УДК 532.59:532.62

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

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

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН
Новосибирский Государственный Университет,
Новосибирск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант №14-22-00174).

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты систематического экспериментального исследования режимов течения плёнки жидкости по вертикальной пластине в диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения $5 < Re < 100$ с использованием жидкостей с различными физическими свойствами. Анализ различных статистических характеристик позволил детализировать классификацию режимов течения. Показано, что для выраженных струйных режимов течения по всей рабочей области наблюдается затухающий характер волновой эволюции. При этом статистические характеристики различаются для случаев естественной и вынужденной волновой эволюции. Для более высоких Re, при которых уже не наблюдается формирование струй, характерна быстрая эволюция всех характеристик в верхней части течения с последующим выходом на неизменные значения. Причем заметных различий между случаями естественной и вынужденной волновой эволюции не наблюдается.

ВВЕДЕНИЕ

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. Не смотря на большое количество работ по исследованию пленочных течений, основная часть работ посвящена изучению статистических характеристик плёночного течения при $Re > 100$, где $Re = q/\nu$, q – удельный объёмный расход жидкости, ν – кинематическая вязкость, а в диапазоне чисел Рейнольдса $5 < Re < 100$ наблюдается недостаток экспериментальных данных. К тому же данные во многих случаях получены локальными датчиками, не позволяющими передать полную информацию о течении. При этом существенная трёхмерность (согласно визуальным наблюдениям) возникающих на плёнке волновых структур подчёркивается всеми исследователями. Некоторые авторы [1, 2] предлагают рассматривать возникающие в трёхмерных режимах волны как отдельные устойчивые структуры, имеющие вполне определённые характеристики. Однако критерии установления течения, когда можно говорить о появлении таких структур, в литературе отсутствуют.

Недавние экспериментальные исследования [3, 4] показали образование струй в процессе перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению при изотермическом течении плёнки, как для случая естественной, так и вынужденной волновой эволюции. Из-за этого использование локальных датчиков может приводить к существенным искажениям измеряемых параметров. Существующие попытки систематизации режимов течения плёнки в диапазоне умеренных Re осуществлялись без учета струйного характера течения с использованием данных локальных датчиков и (или) теневых фотографий, не передающих достаточной информации о толщине плёнки, как, например, в работе [5]. В данной работе представлены результаты систематического экспериментального исследования перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению на вертикально стекающей плёнке для жидкостей с различными физическими свойствами. Основное внимание уделялось анализу статистических характеристик и их связи с режимами течения, в том числе с образованием струй.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились на вертикально закреплённой стеклянной прозрачной пластине в диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения $5 < Re < 100$. В качестве рабочих жидкостей использовались водоглицериновые растворы ВГР1 ($\rho = 1{,}05$ г/см^3, $\sigma = 72$ г/с^2, $\nu=1{,}6*10^{-2}$ см^2/с, $\gamma=1733$), ВГР2 ($\rho = 1{,}07$ г/см^3, $\sigma = 72$ г/с^2, $\nu=2{,}1*10^{-2}$ см^2/с, $\gamma=1140$) и вода ($\rho = 0{,}998$ г/см^3, $\sigma = 72$ г/с^2, $\nu=0{,}94*10^{-2}$ см^2/с, $\gamma=3675$), где ρ – плотность жидкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения, ν – кинематическая вязкость, а $\gamma=\sigma\rho^{-1}\nu^{-4/3}g^{-1/3}$ – число Капицы (g – ускорение свободного падения). Плёночное течение формировалось с одной стороны стекла при помощи щелевого распределителя на площадке длиной 140 см и шириной 45 см. Для формирования регулярных волн на расход жидкости накладывались гармонические колебания частотой F непосредственно перед входом на рабочий участок. По форме фронта этих волн в верхней части течения контролировалась равномерность орошения пластины. Когда орошение равномерно, фронты волн прямолинейны и перпендикулярны направлению течения.

