

03

## Особенности установления трехмерных волновых режимов в вертикально стекающей пленке жидкости

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

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

Поступило в Редакцию 28 сентября 2015 г.

Представлены результаты экспериментального исследования волновых режимов пленочного течения жидкости по вертикальной пластине в диапазоне умеренных чисел Рейнольдса с использованием жидкостей с различными физическими свойствами. Анализ статистических характеристик волновых полей позволил детализировать классификацию трехмерных волновых режимов в исследованном диапазоне расходов жидкости. Показано, что установившиеся трехмерные волновые режимы реализуются при числах Рейнольдса, значительно превышающих число Рейнольдса перехода от двумерного к трехмерному волновому течению.

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 взаимодействующими друг с другом трехмерными волнами. Из-за большого количества волн и хаотичности их взаимодействия широко распространено статистическое описание подобных режимов. Несмотря на большое количество работ по исследованию статистических характеристик пленочных течений, в них в основном рассматриваются режимы с умеренными и высокими расходами жидкости, характеризуемыми числами Рейнольдса  $Re > 100$ , где  $Re = q/\nu$ ,  $q$  — удельный объемный расход жидкости,  $\nu$  — кинематическая вязкость. Для режимов течения в диапазоне  $10 < Re < 100$  наблюдается недостаток статистических данных. В то же время практически все работы по моделированию и экспериментально-

му исследованию трехмерных волн на поверхности стекающих пленок в детерминистской постановке ограничиваются именно этим диапазоном относительно небольших расходов жидкости. Нехватка статистической информации затрудняет проведение корректного сравнения результатов моделирования и экспериментов, особенно для случая трехмерных волновых режимов. Так, например, в [1,2] предлагается рассматривать возникающие в трехмерных режимах волны как отдельные устойчивые структуры, имеющие вполне определенные характеристики. Однако критерии установления течения, при выполнении которых можно говорить о полном развитии таких структур, в литературе отсутствуют. Недавние эксперименты [3,4], проведенные в диапазоне  $5 < Re < 100$ , показали, что переход от двумерного к трехмерному волновому движению при изотермическом пленочном течении по вертикальной пластине сопровождается образованием струй. Уже по этой причине применение данных, полученных с использованием небольшого количества локальных датчиков, может приводить к существенным искажениям статистической информации. В то же время известные попытки классификации режимов течения пленки в указанном диапазоне чисел  $Re$  осуществлялись без учета струйного характера течения с использованием данных локальных датчиков и (или) теневых фотографий, не передающих достаточной информации о толщине пленки, как, например, в работах [5,6]. В данной работе представлены результаты исследования эволюции вниз по течению статистических характеристик волн при пленочном течении жидкости по вертикальной пластине в диапазоне  $5 < Re < 100$  с использованием полевых измерений, что позволило детализировать классификацию волновых режимов.

Эксперименты проводились на стеклянной пластине шириной 45 см и длиной 140 см. Исследовались режимы как естественной волновой эволюции, так и эволюции изначально двумерных регулярных волн. Регулярные волны возбуждались гармонической модуляцией расхода жидкости с частотой  $F$  на входе в распределительную секцию рабочего участка. По форме фронта регулярных волн в верхней части течения контролировалась равномерность орошения пластины. Когда орошение равномерно, регулярные волны являются двумерными и их фронты прямолинейны и перпендикулярны направлению течения. В качестве рабочих жидкостей использовались вода и водоглицериновые растворы различной концентрации. Число Капицы  $\gamma$ , характеризующее физические свойства жидкости, варьировалось в диапазоне  $1100 \leq \gamma \leq 3700$ .

