

А. В. Бобылев, Д. М. Маркович, С. М. Харламов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: bobylev@itp.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТИ В ВОЛНОВОМ РУЧЕЙКОВОМ ТЕЧЕНИИ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЕ *

С использованием полевых методов PIV и ЛИФ проведено взаимодополняющее измерение полей толщины и полей скорости течения жидкости в волновых ривулетах, стекающих по вертикальной пластине. Под гребнями низкочастотных волн большой амплитуды обнаружены застойные области, в которых жидкость движется со скоростью волн. Получены профили продольной компоненты скорости течения жидкости в различных частях волны. Наибольшие отклонения профилей скорости от автоматических параболических профилей наблюдаются в области капиллярного предвестника и в застойных областях под гребнями волн.

Ключевые слова: ручейковое течение, регулярные волны, лазерно-индуцированная флуоресценция, поле скорости.

Введение

Течение жидкости по твердой поверхности в виде тонкой струйки под действием силы тяжести принято называть ручейковым или ривулетным. При умеренных расходах жидкости ручейковое течение всегда наблюдается при стекании жидкости по гидрофобной поверхности и часто реализуется даже на идеально смачиваемой поверхности вследствие разрушения сплошного пленочного течения [1].

Исследование ручейкового течения по плоской наклонной поверхности является сложной задачей в силу неустойчивости большинства режимов течения, обусловленной наличием гистерезиса краевого угла смачиваемости [2]. Еще более сложной задачей является исследование ривулетов, образующихся при течении жидкой пленки по структурированным поверхностям, приме-

няющимся для изготовления насадок массообменных аппаратов.

Как и для наклонно стекающих пленок жидкости [3], на свободной поверхности ручейкового течения реализуется волновое движение, влияющее как на процессы переноса, так и на режимные особенности течения. Широкий спектр реализуемых волновых режимов течения ривулетов обуславливается характером течения в области контактной линии, физическими свойствами жидкости, условиями возбуждения волн [4; 5].

Статистически надежные экспериментальные данные о волновой структуре на свободной поверхности ривулетов удается получить при условии реализации прямого режима течения, когда берега ривулета являются прямыми. Такое течение образуется, например, при струйном орошении наклонного цилиндра, когда жидкость

* Работа выполнена при финансировании правительства Российской Федерации в рамках программы поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (грант № 11.G34.31.0035), и проекта РФФИ № 12-01-00778.

собирается в его нижней части и движется в виде стационарного ривулета постоянной ширины [6]. Модель волнового движения на свободной поверхности такого течения была развита в [7]. Экспериментально волновой ривулет, стекающий по нижней части наклонного цилиндра, был исследован в [8]. Слабая экспериментальная изученность волновых режимов ривулетного течения по наклонным поверхностям обусловлена трехмерной формой развивающихся волн и малой толщиной слоя жидкости в волновых ривулетах. Полное описание таких режимов требует применения полевых методов измерений, например метода цифровой трассерной визуализации (метод PIV) для измерения поля скорости течения или метода лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) для получения формы волн. Адаптация этих методов к исследованию ривулетного течения сталкивается с объективными трудностями методического характера.

Хорошо зарекомендовавший себя в газожидкостных потоках метод PIV [9] в применении к пленочному и, в особенности, к ручейковому течению, имеет ряд серьезных ограничений. Они связаны с необходимостью учета оптических искажений на межфазной поверхности раздела, малой толщиной слоя жидкости и высокими поперечными градиентами скорости в волновых ривулетах. Данные экспериментальных исследований поля скорости при ривулетном течении в литературе практически отсутствуют в силу сложности компенсации оптических искажений, связанных с трехмерной структурой волн на свободной поверхности ривулета. Единственной работой, сделанной в этом направлении, является [10], в которой был предложен метод измерения поля скорости в волновых ривулетах, стекающих по нижней части наклонного цилиндра.

