

03

## **О формировании струй при изотермическом пленочном течении жидкости в процессе перехода к трехмерному волновому движению**

© С.В. Алексеенко, А.В. Бобылев, В.В. Гузанов, Д.М. Маркович,  
С.М. Харламов

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

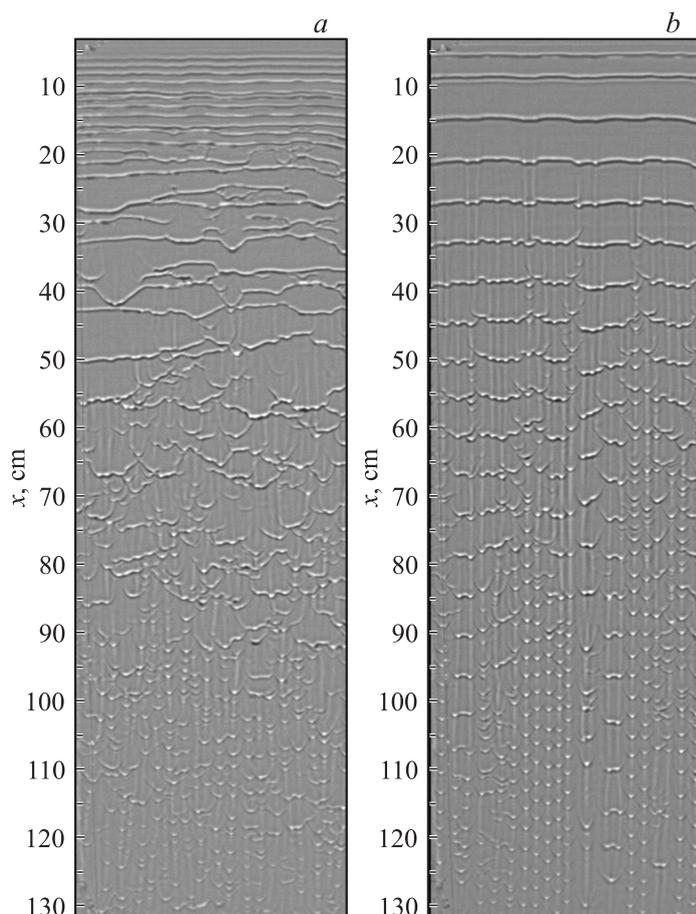
Поступило в Редакцию 11 июля 2014 г.

Представлены результаты экспериментального исследования перехода от двумерного к трехмерному волновому движению при пленочном течении жидкости по вертикальной пластине больших размеров. Показано, что такой переход сопровождается формированием струй, при этом на больших расстояниях от начального участка волновое движение может быть практически полностью подавлено в межструйных областях.

Трехмерные волновые режимы считаются конечной стадией волновой эволюции при умеренных числах Рейнольдса пленочного течения жидкости по вертикальной пластине. При таких режимах поверхность пленки покрыта многочисленными трехмерными волнами, взаимодействующими друг с другом случайным образом. Как правило, переход к трехмерным режимам происходит за счет поперечной неустойчивости двумерных нелинейных волн, развивающихся на начальном участке пленочного течения. При этом выделяют два основных сценария развития двумерных волн: эволюцию регулярных двумерных волн, возбуждаемых периодическими возмущениями, и естественную волную эволюцию, при которой волны возникают за счет широкополосного фонового шума. К настоящему времени наиболее исследована начальная стадия перехода к трехмерным волновым режимам для случая регулярных двумерных волн. Эксперименты в такой постановке проводились в [1] с использованием теневой методики, не позволяющей определять трехмерную форму волн. Моделирование перехода к

трехмерным волновым режимам для условий экспериментов [1] осуществлялось как на основании моделей пониженной размерности [2,3], так и прямым численным расчетом уравнений гидродинамики [4,5] с использованием периодических граничных условий вдоль и поперек течения, что затрудняет определение области применимости указанных подходов для описания реальных течений. Сопоставление результатов моделирования и эксперимента приводит к неоднозначным выводам. В то время как поперечные и продольные размеры формирующихся трехмерных волн во всех расчетах близки к экспериментальным значениям, пространственная форма волн существенно различается у разных авторов. Так, по результатам [2,3] формирующиеся трехмерные волны имеют подковообразную форму, в то время как по [4] эти же структуры являются удлиненными по течению волнами с заполненным задним склоном. В экспериментах [6] с использованием метода лазерно-индуцированной флюоресценции (метод ЛИФ), позволяющего измерять локальную толщину пленки и определять форму трехмерных волн, было показано, что формирующиеся трехмерные волны имеют форму, близкую к рассчитанной в [4]. Кроме того, в [6] было показано, что для случая регулярных двумерных волн начальный этап перехода к трехмерному волновому течению сопровождается существенным перераспределением жидкости в горизонтальном направлении и на осредненных по времени полях толщин пленки наблюдается формирование струй, что является неожиданным результатом для изотермического течения. Результаты, представленные в [6], были получены на пластине небольших размеров. В данной работе представлены результаты исследования трехмерных волновых режимов на пластине больших размеров. Основное внимание уделялось процессам развития струйного течения на больших расстояниях от начального участка.