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. Расстояние между экраном и пластиной могло варьироваться в широком диапазоне для лучшей визуализации различных элементов течения. При малом расстоянии, получающиеся теневые изображения схожи с изображениями полученными другими авторами (например, [5]) и хорошо передают структуру волн с наибольшей кривизной поверхности – капиллярный предвестник. При такой настройке изображения выглядят наиболее «резко». При отдалении экрана от пластины на теневых изображениях становятся более заметными элементы течения с меньшей кривизной поверхности, а капиллярный предвестник становится менее «резким». При определённом расстоянии между экраном и пластиной на изображении видны и капиллярный предвестник, и основной горб трёхмерной волны, имеющий меньшую кривизну. При такой настройке системы в работе [4] впервые удалось визуализировать струи в процессе перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению при изотермическом течении пленки воды.

Измерения толщины плёнки жидкости проводились при помощи метода лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ). Для обеспечения достаточного для вычисления статистических характеристик временного и пространственного разрешения съёмка длительностью 2 сек. производилась высокоскоростной камерой с частотой 1 кГц на площадках размером от 13x13 см^2 до 19x19 см^2, с пространственным разрешением соответственно от 0,13 до 0,19 мм на пиксель. Возбуждение флуоресцентного свечения растворенного в рабочей жидкости Родамина 6Ж производилось на чуть большей площади непрерывным лазером мощностью 2Вт с длиной волны излучения 532нм. Измерения производились независимо на пяти не пересекающихся площадках на различном удалении от распределителя. По полученным мгновенным распределениям толщины плёнки для каждого исследованного режима были вычислены различные статистические характеристики. Для оценки направления волновой эволюции наиболее показательными оказались следующие величины: плотность вероятности распределения толщины пленки (pdf), дисперсия (D) и спектральная плотность мощности (Y(f)). Поскольку течение плёнки в исследуемом диапазоне параметров зачастую имеет струйный характер указанные выше характеристики приводятся осреднёнными по поперечной координате.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для всех исследованных жидкостей, как для случая естественной волновой эволюции, так и при возбуждении двумерных волн модуляцией расхода жидкости с частотой F, в зависимости от числа Рейнольдса наблюдается три характерных режима течения. Первый – при малых $Re < Re_1$, когда на всей поверхности пластины переход от двумерного к трёхмерному волновому движению не происходит. Величина Re_1 для разных жидкостей различна и лежит в диапазоне значений от 5 до 15. Точное определение величины Re_1 затруднено в первую очередь из-за малости амплитуд волн в этих режимах. При этом статистические характеристики эволюционируют на всем протяжении течения. Стоит отметить, что плотность вероятности распределения толщины плёнки имеет почти симметричную относительно максимального значения форму.

При превышении некоторого порогового $Re > Re_1$ наблюдается переход от двумерного к трёхмерному волновому движению с формированием струй, хорошо видимых на осреднённых по времени полях толщин. При этом бегущие трёхмерные волны следуют друг за другом по максимумам струй, выстраиваясь в цепочки. При возбуждении двумерных волн струйный характер течения усиливается: амплитуда струй на осреднённых по времени полях толщин увеличивается, а их положение становится более регулярным. Для таких режимов наблюдается непрерывное изменение статистических характеристик на всей длине рабочей области. Наиболее резкие изменения

происходят в начальной части течения на расстояниях до 50 – 60 см. от распределителя с существенным отличием между собой режимов с естественной и вынужденной волновой эволюцией. Так, например, дисперсия (рис. 1, линии 1 и 2) возрастает на начальном участке течения, где происходит развитие двумерных волн, далее после начала распада двумерных волн на трёхмерные наблюдается её монотонное затухание. Ниже по потоку различия между режимами уменьшаются, но остаются заметными вплоть до окончания рабочей области. Затухающий характер трёхмерного волнового движения также хорошо заметен и в спектральной области (рис. 3 (а)). Причем для случаев эволюции регулярных двумерных волн скорость убывания Y(f) выше, чем для естественной волновой эволюции на всех частотах. Плотность вероятности распределения толщины плёнки принимает характерную несимметричную форму с более пологим правым склоном в верхней части течения (рис. 2 (а)), а ниже по течению стремится к симметричной относительно модального значения форме. Таким образом, все статистические характеристики свидетельствуют о затухающем характере трёхмерного волнового движения вдоль течения для ярко выраженных струйных режимов (рис. 1, линии 1, 2, рис. 2(а) и рис. 3(а)), которые наблюдаются вплоть до значений $Re < Re_2$.

