

03

## Нестационарное воздействие искусственных возмущений на нагреваемую пленку жидкости

© Е.А. Чиннов

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

Поступило в Редакцию 11 июня 2008 г.

Экспериментально исследовано влияние нестационарных искусственных возмущений на формирование струй на поверхности стекающей неизотермической пленки воды. Для измерения толщины пленки применен флуоресцентный метод. Показано, что периодические возмущения позволяют изменять расстояние между струями во времени. Обнаружен рост амплитуды волн на фронте распространяющегося возмущения. Установлено, что рост амплитуды волн и перемещение массы жидкости поперек потока приводят к смыванию сухих пятен в нижней части нагревателя.

PACS: 47.20.Ma, 47.55.nb

Исследование механизма неустойчивости течения нагреваемой пленки жидкости, возникновения трехмерных деформаций и развития струйных течений на ее поверхности важно для понимания закономерностей теплообмена и кризисных явлений при теплоотдаче к пленке.

В предшествующих работах обнаружены различные механизмы формирования струй в неизотермических пленках жидкости, выделено два режима *A* и *B* [1]. В режиме *A* под действием термокапиллярных сил, направленных против течения, происходило утолщение изначально гладкой пленки жидкости. При достижении пороговой плотности теплового потока течение разделялось на вертикальные струи, следующие с определенной длиной волны  $\Lambda$  и тонкую пленку между ними [2,3]. Теоретическое изучение и детальный анализ этого явления выполнены в [4–7]. В режиме *B* регулярные деформации на поверхности пленки появлялись в результате развития гидродинамической неустойчивости в области формирования двумерных или трехмерных волн под действием термокапиллярных сил, направленных от более горячих областей к

холодным. Формирование струйного течения происходило постепенно с ростом плотности теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя [8–10]. Структуры двух типов *A* и *B* различаются уровнем теплового потока, необходимого для их возникновения, величиной и характером зависимости расстояния между струями от плотности теплового потока и числа Рейнольдса.

В [11] установлено, что стационарные искусственные возмущения на поверхности пленки жидкости могут существенно изменять расстояние между струями. Искусственные возмущения на поверхности пленки уменьшают расстояние между струями: от значений, соответствующих течению „типа *B*“ до значений, близких к „типу *A*“. Определена „наиболее опасная“ длина волны искусственных возмущений, при которой подавляются естественно возникающие возмущения, а количество струй в области нагревателя существенно возрастает.

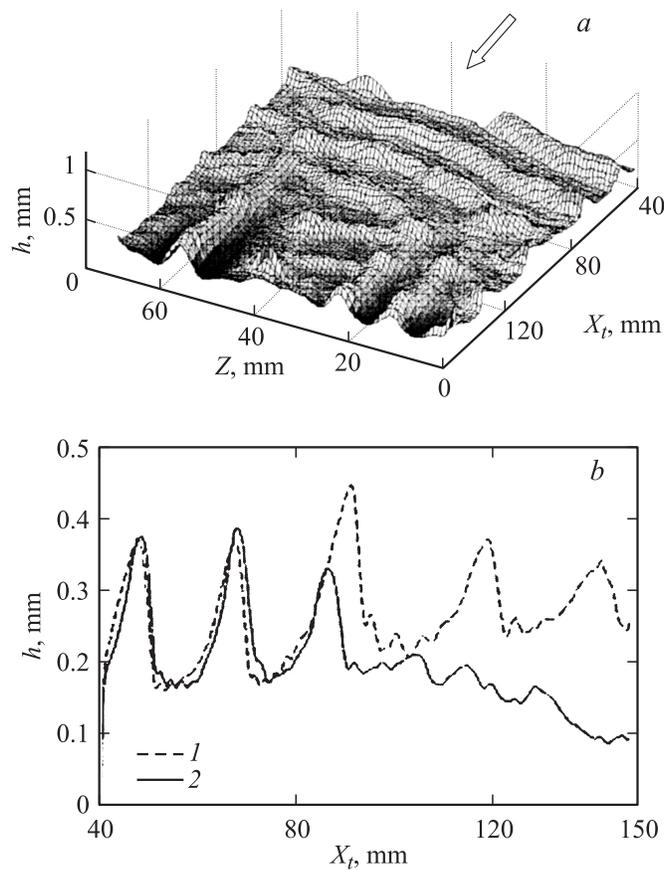
Однако влияние нестационарных искусственных возмущений на формирование струй на поверхности неизотермической пленки жидкости до настоящего времени не изучалось. Рассматривались и анализировались только стационарные состояния до и после возмущения. В настоящей работе выполнено исследование эволюции искусственных возмущений на поверхности неизотермической пленки жидкости во времени.

