

03

Характеристики уединенных трехмерных волн 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, Новосибирск
E-mail: kharlamov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 22 июня 2010 г.

Представлены результаты систематического исследования характеристик стационарных уединенных трехмерных волн на вертикально стекающих пленках с использованием жидкостей с различными физическими свойствами. Проведено сравнение экспериментально полученных характеристик стационарных волн с теоретически предсказанными. Определена область режимов пленочного течения, для которых наблюдается хорошее соответствие теории и эксперимента.

Трехмерные волновые режимы пленочного течения жидкости являются преобладающими при умеренных удельных расходах жидкости. При таких режимах поверхность пленки покрыта трехмерными волнами, взаимодействующими друг с другом случайным образом, что дает основание ряду авторов использовать при описании таких режимов термин „поверхностная турбулентность“ уже при относительно небольших $Re \sim 100$ числах Рейнольдса пленочного течения [1,2]. На основании существующих наблюдений в [3–5] высказывается предположение, что, несмотря на случайный характер взаимодействия, сами взаимодействующие трехмерные волны обладают вполне определенными характеристиками и представляют собой устойчивые ло-

кализированные структуры, характеристики и динамика взаимодействия которых являются определяющими для описания трехмерных волновых режимов пленочного течения. В соответствии с таким предположением в [2,6] обсуждается возможность моделирования трехмерных волновых режимов через описание взаимодействия уединенных трехмерных волн.

Эволюция уединенных трехмерных волн на вертикально стекающей пленке жидкости была экспериментально исследована в [7,8] для случая $Re < 5$. В этих экспериментах были обнаружены стационарные уединенные трехмерные волны, т.е. волны, характеристики которых остаются неизменными в процессе распространения. Существование стационарных волн упрощает сопоставление теории и эксперимента, поскольку в этом случае нет необходимости в точном соответствии начальных условий для теоретической и экспериментальной задач. Достаточно, чтобы эволюция начального трехмерного возмущения приводила к образованию стационарной волны. Именно такой сценарий развития локализованных трехмерных возмущений наблюдался в [7,8].

Теоретическое решение в виде стационарной уединенной трехмерной волны для случая пленки жидкости, стекающей по вертикальной пластине, при умеренных Re получено и исследовано на основе модельной системы уравнений Капицы–Шкадова в [5,9]. Несмотря на ряд ограничений этой модели, обсуждение которых можно найти, например, в [2], ее преимуществом является относительная простота. Трехмерные волновые режимы описываются с использованием только одного параметра — модифицированного числа Рейнольдса $\delta = Re^{11/9} / (3^{7/9} 5 \gamma^{1/3})$. Здесь $Re = q/\nu$ — число Рейнольдса пленочного течения, $\gamma = \sigma \rho^{-1} \nu^{-4/3} g^{-1/3}$ — число Капицы для вертикально стекающей пленки, q — удельный объемный расход жидкости, ν — кинематическая вязкость, ρ — плотность, σ — поверхностное натяжение, g — ускорение свободного падения.

В [10] показано хорошее количественное соответствие между рассчитанными на основе модели Капицы–Шкадова и экспериментально определенными в [8] характеристиками стационарной трехмерной волны для случая $\delta \approx 0.06$. В [11] эксперименты по определению характеристик уединенных трехмерных волн на вертикально стекающих пленках воды проводились с использованием в качестве начального возмущения капли воды с массой, равной массе жидкости в стационарной уединенной волне с характеристиками, рассчитанными по [5].

Показано хорошее соответствие между теоретическими и измеренными значениями амплитуды и скорости возбуждаемых таким возмущением уединенных волн вплоть до $Re \approx 18$, что соответствует в условиях эксперимента $\delta \approx 0.2$. В отличие от модели [5,9] более точная модель [12] сопоставлялась для случая вертикально стекающих пленок только с экспериментами [13] по исследованию регулярных трехмерных волновых режимов. Поскольку в [13] для регистрации волновой картины использовался теневой метод, не позволяющий получать информацию об амплитудных характеристиках волн, был сделан вывод о качественном соответствии теории и эксперимента.

В настоящее время вопрос об области применимости существующих теоретических моделей для описания трехмерных волновых режимов пленочного течения жидкости остается открытым в силу ограниченного количества экспериментальных данных, позволяющих проводить адекватное сопоставление с теорией. В данной работе представлены результаты систематического исследования характеристик стационарных уединенных трехмерных волн на вертикально стекающих пленках с использованием жидкостей с различными физическими свойствами.