Эксперименты проводились на стеклянной пластине шириной 45 см и длиной 140 см в диапазоне чисел Рейнольдса  $4 < Re < 110$ ,  $Re = q/\nu$ ,  $q$  — удельный объемный расход жидкости,  $\nu$  — кинематическая вязкость. В качестве рабочей жидкости использовалась вода ( $\nu = 0.994 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, плотность  $\rho = 998$  кг/м<sup>3</sup>, поверхностное натяжение  $\sigma = 0.073$  кг/с<sup>2</sup>). Пленка формировалась при помощи щелевого распределителя с регулируемой шириной зазора. В качестве берегов течения использовались смачиваемые нити, проложенные параллельно боковым краям пластины. Исследовался переход к трехмерным волновым режимам как для случая эволюции регулярных

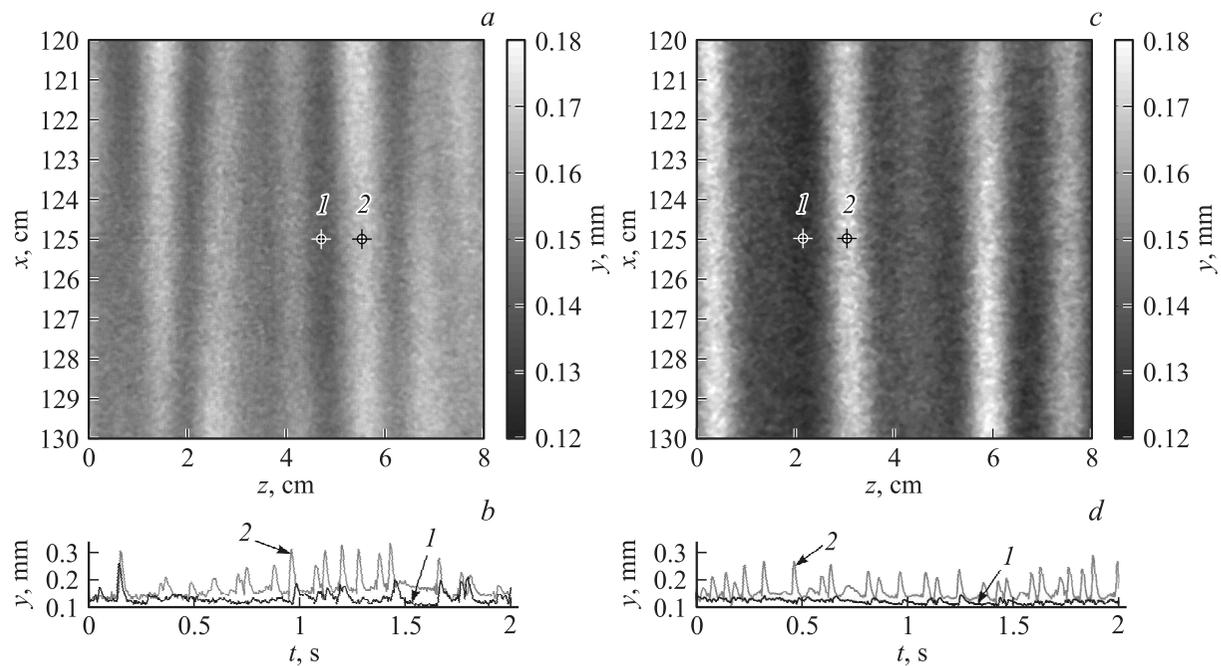


**Рис. 1.** Теневые фотографии течения.  $Re = 14$ . *a* — естественная волновая эволюция; *b* — эволюция регулярных двумерных волн, частота возбуждения  $F = 6$  Hz. При включении/выключении наложенных колебаний переход от *a* к *b* и обратно происходит в течение нескольких секунд.

