

03

## **Управление взаимодействием гидродинамических волн с термокапиллярной неустойчивостью в стекающей пленке жидкости**

© Е.А. Чиннов, Е.Н. Шатский

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

Поступило в Редакцию 1 апреля 2010 г.

С использованием скоростной инфракрасной камеры выполнено экспериментальное исследование взаимодействия гидродинамических волновых и термокапиллярных возмущений в вертикально стекающей нагреваемой пленке воды. Установлено, что искусственные возмущения при достаточно высоких тепловых потоках оказывают существенное влияние на формирование структур и волновое течение пленки жидкости. Показано, что в зависимости от параметров набегających на нагреватель волн, возможны разные сценарии их преобразования в струи.

В предшествующих работах обнаружены различные механизмы формирования струй в неизотермических пленках жидкости [1,2], выделено два режима: А и Б. Режим А наблюдался при малых числах Рейнольдса на поверхности безволновой пленки. Под действием термокапиллярных сил в верхней части нагревателя формировался вал жидкости; при достижении пороговой плотности теплового потока течение разделялось на вертикальные струи, следующие с определенной длиной волны  $\Lambda$ , и тонкую пленку между ними. Происходило формирование регулярных структур в режиме А, обнаруженных и исследованных в [3–5]. К настоящему времени структуры А обнаружены экспериментально только при  $Re \leq 12$ . Теоретические исследования ограничены анализом течения неизотермической безволновой пленки жидкости при малых числах Рейнольдса  $Re \leq 2$ .

Режим Б зарегистрирован при  $Re > 5$  в нижней части нагревателя. Формирование струйного течения происходило постепенно с ростом теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя [6,7].

Структуры двух типов А и Б различались уровнем теплового потока, необходимого для их возникновения, граничными условиями на поверхности нагрева, величиной и характером зависимости расстояния между струями от плотности теплового потока и числа Рейнольдса.

Структуры Б формировались гравным образом в условиях волнового течения пленки. Известно, что двумерные волны в изотермических пленках жидкости неустойчивы к трехмерным возмущениям. Установлено, что длина волны неустойчивости к поперечным трехмерным возмущениям убывает с ростом числа Рейнольдса. В работе [8] исследовано распространение двумерных и трехмерных волн по вертикально стекающей изотермической пленке воды при  $Re = 10-100$ , а также воздействие на них искусственных возмущений. Показано, что при  $Re < 20$  длина волны неустойчивости к поперечным трехмерным возмущениям возрастает до 30 мм и более. В этом случае по поверхности пленки движутся солитонобразные волны с достаточно большим расстоянием между ними.

Экспериментальное исследование естественной (без внешних воздействий) эволюции развитых трехмерных волн в термокапиллярно-волновые струи при нагреве вертикально стекающей пленки воды выполнено в [9]. Показано, что на трехмерном фронте волны при ее прохождении вдоль нагревателя появляются температурные неоднородности, которые за счет действия термокапиллярных сил приводят к деформации пленки жидкости и формированию струй. Измерены расстояния между трехмерными волнами и струями в зависимости от плотности теплового потока.

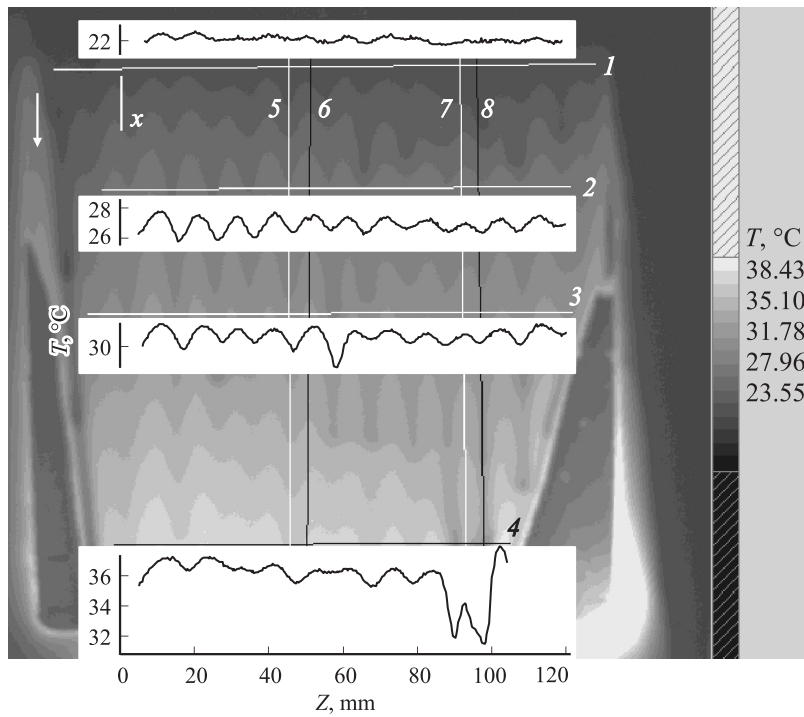
В [10] исследовано влияние искусственных возмущений на формирование структур при течении пленки воды по вертикальной пластине с нагревателем. На нагреватель поступали трехмерные волны в области их формирования и развития (расстояние от сопла распределительного устройства до верхнего края нагревателя изменялось от 120 до 200 мм). Для создания возмущений использовалась механическая система расположенных по горизонтальной линии цилиндров разного диаметра, которая опускалась в пленку жидкости поперек потока выше верхнего края нагревателя. Для измерения толщины пленки применен флуоресцентный метод. Варьирование расстояний между цилиндрами позволило определить „наиболее опасную“ длину волны возмущений, при которой происходило максимальное изменение расстояния между струями на поверхности пленки жидкости. Установлено, что сценарий

