается перераспределением жидкости в горизонтальном направлении. В нагреваемой пленке жидкости за счет влияния термокапиллярных сил перераспределение жидкости значительно возрастает. Происходит формирование струй и тонкой пленки жидкости между ними [8]. Характеристики гидродинамических волн существенно изменяются при их прохождении вдоль нагревателя. Динамика пульсаций температуры в межструйной области, в нижней части нагревателя

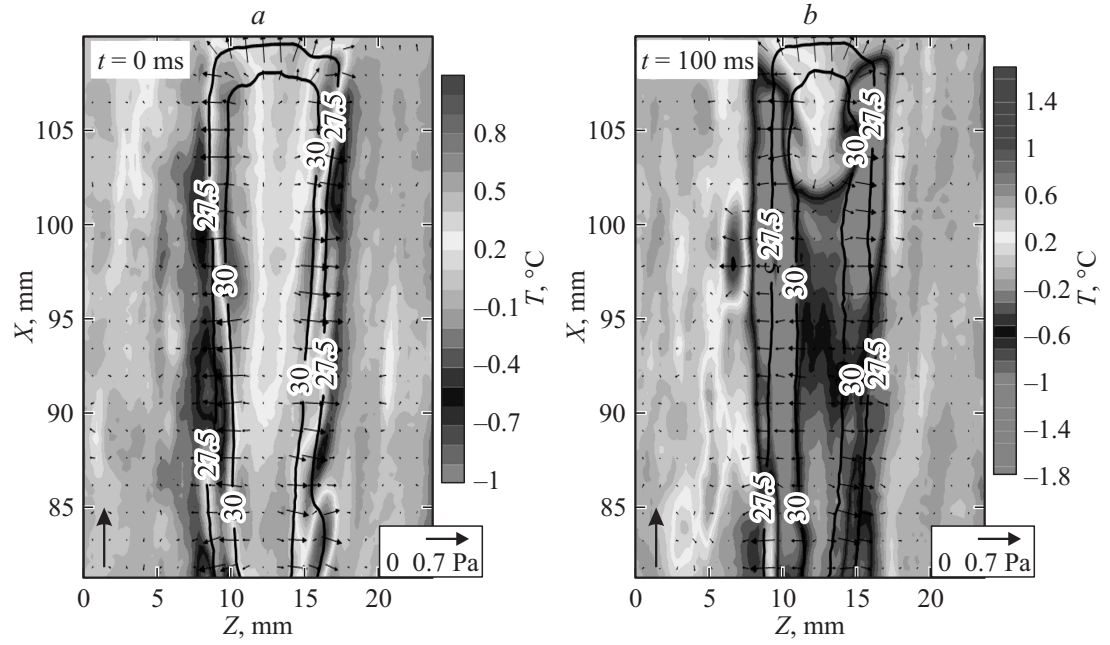


Рис. 1. Эволюция пульсаций температуры и касательных напряжений в межструйной области у нижнего края нагревателя при $q = 1.3 \text{ W/cm}^2$. Стрелкой показано направление потока. Сплошными линиями показаны изолинии температуры, обозначающие примерную границу межструйной области.

показана на рис. 1, где приведены их мгновенные распределения в разные моменты времени.

На рис. 1, *a* межструйная область имеет максимальные поперечные размеры. При этом толщина пленки в центральной части межструйной области минимальна. По сравнению с границами межструйной области пульсации температуры здесь практически отсутствуют. На границе межструйной области наблюдаются значительные касательные напряжения, раздвигающие струи. На рис. 1, *b* показано прохождение перемычки с холодной жидкостью между фронтами крупных трехмерных волн, которая „несет на себе“ отрицательные температурные пульсации. В центре межструйной области, по которой движется указанная перемычка, толщины пленки меньше. Здесь холодная жидкость нагревается быстрее, чем на периферии. Возникают термокапиллярные касательные напряжения, направленные к краям межструйной области и в сторону струй. Происходит перемещение отрицательных пульсаций температуры за границу межструйных областей. Толщина пленки жидкости в межструйной области уменьшается, а температура на ее поверхности выравнивается. Затем поперечные размеры и температура пленки в межструйной области начинают возрастать, снова реализуется картина, близкая к рис. 1, *a*, до момента прихода следующей перемычки с холодной жидкостью. Таким образом, происходящее перемещение жидкости в межструйной области — квазипериодический процесс, который должен быть отражен в спектре пульсаций температуры.