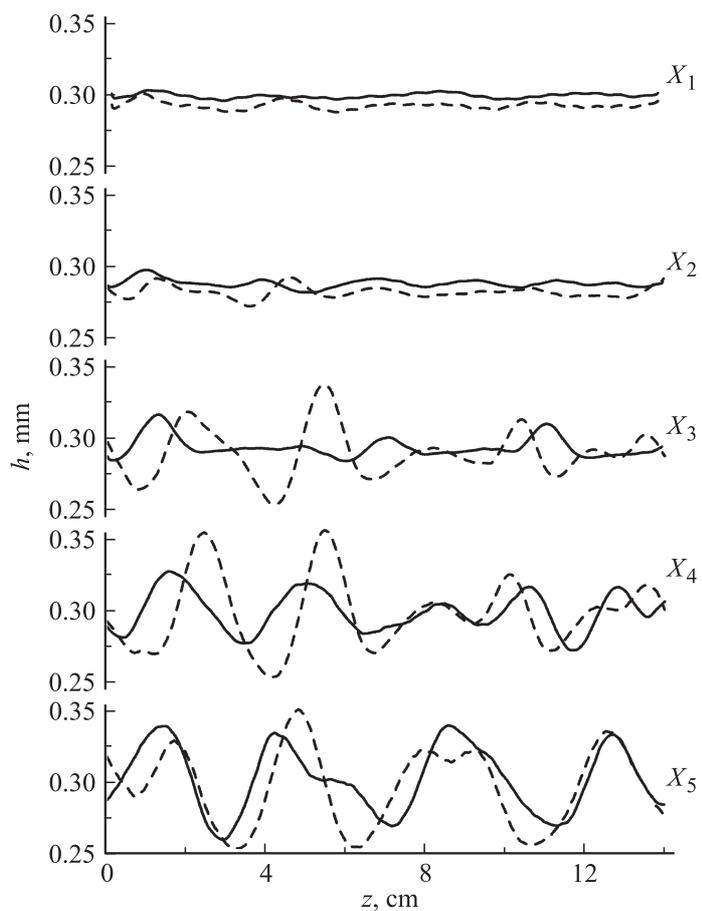
Здесь  $\gamma = \sigma \rho^{-1} \nu^{-4/3} g^{-1/3}$ ,  $\rho$  — плотность,  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $g$  — ускорение свободного падения.

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. В экспериментах использовалась скоростная система ЛИФ [7], состоящая из непрерывного лазера и скоростной камеры. Для обеспечения достаточного временного и пространственного разрешения съемка длительностью 2 с производилась высокоскоростной камерой с частотой 1 kHz и временем экспозиции 0.99 ms на площадках с размерами от  $13 \times 13$  см до  $19 \times 19$  см с разрешением от 0.13 до 0.19 mm на пиксель. Измерения производились независимо на пяти площадках, находящихся на различном удалении от начала течения. По полученным данным для каждого исследованного режима были вычислены статистические характеристики флуктуаций толщины пленки, в том числе ряд моментов высших порядков. Наиболее информативными для оценки направления волновой эволюции оказались плотность вероятности распределения толщины пленки, дисперсия  $D$  и спектральная мощность  $Y(f)$ , которые и будут рассмотрены ниже.

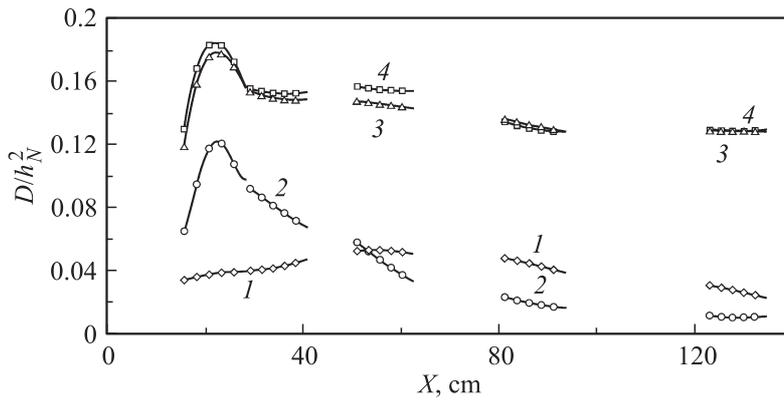
Поскольку для всех использованных рабочих жидкостей наблюдались одни и те же характерные режимы течения, графическая иллюстрация результатов проводится на примере водоглицеринового раствора с  $\nu = 2.1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho = 1070$  кг/м<sup>3</sup>,  $\sigma = 0.072$  кг/с<sup>2</sup>,  $\gamma = 1140$ .

При малых расходах жидкости, когда  $Re < Re_1$ , не наблюдается перехода к трехмерным волнам и характерные поперечные размеры волн намного больше их продольных размеров в любой части течения. При таких числах Рейнольдса распределение жидкости по пластине является равномерным и на осредненных по времени полях толщин пленки не наблюдается формирование струй. В силу малости амплитуды волн в этом диапазоне расходов, точное определение величины  $Re_1$  затруднено, но для всех рабочих жидкостей оно было меньше 15.

