УДК 532.59:532.62

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУЙ ПРИ ВОЛНОВОМ ТЕЧЕНИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПЛЕНОК 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 экспериментального исследования процессов перехода от двумерного к трехмерному волновому движению при изотермическом течении вертикально стекающей пленки жидкости. Получены мгновенные и осредненные по времени поля толщин пленки жидкости для различных режимных параметров. Так же показано, что процесс перехода к трехмерному волновому движению сопровождается формированием струй.

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. Образование трехмерных волн происходит, как правило, за счет поперечной неустойчивости двумерных нелинейных волн, которые в свою очередь, образуются двумя основными способами. Один из них – это эволюция регулярных двухмерных волн, возбуждаемых периодическими возмущениями. Второй – естественная волновая эволюция, при которой двумерные волны возникают за счет широкополосного фонового шума. На данный момент более детально изучена начальная стадия перехода к трехмерным волновым режимам при эволюции регулярных двумерных волн. Эксперименты в такой постановке проводились в [1] с помощью теневой методики, которая не позволяла определять амплитудные характеристики и форму волн. Поперечные и продольные размеры формирующихся трехмерных волн, полученные в процессе моделирования [2, 3, 4] близки к данным, полученным экспериментально. Однако пространственная форма волн, полученная при моделировании, у разных авторов существенно отличается. Структура формирующихся волн, полученная экспериментально в работе [5], наиболее близка к рассчитанной в [4]. Кроме того, в [5] при экспериментах на пластине небольших размеров было показано, что в случае эволюции регулярных двумерных волн при переходе к трехмерному волновому режиму происходит существенное перераспределение жидкости в горизонтальном направлении. При этом на осредненных по времени полях толщин наблюдается формирование струй, что является неожиданным результатом для изотермических течений. Целью данной работы являлось изучение трехмерных волновых режимов на пластине больших размеров, при этом основное внимание уделялось процессам развития струйного течения на больших расстояниях от начального участка.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый гидродинамический контур. Пленка жидкости формировалась на вертикальной прозрачной стеклянной пластине длинной 140 см и шириной 50 см при помощи щелевого распределителя с регулируемой шириной зазора. Плёнка свободно стекала под действием силы тяжести. Параллельно боковым краям пластины для ограничения пленочного течения были проложены смачиваемые нити. Эксперименты проводились с использованием жидкостей с различными физическими свойствами (вода, водоглицериновые растворы) в диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения $10<Re<100$. Число Рейнольдса определяется как $Re = q/\nu$, где q – удельный расход

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

жидкости, а ν – кинематическая вязкость. В данной работе исследовались процессы перехода к трехмерным волновым режимам, как для случая эволюции искусственных двумерных регулярных волн, так и для случая естественной волновой эволюции. Регулярные двумерные волны формировались с помощью модуляции расхода жидкости. Равномерность орошения пластины контролировалась по форме фронта генерируемых двумерных волн в верхней части течения. В случае равномерности орошения, фронты волн были прямолинейны и перпендикулярны направлению движения. В области берегов фронты двумерных волн тормозились и искажались вследствие влияния берегов. Однако глубина прорастания возмущений от берегов в нижней части пластины не превышала 7-8 см, что позволяло считать течение в центральной области пластины не затронутым влиянием берегов. Теневая съемка использовалась для регистрации общей картины течения по всей поверхности. В экспериментах пластина освещалась со стороны пленки, а теневое изображение формировалось на белом матовом экране, расположенном за пластиной. Причем расстояние между пластиной и экраном могло меняться, и в зависимости от расположения экрана были хорошо различимы разные волновые структуры. Когда расстояние между экраном и плекнкой жидкости минимально, на изображении отчетливо видна структура капиллярного предвестника перед крупными волнами. Теневые изображения схожи с полученными в [1]. При увеличении расстояния между экраном и стеклянной пластиной становятся лучше различимы элементы волн с меньшей кривизной поверхности. На Рис 1 показано теневое изображение, полученное, когда экран располагался на расстоянии 7 см. Структура капиллярного предвестника не наблюдается, но при этом можно отчетливо наблюдать главные гребни волн и следы в виде вертикальных дорожек с повышенной толщиной слоя жидкости. Эти следы оставляют за собой развивающиеся трехмерные волны. Для измерения полей локальных толщин пленки использовался метод лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) [5]. Основной принцип данного метода основан на взаимосвязи между толщиной пленки с интенсивностью свечения растворенного в рабочей жидкости флуорофора (Родамин 6Ж). Съемка производилась высокоскоростной камерой с частотой 1 кГц. Длительность съемки составляла 2 с, а время экспозиции одного кадра 0.99 мс. В качестве источника освещения применялся непрерывный лазер (532 нм). Размер площадок, на которых проводились измерения, составлял от 13x13 см^2 до 19x19 см^2, а разрешение, соответственно, от 0.13 до 0.19 мм на пиксель. Средние по времени поля толщин для каждого режима течения были получены с помощью осреднения мгновенных распределений толщины плёнки в каждой точке по всей длине записи.