Эксперименты проводились по методике, описанной в [7,8]. В качестве рабочего участка использовалась вертикально установленная пластина из оптического стекла. Стекающая по поверхности пластины пленка формировалась с помощью щелевого распределителя с регулируемой шириной зазора. Регистрация волновой картины осуществлялась с использованием полевого метода лазер-индуцированной флуоресценции (метод ЛИФ). Суть метода заключается в том, что мгновенное поле толщин пленки вдоль поверхности пластины определяется по интенсивности свечения флуоресцентного красителя, растворенного в рабочей жидкости. Для регистрации использовалась полевая система оптической диагностики течений „Полис“, работающая в режиме двойного кадра. Измерительный цикл системы состоит из съемки двух кадров флуоресцирующей жидкой пленки через заданный интервал времени на специализированную цифровую камеру, что позволяет определять как пространственную форму, так и скорость трехмерных волн. Флуоресценция возбуждается импульсным лазерным излучением с длительностью импульса $10 \mu\text{m}$, определяющей длительность экспозиции отдельного кадра.

Свойства рабочих жидкостей

Водоглицериновые растворы	$\nu \cdot 10^6, \text{m}^2/\text{s}$	$\rho, \text{kg}/\text{m}^3$	$\sigma, \text{kg}/\text{s}^2$	γ
WG1	7.1	1140	0.07	210
WG2	3.7	1110	0.071	520
WG3	2.1	1070	0.072	1170
Водно-спиртовой раствор				
WA	2.7	931	0.03	400

Частота повторения измерительных циклов при проведении экспериментов составляла 7 Hz. Для уменьшения уровня оптических искажений, связанных с криволинейностью свободной поверхности волновой пленки, освещение лазером и съемка на камеру осуществлялись через стекло с неоросаемой стороны пластины. Съемка производилась на матрицу размерами 1000×1000 пикселей с разрешением в разных сериях экспериментов от 0.1 до 0.15 mm на пиксель. В качестве флуоресцентного красителя использовался Родамин 6Ж в концентрациях, не влияющих на физические свойства рабочих жидкостей. Свойства использованных рабочих жидкостей приведены в таблице.

Уединенная трехмерная волна возбуждалась коротким, продолжительностью 10–20 ms, ударом струйки рабочей жидкости в верхней части пленочного течения. Струйка выбрасывалась инжектором с импульсным электродинамическим приводом через сменные конические сопла с внутренними диаметрами от 0.2 до 0.8 mm. Энергия возбуждения, зависящая от массы и скорости инжектируемой жидкости, варьировалась в широких пределах, что позволило исследовать различные сценарии эволюции уединенных трехмерных волн. Регистрация волновой картины осуществлялась в верхней части пленочного течения, в области, где амплитуда естественных волн мала и пленку можно считать гладкой.

Начальное возмущение развивается вниз по течению в виде подковообразной волны, характер эволюции которой зависит от энергии возбуждения. Для описания эволюции использовались четыре характеристики уединенной волны: амплитуда, скорость, характерные продольный и поперечный размеры. При некоторых энергиях возбуждения наблюдалось формирование стационарных волн, для которых все указанные

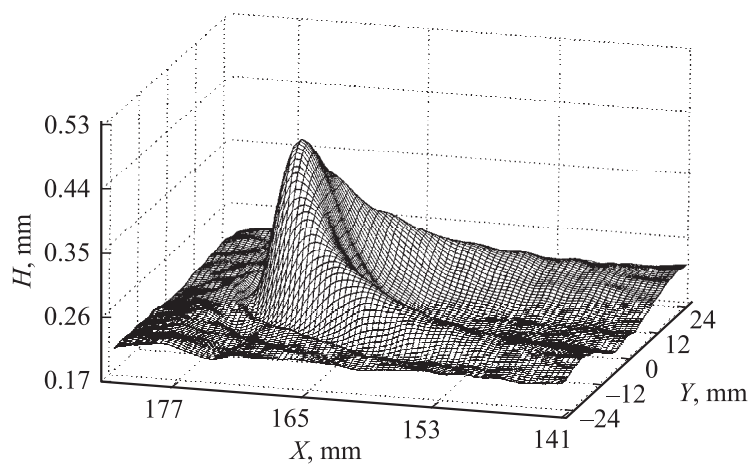


Рис. 1. Форма стационарной трехмерной волны. Рабочая жидкость WG3, $\delta = 0.1$, H — толщина пленки, X — расстояние вниз по течению от точки возбуждения.