Экспериментальное изучение влияния нестационарных искусственных возмущений на формирование структур в пленке воды проводилось на экспериментальном стенде, представляющем собой замкнутый циркуляционный контур и включающем рабочий участок с расположенным на вертикальной пластине нагревателем размером  $150 \times 150$  mm. Дистиллированная вода с помощью насоса подавалась в пленкоформирователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. На поверхности нагрева выполнялось граничное условие  $q = \text{const}$ . Подробное описание экспериментальной установки и рабочего участка приведено в [12]. Расстояние от распределительного устройства до верхнего края нагревателя составляло 200 mm. Число Рейнольдса пленки равнялось 33 ( $Re = \Gamma/\mu$ , где  $\Gamma$  — удельный массовый расход жидкости,  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости жидкости). Толщина пленки  $h_0$ , рассчитанная по зависимости Нуссельса, составляла 0.203 mm. Начальная температура жидкости равнялась  $T_0 = 24^\circ\text{C}$ .

Для создания возмущений использовалась механическая система расположенных в горизонтальную линию цилиндров диаметром 3 мм, которая периодически опускалась в пленку жидкости выше верхнего края нагревателя на 10 мм. Расстояние между цилиндрами составляло 9 мм и соответствовало ранее определенной в [11] „наиболее опасной“ длине волны искусственных возмущений для стационарного режима. Толщина пленки жидкости измерялась флуоресцентным методом [10]. Время экспозиции каждого кадра равнялось длительности лазерного импульса (10 ns), что намного меньше характерных времен течения волновой пленки.

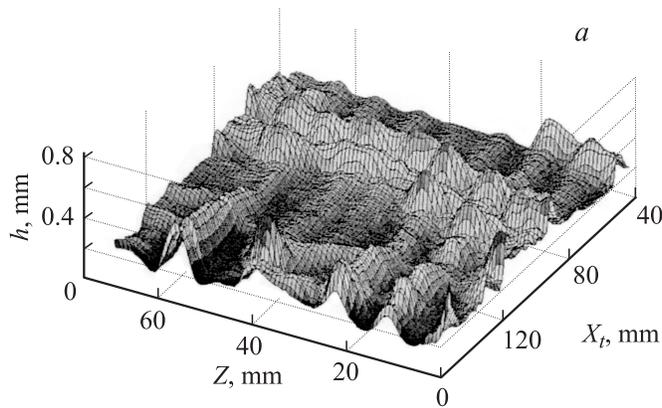
На рис. 1, *a* представлено мгновенное поле толщин пленки при естественном течении вдоль нагревателя без возмущения для значения плотности теплового потока  $q = 1.3 \text{ W/cm}^2$ ,  $X_t$  — расстояние от верхнего края нагревателя,  $Z$  — координата поперек потока. В верхней части нагревателя наблюдается течение практически двумерных волн и струи не формируются. Волны при  $X_t = 90\text{--}100 \text{ mm}$  преобразуются в струи. При  $X_t > 100 \text{ mm}$  происходит уменьшение средней толщины в межструйной области ( $Z = 18.5 \text{ mm}$ ) и увеличение в струе ( $Z = 13 \text{ mm}$ ), рис. 1, *b*. Амплитуда крупных волн  $h_{\max}$  (максимальные периодические значения толщины) в области струи изменяется незначительно, а в межструйной области резко убывает. Расстояния между струями в нижней части нагревателя могут быть неодинаковыми и существенно отличаться друг от друга.

