

УДК 532.59:532.62

С.В. Алексеенко^{1,2}, А.В. Бобылев^{1,2}, В.В. Гузанов^{1,2}, А.З. Квон^{1,2}, Д.М. Маркович^{1,2}, С.М. Харламов^{1,2}

¹ Новосибирский Государственный Университет, Россия,
630090, Новосибирск, Пирогова ул., 2, E-mail: kharlamov@itp.nsc.ru

² Институт Теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева д., 1, E-mail: azkvon@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ВОЛНОВЫХ РЕЖИМОВ ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования характеристик волнового движения на вертикально стекающих плёнках жидкости в диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения $10 < Re < 100$ для жидкостей с различными физическими свойствами. В данной работе были совместно использованы полевые оптические методы исследования взаимодополняющие друг друга, такие как метод теневой фотографии и высокоскоростной метод лазерно индуцированной флуоресценции. Показано формирование струй на осреднённых по времени полях толщин при переходе от двумерного к трёхмерному волновому движению в широком диапазоне режимных параметров при изотермическом течении плёнок жидкости. Обнаруженный струйный характер течения плёнок жидкости, несомненно, оказывает существенное влияние на процессы тепло и массопереноса и должен учитываться при моделировании такого вида течений.

ПЛЕНОЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ, ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ, ЛАЗЕРНО ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ, ТЕНЕВАЯ ФОТОГРАФИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

Трёхмерные волновые режимы считаются конечной стадией волновой эволюции при умеренных числах Рейнольдса (Re) пленочного течения жидкости по вертикальной пластине. При таких режимах поверхность пленки покрыта многочисленными трёхмерными волнами, взаимодействующими друг с другом случайным образом. Как правило, переход к трёхмерным режимам происходит за счет поперечной неустойчивости двумерных нелинейных волн, развивающихся на начальном участке пленочного течения. Из-за малой скорости перестройки течения длина рабочего участка для исследования таких режимов должна быть достаточно большой, поэтому трёхмерные волновые режимы и области перехода к ним остаются малоизученными. Ускорения эволюционных процессов можно добиться, разрушая искусственно возбужденные на поверхности пленки волны. Экспериментальное исследование переходных режимов течения, как при естественной, так и при вынужденной эволюции волн на вертикальной пластине достаточных размеров проводилось, например, в [1] методом теневой фотографии, не позволяющим определять амплитудные характеристики волн.

Недавно авторами [2] было впервые показано образование струй в процессе перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению при изотермическом течении плёнки воды. Такие струи имеют малую кривизну поверхности и не заметны на теневых фотографиях плёнки при обычной настройке оптической системы для этого метода, когда с высокой резкостью визуализируются области с большой кривизной поверхности (капиллярный предвестник).

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию трехмерных волновых режимов течения пленки жидкости оптическими методами в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Для регистрации общей картины течения использовался метод теневой фотографии. Для разрешения малых масштабов волновых структур и быстропротекающих процессов использовался высокоскоростной метод лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) [3].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Эксперименты проводились на вертикальной прозрачной стеклянной пластине 2 шириной 50см и длиной 140см с использованием жидкостей с различными физическими свойствами в диапазоне чисел Рейнольдса плёночного течения $10 < Re < 100$. Число Рейнольдса определяется как удельный объемный расход жидкости, отнесённый к кинематической вязкости жидкости.

