

03

## Особенности перехода от регулярного двумерного к трехмерному волновому движению на вертикально стекающих пленках жидкости

© С.В. Алексеенко, 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 14 марта 2012 г.

Представлены результаты экспериментального исследования перехода от двумерного к трехмерному волновому движению на вертикально стекающих пленках жидкости. Показано, что такой переход сопровождается существенным перераспределением жидкости в горизонтальном направлении. Представлена информация о характерной форме развивающихся в процессе перехода трехмерных структур.

Пленочные течения жидкости являются конвективно-неустойчивыми, вследствие чего на поверхности пленок, стекающих под действием силы тяжести, развиваются волны. При умеренных числах Рейнольдса пленочного течения конечной стадией волновой эволюции являются трехмерные волновые режимы, при которых поверхность пленки покрыта трехмерными волнами, взаимодействующими друг с другом случайным образом. Для воды такие режимы наблюдаются в диапазоне чисел Рейнольдса  $30 < Re < 400$ , где  $Re = q/\nu$ ,  $q$  — удельный объемный расход жидкости,  $\nu$  — кинематическая вязкость. В [1–4] предполагается, что взаимодействующие трехмерные волны обладают вполне определенными характеристиками и представляют собой устойчивые когерентные структуры.

К настоящему времени в исследовании трехмерных волновых режимов достигнут определенный прогресс. В [1,5,6] на основании модели Капицы–Шкадова исследованы сценарии перехода от двумерных к трехмерным волнам, получены стационарные решения в виде уединенных

подковообразных волн, показано хорошее соответствие между рассчитанными и экспериментально измеренными в [6–8] характеристиками таких волн. На основании этого авторы [6] предлагают использовать развитые ими подходы для описания трехмерных режимов, несмотря на недостатки [4,5] используемой ими модели.

Моделирование трехмерных режимов как на основании более точной модели [4], так и прямым численным расчетом уравнений гидродинамики [9] выполнялось с использованием периодических граничных условий, что затрудняет определение области применимости указанных подходов для описания реальных течений. Расчеты [4,6,9] по моделированию трехмерных волновых режимов сопоставлялись в основном с экспериментом [10], где использовался теневой метод, не дающий полной информации о форме волн. Результаты сопоставления имеют противоречивый характер. Так, в [4,6] получено, что трехмерные структуры в [10] являются подковообразными волнами, в то время как по [9] эти же структуры являются удлиненными по течению волнами с заполненным задним склоном. В [11], где измерялись характеристики волн при развитых трехмерных режимах, наблюдались преимущественно удлиненные волны.

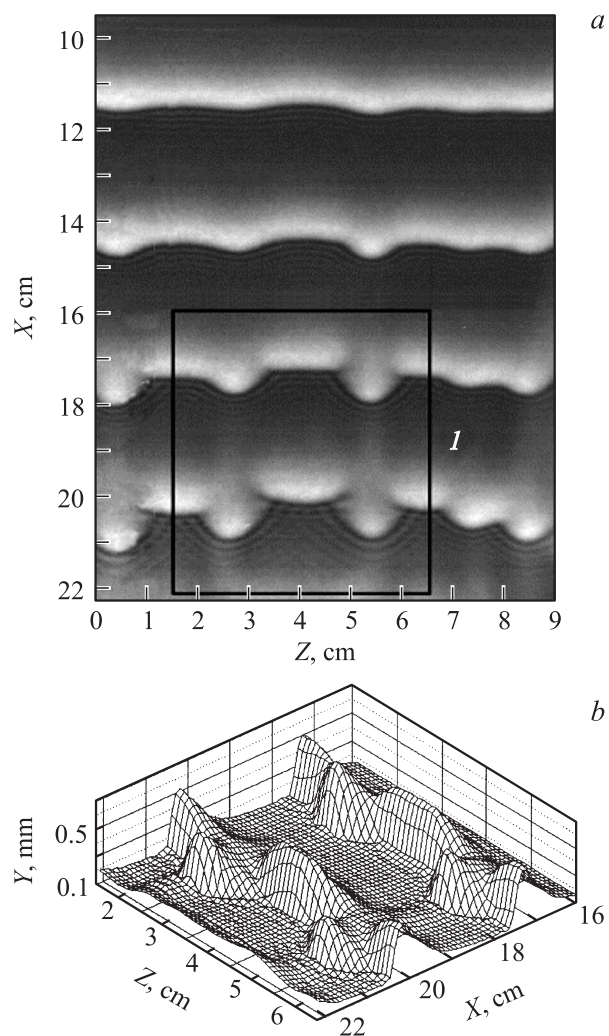
В данной работе представлены экспериментальные результаты, восполняющие нехватку информации о характерных особенностях перехода от двумерного к трехмерному волновому движению на вертикально стекающих пленках жидкости. Эксперименты проводились по методике [7]. В качестве рабочего участка использовалась вертикально установленная стеклянная пластина. Пленочное течение формировалось при помощи щелевого распределителя. Поле локальных толщин пленки измерялось методом лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), в котором мгновенное распределение толщины пленки по поверхности пластины определяется по интенсивности свечения растворенного в жидкости флуорофора. Волновая картина регистрировалась на расстояниях  $10\text{ см} < X < 22\text{ см}$  от распределителя на площадке размерами  $12 \times 12\text{ см}$  с разрешением  $0.125\text{ мм}$  на пиксель. Закономерности перехода к трехмерным волновым режимам исследовались только для периодических двумерных волн при условии сохранения периодичности волновой картины во всей области наблюдения. Двумерные волны частоты  $f$  возбуждались гармонической модуляцией расхода жидкости. В измерениях использовался стробоскопический эффект, позволяющий