характеристики достигали на начальном этапе развития определенных значений, остающихся постоянными при дальнейшем распространении волны. Характерная форма стационарной трехмерной волны приведена на рис. 1.

При энергиях возбуждения, отличных от энергии возбуждения стационарных волн, наблюдалось изменение характеристик эволюционирующих волн в направлении стационарных значений. В отдельных случаях наблюдалось формирование стационарных волн с одинаковыми характеристиками при двух близких энергиях возбуждения. В таких случаях формирование стационарной волны происходило для разных энергий на разных расстояниях от точки возбуждения.

Результаты экспериментов представлены в безразмерном виде с использованием масштаба H_N по оси Z , направленной по нормали к поверхности пластины, и масштаба $M_t = \text{Re}H_N/15\delta$ по осям X и Y вдоль поверхности пластины, где $H_N = (3\nu^2\text{Re}/g)^{1/3}$ — толщина гладкой пленки по Нуссельту. Безразмерные амплитуды $A = H/H_N - 1$ всех зарегистрированных стационарных волн в зависимости от модифицированного числа Рейнольдса приведены на рис. 2. На этом же

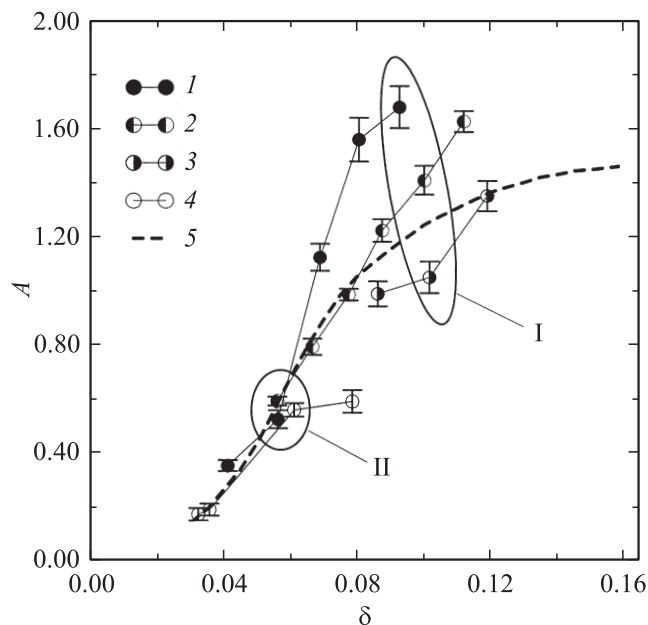


Рис. 2. Зависимость амплитуды стационарных волн от числа Рейнольдса. Рабочие жидкости: 1 — WG1; 2 — WG2; 3 — WG3; 4 — WA; 5 — расчет [5]. Для волн, выделенных областями I и II, на рис. 3 приведены сечения.

рисунке приведен расчет для амплитуд стационарных волн по [5]. Теоретическая зависимость в целом передает характер изменения амплитуды стационарных волн. Для значений $\delta \leq 0.06$ измеренные амплитуды хорошо соответствуют расчетным значениям для разных рабочих жидкостей. При дальнейшем увеличении δ наблюдается расслоение экспериментальных данных для жидкостей с разными физическими свойствами. Как видно из рис. 3, *a* и *b* расслоение в зависимости от свойств жидкости при $\delta \approx 0.1$ наблюдается не только для амплитуд, но и для поперечных размеров стационарных трехмерных волн. Вместе с тем при несколько меньших значениях δ не только амплитуды стационарных волн близки к теоретически рассчитанным значениям, но и их размеры неплохо обобщаются в безразмерных координатах $x = X/M_t$, $y = Y/M_t$ (рис. 3, *c, d*).