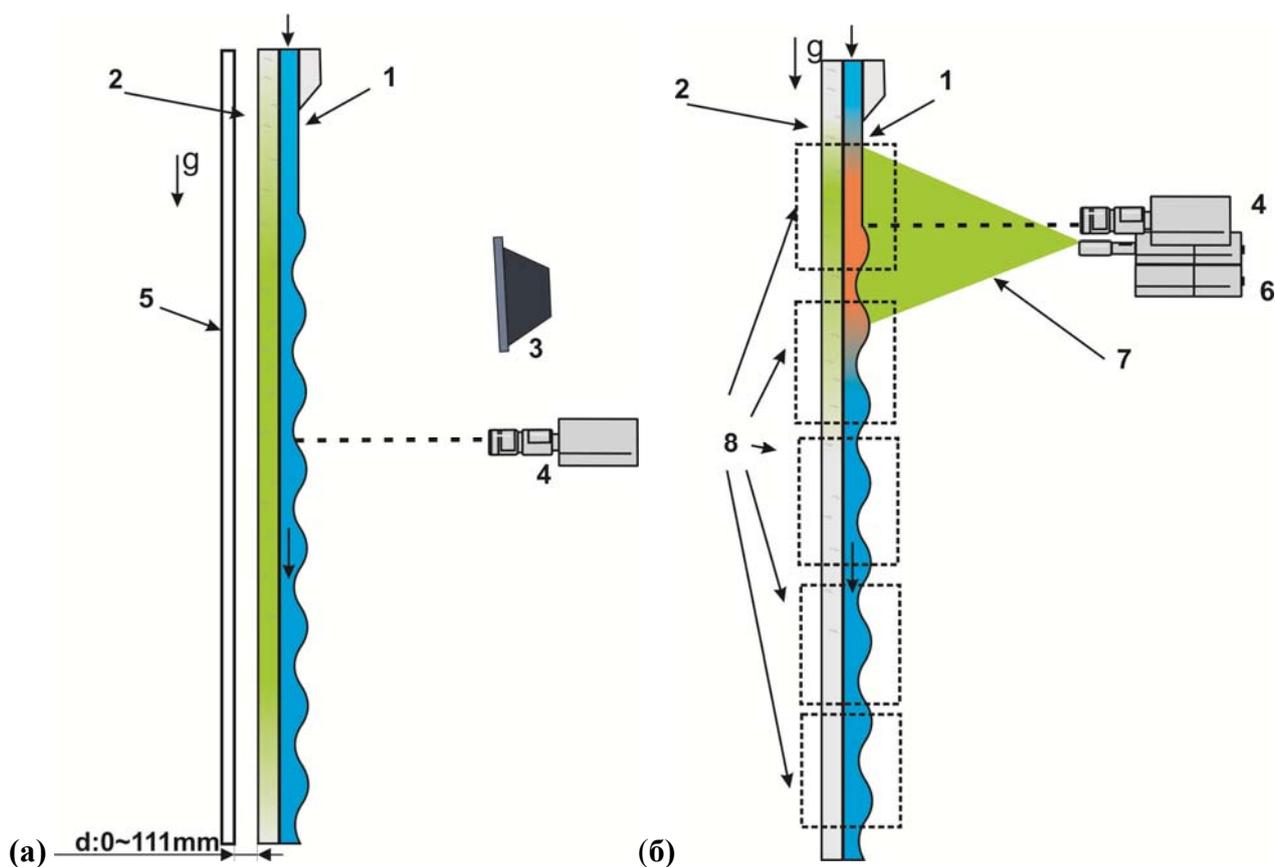


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для теневых(а) и ЛИФ метода (б). 1-пленка жидкости, 2-стеклянная пластина, 3-галогеновая лампа, 4-высокоскоростная ССD камера, 5-экран, 6-непрерывный лазер(532нм), 7-лазерный пучок 8-области измерений

Установка представляет собой замкнутый гидродинамический контур. Плёнка жидкости-1 формировалась на вертикальной пластине при помощи регулируемого щелевого

распределителя и стекала под действием силы тяжести. Двумерные волны на поверхности плёнки формировались периодической модуляцией расхода жидкости с заданной частотой.

Для регистрации волновой картины одновременно на все длине пластины использовался метод теневой фотографии. Для разрешения малых масштабов волновых структур и быстротекущих процессов использовался высокоскоростной метод ЛИФ. Используемые для реализации последнего высокоскоростная камера 4 и непрерывный лазер 6 позволили с достаточным временным и пространственным разрешением регистрировать мгновенные распределения толщины плёнки жидкости на площадках 8 размером $20 \times 20 \text{ см}^2$, расположенных на различном удалении X от щелевого распределителя. С помощью полученных распределений были вычислены различные статистические характеристики, в частности, плотность вероятности распределения толщины пленки, пространственная и временная дисперсии полей толщин.