повысить частоту дискретизации по времени  $t$  при исследовании периодических процессов. Для каждой  $f$  подбиралась частота регистрации, при которой смещение элементов волновой структуры за время между двумя последовательными измерениями не превышало 0.5 длины волны капиллярного предвестника, определяющей максимальную частоту в спектре волн. Результаты последовательных измерений для каждой точки поверхности интерпретировались как результат дискретизации по  $t$  поля толщин пленки  $h(x, x, t)$  с частотой, удовлетворяющей теореме отсчетов.

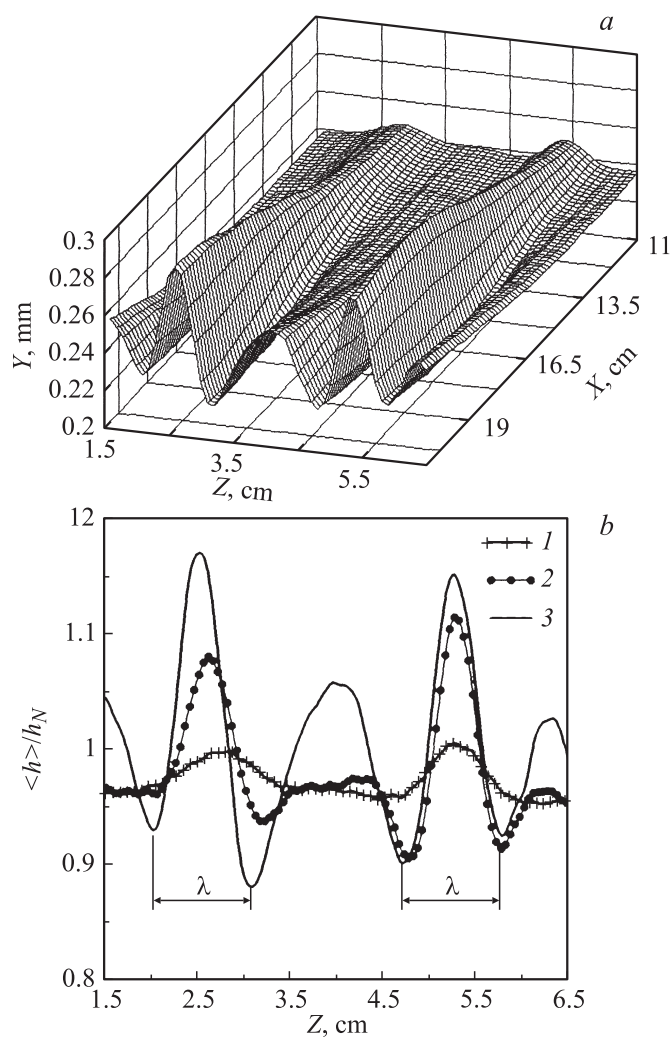
В экспериментах использовались вода ( $\nu = 0.994 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , плотность  $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$ , поверхностное натяжение  $\sigma = 0.073 \text{ кг/с}^2$ ) и водоглицериновый раствор ВГР ( $\nu = 3.9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\rho = 1110 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma = 0.073 \text{ кг/с}^2$ ). Измерения проводились в диапазоне  $18 < \text{Re} < 70$  для воды и  $10 < \text{Re} < 50$  для ВГР. Исследовались переходы к трехмерному волновому движению вследствие как естественной поперечной неустойчивости двумерных волн, так и их принудительного разрушения при помощи регулярных гребенок из игл, касавшихся поверхности пленки в верхней части течения.