При  $Re > Re_1$  наблюдается переход к трехмерному волновому течению. Двумерные волны распадаются на трехмерные волны с характерными продольными и поперечными размерами 1–2 см. При этом в области формирования трехмерных волн на осредненных по времени полях толщин наблюдается формирование струй (рис. 1). Поскольку течение жидкости имеет струйный характер, исследовалась эволюция

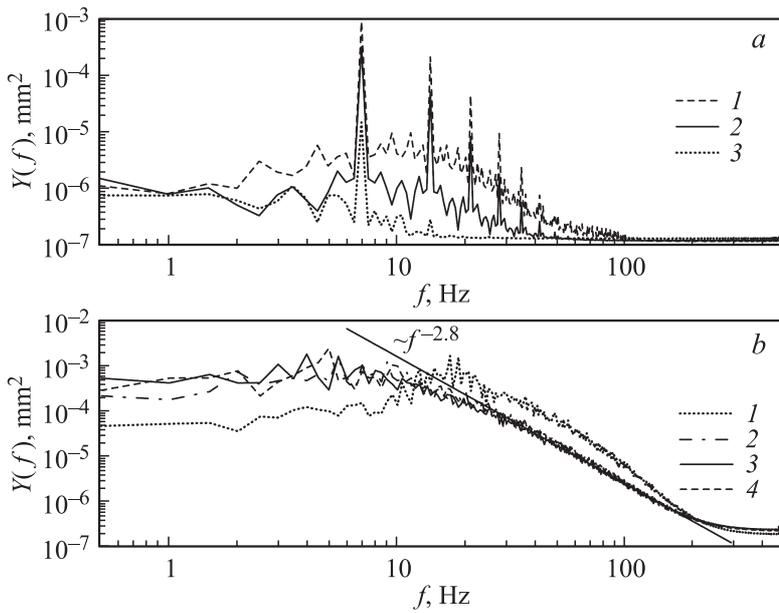


**Рис. 1.** Осредненная по времени толщина пленки  $h$  на различных расстояниях  $X$  от пленкоформователя для случаев естественной волновой эволюции (сплошная линия) и при возбуждении двумерных волн (пунктирная линия).  $Re = 19$ ;  $Z$  — поперечная координата;  $X_1 = 21$  см,  $X_2 = 34$ ,  $X_3 = 56$ ,  $X_4 = 87$ ,  $X_5 = 128$  см.



**Рис. 2.** Дисперсия толщины пленки  $D$  в случаях естественной волновой эволюции и при возбуждении двумерных волн.  $h_N$  — толщина гладкой пленки, рассчитанной по формуле Нуссельта. 1 —  $Re = 19$ , без возбуждения; 2 —  $Re = 19$ , при возбуждении двумерных волн с частотой  $F = 7$  Hz; 3 —  $Re = 54$ ,  $F = 7$  Hz, 4 —  $Re = 54$ , без возбуждения.

статистических и спектральных характеристик, осредненных по области наблюдения в поперечном течению направлении. В интервале  $Re_1 < Re < Re_2$ , где для всех жидкостей  $40 < Re_2 < 60$ , на всем протяжении течения имеется существенное различие в сценариях волновой эволюции естественно возникающих и принудительно возбуждаемых волн. В этом диапазоне  $Re$  эволюция статистических характеристик наблюдается на всем протяжении течения. На небольших расстояниях от распределителя происходит развитие вниз по течению двумерных волн, при этом  $D$  на начальном участке возрастает с расстоянием (рис. 2). После начала распада двумерных волн на трехмерные дисперсия начинает монотонно уменьшаться вниз по течению, при этом скорость уменьшения  $D$  для случая регулярных волн всегда значительно больше, чем для случая естественно возникающих волн. В нижней части течения дисперсия, продолжая уменьшаться, становится на порядок меньше, чем в области развитых двумерных волн. Монотонное затухание образовавшихся трехмерных волн вниз по течению хорошо видно и в спектральной области (рис. 3, а), причем в случае регулярных волн спектральная мощность на всех частотах убывает быстрее, чем в



**Рис. 3.** Спектр мощности  $Y(f)$  на различных расстояниях  $X$  от пленкоформирователя. *a* —  $Re = 13.5$ , при возбуждении двумерных волн с частотой  $F = 7$  Hz. 1 —  $X = 21$  cm, 2 —  $X = 56$  cm, 3 —  $X = 128$  cm. *b* —  $Re = 54$ , без возбуждения, 1 —  $X = 21$  cm, 2 —  $X = 87$  cm, 3 —  $X = 128$  cm; 4 —  $F = 7$  Hz,  $X = 128$  cm.