Метод ЛИФ основан на восстановлении толщины пленки по интенсивности излучения, испускаемого небольшим количеством растворенного в рабочей жидкости флуоресцентного красителя, и позволяет регистрировать поле локальных толщин пленки жидкости на большой площади. Впервые полевые измерения флуоресцентным методом были выполнены для исследования волнового пленочного течения жидкости по наклонной пластине [11]. Применительно к ручейковому течению этот метод использовался в [1] для исследования формирования

ривулетов при стекании по наклонной пластине пленок жидкости, ограниченных контактной линией. Полевые измерения формы волн на ривулетах, стекающих по вертикальной пластине, впервые выполнены методом ЛИФ в [12].

В настоящей работе представлены результаты измерения поля скорости в волновых ривулетах с прямолинейными берегами, стекающих по вертикальной пластине, с применением взаимодополняющих полевых методов PIV и ЛИФ.

Схема установки и параметры эксперимента

Ручейковое течение было организовано на специализированной установке с замкнутым гидродинамическим контуром и сменными рабочими участками из листового стекла толщиной 4 мм. Исследовалось течение ривулетов, ограниченных прямолинейными параллельными берегами из гидрофобного материала. В качестве гидрофобного материала использовалась фторопластовая пленка толщиной 10 мкм, которая прикатывалась к поверхности рабочего участка. На разных участках расстояние между берегами имело разное значение и менялось от 3 до 15 мм с шагом 4 мм. Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Регулярные волны заданной частоты F создавались путем модуляции расхода жидкости на входе в распределительную секцию.

Оптическая схема эксперимента и измерительная система

При измерении полей скорости в ривулетах методом PIV возникает проблема точного определения положения границы свободной поверхности ривулета и фазы проходящих волн. Эта задача может быть решена при условии одновременного применения методов PIV и ЛИФ, поскольку метод ЛИФ позволяет с высокой точностью определять поле толщин волновых ривулетов и, следовательно, профиль волны, ее фазу и скорость. Для исключения оптических искажений на криволинейной свободной поверхности ривулета измерения проводились с неорошаемой стороны рабочего участка. Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 2.

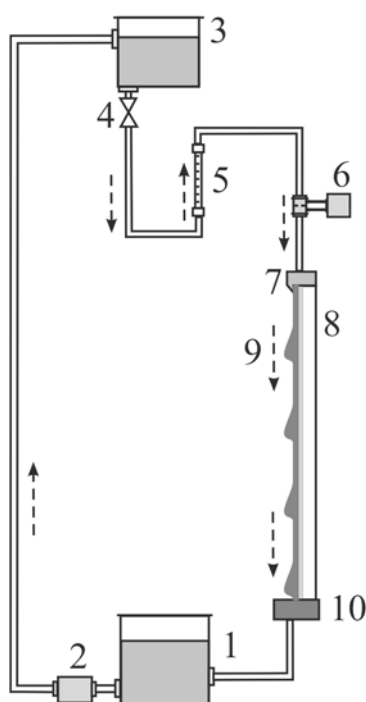


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – приемный бак; 2 – насос; 3 – бак постоянного уровня; 4 – регулировочный вентиль; 5 – ротаметр; 6 – модулятор расхода жидкости; 7 – щелевой распределитель; 8 – прозрачная вертикальная пластина; 9 – волновой ривулет; 10 – поддон для сбора жидкости. Пунктирными стрелками указано направление течения жидкости

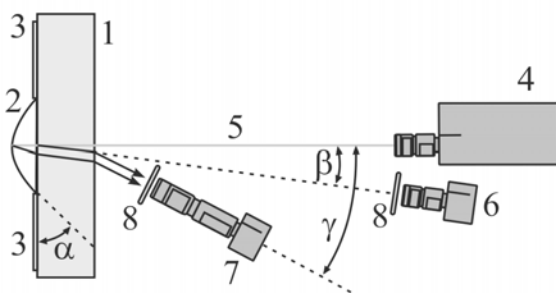


Рис. 2. Оптическая схема эксперимента: 1 – прозрачная вертикальная пластина; 2 – ривулет; 3 – берега из фторопластовой пленки; 4 – лазер; 5 – лазерный нож; 6 – CCD-камера для регистрации поля толщины методом ЛИФ; 7 – CCD-камера для съемки поля маркеров, метод PIV; 8 – оранжевые светофильтры (α – краевой угол ривулета; β – угол наблюдения для диагностики методом ЛИФ; γ – угол наблюдения для диагностики методом PIV)