эволюции волновой картины зависит от интенсивности возмущений (диаметров цилиндров). Искусственные возмущения с „наиболее опасной“ длиной волны уменьшают расстояние между струями от значений, соответствующих режиму Б формирования струй, до значений, близких к расстояниям, характерным для термокапиллярного режима А. При этом расстояние между струями может быть изменено при более высоких числах Рейнольдса, чем в случае режима А.

Задачей данной работы являлось экспериментальное исследование воздействия искусственных возмущений с „наиболее опасной“ длиной волны на развитые трехмерные (солитоннообразные) волны при нагреве вертикально стекающей пленки воды.

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с электронасосом, рабочий участок и фильтр. Рабочий участок состоял из несущей плиты из текстолита с расположенными на ней нагревателем размером  $150 \times 150$  mm, стабилизаторами температуры, удлиняющей пластины и пленкоформователем. Подробное описание экспериментальной установки приведено в [10]. Дистиллированная вода с помощью насоса подавалась в пленкоформователь, который включал в себя накопительную камеру, распространительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Расстояние от нижнего края сопла пленкоформователя до верхнего края нагревателя  $X_n$  составляло 543 mm. На поверхности нагрева выполнялось граничное условие постоянства плотности теплового потока  $q = \text{const}$ . Начальная температура воды при выходе из сопла пленкоформователя  $T_0$  составляла  $22^\circ\text{C}$ . Число Рейнольдса пленки воды равнялось 10.5. В экспериментах использовался инфракрасный сканер Titanium HD 570M, позволяющий измерять поле температур на поверхности пленки с разрешением до  $640 \times 512$  пикселей, частотой полных кадров до 115 Hz и чувствительностью 18 mK. Для создания возмущений использовалась механическая система расположенных в горизонтальную линию цилиндров, которая опускалась в пленку жидкости выше верхнего края нагревателя на 18 mm [10].

Воздействие внешних возмущений с „наиболее опасной“ длиной волны, соответствующей расстоянию между цилиндрами  $l_w = 10$  mm и диаметрами цилиндров  $d_w = 2$  mm (см. [10]), при достаточно высоких тепловых потоках приводило к полной перестройке структуры течения (рис. 1). Течение пленки жидкости происходило сверху вниз (показано стрелкой). Термокапиллярные силы в боковых частях нагревателя



**Рис. 1.** Распределение температуры на поверхности вертикально стекающей пленки воды ( $Re = 10.5$ ,  $q = 0.88 \text{ W/cm}^2$ ) при воздействии внешних возмущений с „наиболее опасной“ длиной волны  $l_w = 10 \text{ mm}$ ,  $d_w = 2 \text{ mm}$ . Горизонтальные сечения построены на расстоянии от верхней кромки нагревателя: 1 — 2 mm, 2 — 32 mm, 3 — 65 mm, 4 — 127 mm.

