

03

Структура течения в трехмерных волнах на вертикально стекающей пленке жидкости

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

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет
E-mail: azkvon@gmail.com

Поступило в Редакцию 3 мая 2017 г.

Проведены одновременные измерения полей скорости и толщины пленки в трехмерных волнах, образующихся в результате распада регулярных двумерных волн при пленочном течении жидкости по вертикальной пластине. Построены поля скорости на разном расстоянии от пластины с привязкой к конкретным участкам трехмерной волны. Показано, что поток жидкости в волне имеет сложную структуру с существованием областей возвратного течения и поперечных потоков, при этом основные области этих потоков находятся под главным гребнем волны.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.18.45027.16851

Трехмерные (3D) волны на поверхности вертикально стекающей пленки жидкости образуются в процессе распада двумерных (2D) волн (рис. 1, *a*) и являются конечной стадией волновой эволюции при умеренных расходах жидкости. В экспериментальных работах [1,2] было обнаружено, что переход к трехмерному волновому режиму пленочного течения сопровождается формированием струй, т.е. приводит к неравномерному распределению жидкости поперек пластины, при

этом поперечные потоки жидкости направлены к центральным частям формирующихся трехмерных волн. Несмотря на то что характеристики струйного течения были описаны в работе [3], вопрос о том, в каких областях трехмерной волны происходит приток жидкости, остается открытым, хотя данная информация необходима для понимания механизмов развития 3D-волн и формирования струй. Для ответа на этот вопрос требуется информация о поле скоростей течения жидкости в 3D волнах. Несмотря на то что пленочное течение жидкости активно изучается, результаты полевых измерений скорости жидкости в волновых пленках представлены в немногочисленных работах, что связано со сложностью проведения таких измерений. При этом авторы ограничиваются измерением на разных расстояниях y от поверхности, по которой происходит течение, продольной компоненты скорости V_x , направленной вдоль основного течения, как, например, в работе [4], где для измерений использовался фотохроматический метод. В [5,6] для измерения скорости жидкости в волновых пленках применялся современный полевой метод цифровой трассерной визуализации (ЦТВ), являющийся на данный момент наиболее эффективной техникой оптической диагностики потоков. Однако, как и в работе [4], результаты ограничивались измерением $V_x(y)$. Следует отметить, что при использовании методов ЦТВ поток предварительно засеивается частицами (трассерами), а векторы скорости определяются по смещению изображений частиц на двух последовательных кадрах, полученных с известной задержкой по времени. Определение положения трассеров в пространстве осуществляется, как правило, с использованием специальных способов их освещения, как, например, в работе [5], в которой поток освещался лазерным ножом, направленным перпендикулярно стенке канала, вдоль его оси. Таким образом, двумерные поля скорости потока измерялись в плоскости, освещенной лазерным ножом. В случае трехмерной волны необходимо определять перемещение трассеров по меньшей мере в двух взаимно перпендикулярных направлениях, параллельных пластине, на разных участках волны, что является гораздо более сложной задачей. По этой причине в литературе отсутствуют экспериментальные данные о структуре течения жидкости в трехмерных волнах, в частности о поперечных по отношению к направлению основного течения и параллельных пластине компонентах скорости V_z , которые должны обуславливать поперечные перетоки жидкости. С целью определения областей трехмерных волн, в которых присутствуют поперечные потоки

жидкости, в настоящей работе был применен метод ЦТВ на основе использования камеры светового поля, позволяющей определять координаты трассеров в пространстве [7], что впервые позволило измерить компоненты скорости V_x и V_z во всем исследуемом объеме жидкости с привязкой к конкретным участкам 3D-волны. Устройство камеры позволяет получать большое количество стереоизображений на единой цифровой матрице при использовании стандартного фотообъектива. Координаты трассеров определяются по алгоритмам, применяемым в стереоскопии.