Распределение поля толщин через 142 ms после опускания возмущающей системы из цилиндров в пленку жидкости до касания с вертикальной подложкой показано на рис. 1, *a*. В отличие от невозмущенной пленки жидкости (рис. 1, *a*) в верхней части нагревателя появляются струи. Видно, что по поверхности пленки вдоль нагревателя распространяется фронт возмущения. Перед фронтом количество струй на нагревателе такое же, как и в невозмущенной пленке, а за фронтом больше. Как видно из поперечного сечения пленки (рис. 2, *c*), в верхней части нагревателя при  $X_t = 45 \text{ mm}$  формируются 7 струй, среднее расстояние между которыми соответствует расстоянию между возмущающими цилиндрами 9 мм. При  $X_t = 144 \text{ mm}$  количество струй и их расположение соответствуют невозмущенной пленке. Поперечные деформации  $Def$ , определяемые как разницы между толщиной пленки на гребне струи и в межструйной области, деленные на начальную толщину пленки, колеблются в диапазоне от 0.2 до 0.7 при  $X_t = 45 \text{ mm}$ ,



**Рис. 1.** Течение пленки без искусственных возмущений при  $q = 1.3 \text{ W/cm}^2$ ,  $Re = 33$ . *a* — мгновенное поле толщин, *b* — распределение толщины пленки вдоль вертикальной координаты: *1* — струя ( $Z = 13 \text{ mm}$ ), *2* — межструйная область ( $Z = 18.5 \text{ mm}$ ). Стрелкой показано направление течения пленки.

а при  $X_t = 144 \text{ mm}$  достигают 1.5 (рис. 2, *c*). Согласно данным работы [10], при естественном формировании струй в режиме *B* поперечные деформации с  $Def > 0.3$  появляются только в нижней части нагревателя при  $X_t > 0.4L$ , где  $L$  — длина нагревателя.



**Рис. 2.** Течение пленки через 142 ms после создания искусственного возмущения  $q = 1.3 \text{ W/cm}^2$ ,  $Re = 33$ . *a* — мгновенное поле толщины; *b* — распределение толщины пленки вдоль вертикальной координаты: 1 — струя ( $Z = 13 \text{ mm}$ ), 2 — межструйная область ( $Z = 18.5 \text{ mm}$ ); *c* — профили толщин в нижней и верхней частях нагревателя: 1 — горизонтальное сечение  $X_t = 45 \text{ mm}$ , 2 — горизонтальное сечение  $X_t = 144 \text{ mm}$ .

Амплитуда волн в верхней части нагревателя претерпевает существенные изменения (рис. 2, *b*). Если в области сформировавшейся струи ( $Z = 13 \text{ mm}$ ) максимальная высота гребней волн  $h_{\max}$ , как и в невозмущенной пленке жидкости (рис. 1, *b*), достигает  $0.4 \text{ mm}$ , то в межструйной области ( $Z = 18.5 \text{ mm}$ ) уменьшается до  $0.3 \text{ mm}$ .

Через 285 ms после воздействия системой цилиндров фронт возмущений находится вблизи нижнего края нагревателя. Общее количество струй на поверхности пленки жидкости увеличивается до 7. Максимальное значение поперечных деформаций в нижней части нагревателя при  $x_t = 144 \text{ mm}$  сохраняется на уровне  $Def = 1.5$ . Величина амплитуды волны на фронте распространяющегося возмущения возрастает в области струи, достигая значения  $h_{\max} = 0.5 \text{ mm}$ . В результате увеличения количества струй и перестройки течения происходит рост амплитуды волн в межструйной области по сравнению с невозмущенной пленкой жидкости. Рост амплитуды волн и перемещение массы жидкости поперек потока в нижней части нагревателя приводят к значительным динамическим периодическим нагрузкам, позволяющим деформировать контактную линию и осуществлять повторное орошение осушенных зон.