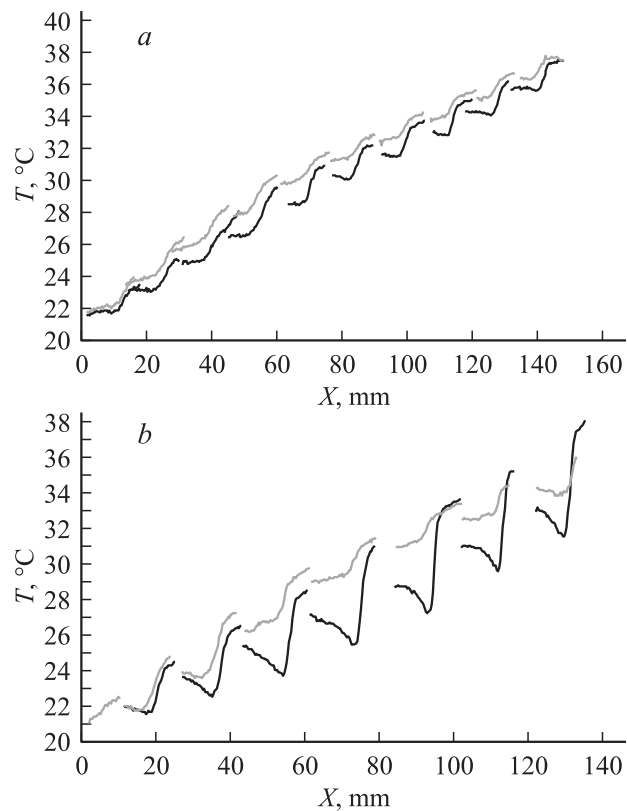
приводили к разрыву пленки и ее сужению. Значения температуры в области осушенной части нагревателя не верны в силу существенного отличия степени черноты поверхностей нагрева и пленки. На рисунке показано распределение температуры в горизонтальных сечениях 1–4 на поверхности пленки жидкости. При воздействии „наиболее опасных“ внешних возмущений деформация солитообразных волн происходила уже вблизи верхнего края нагревателя. Соответственно существенные поперечные неоднородности температуры до 0.5 K возникали уже на расстоянии нескольких миллиметров от верхнего края нагревателя

(линии 1, рис. 1). В результате формировались структуры с расстоянием между струями 10 mm, которое не изменялось до нижнего края нагревателя.

При отсутствии прохождения крупных волн поперечное распределение температуры было близко к синусоидальному (линия 2, рис. 1). На фронте крупных волн по мере прохождения нагревателя возрастал перепад температур. В зависимости от размеров волны (ширины фронта и амплитуды) и воздействия внешних возмущений могли реализовываться разные сценарии их преобразования в струи.

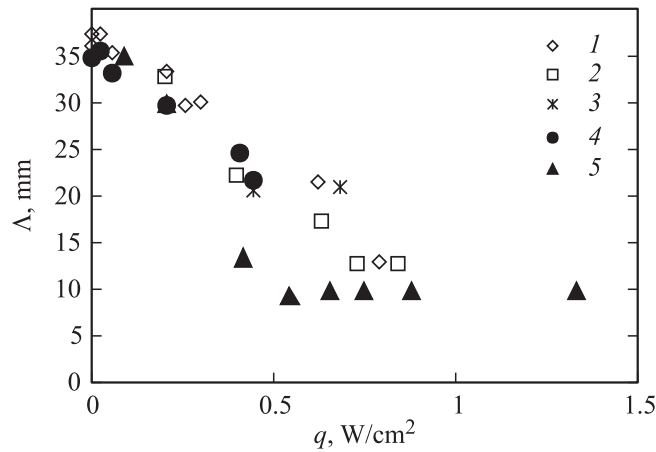
В сечении 3 рис. 1 на фронте волны среднего размера значение температуры существенно уменьшалось. По данным измерения флуоресцентным методом средняя ширина таких волн составляла 14 mm, а амплитуда (максимальная толщина) — 0.18 mm. Перепад температуры между гребнем волны и межструйной областью составлял 1.5–3 K. На рис. 2, *a* показана эволюция фронта волны на гребне струи (нижние жирные линии) в сечении 5 (рис. 1) и в межструйной области (сечение 6, рис. 1). Распределение температуры определялось на фронте фиксированной волны через равные промежутки времени при ее прохождении по нагревателю. Видно различие в распределении температуры на фронте волны уже при малых значениях расстояния от верхнего края нагревателя  $X$ . На гребне струи температурный фронт волны становился более крутым, достигая минимума в области максимального значения амплитуды, а затем температура возрастала. Градиент температуры на фронте возрастал от 0.3 до 0.5 K/mm, а в межструйной области уменьшался до 0.25 K/mm при прохождении волны вдоль нагревателя. Скорость распространения волн вдоль нагревателя возрастала от 0.23 до 0.3 m/s.