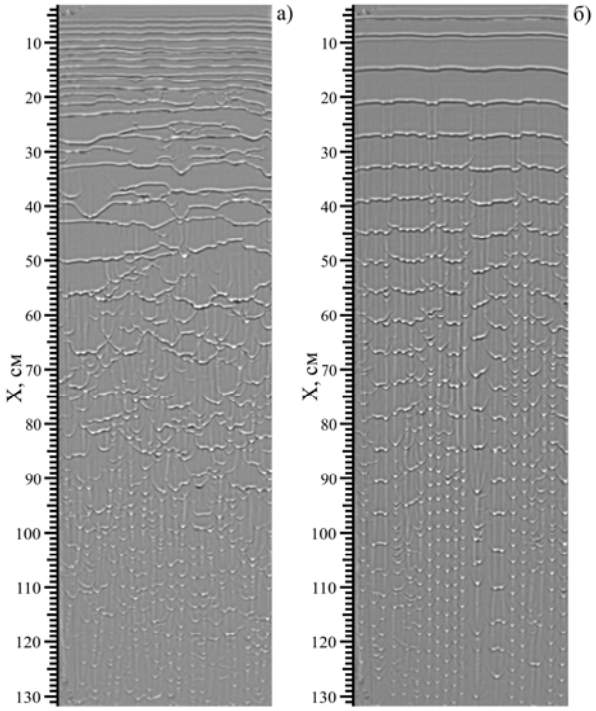

Рис. 1 Теневые фотографии течения. Вода Re = 14: а) естественная волновая эволюция; б) эволюция регулярных двумерных волн, частота возбуждения F=6Hz

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Переход от двумерного к трехмерному волновому режиму течения происходил, когда число Рейнольдса превышало некоторое пороговое значение Re_1. При малых расходах жидкости и значениях $Re < Re_1$ характерные продольные размеры волн были намного меньше их поперечных размеров на всём протяжении течения. Кроме того, при таких числах Рейнольдса жидкость распределяется равномерно по всей поверхности пластины и на осредненных по времени полях толщин не наблюдается формирование струй по всей её длине. Вследствие малости амплитуды волн при таких режимах течения затруднительно определить точное значение Re_1. Однако для всех используемых в работе жидкостях Re_1 не превышало 15.

При превышении значения Re_1 наблюдается переход от двумерного к трёхмерному волновому движению: двумерные волны распадаются на многочисленные трехмерные волны с характерными продольными и поперечными размерами 1 – 2 см. При этом на осредненных по времени полях толщин отмечается формирование струй в области развития трехмер-

ных волн. При достаточно больших числах Рейнольдса превышающих некоторое значение Re_2, развитие струй носит немонотонный характер: нарастание амплитуды струй происходит вплоть до расстояния x = 40 – 50 см, дальше струи начинают затухать и могут практически исчезать в нижней части течения. Для этих режимов характерно быстрое установление хаотического трёхмерного режима течения, при этом различия в эволюции естественных и возбужденных волн заметны только на начальном участке течения.

