

В. В. Гузанов, С. М. ХарламовИнститут теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, РоссияНовосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: guzanov@gorodok.net**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ
ТРЕХМЕРНЫХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ
ВЕРТИКАЛЬНО СТЕКАЮЩИХ ПЛЕНОК ЖИДКОСТИ***

Методом лазерно-индуцированной флуоресценции экспериментально обнаружены стационарные подковообразные волны на поверхности вертикально стекающих пленок водоспиртового и водоглицеринового растворов для $Re = 2-10$. Несмотря на отличие формы зарегистрированных волн от теоретической их скорость и амплитуда близки к теоретическим значениям в области малых $Re < 5$, однако для умеренных Re отклонение от теоретических значений существенное.

Ключевые слова: солитон, пленка, жидкости.

Введение

На конечной стадии эволюции пленочного течения при малых и умеренных числах Рейнольдса $5 \leq Re \leq 100$ поверхность пленки покрыта многочисленными нелинейными трехмерными волнами хаотически взаимодействующими друг с другом. Здесь $Re = q/v$, где q – объемный расход жидкости на единицу ширины пленки, v – кинематическая вязкость жидкости. Исследования подобных режимов в настоящее время в литературе не представлены.

Теоретическое решение, описывающее уединенную стационарную подковообразную волну, похожую на наблюдаемые в эксперименте [1], впервые получено в работе [2] из рассмотрения уравнения Курамото – Сивашинского (КС), которое применимо для $Re \sim 1$. Из рассмотрения обобщенного уравнения Курамото – Сивашинского (оКС), которое содержит дополнительный член, учитывающий дисперсионные эффекты, и является продолжением КС на большие Re , предварительные данные по трехмерным волнам представлены в работе [3]. Согласно представленным результатам, для вертикально стекающих пленок жидкости существует несколько решений: одно в виде одиночной стационарной

подковообразной волны, другие в виде многогорбой стационарной волны.

Экспериментальное изучение уединенных трехмерных волн затруднено из-за хаотического взаимодействия волн между собой. Другой трудностью является медленная эволюция естественных волн в трехмерные, из-за чего длина рабочего участка должна составлять по крайней мере несколько метров. Эту длину можно существенно уменьшить, разрушая внешними воздействиями возбужденные регулярные двумерные волны. Такая методика применялась, например, в работе [4], в которой изучались некоторые характеристики регулярных взаимодействующих подковообразных волн для $Re = 10-100$. Однако взаимодействие волн существенно влияет на их характеристики, что затрудняет интерпретацию результатов, представленных в упомянутой выше работе. Альтернативный способ, позволяющий изучать характеристики детерминированных трехмерных волн на компактной экспериментальной установке, состоит в возбуждении этих волн точечным источником в верхней части безволновой пленки жидкости, где уровень естественных возмущений мал и пленку можно считать гладкой. Такой участок наблюдается для всех Re в верхней части пленочного течения.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 06-01-00762-а).