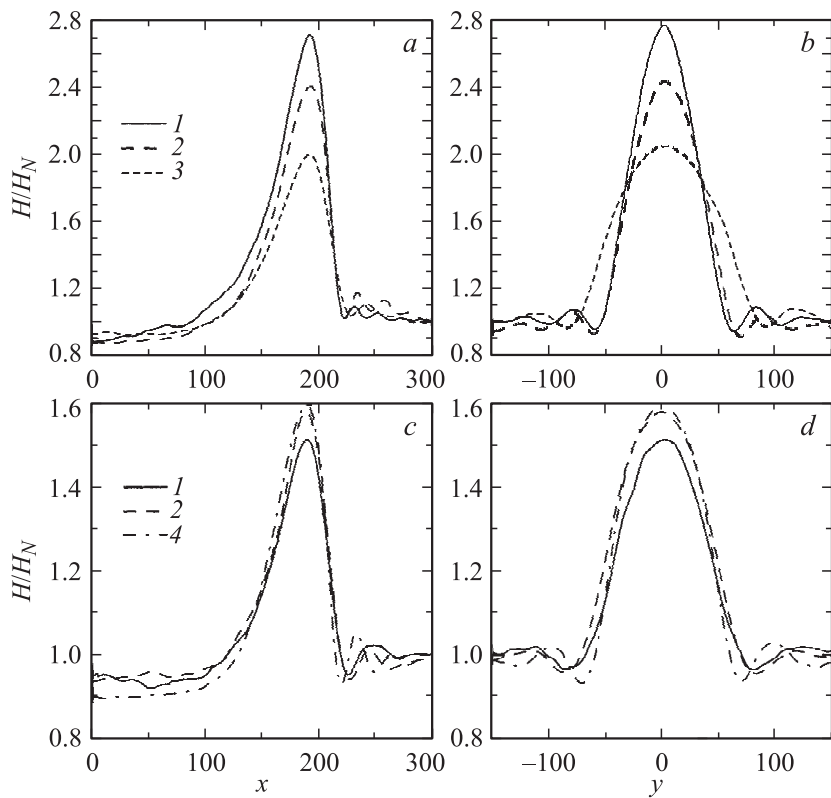


Рис. 3. Продольные (слева) и поперечные (справа) сечения через вершину уединенной волны. *a, b* — для случая $\delta \approx 0.1$ (область I на рис. 2); *c, d* — для случая $\delta \approx 0.06$ (область II на рис. 2). Рабочие жидкости: 1 — WG1; 2 — WG2; 3 — WG3; 4 — WA.

На основании представленных экспериментальных результатов, полученных для жидкостей с разными физическими свойствами, можно сделать вывод, что в случае описания стационарных трехмерных волн область применимости существующих теоретических моделей, по-видимому, ограничена значениями $\delta < 0.1$.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (проект № 09-01-00765) и Федерального агентства по образованию.

Список литературы

- [1] Saprykin S., Demekhin E.A., Kalliadasis S. // Phys. Fluids. 2005. V. 17. P. 117105.
- [2] Demekhin E.A., Kalaidin E.N., Kalliadasis S., Vlaskin S.Yu. // Phys. Fluids. 2007. V. 19. P. 114103.
- [3] Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусавев 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] Demekhin E.A., Kalaidin E.N., Kalliadasis S., Vlaskin S.Yu. // Phys. Fluids. 2007. V. 19. P. 114104.
- [6] Saprykin S., Demekhin E.A., Kalliadasis S. // Phys. Fluids. 2005. V. 17. P. 117106.
- [7] Алексеенко С.В., Антипин В.А., Гузанов В.В. и др. // ДАН. 2005. Т. 405. № 2. С. 193.
- [8] Alekseenko S.V., Antipin V.A., Guzanov V.V. et al. // Phys. Fluids. 2005. V. 17. P. 121704.
- [9] Калайдин Е.Н., Власкин С.Ю., Демехин Е.А., Каллиадасис С. // ДАН. 2006. Т. 406. № 1. С. 44.
- [10] Демехин Е.А., Калайдин Е.Н., Шапарь С.Н., Шелестов В.С. // ДАН. 2007. Т. 413. № 2. С. 193.
- [11] Калайдин Е.Н., Селин А.С., Демехин Е.А. // ДАН. 2009. Т. 427. № 4. С. 486.
- [12] Scheid B., Ruyer-Quill C., Manneville P. // J. Fluid Mech. 2006. V. 562. P. 183.
- [13] Park C.D., Nosoko T. // AIChE J. 2003. V. 49. N 11. P. 2715.