Наиболее выраженный струйный характер течения наблюдается, когда число Рейнольдса принимает значение в интервале $Re_1<Re<Re_2$, где $40<Re_2<60$. Причём практически на всем протяжении течения характер эволюции естественных волн существенно отличается от эволюции возбужденных двумерных волн. Характерную общую картину волновой эволюции для таких режимов можно наблюдать на рис. 1. При эволюции регулярных двумерных волн сценарий перехода к трехмерному режиму течения схож с описанным в [5]. При формировании трехмерных волн с характерным размером 1 см, за волной образуется след в виде дорожки с повышенной толщиной пленки. Светлые вертикальные полоски на теневой фотографии (рис. 1) соответствуют таким дорожкам. Обнаружено, что область начала развития струй совпадает с участком течения, где начинают развиваться трехмерные волны. Для случая естественной волновой эволюции формирование элементов волновых структур со схожими характерными размерами, так же как и область формирования струй, начинается существенно ниже по течению. Однако стоит отметить, что характерные размеры и форма трехмерных волн на больших расстояниях от распределителя совпадают для обоих случаев эволюции, несмотря на существенные отличия в верхней части течения. Кроме того, в случае естественной эволюции в нижней части течения так же образуются цепочки из трехмерных волн. Хотя они и не такие регулярные как в случае с эволюцией возбужденных волн. Таким образом, на больших расстояниях от распределителя можно наблюдать струи для обоих случаев волновой эволюции (рис. 2). Причем характерный поперечный размер струй слабо зависит от числа Рейнольдса и лежит в интервале 1.1-1.4 см. В случае образования струй при эволюции регулярных двумерных волн происходит практически полное подавление трехмерного волнового движения в межструйных областях.

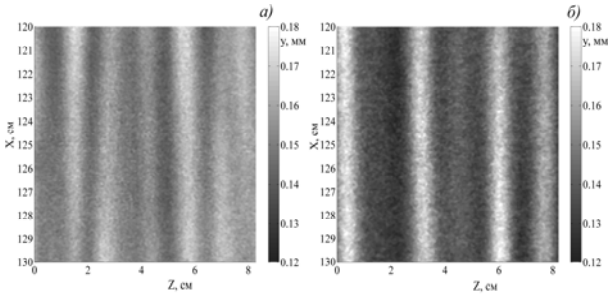

Рис. 2 Осредненные поля толщин. Вода Re = 14: а) естественная волновая эволюция; б) эволюция регулярных двумерных волн, частота возбуждения F=6Hz

Однако при естественной волновой эволюции наблюдается перемежаемость, подавление волнового движения в межструйных областях чередуется с прохождением цугов волн. Для того чтобы исключить влияние неизотермичности, с которой часто связывают образование струй при пленочном течении жидкости, с помощью скоростного ИК-сканера Titanium ATR-570M с чувствительностью 25 мК было проведено прямое измерение поля температур на поверхности пленки. Погрешность измерений с учетом шумов матрицы составляла не более 0.05 К. Измерения показали, что в пределах указанной погрешности течение жидкости можно считать изотермическим. Следовательно, формирование струй при переходе к трехмерному волновому режиму должно объясняться в рамках гидродинамики изотермического пленочного течения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование изотермического пленочного течения жидкости на пластине большой длины позволило обнаружить и описать процесс формирования струй при переходе от двумерного к трехмерному волновому режиму течения. Оказалось, что в зависимости от параметров течения, струи могут иметь немонотонный характер развития. Анализ полученных данных показал, что в диапазоне Re1<Re<Re2, как для случая эволюции возбужденных двумерных волн, так и для случая естественной волновой эволюции характерные размеры и формы трехмерных волн одинаковы на больших расстояниях от распределителя, несмотря на существенные различия волновой эволюции в верхней части течения. Как следствие, на больших расстояниях от распределителя струи наблюдаются при любом из сценариев эволюции. В ходе исследования было обнаружено, что характерные размеры сформировавшихся струй слабо зависят от числа Re. Прямые измерения полей температур показали, что в пределах погрешности течение можно считать изотермическим. Таким образом, формирование струй при переходе от двумерного к трехмерному волновому режиму должно описываться в рамках гидродинамики изотермического пленочного течения

ЛИТЕРАТУРА

1. Park C. D., Nosoko T. Three - dimensional wave dynamics on a falling film and associated mass transfer //AIChE Journal. – 2003. – Т. 49. – №. 11. – С. 2715-2727.
2. Kalliadasis S. et al. Falling liquid films. – Springer Science & Business Media, 2011. – Т. 176.
3. Scheid B., Ruyer-Quil C., Manneville P. Wave patterns in film flows: modelling and three-dimensional waves //Journal of Fluid Mechanics. – 2006. – Т. 562. – С. 183-222.
4. Dietze G., Kneer R. Flow separation in falling liquid films //Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT). – 2011. – Т. 2. – №. 3.
5. Алексеенко С. В. и др. Особенности перехода от регулярного двумерного к трехмерному волновому движению на вертикально стекающих пленках жидкости //Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – №. 16.

   Alekseenko S.V. et al. (2012). “Features of the transition from the regular two-dimensional to three-dimensional wave motion on the vertical falling liquid films”, Technical Physics Letters, Vol. 38, no 8, p. 739