Для реализации метода теневой фотографии вся стеклянная пластина освещалась 500 ваттным галогенным прожектором 3 со стороны плёнки жидкости, образующееся на белом матовом экране 5 теневое изображение от плёнки регистрировалось камерой 4 с частотой 125 Гц. Расстояние между экраном и плёнкой могло варьироваться в широком диапазоне. В зависимости от положения экрана на изображении хорошо различаются разные детали волновой картины. При малом расстоянии между плёнкой и экраном (d на рис. 1, а) на изображениях отчётливо видны волновые элементы, имеющие высокую кривизну поверхности (капиллярный предвестник), и теневые изображения плёнки (рис. 2 (а)) похожи на полученные в [1]. При отдалении экрана от плёнки становятся различимыми элементы волновой структуры с меньшей кривизной поверхности (рис. 2, б). Такие элементы не были обнаружены предыдущими исследователями.

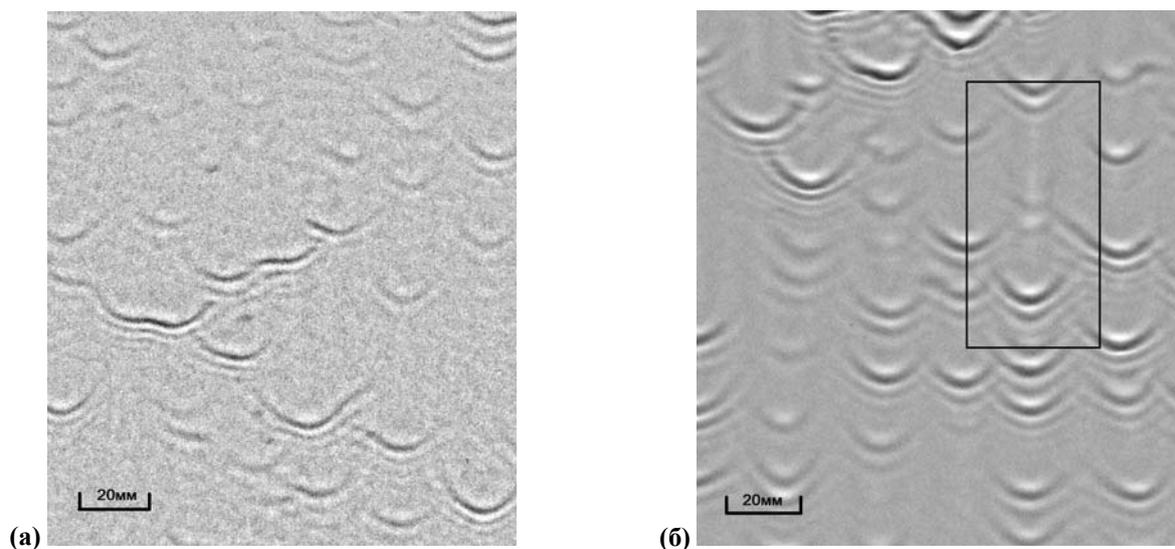


Рис. 2. Теневые фотографии пленочного течения, полученные при разном расстоянии экрана от пластины $d = 0 \text{ мм}$ (а) и $d = 44 \text{ мм}$ (б). Рабочая жидкость – вода, $Re = 10$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для всех исследованных жидкостей обнаружено, что при числах Рейнольдса ниже некоторого порогового значения ($Re < Re_1$) перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению не происходит на всей длине рабочего участка как для случая естественных, так и для возбуждённых двумерных волн.