Естественное формирование трехмерных структур наблюдалось при  $\text{Re} > 30$  для воды и  $\text{Re} > 12$  для ВГР. Пример волновой картины при естественном развитии трехмерных структур приведен на рис. 1. Как видно, искривление гребня двумерной волны приводит к образованию убегающих вперед выступов. Участки волны между выступами, которые будем называть „стенками“, имеют существенно меньшую, чем выступы, кривизну переднего фронта. Во всех случаях наблюдался синхронный сценарий [12] развития трехмерных структур — их поперечные координаты (вдоль оси  $z$ ) оставались постоянными во времени для всех гребней двумерных волн. По мере формирования выступов за ними образуется след в виде дорожки, толщина пленки в которой больше толщины остаточного слоя, остающегося за „стенками“. Дорожка хорошо видна на рис. 1, *b*. Несмотря на малую, не более  $5\text{--}10 \mu\text{м}$ , амплитуду, дорожка, остающаяся за выступами, может оказывать возмущающее действие на следующий гребень двумерной волны и тем самым способствовать реализации синхронного сценария развития неустойчивости. Отметим, что синхронный сценарий наблюдается и у других авторов, например на рис. 4 в [13].

При развитии трехмерных структур вниз по течению наблюдается постепенное уменьшение амплитуды „стенок“ в областях, прилегающих



**Рис. 1.** Естественное развитие трехмерных структур: *a* — ЛИФ-изображение течения; *b* — поле толщин пленки для области *I*. Вода,  $Re = 50$ ,  $f = 17$  Hz.



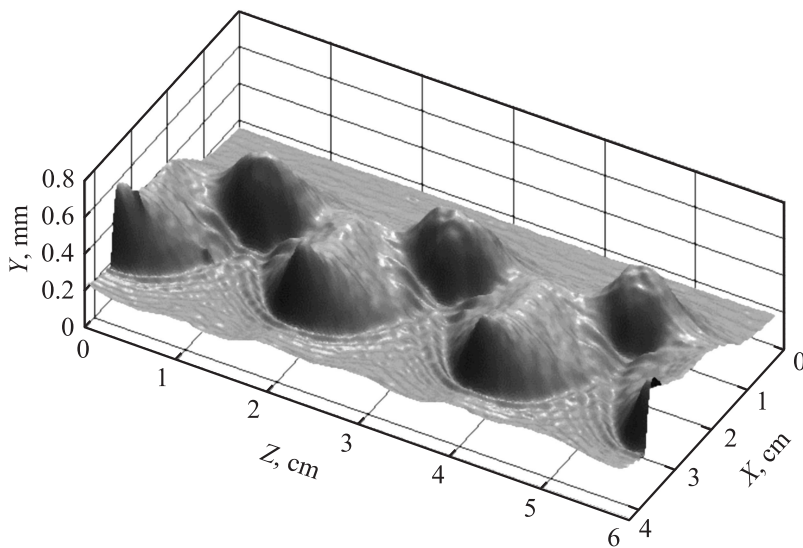
**Рис. 2.** Осредненная по времени форма поверхности пленки: *a* —  $\langle h \rangle$  для случая течения, представленного на рис. 1; *b* — поперечные разрезы для *a* на расстояниях от распределителя: 1 — 11 см, 2 — 16 см, 3 — 21.5 см. Левая и правая границы такие же, как для области 1 на рис. 1, *a*.  $h_N = (3\nu^2 \text{Re}/g)^{1/3}$  — толщина пленки по Нуссельту, *g* — ускорение свободного падения.

к выступам (рис. 1, *b*), что может указывать на наличие поперечных перетоков жидкости. На осредненных по времени полях толщины пленки (рис. 2, *a*) видно, что поперечное перераспределение жидкости действительно происходит. При таком представлении наблюдается формирование „струй“ — средняя по времени толщина пленки

$$\langle h(x, z) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{i=N-1} h(x, z, t + i\Delta t),$$

где  $N\Delta t = 1/f$ ,  $N$  — количество отсчетов на период, нарастает вниз по течению в областях, по которым проходят центральные части выступов и „стенок“, и убывает между ними. Для исследованных режимов  $\langle h \rangle$  может отличаться на 30–40% на расстояниях, сравнимых с поперечным размером „струй“  $\lambda$  (рис. 2, *b*). Этот размер не зависит от  $f$  и  $Re$  и составляет  $10.5 \pm 0.5$  мм для воды и  $13 \pm 1$  мм для ВГР. Перераспределение жидкости должно сопровождаться и перераспределением ее средних по времени локальных расходов  $\langle q(x, z) \rangle$ . Грубая оценка в предположении  $\langle q(x, z) \rangle \sim \langle h(x, z) \rangle^3$  показывает, что  $\langle q \rangle$  в максимуме „струй“ может превосходить  $\langle q \rangle$  на ее периферии в несколько раз.