Изменения в спектре пульсаций температуры в межструйной области вдоль нагревателя показаны на рис. 2. С увеличением X спектры пульсаций существенно изменяются. Энергия высокочастотных пульсаций уменьшается. В межструйной области до конца нагревателя доходят только остатки перемычек от самых крупных волн, что получает отражение в изменении спектра. Эти волны имеют максимальные амплитуды и примерно соответствуют частоте 1 Hz. Амплитуды более мелких волн уменьшаются за счет гидродинамических причин (уменьшения толщины пленки и локального числа Рейнольдса) [7] или сносятся термокапиллярными силами в область струи.

Интегральная энергия пульсаций температуры в единицу времени, усредненная отдельно для всех струй и межструйных областей для разных положений X вдоль нагревателя, показана на рис. 3 для двух значений q . В пяти точках потока $X = 0, 25, 50, 75, 100$ mm бралась проба пульсаций температуры в середине струи и в центре межструйной

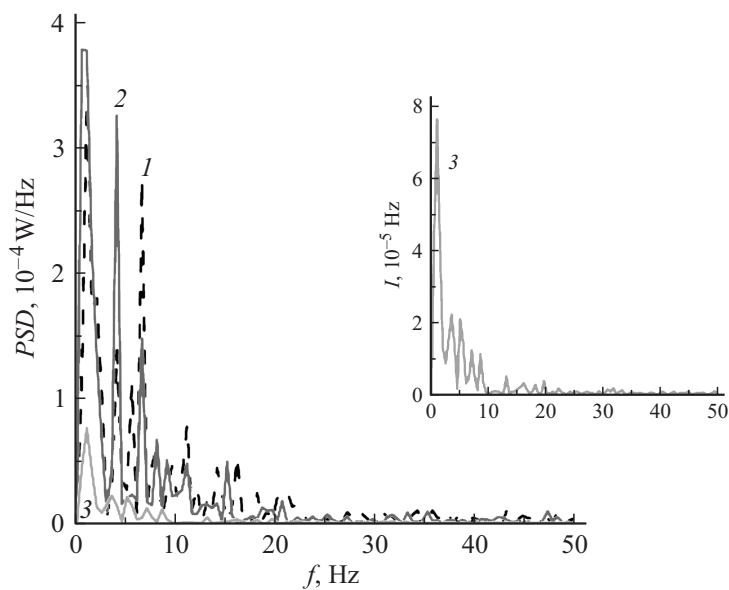


Рис. 2. Плотность спектральной энергии пульсаций температуры в зависимости от частоты в центре межструйной области при различных расстояниях от верхней кромки нагревателя X , мм: 1 — 50, 2 — 75, 3 — 100.

области. Далее для каждой пробы пульсаций рассчитывался спектр с помощью быстрого преобразования Фурье, затем этот спектр пульсаций численно интегрировался (находилась площадь под графиком функции — полная энергия пульсаций). Затем для каждого положения X значение полной энергии усреднялось отдельно для струй и межструйных областей.

Из рис. 3 видно, что для струй при всех значениях тепловых потоков интегральная энергия пульсаций температуры монотонно возрастает с X , причем наибольший рост наблюдается в нижней части нагревателя. В межструйной области энергия пульсаций существенно выше.