двумерных волн, так и для случая естественной волновой эволюции. Регулярные волны возбуждались гармонической модуляцией расхода

жидкости на входе в распределительную секцию рабочего участка. Контроль равномерности орошения пластины проверялся по форме фронтов регулярных двумерных волн на небольших расстояниях от распределителя. В случае равномерного орошения фронты являются прямолинейными и перпендикулярны направлению течения. Влияние берегов проявлялось в торможении и искривлении фронтов двумерных волн в прибрежной области. Картина прорастания возмущений от берегов к центру течения качественно совпадала с описанной в [7,8]. Для исследованных случаев глубина проникновения возмущений в нижней части пластины не превышала 7–8 см, поэтому течение в центральной части пластины считалось не затронутым влиянием берегов. Общая картина течения по всей поверхности пластины регистрировалась при помощи теневой съемки, при которой пластина освещалась со стороны пленки, а теневое изображение получалось на белом матовом экране, расположенном за пластиной. Отметим, что при разных расстояниях между пластиной и экраном хорошо различаются разные элементы волновой структуры. Так, при близком расположении экрана будет отчетливо видна структура капиллярного предвестника перед крупными волнами, а теневые изображения будут подобны полученным в [1]. При удалении экрана от пластины на теневом изображении будут хорошо различаться элементы волн с существенно меньшей кривизной поверхности. На рис. 1 экран располагался в 7 см за пластиной. При таком расположении структура капиллярного предвестника не видна, но хорошо видны главные гребни волн и следы в виде вертикальных дорожек с повышенной толщиной пленки, остающиеся за развивающимися трехмерными волнами. Поле локальных толщин пленки измерялось методом ЛИФ, в котором мгновенное распределение толщины пленки по поверхности пластины определяется по интенсивности свечения растворенного в жидкости флуорофора. В экспериментах использовалась скоростная система ЛИФ [9], состоящая из непрерывного лазера и скоростной камеры. Измерение полей толщин проводилось на площадках размерами  $13 \times 13$  см с разрешением 0.132 мм на пиксель на разных расстояниях от распределителя. Съемка изображений методом ЛИФ производилась с частотой 1 кГц. Длина каждой записи составляла 2 с. Осредненное по времени  $t$  поле толщин  $\langle h(x, z) \rangle$ , где  $x$  — расстояние от распределителя, получалось осреднением мгновенных значений толщины в каждой точке по всей длине записи. Отметим, что при временах усреднения больше 0.5 с максимальная флуктуация средних значений

толщины не превышала 1.5%. Для пластины указанных размеров число Рейнольдса  $Re_1$ , выше которого наблюдался переход к трехмерным волновым режимам, находится в диапазоне  $5 < Re_1 < 10$ . При  $Re < Re_1$  характерные поперечные размеры волн намного больше их продольных размеров в любой части течения. При  $Re < Re_1$  не наблюдается формирования струй на осредненных по времени полях толщин пленки — распределение жидкости по пластине остается равномерным. При  $Re > Re_1$  наблюдается переход к трехмерному волновому течению, при котором двумерные волны распадаются на трехмерные волны с характерными продольными и поперечными размерами 1–2 см. При таких  $Re$  в области формирования трехмерных волн на осредненных по времени полях толщин наблюдается формирование струй. В интервале  $Re_1 < Re < Re_2$ , где  $40 < Re_2 < 60$ , практически на всем протяжении течения наблюдается заметное отличие между случаями естественной волновой эволюции и эволюции регулярных волн. В этом же интервале струйное течение имеет наиболее ярко выраженный характер. При  $Re > Re_2$  отчетливое различие между двумя сценариями волновой эволюции наблюдается только на небольших (несколько длин волн) расстояниях от начального участка, а развитие струй носит немонотонный характер: амплитуда струй нарастает до расстояний  $x = 40–50$  см, после чего струи начинают затухать и могут практически исчезать в нижней части пластины. Общее представление о характере волновой эволюции при  $Re_1 < Re < Re_2$  дает рис. 1. В случае регулярных двумерных волн переход к трехмерным волнам происходит по сценарию, описанному в [6]. Формирование трехмерных волн с характерными размерами порядка 1 см сопровождается появлением за ними следа в виде дорожки с повышенной толщиной пленки. Такие дорожки хорошо видны на теневой фотографии в виде светлых вертикальных полосок (рис. 1, *b*). Развитие струй на осредненных по времени полях толщины пленки начинается в той же области течения, где начинают развиваться трехмерные волны. Так, для случая, представленного на рис. 1, *b*, струи начинают проявляться на расстоянии 20–25 см от распределителя. В случае естественной эволюции возникновение элементов волновой структуры с такими же характерными размерами, как и для случая регулярных волн, наблюдается существенно ниже по течению. Например, для случая, представленного на рис. 1, *a*, трехмерные волны, оставляющие следы в виде вертикальных дорожек, и струи на осредненных полях толщин начинают формироваться при



**Рис. 2.** Характеристики пленочного течения на расстояниях 120–130 см от распределителя. *a* —  $\langle h \rangle$ , естественная эволюция; *c* —  $\langle h \rangle$ , эволюция регулярных двумерных волн,  $F = 6$  Hz; *1*, *2* —  $h(t)$  для точек *1* (межструйная область) и *2* (максимум струи); *b* для *a* и *d* для *c*.