Эксперименты проводились с использованием установки и режимов течения, детально описанных в [1,2]. Измерения проводились в области течения, где вследствие 2D–3D волнового перехода наблюдается быстрое развитие струй вниз по течению. Пленка воды формировалась на вертикальной прозрачной пластине из стекла. Полевые оптические методы ЦТВ для измерения полей скорости и лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) для получения полей толщин применялись одновременно. Поля скорости и толщин строились на основе одних и тех же изображений, зарегистрированных камерой светового поля (пленочной камерой) Raytrix 11m, позволяющей осуществлять съемку в режиме двойного кадра, когда два изображения регистрируются через заданный интервал времени. Пространственное разрешение по глубине слоя жидкости для данной камеры составляет 1/40 от глубины резкости оптической системы [8]. При проведении экспериментов глубина резкости оптической системы составляла 2 mm. Таким образом, положение по глубине флуоресцентных частиц из полиамида диаметром $5\ \mu\text{m}$, которыми был засеян поток, определялось с точностью до $\pm 25\ \mu\text{m}$. При измерениях с помощью метода ЛИФ мгновенное распределение толщины пленки определялось по интенсивности свечения растворенного в жидкости флуорофора Родамин 6Ж в концентрации 1.25 mg/l. Съемка на камеру осуществлялась с неорошаемой стороны пластины через стекло в области течения, показанной на рис. 1, а. Флуоресцентное свечение раствора и трассеров в области измерений возбуждалось импульсным лазером с длиной волны 532 nm. Подробное описание метода ЛИФ и анализ его погрешностей применительно к условиям эксперимента даны в [2]. Ошибка в измерении толщины пленки методом ЛИФ не превышала $\pm 10\ \mu\text{m}$. Пространственное разрешение полученных изображений вдоль поверхности пластины составляло $6.7\ \mu\text{m}$ на пиксель. Полученные результаты иллюстрируются ниже на примере режима течения, характе-

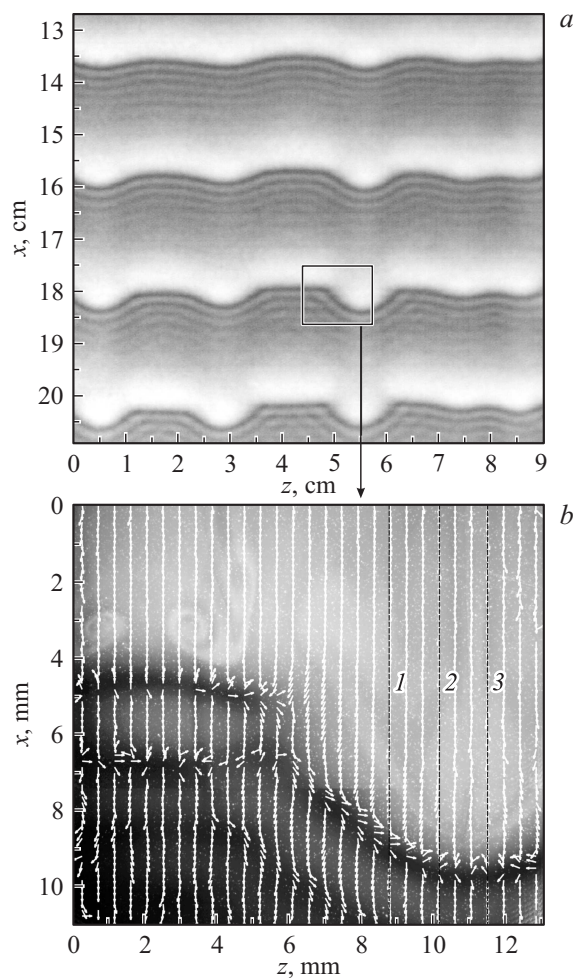


Рис. 1. Область измерений и характерное поле скоростей в трехмерной волне. *a* — часть ЛИФ-изображения, приведенного на рис. 6 работы [1], иллюстрирующая формирование 3D-волн на поверхности пленки воды при $Re = 40$, $F = 19$ Hz. Прямоугольником выделена область, исследуемая в настоящей работе, *b* — направление течения жидкости в разных частях волны на расстоянии $108 \mu\text{m}$ от поверхности пластины. Показаны траектории движения жидкости для профилей 1–3 на рис. 2, *b*.

ризующегося числом Рейнольдса $Re = 40$, где $Re = q/\nu$, q — удельный объемный расход жидкости, ν — кинематическая вязкость. Измерения проводились для случая распада регулярных 2D-волн, возбуждаемых модуляцией расхода жидкости на начальном участке течения с частотой $F = 19$ Hz. Как показано в [2], при таких условиях формирование 3D-волн происходит в одних и тех же местах течения с частотой, равной частоте возбуждаемых 2D-волн. Частота съемки измерительной системы подбиралась таким образом, чтобы образующиеся 3D-волны регистрировались в одном и том же месте. Это позволило набрать достаточный для построения полей скорости объем экспериментальных данных.

