

03

Термокапиллярные неустойчивости в стекающей пленке жидкости при малых числах Рейнольдса

© Е.А. Чиннов, Е.Н. Шатский

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: shatskiy.itp@gmail.com

Поступило в Редакцию 27 июня 2013 г.

С использованием скоростной инфракрасной камеры выполнено экспериментальное исследование формирования термокапиллярных структур на поверхности вертикально стекающей пленки 68%-го раствора глицерина в воде при различных условиях на поверхности нагрева. Установлено, что существенное влияние на формирование струйных течений оказывает продольный градиент температуры. Показано, что воздействие внешних возмущений осуществляет переход между структурами различных типов.

Исследование разных типов термокапиллярной неустойчивости при течениях нагреваемой пленки жидкости и их взаимодействия важно для понимания механизма кризисных явлений при теплоотдаче к пленке и создания способов управления этим процессом. Новые экспериментальные данные необходимы для создания новых теоретических моделей.

В предшествующих работах обнаружены различные механизмы формирования струй в неизотермических пленках жидкости [1,2], выделено два режима: термокапиллярный (А) и термокапиллярно-волновой (В), а термокапиллярные структуры, формирующиеся в каждом из режимов, носят название А и В соответственно. В режиме А под действием термокапиллярных сил, направленных против течения, в верхней части нагревателя образовывалось утолщение пленки в виде горизонтального вала. При достижении пороговой плотности теплового потока течение разделялось на вертикальные струи, вытекающие из вала с определенной длиной волны Λ , и тонкую пленку между ними. К настоящему времени данный тип структур обнаружен экспериментально, главным образом при $0.1 \leq Re \leq 10$. Показано, что с увеличением числа Рейнольдса расстояние между струями возрастает [2].

В режиме В деформации на поверхности пленки появлялись на нагревателях достаточной ширины и длины при $Re > 5$. Под действием термокапиллярных сил, направленных от более горячих областей к холодным, происходил рост деформации поверхности пленки. Формирование струйного течения происходило постепенно с ростом плотности теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя. При малых числах Рейнольдса на пленках воды структуры В обнаружены не были. При малых тепловых потоках распределение температуры на поверхности пленки жидкости поперек ее течения было однородным.

Теоретические исследования главным образом ограничены анализом течения неизотермической безволновой пленки жидкости при малых числах Рейнольдса [3–9]. Подтверждено существование структур А при $Re \leq 2$. Детальное экспериментальное и теоретическое исследование формирования термокапиллярных структур при $0.1 \leq Re \leq 2$ выполнено в [10]. Установлено, что расстояние между структурами практически не зависит от Re , а при фиксированном числе Марангони может даже убывать с ростом числа Рейнольдса.

В работах [1,11] было обнаружено влияние внешних возмущений, которые создавались рядом цилиндров, опускаемых в пленку жидкости выше верхнего края нагревателя, на формирование структур на поверхности пленки жидкости. В [12] установлено, что искусственные возмущения на поверхности пленки жидкости в области значений чисел Рейнольдса от 7 до 40 могут существенно изменять расстояние между струями, а сценарий эволюции волновой картины зависит от их интенсивности (диаметров цилиндров). Обнаружена область, в которой искусственные возмущения в неизотермической стекающей пленке жидкости изменяют расстояние между струями. Определена „наиболее опасная длина волны“ искусственных возмущений. Показано, что искусственные возмущения с „наиболее опасной длиной волны“ на поверхности пленки уменьшают расстояние между струями от значений, соответствующих течению типа В, до значений, близких к типу А. Однако было установлено, что „наиболее опасная длина волны“ возмущений не зависит от числа Рейнольдса, в то время как для структур А при $Re \leq 10$ расстояние между струями возрастает с увеличением Re .

Задачей данной работы было исследование влияния внешних возмущений на безволновое течение пленок растворов глицерина при

малых числа Рейнольдса ($Re = 0.1-2$), нахождение „наиболее опасной“ длины волны внешних возмущений и сопоставление с длиной волны термокапиллярных возмущений (режим А).