$x = 40\text{--}50\text{ см}$ . Несмотря на значительные различия волновой эволюции в верхней части течения, характерные размеры и форма трехмерных волн на больших расстояниях от распределителя одинаковы. При этом в случае естественной эволюции волны в нижней части течения так же выстраиваются в цепочки, хотя и не такие регулярные, как в случае возбужденных волн. Как следствие, на больших расстояниях от распределителя струи наблюдаются при любом из сценариев волновой эволюции (рис. 2). Характерный размер сформировавшихся струй слабо зависит от  $Re$  и лежит в интервале  $1.1\text{--}1.4\text{ см}$ . Отношение осредненной по времени толщины пленки в максимумах струй к толщине в межструйных областях увеличивается с ростом  $Re$  до  $Re \approx 25$ , а затем начинает убывать. Так, для  $Re = 14$  это отношение составляет  $1.1$  для естественных и  $1.3$  для возбужденных волн при  $x = 120\text{--}130\text{ см}$ , а при  $Re = 25$  соответствующие величины составляют  $1.2$  и  $1.5$ . Переход к трехмерному волновому движению в случае эволюции регулярных двумерных волн приводит на больших расстояниях к образованию струй с практически полным подавлением волнового движения в межструйных областях (рис. 2, *c, d*), в то время как для случая естественной эволюции в межструйных областях наблюдается перемежаемость — подавленное волновое движение сменяется прохождением цугов волн (рис. 2, *a, b*). Поскольку формирование струй при пленочном течении часто связывают с его неизомеричностью, для случаев на рис. 2 было проведено прямое измерение поля температур на поверхности пленки с использованием скоростного ИК-сканера Titanium ATR-570M с чувствительностью  $25\text{ мК}$ . Погрешность измерений температуры с учетом шумов матрицы не превышала  $0.05\text{ К}$ . Измерения показали, что в пределах указанной погрешности течение жидкости можно считать изотермическим. Таким образом, формирование струй в процессе перехода к трехмерному волновому течению должно объясняться в рамках гидродинамики изотермического пленочного течения. На качественном уровне можно предложить следующий механизм образования струй: при прохождении трехмерной волны по остаточному слою жидкой пленки происходит боковой подсос жидкости под гребень волны и ее сброс через оставляемый волной след в виде дорожки с повышенной толщиной пленки [6]. Дорожка, оставляемая волной, приводит к синхронизации волновой картины — волны выстраиваются в цепочки, благодаря чему подсос жидкости непрерывно осуществляется к одним и тем же участкам течения, что и приводит к формированию струй на

поверхности пленки. В заключение следует отметить, что описанный эффект, по-видимому, не может быть получен при моделировании с использованием периодических граничных условий вниз по течению. Использование таких условий оправданно в областях выше и ниже области формирования трехмерных волн, но в последнем случае начальным условием для моделирования должно являться течение уже имеющее струйный характер.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 12-01-00778, и гранта правительства России для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах № 11.G34.31.0035.

## Список литературы

- [1] *Park C.D., Nosoko T.* // *AIChE J.* 2003. V. 49. N 11. P. 2715.
- [2] *Kalliadasis S., Ruyer-Quil C., Scheid B., Velarde M.G.* *Falling Liquid Films.* London: Springer, 2012. 440 p.
- [3] *Scheid B., Ruyer-Quil C., Manneville P.* // *J. Fluid Mech.* 2006. V. 562. P. 183.
- [4] *Dietze G. F., Kneer R.* // *Front. Heat Mass Transfer (FHMT).* 2011. V. 2. N 3. P. 033 001.
- [5] *Dietze G.F., Rohlf W., Nährich K.* et al. // *J. Fluid Mech.* 2014. V. 743. P. 75.
- [6] *Алексеенко С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 16. С. 16. (*Alekseenko S.V., Guzanov V.V., Markovich D.M., Kharlamov S.M.* // *Technical Physics Letters.* 2012. V. 38. N 8. P. 739).
- [7] *Leontidis V., Vatteville J., Vlachogiannis M.* et al. // *Phys. Fluids.* 2010. V. 22. P. 112 106.
- [8] *Georgantaki A., Vatteville J., Vlachogiannis M., Bontozoglou V.* // *Phys. Rev. E.* 2011. V. 84. N 2. P. 026 325.
- [9] *Alekseenko S., Cherdantsev A., Cherdantsev M.* et al. // *Exp. Fluids.* 2012. V. 53. N 1. P. 77.