случае естественной волновой эволюции. Эволюция плотности вероятности распределения толщины пленки также указывает на затухание трехмерных волн вниз по течению — распределение становится все более симметричным относительно модального значения, а его ширина монотонно уменьшается с увеличением расстояния от распределителя. Таким образом, в интервале  $Re_1 < Re < Re_2$  установление трехмерного волнового течения не происходит на всех расстояниях от распределителя, а волновая эволюция направлена в сторону монотонного затухания трехмерных волн вниз по течению.

При  $Re > Re_2$  отчетливое различие между двумя сценариями волновой эволюции наблюдается только на небольших (несколько длин

волн) расстояниях  $X$  от пленкоформователя, а развитие струй носит немонотонный характер: амплитуда струй нарастает до расстояний  $X = 40\text{--}50$  см, после чего струи начинают затухать и могут практически исчезать при  $X = 120\text{--}130$  см. Для этих случаев характерна быстрая эволюция статистических характеристик на расстояниях до  $40\text{--}50$  см от распределителя с последующим плавным выходом на постоянные значения. Вблизи от распределителя, в области развития двумерных волн,  $D$  возрастает с расстоянием (рис. 2). После начала распада двумерных волн на трехмерные дисперсия уменьшается вниз по течению до расстояний  $50\text{--}60$  см от распределителя, после чего остается неизменной при дальнейшем увеличении расстояния. При больших  $X$  установившаяся величина  $D$  в 1.5–2.5 раза меньше максимальных значений, наблюдаемых в области развития двумерных волн. Быстрое установление трехмерных волновых режимов течения при  $Re > Re_2$  хорошо видно и в спектральной области (рис. 3, *b*). На начальном этапе волновой эволюции спектральная мощность убывает в области высоких и возрастает в области низких частот. Но, начиная с расстояний  $50\text{--}60$  см, распределение спектральной мощности по частотам устанавливается и не меняется при дальнейшем увеличении расстояния. На этих же расстояниях происходит установление плотности вероятности распределения толщины пленки, причем установившееся распределение во всех случаях является сильно асимметричным, с вытянутым вправо хвостом. Для установившихся трехмерных волновых режимов в области высоких частот спектральная мощность затухает с частотой  $f$  по степенному закону  $Y \sim (f)^\alpha$  с показателем степени  $\alpha$ , равным  $-2.8$  (рис. 3, *b*). Этот показатель не зависит от физических свойств жидкости и близок значению, полученному в [8] для пленочного течения воды в широком диапазоне  $Re$ .

Таким образом, несмотря на то что переход к трехмерным волновым режимам за счет поперечной неустойчивости двумерных волн наблюдается при  $Re \sim 10$ , установившиеся трехмерные режимы наблюдаются при существенно больших расходах жидкости ( $Re > 40$ ). В диапазоне  $10 < Re < 40$  установления не происходит, а характер и направление эволюции характеристик трехмерных волновых полей позволяют предположить, что в этом диапазоне расходов не могут существовать затухающие вниз по течению трехмерные волны конечной амплитуды и, как следствие, реализовываться стационарные волновые поля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 14-22-00174.

## **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 (15 p).
- [3] *Алексеевко С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 16. С. 16.
- [4] *Алексеевко С.В., Бобылев А.В., Гузанов В.В. и др.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 22. С. 97.
- [5] *Park C.D., Nosoko T.* // AIChE J. 2003. V. 49. N 11. P. 2715.
- [6] *Ishigai S., Nakanisi S., Koizumi T., Oyabu Z.* // Bull. JSME. 1972. V. 15. N 83. P. 594.
- [7] *Alekseenko S., Cherdantsev A., Cherdantsev M. et al.* // Exp. Fluids. 2012. V. 53. N 1. P. 77.
- [8] *Chu K.J., Dukler A.E.* // AIChE J. 1975. V. 21. N 3. P. 583.