Экспериментальное исследование влияния искусственных возмущений на формирование структур в пленке воды проводилось на стенде, подробно описанном в [12], включающем в себя рабочие участки с нагревателями размером 150×150 и 150×100 мм. В первом случае (нагреватель размером 150×150 мм) нагрев осуществлялся с помощью тонкой фольги, на которую подавалось напряжение, а интегральный тепловой поток определялся по закону Джоуля–Ленца. Для нагрева пленки во втором случае использовался водный контур, расположенный внутри медного нагревателя. Использование нагревателей различного типа позволило исследовать влияние граничных условий на поверхности нагрева на формирование термокапиллярных структур. Для создания пленки использовался перемещаемый в вертикальной плоскости по пластине формироваватель пленки. В качестве рабочей жидкости использовался 68%-ный раствор глицерина в воде. Начальная температура жидкости поддерживалась термостабилизатором и равнялась $T_0 = 25^\circ\text{C}$. Расстояние от сопла распределительного устройства до верхнего края нагревателя X_n изменялось от 120 до 200 мм. Число Рейнольдса пленки изменялось от 0.1 до 2 ($Re = \Gamma/\mu$, где Γ — удельный массовый расход жидкости на единицу ширины пленки, μ — коэффициент динамической вязкости жидкости). Для регистрации поля температур на поверхности пленки жидкости использовался инфракрасный сканер Titanium 570M, измеряющий поле температур на поверхности пленки с разрешением 640×512 пикселей и частотой полных кадров до 115 Hz. Возмущения создавались механической системой расположенных по горизонтальной линии цилиндров, которая опускалась в пленку жидкости выше верхнего края нагревателя на 10–17 мм. Изменение интенсивности возмущений достигалось использованием цилиндров разного диаметра: $d_w = 1.5$ и 2 мм. Расстояние l_w между цилиндрами изменялось от 5 до 18 мм.

На рис. 1 представлено распределение температуры на поверхности пленки, вертикально стекающей вдоль медного нагревателя размером 150×100 мм с условием $T = \text{const}$ на поверхности нагрева. Число Рейнольдса $Re = 0.1$, плотность теплового потока $q = 0.1 \text{ W/cm}^2$, X — координата, отсчитываемая от верхней кромки нагревателя, Z — координата, отсчитываемая от левой кромки нагревателя. Течение пленки

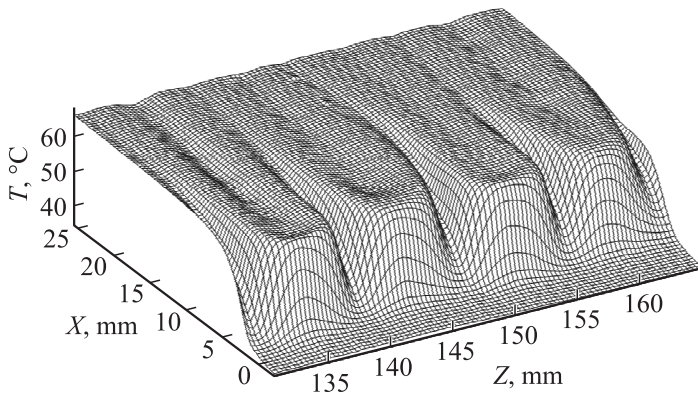


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности пленки 68%-го раствора глицерина в воде с условием $T = \text{const}$ на поверхности нагрева, $q = 0.1 \text{ W/cm}^2$, $\text{Re} = 0.1$.

происходило в сторону возрастания координаты X . Видно, что при натекании на нагреватель ($X = 0$) течение разделилось на вертикальные струи, расстояние между которыми составляло 8.5 mm. При этом градиенты температуры в области между струями достигали значений порядка 20 K/mm, а градиенты температуры вдоль струи — 5 K/mm.