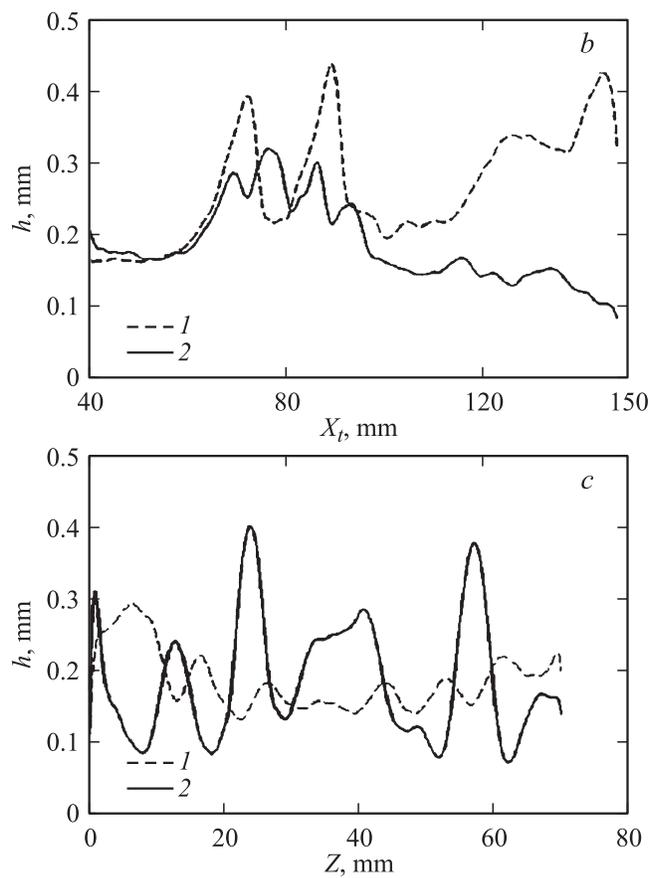


Рис. 2 (продолжение).

Обнаружено, что периодические возмущения позволяют изменять расстояние между струями во времени. Перестройка течения происходит как в нижней, так и в верхней областях нагревателя. Эффективны наиболее опасные периодические возмущения с частотой 1–3 Hz. В этом случае происходит перестройка течения, которая, в частности, приводит к смыванию сухих пятен.

Работа поддержана грантами РФФИ (проект № 05-08-33325-а), СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 111) и президента РФ по поддержке научных школ НШ-4366.2008.8.

## Список литературы

- [1] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 128–137.
- [2] Kabov O.A., Diatlov A.V., Marchuk I.V. // Prox. of the First Int. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. 1995. V. 1. P. 203–210.
- [3] Kabov O.A., Chinnov E.A. // Russ. J. Engng Termophys. 1997. V. 7. N 1/2. P. 1–34.
- [4] Scheid B., Oron A., Colinet P. et al. // Physics of Fluids. 2002. V. 14. P. 4130–4151.
- [5] Skotheim J.M., Thiele U., Scheid B. // J. Fluid Mech. 2003. V. 475. P. 1–19.
- [6] Kalliadasis S., Kiyashko A., Demekhin E.A. // J. Fluid Mech. 2003. V. 475. P. 377–408.
- [7] Frank A.M., Kabov O.A. // Phys. Fluids. 2006. V. 18. P. 032107-1–032107-10.
- [8] Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Сапрыкина А.В. и др. // ТВТ. 2007. Т. 45. В. 5. С. 725–732.
- [9] Chinnov E.A., Kabov O.A. // Micro gravity science and technology. 2007. V. XIX. N 3/4. P. 18–22.
- [10] Чиннов Е.А., Харламов С.М., Сапрыкина А.В. и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. В. 2. С. 249–255.
- [11] Чиннов Е.А., Жуковская О.В. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 9. С. 87–94.
- [12] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // ТВТ. 2004. Т. 42. В. 2. С. 269–278.