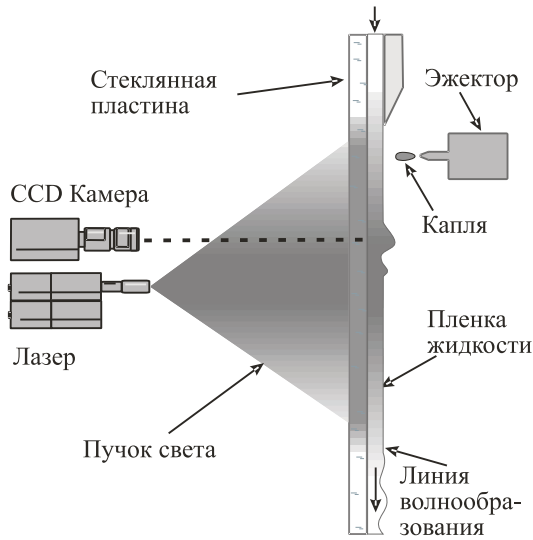


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

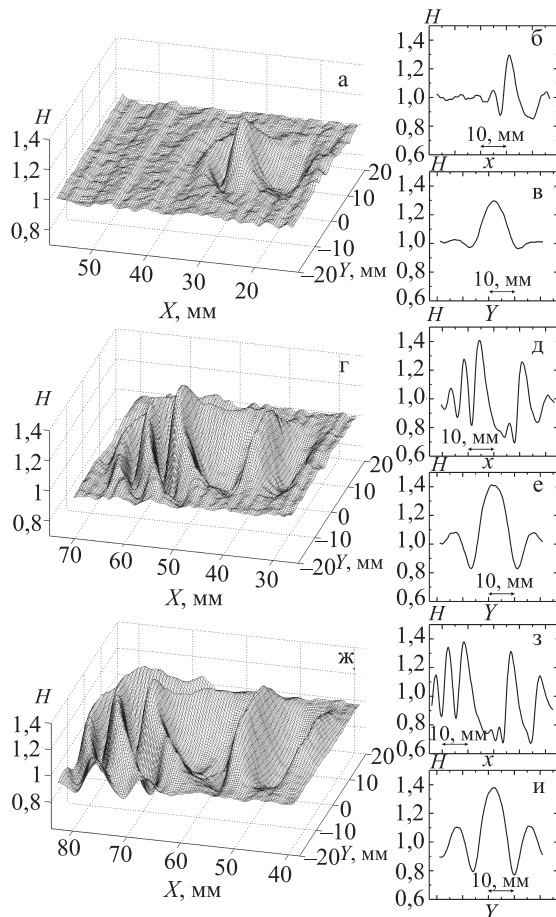


Рис. 2. Пример образования волнового фронта (волна движется справа налево) для $Re = 10$ (водоглицериновый раствор): а – форма волны в верхней части рабочего участка; б – сечение волны (а) в продольном направлении, проходящее через максимум волны; в – поперечный разрез волны (а), проходящий через максимум волны; г – форма волны ниже по потоку; д, е – сечения волны (г), проведенные аналогично (б) и (в); ж – форма волны в виде пуга волн; з, и – соответствующие сечения волны (ж)

Этот подход использовался в работе [5] для исследования эволюции возмущения на вертикально стекающей пленке жидкости для умеренных Re .

Описание экспериментальной установки и методики измерений

Эксперименты проводились на вертикально закрепленной стеклянной пластине размером 20 см в поперечном направлении и 30 см в продольном. Пленка жидкости формировалась при помощи щелевого распределителя с толщиной зазора $\sim 0,2$ мм (рис. 1).

Для регистрации локальной толщины пленки жидкости использовался метод лазерно-индуцированной флуоресценции (МЛИФ) [6]. В целом этот метод схож с методом флуоресцентной визуализации (МФВ) [7] и заключается в том, что локальная толщина жидкости пропорциональна интенсивности свечения флуорофора, растворенного в малом количестве в рабочей жидкости, в каждой точке. В экспериментах использовалась стандартная PIV (Partical Image Velocimeter) аппаратура с некоторыми модификациями для создания лазерного пучка без спеклов.

Для возбуждения флуоресценции использовался двойной импульсный Nd:YAG лазер с длиной волны 532 нм, освещающий площадку размером 10×10 см, что обеспечивает пространственное разрешение 0,1 мм. Для регистрации излученного флуорофором света использовалась CCD камера, работающая в режиме двойного кадра, с фильтром нижних частот (> 550 нм), который пропускает излученный флуорофором свет и отсекает излучение лазера. Данная аппаратура позволяет измерять не только пространственное распределение толщины, но и мгновенную скорость быстро эволюционирующих волн. Камера и лазер располагаются с сухой стороны пластины. Это позволяет минимизировать оптические искажения связанные с криволинейной границей жидкость – воздух.

В качестве рабочих жидкостей использовались водоспиртовой раствор со следующими свойствами: плотность $\rho = 931$ кг/м³, кинематическая вязкость $\nu = 2,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с, поверхностное натяжение $\sigma = 0,03$ кг/с², и водоглицериновый раствор с $\rho = 1070$ кг/м³, $\nu = 2,15 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\sigma = 0,065$ кг/с². В качестве флуорофора использовался Родамин 6Ж, не являющийся сурфактантом, концентрация

которого в рабочей жидкости составляла ~ 0,01 %. Трехмерные волны возбуждались в верхней части безволновой пленки жидкости коротким ударом (10–15 мс) тонкой струйки рабочей жидкости, формируемой соплами с диаметром выходных отверстий от 0,15 до 0,25 мм. В ходе экспериментов энергия возбуждения (масса и скорость капли) варьировались в широком диапазоне значений.

В случае, когда в качестве источника возбуждающего излучения используется лазер, пленка жидкости освещается слабо расходящимся пучком монохроматического света, это позволяет упростить процесс калибровки и учета оптических искажений, связанных с криволинейной свободной границей жидкость – воздух.