Если течение пленки происходило в условиях плавного изменения температуры, т.е. при прохождении верхней кромки на поверхности не возникало высоких градиентов температуры, то термокапиллярные структуры типа А не образовывались. На рис. 2 распределение температуры на поверхности пленки 68%-го раствора глицерина в воде для числа Рейнольдса 2. На поверхности нагревателя размером $150 \times 150 \text{ mm}$ реализовывалось условие, близкое к $q = \text{const}$. Видно, что в условиях безволнового течения при значении плотности теплового потока 1.6 W/cm^2 на поверхности пленки образуются термокапиллярные структуры в виде струй жидкости с тонкой пленкой между ними. Струи возникают на поверхности пленки постепенно, с увеличением длины пробега по нагревателю. Начало формирования струй находится примерно на расстоянии 20 mm от верхнего края нагревателя. При этом продольные и поперечные градиенты температуры на поверхности не превышают 0.5 K/mm, разность температуры в струе и межструйной

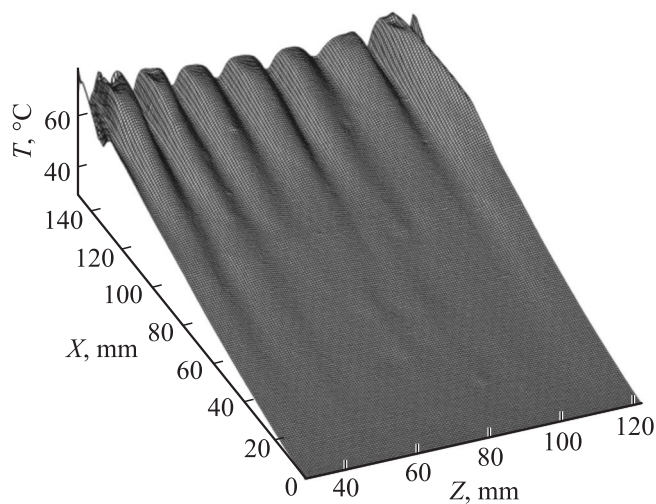


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности пленки 68%-го раствора глицерина в воде с условием, близким к $q = \text{const}$ на поверхности нагрева, $Re = 2$, $q = 1.6 \text{ W/cm}^2$.

области при $X = 130 \text{ mm}$ имеет величину порядка 4 K , а расстояние между струями составляет 14 mm . Данные структуры были зафиксированы и при более низких значениях чисел Рейнольдса, вплоть до 0.1 .

Воздействие возмущений с „наиболее опасной“ длиной волны в сравнении с другой длиной волны показано на рис. 3, а. График обобщает все имеющиеся данные по воздействию возмущений на расстояние между струями для различных жидкостей и чисел Рейнольдса в условиях малых градиентов температуры на поверхности нагрева ($q = \text{const}$). Формирование термокапиллярных структур при внесении возмущений с длиной волны, отличной от „наиболее опасной“, происходит так же, как в невозмущенном случае. Струи образуются в нижней части нагревателя, при этом в верхней части пленка остается невозмущенной. Единственное отличие состоит в том, что вносимые возмущения моделируют температурные неоднородности на верхней кромке нагревателя, однако они сразу затухают. Возмущения с „наиболее опасной“ длиной