При превышении этого порога наблюдается область переход от двумерного волнового движения к трёхмерному, характеризующаяся резким уменьшением поперечного размера волн. В процессе такой перестройки течения, искривление фронта двумерной волны, поперечный размер которой сопоставим с шириной рабочей области, приводит к

формированию трёхмерных волн с характерными поперечными размерами около 1 см. В этой области формирование трёхмерных волн происходит с образованием дорожек повышенной толщины за $3d$ волнами, которые можно наблюдать на рис. 3, а, г в средней части течения. Такой сценарий перехода, впервые показанный в [4] для относительно малых размеров рабочей области, приводит к образованию струй на осреднённых по времени полях толщин. По гребням этих струй друг за другом двигаются трёхмерные волны. Характерный размер струй слабо зависит от Re и лежит в интервале 1,1 – 1,4 см. А осреднённые по времени значения толщины плёнки в максимумах струй отнесенные к толщине в межструйных областях могут достигать величин 1,2 для естественных волн и 1,5 для возбужденных. При этом в межструйной области волновое движение существенно подавляется.

Описанный выше сценарий волновой эволюции наблюдается вплоть до некоторого числа Рейнольдса, при превышении которого ($Re > Re_2$) волновая картина в нижней части течения оказывается не чувствительной к наложенным в верхней части возмущениям, а развитие струй носит немонотонный характер: амплитуда струй нарастает до расстояний 40 – 50 см. от распределителя, после чего струи начинают затухать и могут практически исчезать в нижней части пластины.