Калибровка проводилась в условиях эксперимента по плоскому слою рабочей жидкости известной толщины, который формировался на пластине при помощи специальной плоской пластинки из оптического стекла. Предварительные исследования показали, что в этом случае яркость изображения $J(x, y)$ и толщина пленки жидкости $h(x, y)$ связаны следующим соотношением:

$$J(x, y) = C(x, y) \times [1 - \exp(-\alpha \cdot h(x, y))] \times [1 + K(x, y) \cdot \exp(-\alpha \cdot h(x, y))] + D(x, y).$$

Здесь α – коэффициент поглощения возбуждающего излучения в рабочей жидкости; $K(x, y)$ – коэффициент отражения от свободной границы; $D(x, y)$ – темновой уровень камеры; $C(x, y)$ – передаточная функция. Коэффициент поглощения – характеристика рабочей жидкости и определяется независимо от экспериментальных условий. Таким образом, при известном коэффициенте поглощения, передаточная функция, необходимая для восстановления толщины жидкости, определяется по плоскому слою заданной толщины. В наших экспериментах калибровка проводилась по двум плоским слоям с существенно разной толщиной (0,3 и 0,5 мм). Один из них использовался для определения передаточной функции, другой – для проверки калибровки.

Основные погрешности в экспериментах связаны с шумом камеры и пространственным перераспределением интенсивности лазерного излучения от вспышки к вспышке, что в условиях эксперимента приводит к ошибке в локальной толщине жидкости 3–5 мкм при толщинах жидкости 200–400 мкм. Дополнительные погрешности связаны с температур-

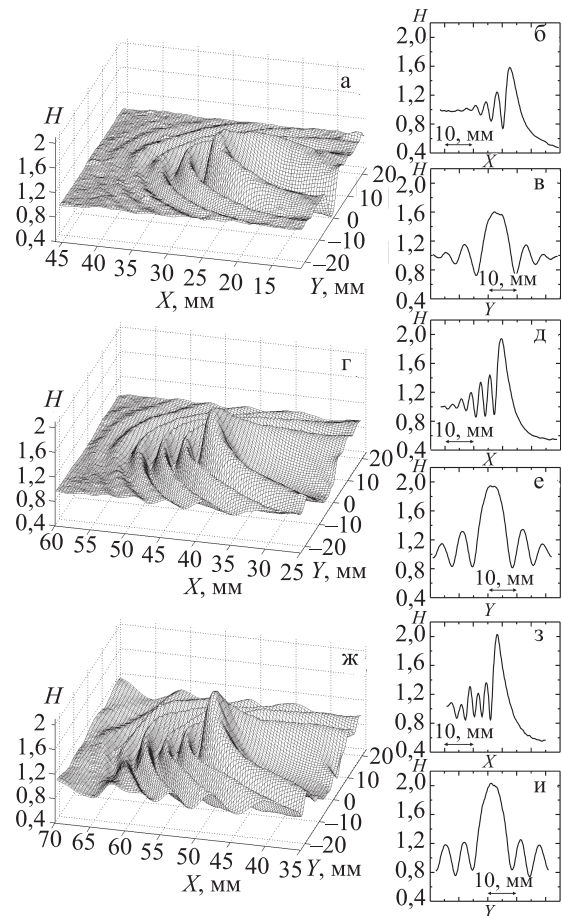


Рис. 3. Пример эволюции (обозначения аналогичные рис. 2) $Re = 25$ (водоспиртовый раствор)

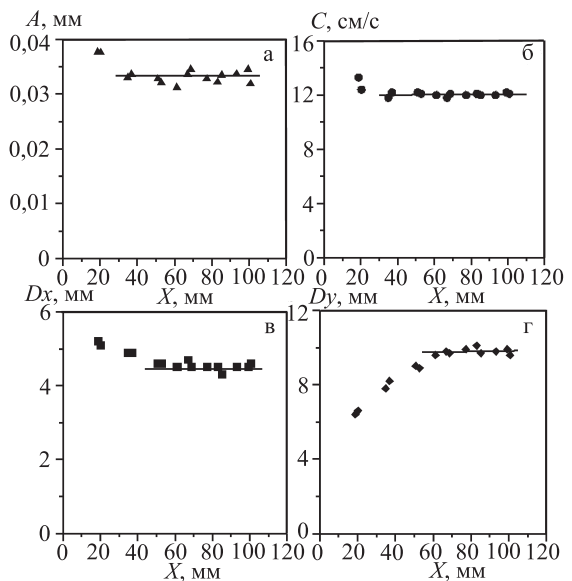


Рис. 4. Пример поведения параметров волны, вышедшей на стационарный режим $Re = 2,5$ (водоспиртовый раствор): а – амплитуда волны; б – скорость, в – полуширина в продольном направлении; г – полуширина в поперечном направлении