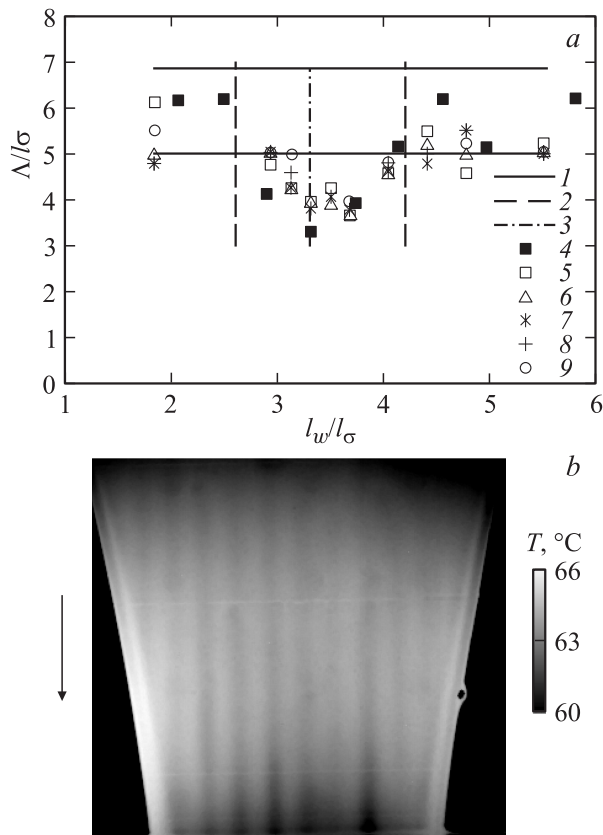


Рис. 3. *a* — влияние длины волны возмущающей системы на формирование регулярных структур для различных жидкостей и чисел Рейнольдса: *1* — без возмущений, *2* — граница влияния искусственных возмущений, *3* — наиболее опасная длина волны, *4* — $Re = 0.1$, *5* — $Re = 7.7$, *6* — $Re = 14.4$, *7* — $Re = 20.7$, *8* — $Re = 28.2$, *9* — $Re = 38.2$ [11]; *b* — термограмма поверхности пленки 68%-го раствора глицерина в воде при внесении внешних возмущений, $l_w = 9$ mm, $Re = 0.1$, $q = 0.3$ W/cm², l_σ — капиллярная постоянная ($l_\sigma^2 = \sigma/\rho g$, σ — поверхностное натяжение, ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения).

волны формируют температурные неоднородности практически по всей длине нагревателя.

На верхнем крае нагревателя количество неоднородностей соответствует расстоянию между возмущающими цилиндрами. Ниже верхнего края нагревателя все возмущения, кроме „наиболее опасных“, затухают. Влияние возмущений с „наиболее опасной“ длиной волны показано на рис. 3, *b*. На рисунке представлена термограмма поверхности пленки при внесении возмущений с расстоянием между цилиндрами 9 mm. Видно, что в области верхней кромки нагревателя появились периодические температурные неоднородности с периодом, соответствующим наложенным возмущениям. Такое же расстояние реализуется в термокапиллярном режиме А (рис. 1). При этом градиенты температуры в направлении течения значительно отличаются в первом и втором случае.

Впервые обнаружено, что термокапиллярные структуры типа В существуют в области малых чисел Рейнольдса ($Re < 5$) в условиях безволновой пленки. Показано, что градиенты температуры на поверхности нагрева существенно влияют на формирование структур различного типа. При этом внесение в поток внешних возмущений с длиной волны, соответствующей термокапиллярным структурам типа А, приводит к перестройке течения даже в случае, если градиенты температуры на передней кромке нагревателя недостаточны для формирования структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов ФЦП (ГК № 14.132.21.1357, ГК № 14.516.11.0087), НААВ (проект № 12-01-00360) и СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 116).

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. // Proc. of the First Int. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. 1995. V. 1. P. 203.
- [3] Kuznetsov V.V. // Russ. J. Engng Thermophys. 2000. V. 10. N 2. P. 107.
- [4] Sharypov O.V., Medvedko K.A. // Russ. J. Engng Thermophys. 2000. V. 10. N 4. P. 315.
- [5] Кабов О.А., Кузнецов В.В., Марчук И.В. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2001. № 9. С. 83.
- [6] Scheid B., Oron A., Colinet P. et al. // Phys. Fluids. 2002. V. 14. P. 4130.

- [7] *Kalliadasis S., Kiyashko A., Demekhin E.A.* // J. Fluid Mech. 2003. V. 475. P. 377.
- [8] *Frank A.M.* // European J. Mechanics. B. Fluids. 2003. V. 22. P. 445.
- [9] *Skotheim J.M., Tiele U., Scheid B.* // J. Fluid Mech. 2003. V. 475. P. 1.
- [10] *Frank A.M., Kabov O.A.* // Phys. Fluids. 2006. V. 18. P. 032107-1.
- [11] *Чиннов Е.А., Жуковская О.В.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 9. С. 87.
- [12] *Чиннов Е.А.* // ТВТ-2009. Т. 47. № 1. С. 63–68.