При искусственном разрушении двумерных волн регулярной гребенкой трехмерные структуры, также состоящие из выступов и „стенок“, образуются на начальном участке пленочного течения, при этом поперечные координаты центров выступов совпадают с положением игл, а осредненное по времени распределение жидкости всегда имеет струйный характер сразу за гребенкой. При малых  $Re$ , для которых не наблюдалось естественного перехода к трехмерным волновым режимам, в процессе последующей эволюции „стенки“ постепенно догоняют выступы, а поперечные перетоки направлены в сторону выравнивания распределения жидкости по пластине — „струй“ затухают вниз по течению. При больших  $Re$  наблюдается один из двух сценариев волновой эволюции. При низких частотах возбуждения выступы вначале убегают от „стенок“, при этом их скорость и амплитуда падают, вследствие чего „стенки“, движущиеся с примерно постоянной скоростью, начинают догонять выступы. По мере приближения „стенок“ к выступам амплитуда последних начинает восстанавливаться и волновая структура в нижней части рабочего участка оказывается похожей на структуру на начальном участке течения. При высоких частотах возбуждения место между „стенкой“, покинутое убежавшим



**Рис. 3.** Фрагмент волновой картины при разрушении двумерных волн регулярной гребенкой с шагом 2 см. Вода,  $Re = 65$ ,  $f = 16$  Hz.

выступом, заполняется другим выступом, приходящим сверху, при этом волновая структура в нижней части рабочего участка также оказывается похожей на структуру на начальном участке. Таким образом, при любом из сценариев волновая структура проходит через сложную перестройку с почти полным восстановлением начального состояния через несколько пространственных периодов. Независимо от сценария, на тех участках течения, где выступы движутся быстрее „стенок“, наблюдается преимущественное перераспределение жидкости в сторону выступов. Обратные перетоки, от выступов к стенкам, наблюдаются там, где „стенки“ догоняют выступы или вновь приходящие выступы заполняют пространство между „стенками“. Как следствие, чаще всего наблюдается немонотонное развитие „струй“ вниз по течению.

Для всех исследованных случаев форма наблюдавшихся трехмерных структур не является подковообразной и в большей степени похожа на форму удлиненных трехмерных волн [11]. На рис. 3 приведен фрагмент волновой картины для условий, близких к условиям расчета [9]. Форма

трехмерных структур на рис. 3 хорошо совпадает, в том числе и по ряду мелкомасштабных деталей, с результатами расчета, приведенными на рис. 18 в [9]. Следует отметить, что структуры, представленные на рис. 3, быстро изменяются в процессе эволюции и в другие моменты времени их форма существенно отличается от расчетной, что, по всей видимости, связано с использованием в [9] периодических граничных условий по  $X$ .

В заключение следует отметить, что явление поперечного перераспределения жидкости в процессе формирования трехмерных волновых структур при изотермическом пленочном течении обнаружено впервые и имеет большое значение для объяснения механизмов влияния волн на теплообмен. В частности, наличие такого перераспределения может объяснять ряд особенностей термокапиллярно-волнового режима течения неизотермических пленок жидкости [14].

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства России для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах № 11.G34.31.0035.

## Список литературы

- [1] Demekhin E.A., Kalaidin E.N., Kalliadasis S., Vlaskin S.Yu. // Phys. Fluids. 2007. V. 19. P. 114 103.
- [2] Demekhin E.A., Kalaidin E.N., Kalliadasis S., Vlaskin S.Yu. // Phys. Fluids. 2007. V. 19. P. 114 104.
- [3] Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. 256 с.
- [4] Chang H.C., Demekhin E.A. Complex wave dynamics on thin films. Amsterdam: Elsevier, 2002. 399 p.
- [5] Kalliadasis S., Ruyer-Quil C., Scheid B., Velarde M.G. Falling Liquid Films. London: Springer, 2012. 440 p.
- [6] Demekhin E.A., Kalaidin E.N., Selin A.S. // Phys. Fluids. 2010. V. 22. P. 092 103.
- [7] Alekseenko S.V., Antipin V.A., Guzanov V.V. et al. // Phys. Fluids. 2005. V. 17. P. 121 704.
- [8] Алексеенко С.В., Антипин В.А., Гузанов В.В. и др. // ДАН. 2005. Т. 405. № 2. С. 193.
- [9] Dietze G.F., Kneer R. // Front. Heat Mass Transfer (FHMT). 2011. V. 2. N 3. P. 033 001.



- [10] *Park C.D., Nosoko T.* // *AIChE J.* 2003. V. 49. N 11. P. 2715.
- [11] *Adomeit P., Renz U.* // *Int. J. Multiphase Flow.* 2000. V. 26. P. 1183.
- [12] *Liu J., Schneider J.B., Gollub J.P.* // *Phys. Fluids.* 1995. V. 7. N 1. P. 55.
- [13] *Yoshimura P.N., Nosoko T., Nagata T.* // *Chem. Eng. Sci.* 1996. V. 51. N 8. P. 1231.
- [14] *Чиннов Е.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2008. Т. 34. В. 19. С. 27.