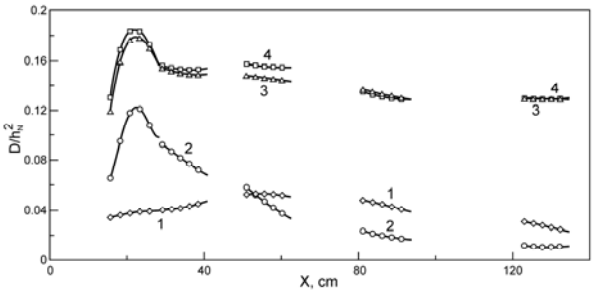

Рис. 1 Дисперсия толщины пленки D обезразмеренная на толщину невозмущённой плёнки (h_N).ВГР2. 1 – Re = 19, без возбуждения; 2 – Re = 19, при возбуждении двумерных волн с частотой F = 7 Hz; 3 – Re = 54, F = 7 Hz; 4 – Re = 54, без возбуждения.

Таким образом, установление развитого трёхмерного движения в диапазоне $Re_1 < Re < Re_2$ не происходит. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса и превышении некоторого значения $Re > Re_2$ хаотизация течения визуально наступает в верхней части течения. Величина Re_2 также различна для разных жидкостей и находится в диапазоне значений $50 < Re_2 < 60$ для всех исследованных жидкостей. Наложение внешних возмущений на расход приводит к незначительному влиянию на расстояниях от распределителя в несколько длин волн, при этом струи на осреднённых полях могут наблюдаться вплоть до средней части пластины (60 – 70 см. от распределителя), но в нижней части течения отсутствуют.

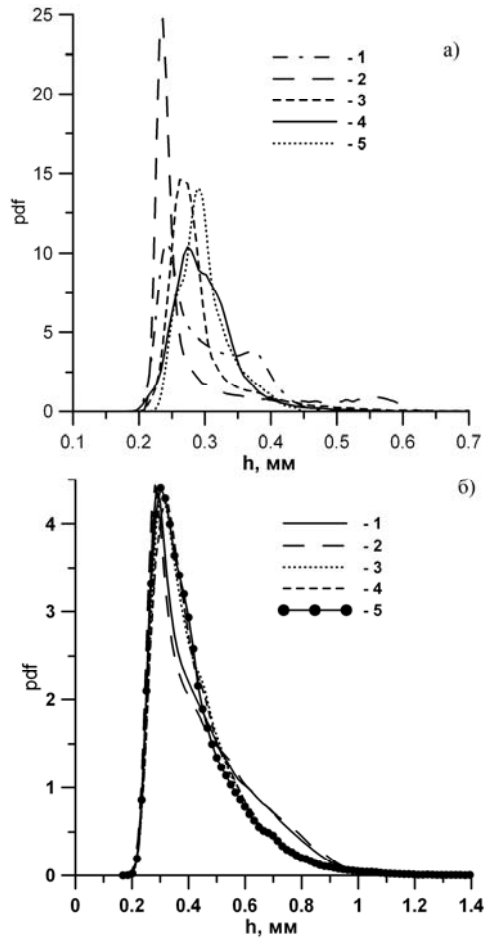

Рис. 2 Функция распределения плотности вероятности толщины плёнки жидкости (pdf) ВГР2. а) Re=19, линии 1 – X=26см, 2 – X=26см, f=8Гц, 3 – X=92см, 4 – X=133см, 5 – X=133см, f=8Гц. б) Re=54, линии 1 – X=26см, 2 – X=26см, f=8Гц, 3 – X=92см, 4 – X=133см, f=8Гц, 5 – X=133см.

Для этих случаев характерна быстрая эволюция статистических характеристик на расстояниях до 40 см. от распределителя с последующим выходом на неизменные значения (рис. 1, линии 3, 4, рис. 2(б)). А небольшое влияние наложенных на расход возмущений постепенно ослабляется вниз по потоку и становится незаметным в нижней части течения. При этом плотность вероятности распределения толщины плёнки (рис. 2(б)) имеет характерную асимметричную форму с пологим правым склоном во всей области течения. Быстрое установление трёхмерных режимов течения для $Re > Re_2$ хорошо видно и в спектральной области (рис. 3 (б)). Причем для установившихся режимов течения в области высоких

частот характерно затухание спектральной плотности энергии по закону $Y \sim f^{\alpha}$, с показателем степени $\alpha = -2{,}8$, который близок к значениям полученным в работе [6] и, как оказалось, не зависит от свойств жидкости.