Для невозмущенного течения при максимальной достигнутой плотности теплового потока  $q = 1.13 \text{ W/cm}^2$  для исследуемого числа Рейнольдса распределение температуры на фронте волны, одинаковое в верхней части нагревателя, начинало различаться только при  $X$  более 50 mm. Градиент температуры на фронте волны, движущейся по струе, значительно возрастал от 0.3 до 2.5 K/mm. В межструйной области градиент температуры уменьшался до 0.2 K/mm при прохождении волны вдоль нагревателя. Фактически происходило сглаживание волновой структуры в межструйной области, что облегчало разрыв пленки жидкости. Скорость распространения волн по струям вдоль нагревателя возрастала от 0.23 до 0.34 m/s, что связано с более значительным ростом амплитуды волны.



**Рис. 2.** Эволюция распределения температуры на фронте волн. Нижние (жирные) линии соответствуют распространению волн в струе, а верхние — распространению волн в межструйной области. Распределения температуры построены с временным интервалом 0.05 s: *a* — для волны среднего размера в сечениях 5 и 6 (рис. 1); *b* — для крупной волны в сечениях 7 и 8 (рис. 1).

На рис. 2, *b* показана эволюция фронта крупной волны в межструйной области (сечение 7, рис. 1) и на гребне струи (сечение 8, рис. 1). На рис. 1 (линия 4) показано распределение температуры поперек потока на фронте такой волны. Перепад температуры между гребнем крупной волны и межструйной областью составлял 3–5 К. Ширина фронта составляла 25–35 мм, а амплитуда 0.22–0.27 мм. Распределение тем-



**Рис. 3.** Зависимость расстояния между гребнями волн или струями от плотности теплового потока в нижней части нагревателя при  $X = 130$  mm, построенная по следующим данным. Без возмущений: 1 — обработки цифровых фотографий, 2 — обработки тепловизионных изображений, 3 — обработки данных флуоресцентного метода; с возмущениями: 4 — обработки данных флуоресцентного метода, 5 — обработки тепловизионных изображений.

пературы на фронте волны, одинаковое в указанных сечениях в верхней части нагревателя, разделялось при  $X$  более 15–20 mm, что объясняется более высоким значением амплитуды волны по сравнению со средним значением. Градиент температуры на фронте движущейся по струе волны возрастал от 0.5 до 2.3 K/mm. Скорость распространения волн по струям вдоль нагревателя возрастала от 0.25 до 0.4 m/s. Фронт волны в межструйной области сначала становился более пологим (градиент температуры уменьшался), а затем возрастал. При этом в межструйной области градиент температуры на фронте волны изменялся незначительно: от 0.4 до 0.6 K/mm.

Зависимость расстояния между струями от плотности теплового потока в нижней части нагревателя при  $X = 130$  mm показана на рис. 3. Обработывались данные по распределению температуры и толщины (полученные флуоресцентным методом). В отсутствие нагрева и при малых плотностях тепловых потоков параметр  $\Lambda$  определялся как расстояние между гребнями волн. В отсутствие теплового потока полученные данные согласуются с результатами работы [8], а при

высоких тепловых потоках совпадают с ранее полученными данными для формирования структур. Воздействие внешних возмущений не проявлялось при малых тепловых потоках. Для достаточно высоких плотностей тепловых потоков при воздействии „наиболее опасных“ внешних возмущений структуры типа А формировались на всей поверхности нагревателя, а расстояние между струями уменьшалось до 10 mm.

Работа поддержана РФФИ (проект № 09-01-00765-а) и молодежным научно-исследовательским проектом ИТ СО РАН.

## Список литературы

- [1] Чиннов Е.А., Кабов О.А. // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 128–137.
- [2] Чиннов Е.А. / Дис. . . . докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2004. 347 с.
- [3] Kabov O.A., Diatlov A., Marchuk I.V. // Proc. of the First Int. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. 1995. V. 1. P. 203–210.
- [4] Kabov O.A., Marchuk I.V., Chupin V.M. // Russ. J. Eng. Therm. 1996. V. 6. N 2. P. 104–138.
- [5] Kabov O.A., Chinnov E.A. // Russ. J. Eng. Therm. 1997. V. 7. N 1/2. P. 1–34.
- [6] Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Сапрыкина А.В., Жуковская О.В., Серов А.Ф. // ТВТ. 2007. Т. 45. № 5. С. 725–732.
- [7] Chinnov E.A., Kabov O.A. // Micro gravity science and technology. 2007. V. 19. N 3/4. P. 18–22.
- [8] Park C.D., Nosoko T. // AIChE Journal. 2003. V. 49. N 11. P. 2715–2727.
- [9] Чиннов Е.А., Шатский Е.Н. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 2. С. 7–17.
- [10] Чиннов Е.А. // ТВТ. 2009. Т. 47. № 1. С. 63–68.