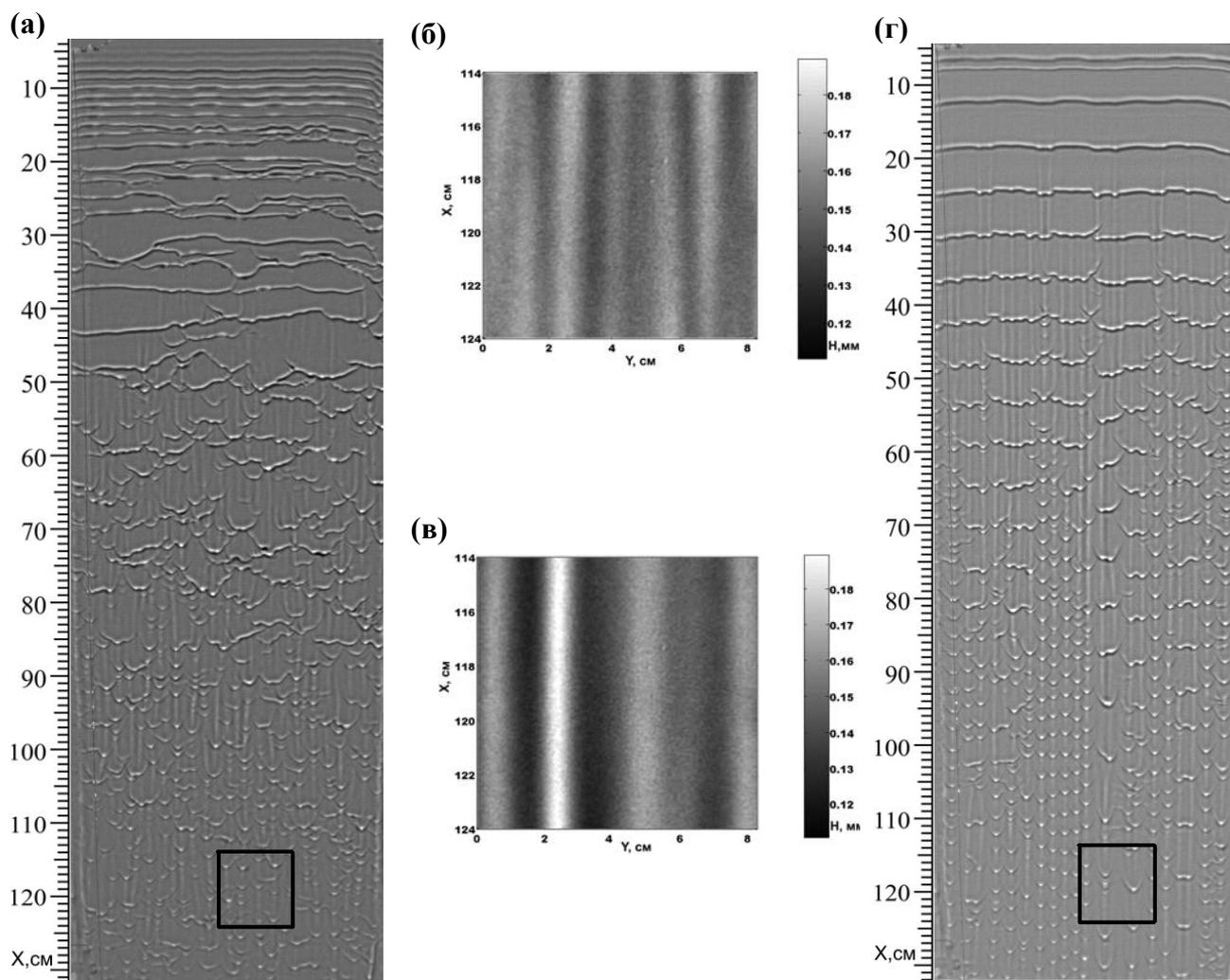


Рис. 3. Теневые фотографии пленочного течения для случая естественной (а) и возбужденной (г) волновой эволюции (частота возбуждения 6Гц). (б), (в) – усредненное по времени поле толщин пленки в выделенных областях на изображении (а) и (г) соответственно. Рабочая жидкость-вода, $Re=14$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместное использование высокоскоростного метода ЛИФ и теневой фотографии позволило впервые обнаружить образование струй в процессе перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению при изотермическом течении плёнки (рис. 3). Характеристики струйного течения измерены в широком диапазоне режимных параметров. Обнаружены различные сценарии развития волнового течения, связанные, по всей видимости, с формированием струй. Полученные экспериментальные данные могут представлять интерес не только при построении теоретических моделей, но и при решении прикладных задач связанных с тепломассопереносом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **C.D. Park, T. Nosoko.** Three-dimensional wave dynamics on a falling film and associated mass transfer. *AIChE Journal*, 2003, 49(11): 2715-2727.
2. **S.V. Alekseenko, A.V. Bobylev, V.V. Guzanov, D.M. Markovich and S.M. Kharlamov.** Formation of Rivulets in Isothermal Liquid Film Flow during Transition to a Three-Dimensional Wave Regime. *Technical Physics Letters*, 2014, 40(11): 1031–1034.
3. **S.V. Alekseenko, A.V. Cherdantsev, M.V. Cherdantsev, S.V. Isaenkov, S.M. Kharlamov and D.M. Markovich.** Application of a high-speed laser-induced fluorescence technique for studying the three-dimensional structure of annular gas–liquid flow. *Experiments in fluids*, 2012, 53(1): 77-89.
4. **S. V. Alekseenko, V. V. Guzanov, D. M. Markovich, and S. M. Kharlamov.** Specific Features of a Transition from the Regular Two-Dimensional to Three-Dimensional Waves on Falling Liquid Films. *Technical Physics Letters*, 2012, 38(8): 739-742.

S.V. Alekseenko^{1,2}, A.V. Bobylev^{1,2}, V.V. Guzanov^{1,2}, S.M. Kharlamov^{1,2},
A.Z. Kvon^{1,2} and D.M. Markovich^{1,2}

¹*Institute of Thermophysics Siberian Branch of RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentyev Ave., 1, E-mail: kharlamov@itp.nsc.ru*

²*Novosibirsk State University, Russia,
630090, Novosibirsk, Lyapunova st., 1, E-mail: azkvon@gmail.com*

The results of an experimental study of wave motion on a falling liquid films over a range of film flow Reynolds number $10 < Re < 100$ using liquids with various physical properties are presented. In the present study field optical measurement techniques such as shadowgraphy and high speed laser induced fluorescence method were used. Rivulets formation during the process of transition from two-dimensional to three-dimensional wave flow of the isothermal liquid films over a wide range of flow parameters was shown. Revealed rivulet nature of the liquid film flow can significantly affects heat and mass transfer processes in liquid films and should be taken into account while modeling such kind of a flow.

LIQUID FILM FLOW, WAVE MOTION, LASER INDUCED FLUORESCENCE,
SHADOWGRAPHY