По прозрачной пластине 1 стекает волновой ривулет 2 с гидрофобными берегами 3

толщиной 10 мкм. Лазер 4 оборудован насадкой, формирующей лазерный нож 5, толщиной 0,8 мм и углом раскрытия 30° . Лазерный нож освещает ривулет вдоль течения в центральном сечении, там, где толщина слоя жидкости максимальна. С использованием камеры 6 методом ЛИФ в области, освещенной лазером, осуществляется регистрация поля толщин. Угол наблюдения камеры ЛИФ β выбирается минимально возможным для конкретной компоновки системы. Подробное описание метода ЛИФ применительно к исследованию ривулетного течения приведено в [12]. Камера 7 служит для съемки поля трассеров с последующим определением поля скорости жидкости методом PIV. Камеры оборудованы оранжевыми светофильтрами 8, подавляющими отраженное и рассеянное лазерное излучение.

Для реализации измерений методами PIV и ЛИФ в рабочей жидкости растворялся флуоресцентный краситель родамин 6Ж в концентрации 0,05 мг/л. В качестве трассеров для метода PIV использовались окрашенные родамином 6Ж полиамидные частицы диаметром $d = 5\div 15$ мкм с плотностью, близкой к плотности рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор глицерина с кинематической вязкостью $\nu = 3,92 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, плотностью $\rho = 1130 \text{ кг}/\text{м}^3$ и поверхностным натяжением $\sigma = 0,07 \text{ кг}/\text{с}^2$.

В работе использовалась измерительная система «Полис», оснащенная двойным лазером Nd:YAG с энергией импульса 50 мДж при длине волны излучения 532 нм, процессором управления системой и обработкой данных «Полис-3», двумя специализированными цифровыми CCD-камерами «Kodak Megaplug ES 1.0», позволяющими работать в режиме двойного кадра, с разрешением 1008×1018 пикселей и программным пакетом «ActualFlow 1.17.2.11». Пакет использовался для управления системой измерения и расчета полей скорости методом PIV, а также их фильтрации и интерполяции. Расчет мгновенных полей скорости проводился с применением стандартного кросс-корреляционного алгоритма с разрешением 8×64 пикселей и 50 % перекрытием [9]. Измерение поля толщины в режиме двойного кадра с известной временной задержкой позволяло определять как форму, так и фазовую скорость волн C .

Для достаточного разрешения поля скоростей по глубине ривулета камера PIV должна располагаться под большим углом γ , при этом изображение наблюдаемой области будет сжиматься в поперечном направлении. Коэффициент сжатия изображения k зависит от γ и коэффициентов преломления жидкости и стекла и может быть рассчитан на основе законов геометрической оптики. Однако в условиях эксперимента удобнее определять коэффициент сжатия опытным путем. Для этого в плоскости сечения ривулета лазерным ножом устанавливалась погруженная в рабочую жидкость стеклянная пластинка с нанесенной микрометрической сеткой, которая фотографировалась при нескольких значениях γ . В результате для проведения экспериментов было выбрано значение $\gamma = 35^\circ$, при котором $k = 2,92$. Съемка камерой ЛИФ осуществлялась с пространственным разрешением 84,3 мкм/пиксель, а камерой PIV – 5,3 мкм/пиксель.

Последовательные этапы определения границы волнового ривулета в его центральном сечении методом ЛИФ представлены на рис. 3. Полученные методом ЛИФ мгновенные профили волнового ривулета использовались для маскирования изображений камеры PIV, после чего выполнялись операции удаления светящегося фона, образованного флуоресцентным свечением ра-

бочей жидкости, и увеличения контрастности изображения. Процедура предварительной подготовки изображений, полученных камерой PIV, к последующему расчету полей скорости представлена на рис. 4.