При высоких плотностях тепловых потоков наблюдается уменьшение интегральной энергии пульсаций в межструйных областях при больших X , (рис. 3, *b*). В наиболее нагретых зонах у нижнего края нагревателя ($X = 100$ мм), где пленка совсем тонкая, происходит эффект

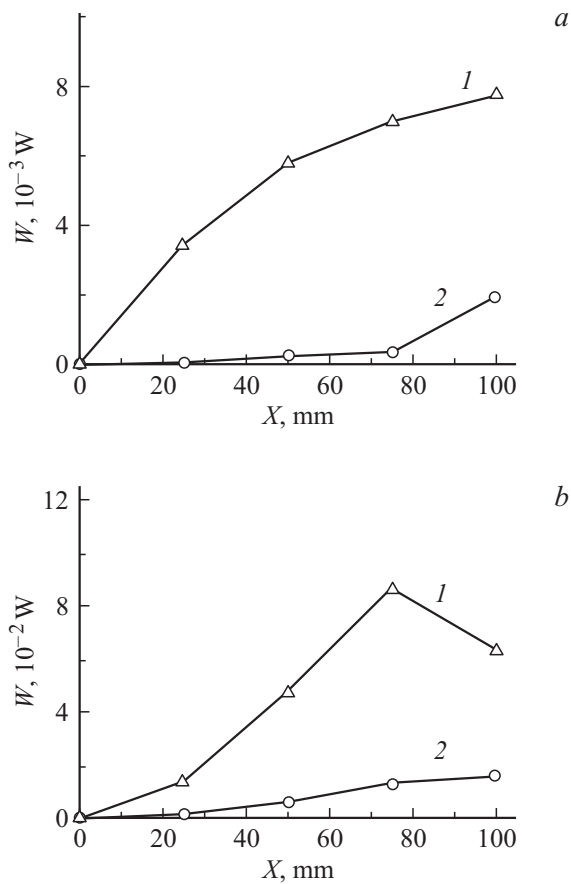


Рис. 3. Интегральная энергия пульсаций температуры в единицу времени, усредненная по всем струям и межструйным областям, в зависимости от X . a — $q = 2.9$, b — $q = 8.6 \text{ W/cm}^2$. Треугольниками (1) отмечены данные для межструйных областей, а кругами (2) — для струй.

„разглаживания пленки“. Часть температурных возмущений сносится в область струй в результате действия поперечных термокапиллярных сил. Нижней границы нагревателя при высоких плотностях тепловых потоков достигают только максимальные возмущения температуры, создаваемые наиболее крупными волнами.

Таким образом, при высоких плотностях тепловых потоков происходит существенное изменение характера зависимости усредненной интегральной энергии пульсаций температуры в межструйной области от X . Снижение значения указанного параметра у нижней границы нагревателя, где толщина пленки достигает минимального значения, может быть одной из причин, способствующих появлению первых сухих пятен. Разрыв пленки (появление устойчивого сухого пятна) в межструйной области определяется двумя факторами: уменьшением толщины с одновременным „разглаживанием“ поверхности пленки и периодическим прохождением перемычек крупных волн, способствующих повторному орошению возникающих осушенных зон.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.604.21.0053).

Список литературы

- [1] *Ito A., Masunaga N., Baba K.* Advances in Multiphase Flow. Elsevier Science, 1995. P. 255.
- [2] *Miladinova S., Slavtchev S., Lebon G.* et al. // Fluid Mech. 2002. V. 453. P. 153–175.
- [3] *Chinnov E.A., Kabov O.A.* // Microgravity Sci. Technol. 2007. V. 19. N 3/4. P. 18–22.
- [4] *Lel V.V., Stadler H., Pavlenko A.N.* et al. // Heat Mass Transfer 2007. V. 43. N 11. P. 1121–1132.
- [5] *Lel V.V., Kellerman A., Deitze G.* et al. // Exp. Fluids. 2008. V. 44. N 2. P. 341–354.
- [6] *Чернявский А.Н., Павленко А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 23. С. 1–8.
- [7] *Зайцев Д.В., Чиннов Е.А., Кабов О.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 6. С. 31–37.
- [8] *Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Сапрыкина А.В.* и др. // ТВТ. 2007. Т. 45. № 5. С. 725–732.
- [9] *Chinnov E.A.* // ИЖМТ. 2014. V. 71. P. 106–116.
- [10] *Chinnov E.A., Abdurakipov S.S.* // ИЖМТ. 2013. V. 56. P. 775–786.
- [11] *Алексеев С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М.* и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 16. С. 16–24.