Обработка полученных экспериментальных данных включала этапы первичной фильтрации изображений, после которой восстанавливались поля толщин пленки и определялись координаты трассеров в пространстве. На заключительном этапе производилось разбиение изображений трассеров по глубине их погружения в жидкость на слои, параллельные поверхности пластины, и для каждого слоя определялось поле скоростей. Для расчета скоростей использовался алгоритм PTV из стандартного программного пакета ActualFlow. При разбиении на слои центры соседних слоев располагались с шагом $36 \mu\text{m}$ от стенки (в направлении y). Все трассеры, попадающие в диапазон глубин $\pm 36 \mu\text{m}$ от центра слоя, считались относящимися к нему. Погрешность измерения скорости при $y \geq 72 \mu\text{m}$ составляла 30%, что объясняется недостаточно высокой локализацией трассеров по глубине в сдвиговом течении. Тем не менее полученные результаты позволяют выделить области волны с характерным направлением течения жидкости. В качестве примера на рис. 1, *b* приведено поле скоростей в слое с $y = 108 \mu\text{m}$ на фоне реконструированного поля толщин. Яркость фона соответствует толщине слоя жидкости. Минимальная и максимальная толщина пленки по центру волны составляют 90 и $400 \mu\text{m}$ соответственно в минимуме капиллярного предвестника и в максимуме основного гребня. Для наглядности длина каждого вектора скорости нормирована сама на себя и показывает только направление течения. Как видно, течение жидкости в волне имеет сложную структуру. В области капиллярного предвестника наблюдаются участки притока жидкости в направлении к центральной части волны вдоль впадин, проходящих через локальные минимумы предвестника, и участки оттока жидкости в противоположном направлении вдоль гребней, проходящих через

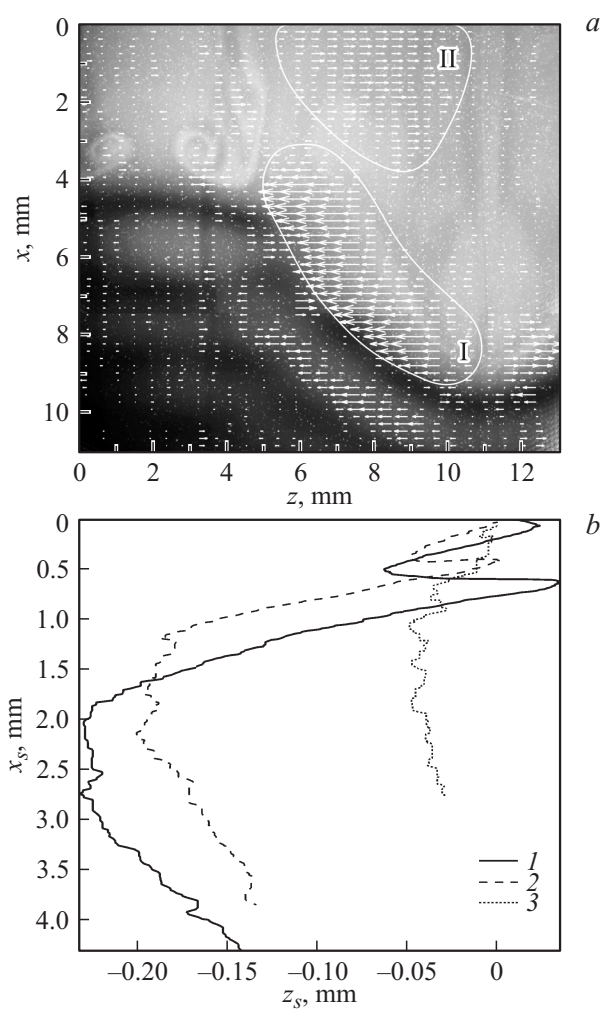


Рис. 2. Поперечные смещения жидкости в разных участках волны. *a* — поперечные скорости V_z на расстоянии $180 \mu\text{m}$ от пластины. I — область оттока жидкости из волны, II — область притока жидкости в волну. *b* — траектории движения элементарного объема жидкости вдоль профилей, указанных на рис. 1, *b* на расстоянии $108 \mu\text{m}$ от пластины.