Для получения статистических данных о поле скорости в определенной фазе применялся метод фазового осреднения. Частота опроса PIV системы задавалась отличной от частоты возбуждения волн на поверхности ривулета F на $0,05F$. Полученные снимки полей трассеров распределялись в группы изображений с близкими по значению фазам волн. Для каждой из групп строилось поле скорости жидкости. Статистически осредненное поле скорости рассчитывалось по 30–50 мгновенным реализациям. Окончательно в соответствии с полученным при калибровке оптической системы коэффициентом сжатия $k = 2,92$ проводилась корректировка осредненного поля скорости.

Результаты измерений

Как было показано в [12], отличие волновой картины при ривулетном течении от случая пленочного течения наблюдается при низких частотах возбуждения волн, когда на поверхности ривулетов развиваются волны большой амплитуды, близкие по форме к ступеньке с крутым передним и очень по-

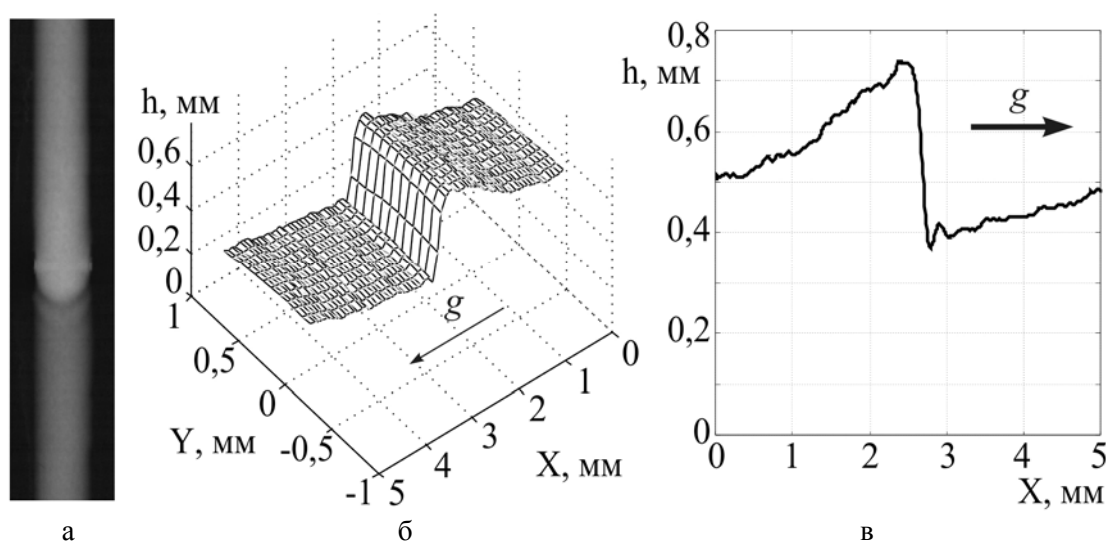


Рис. 3. Определение границы волнового ривулета методом ЛИФ: а – первичное изображение ЛИФ; б – реконструированная свободная поверхность ривулета в окрестности его центрального сечения; в – продольный профиль волны в центральном сечении ривулета

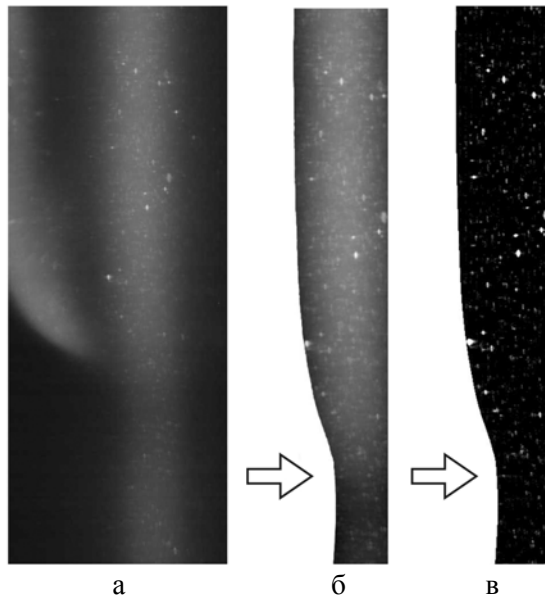


Рис. 4. Процедура предварительной подготовки снимка камеры PIV: *a* – исходный снимок; *б* – маскирование изображения с использованием профиля волны, полученного методом ЛИФ; *в* – удаление фона и увеличение контрастности изображения