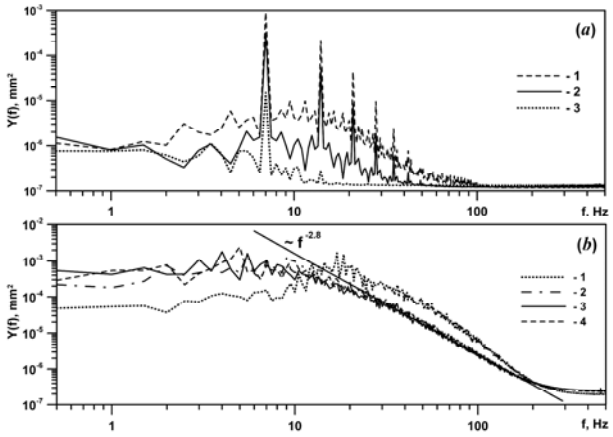

Рис. 3. Спектральная плотность энергии Y(f) на различных расстояниях X от пленкоформирователя. a) Re = 13.5, при возбуждении двумерных волн с частотой F = 7 Hz. 1 – X = 21 cm, 2 – X = 56 cm, 3 – X = 128 cm. b) Re = 54, без возбуждения, 1 – X = 21 cm, 2 –X = 87 cm, 3 – X = 128 cm; линия 4 - F = 7 Hz, X = 128 cm.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ статистических характеристик позволил детализировать режимы течения плёнки жидкости по вертикальной пластине в диапазоне $5 < Re < 100$. Показано, что при выраженном струйном режиме течения реализуется затухающий трёхмерный волновой режим с заметным отличием случаев вынужденной и естественной волновой эволюции. Тогда как для больших Re характерна быстрая эволюция всех параметров течения и установление трёхмерного режима течения с неизменными статистическими характеристиками и отсутствием влияния начальных возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Demekhin E.A., Kalaidin E.N., Kalliadasis S., Vlaskin S.Yu. Three-dimensional localized coherent structures of surface turbulence. I. Scenarios of two-dimensional-three-dimensional transition // Phys. Fluids. – 2007. – Vol. 19. – P. 114103, 15 p.
2. Demekhin E.A., Kalaidin E.N., Kalliadasis S., Vlaskin S.Yu. Tree-dimensional localized coherent structures of surface turbulence. II. Λ solitons // Phys. Fluids. – 2007. – Vol. 19. – P. 114104, 15 p.
3. 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).

   Alekseenko S.V., Guzanov V.V., Markovich D.M., Kharlamov S.M. // Pisma v ZhTF. 2012. T. 38. B. 16. S. 16. (Alekseenko S.V., Guzanov V.V., Markovich D.M., Kharlamov S.M. // Technical Physics Letters. 2012. V. 38. N 8. P. 739).
4. Алексеенко С.В., Бобылев А. В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 22. С. 97. (Alekseenko S.V., Bobylev A.V.,Guzanov V.V., Markovich D.M., Kharlamov S.M. // Technical Physics Letters, 2014, Vol. 40, No. 22, P. 97).

   Alekseenko S.V., Bobylev A. V., Guzanov V.V., Markovich D.M., Kharlamov S.M. // Pisma v ZhTF. 2014. T. 40. B. 22. S. 97. (Alekseenko S.V., Bobylev A.V.,Guzanov V.V., Markovich D.M., Kharlamov S.M. // Technical Physics Letters, 2014, Vol. 40, No. 22, P. 97).
5. Park C. D., Nosoko T. Three-dimensional wave dynamics on a falling film and associated mass transfer // AIChE J. – 2003. – V. 49. № 11. P. 2715
6. Chu K. J., Dukler A. E. Statistical characteristics of thin, wavy films III. Structure of the large waves and their resistance to gas flow //AIChE Journal. – 1975. – T. 21. – №. 3. – C. 583-593.

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