его локальные максимумы. Кроме того, в отдельных частях впадин предвестника наблюдается возвратное течение жидкости, направленное против силы тяжести. Эти результаты качественно соответствуют результатам работы [9], где экспериментально и численно было исследовано возвратное течение в окрестности минимума капиллярного предвестника 2D-волн, и работы [10], где в результате численного моделирования было показано, что вдоль гребней и впадин капиллярного предвестника 3D-волны возникают значительные поперечные потоки жидкости. Под основным гребнем волны также можно выделить две пространственно разделенные области со значительными поперечными потоками жидкости, как показано на рис. 2, *a*. В области I, прилегающей к переднему фронту волны, течение направлено от ее центральной части. В области II на заднем склоне волны поток жидкости направлен к центру волны. Характерные скорости в указанных областях для приведенного на рис. 2, *a* случая $y = 180 \mu\text{m}$ составляют $V_x = 0.25 \text{ m/s}$, $V_z = 0.06 \text{ m/s}$ для области I и $V_x = 0.3 \text{ m/s}$, $V_z = 0.03 \text{ m/s}$ для области II. С увеличением расстояния от стенки происходит расширение области II в направлении переднего фронта волны и соответственно сужение области I с увеличением V_x до 0.4 m/s , V_z до 0.08 m/s в обеих областях при скорости волны $V \approx 0.42 \text{ m/s}$. На рис. 2, *b* приведены траектории движения элементарных объемов жидкости при прохождении трехмерной волны, построенные в предположении, что жидкость не покидает границ выделенного слоя и V_z не меняется в направлении z в пределах поперечных смещений элементарного объема. Траектории строились в сечениях, указанных штриховыми линиями на рис. 1, *b* в слое жидкости при $y = 108 \mu\text{m}$. Начало траекторий соответствует положению элементарных объемов жидкости в нижней части рис. 1, *b* (в области капиллярного предвестника), а конец — их положению в хвостовой части волны, после прохождения главного гребня. Из рис. 2, *b* видно, что поперечные перемещения жидкости в области капиллярного предвестника (при $x_s < 0.7 \text{ mm}$) малы, а основные поперечные перемещения происходят в областях I ($0.6 < x_s < 1.2 \text{ mm}$) и II ($2 < x_s < 2.6 \text{ mm}$) под главным гребнем волны. Поскольку с увеличением расстояния от стенки размеры области II возрастают, а области I уменьшаются, можно говорить о том, что основной приток жидкости в волну при формировании струй происходит в области заднего склона волны. Таким образом, экспериментально показано, что течение жидкости в трехмерной волне имеет сложную структуру с существованием областей возвратного

течения и поперечных потоков, при этом основные области этих потоков находятся под главным гребнем волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10449).

Список литературы

- [1] Алексеев С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 16. С. 16.
- [2] Kharlamov S.M., Guzanov V.V., Bobylev A.V. et al. // Physics Fluids. 2015. V. 27. Iss. 11. P. 114106.
- [3] Гузанов В.В., Бобылев А.В., Квон А.З. и др. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 5. С. 24.
- [4] Moran K., Inumaru J., Kawaji M. // Int. J. Multiphase Flow. 2002. V. 28. Iss. 5. P. 731.
- [5] Adomeit P., Renz U. // Int. J. Multiphase Flow. 2000. V. 26. Iss. 7. P. 1183.
- [6] Zadrazil I., Markides C.N. // Int. J. Multiphase Flow. 2014. V. 67. Suppl. P. 42.
- [7] Cenedese A., Cenedese C., Furia F. et al. // 3D particle reconstruction using light field imaging // 16th Int. Symp. on applications of laser techniques to fluid mechanics. Lisbon, Portugal, 2012.
- [8] Середкин А.В., Токарев М.П. // Вычислительные методы и программирование. 2016. Т. 17. В. 3. С. 224.
- [9] Dietze G.F., Leefken A., Kneer R. // J. Fluid Mechanics. 2008. V. 595. P. 435.
- [10] Dietze G.F., Rohlf's W., Nährich K. et al. // J. Fluid Mechanics. 2014. V. 743. P. 75.