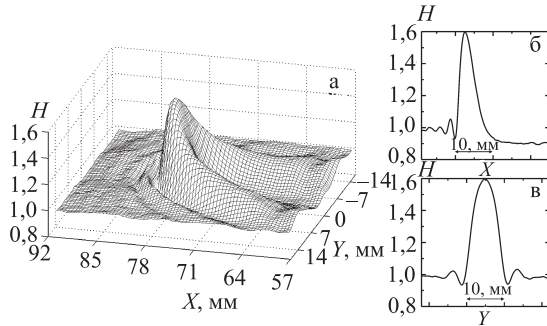


Рис. 5. Форма стационарной волны $Re = 3,9$ (водоспиртовой раствор): *a* – форма волны (волна движется справа налево); *b* – продольное сечение, проходящее через максимум волны; *v* – поперечное сечение волны, проходящее через максимум волны

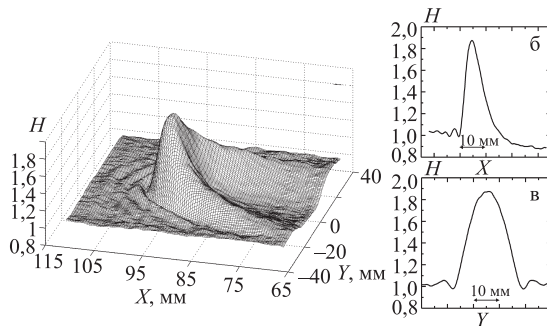


Рис. 6. Форма стационарной волны $Re = 10$ (водоглицериновый раствор), обозначения аналогичны рис. 5

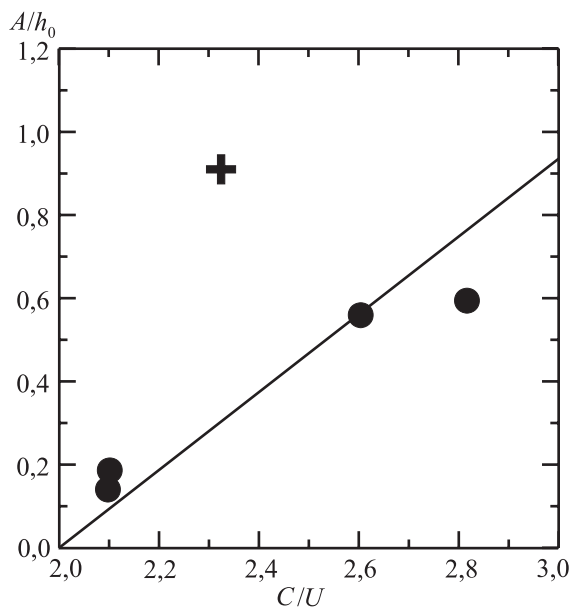


Рис. 7. Сравнение амплитуды и скорости зарегистрированных стационарных волн с теоретическими значениями. Точки – водоспиртовой раствор ($Re = 2,2, 2,5, 3,9, 4,7$), крест – водоглицериновый раствор ($Re = 10$)

ным дрейфом камеры во время продолжительных экспериментов ($< 1\%$) и с оптическими искажениями, связанными с перераспределением возбуждающего лазерного излучения при отражении от криволинейной свободной границы жидкость – воздух. Использование слабо расходящегося возбуждающего лазерного излучения позволяет считать, в рамках геометрической оптики, оптические искажения, связанные с перераспределением возбуждающего и флуоресцентного излучения под криволинейной границей. При вычислениях учитывалась зависимость коэффициента отражения от угла наклона свободной поверхности, а также пространственное перераспределение (фокусировки, расфокусировки) света в жидкости под криволинейной границей. Зарегистрированная форма волны бралась за истинную, и проводился расчет искажений. Исследование различных форм волн, зарегистрированных в эксперименте, показало, что основные искажения всегда связаны с фокусировками под большими волнами на поверхности пленки, и для всех зарегистрированных волн искажения существенно меньше 1% .

Результаты

Так же, как для случая малых $2,5 < Re < 5$, для умеренных Re в случае относительно малых энергий возбуждения амплитуда начального возмущения быстро возрастает и образуется в волновой цуг, как показано на рис. 2 (здесь и далее H – толщина пленки жидкости, обезразмеренная на толщину невозмущенной пленки жидкости). Тогда как в случае более высоких энергий возбуждения начальное возмущение трансформируется в уединенную подковообразную волну, зачастую не стационарную, с ярко выраженным максимумом и капиллярным предвестником значительно меньшей амплитуды, пример такого сценария развития начального возмущения представлен на рис. 3. Наличие таких двух сценариев эволюции начального возмущения позволяет нам предполагать, что стационарные подковообразные волны могут быть возбуждены начальным возмущением только с энергией, большей некоторого порогового значения.

При проведении экспериментов особое внимание уделялось поиску стационарных подковообразных волн. Предполагалось, что существуют такие условия возбуждения,

при которых начальное возмущение может трансформироваться в стационарную подковообразную волну очень быстро (в пределах рабочего участка). Поэтому энергия возбуждения изменялась в широком диапазоне значений. В качестве параметров, характеризующих подковообразную волну, были выбраны следующие: амплитуда, скорость, полуширина на полувысоте (половина амплитуды волны) вдоль движения волны, полуширина подковы на полувысоте в поперечном направлении. Для каждого Re и каждой энергии возбуждения изучалось поведение этих параметров вдоль по потоку. Волна считалась стационарной, если все 4 параметра оставались неизменными, в пределах погрешности, на расстоянии не менее 3 характерных продольных масштабов в нижней части безволновой плёнки жидкости. Пример поведения этих параметров вдоль потока для стационарной волны показан на рис. 4.

Стоит отметить, что в настоящее время нет полного понимания области притяжения начального возмущения, форма которого существенно отличается от формы стационарной волны, к стационарному состоянию в виде подковообразной волны. Наиболее часто в экспериментах наблюдается рост амплитуды и скорости подковообразной волны вдоль по потоку, хотя иногда и очень медленный. Однако в некоторых экспериментах наблюдалась следующая картина развития волны: 3 параметра, например амплитуда, скорость и продольная полуширина, быстро достигали стационарного состояния, тогда как четвертый параметр, в данном случае полуширина подковы, изменялся очень быстро. Для указанного примера экспериментально были зарегистрированы как рост, так и уменьшение полуширины подковы. Таким образом, только при некоторых условиях эксперимента были зарегистрированы стационарные подковообразные волны, преимущественно для малых Re . Форма и сечения (продольное и поперечное) зарегистрированных в эксперименте стационарных подковообразных волн для малых и умеренных Re приведены на рис. 5 и 6.

Несмотря на отличие формы зарегистрированных в экспериментах стационарных волн от теоретически предсказанной в [2],

их амплитуда и скорость для $Re < 5$ близки к теоретическим значениям (сплошная линия на рис. 7), полученным также в [2]. A – амплитуда волны, h_0 – толщина невозмущенной пленки жидкости, C – скорость волны, а $U = gh_0^2 / (2\nu)$ – скорость поверхности невозмущенной пленки жидкости.

Однако для $Re = 10$ отличие от теоретических значений существенное, по всей видимости, это связано с областью применимости теории, в которой делается предположение о малости амплитуды волн по сравнению с толщиной пленки жидкости, тогда как для указанного Re амплитуда волны приближается к толщине невозмущенной пленки жидкости.

Список литературы

1. Алексеев С. В., Накоряков В. Е., Покусев Б. Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: ВО «Наука». Сиб. изд. фирма, 1992. 256 с.
2. Петвиашвили В. И., Цвелодуб О. Ю. Подковообразные солитоны на стекающей вязкой пленке жидкости // Докл. Академии наук СССР. 1978. Т. 238, № 6. С. 1321–1323.
3. Chang H.-C., Demekhin E. A. Complex Wave Dynamics on Thin Films. Amsterdam: ELSEVIER, 2002. 399 p.
4. Park C. D., Nosoko T. Three-dimensional wave dynamics on a falling film and associated mass transfer // AIChE J. 2003. Vol. 49. No. 11. P. 2715–2727.
5. Alekseenko S. V., Antipin V. A., Kharlamov S. M. et al. An experimental study of the evolution of three-dimensional waves on a falling film // Second International Berlin Workshop – IBW2 on Transport Phenomena With Moving Boundaries. GmbH; Dusseldorf: VDI Verlag, 2003. P. 49–61.
6. Kharlamov S., Guzanov V., Crey D. On applicability of LIF method for field measurement of local thickness of liquid films // Book of abstracts of The International Topical Team Workshop Two-phase Systems for Ground and Space Applications. Brussels, 2006. P. 100–101.
7. Liu J., Paul J. D., Gollub J. P. Measurements of the primary instabilities of film flows // J. Fluid Mech. 1993. Vol. 250. P. 69–101.