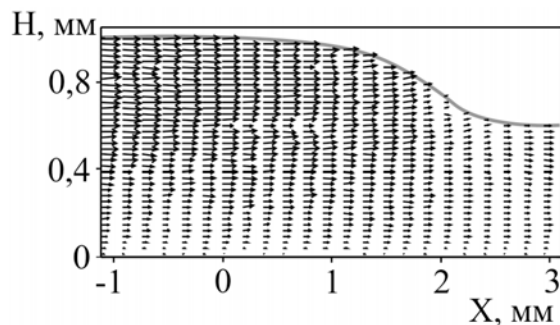


Рис. 5. Поле скорости в окрестности переднего фронта волны: $Q = 1,8$ мл/с; $Re = 97$; $\alpha = 12,6^\circ$; $F = 12$ Гц; $C = 0,8$ м/с

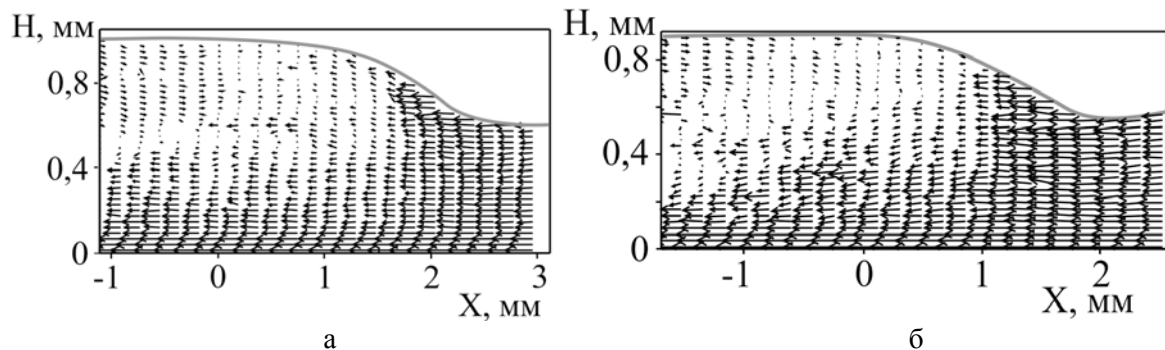


Рис. 6. Поле скорости в окрестности переднего фронта волны в системе отсчета, движущейся со скоростью волны: *a* – $Q = 1,8$ мл/с, $Re = 97$, $\alpha = 12,6^\circ$, $F = 12$ Гц, $C = 0,8$ м/с; *б* – $Q = 0,8$ мл/с, $Re = 46$, $\alpha = 9,8^\circ$, $F = 4$ Гц, $C = 0,73$ м/с

логим задним фронтами. Для таких волн следует ожидать сильного отклонения профиля течения жидкости от параболического профиля, часто используемого при моделировании пленочных течений [3]. По этой причине основное внимание уделялось исследованию полей скорости течения жидкости в волновых ривулетах при низких частотах возбуждения волн.

Волны ступенчатой формы наблюдались на ривулетах разной ширины в достаточно широком диапазоне расходов жидкости Q при частотах возбуждения F от 0,5–1,0 до 25–30 Гц. При больших частотах развивались волны малой амплитуды, имевшие форму, близкую к синусоидальной. При отсутствии внешнего возбуждения наблюдалось устойчивое течение гладких (безволновых) ривулетах. В этом случае форма свободной поверхности ривулета в поперечном сечении является дугой окружности, а краевой угол α определяется из выражения $\text{tg} \alpha = 2Hb/(b^2 - H^2)$, где b – полуширина ривулета, а H – толщина безволнового ривулета в его центральном течении, измеренная методом ЛИФ. Число Рейнольдса ривулета определялось как $Re = gH^3/(3\nu^2)$.

Измерения показали, что поля скорости течения жидкости при низких частотах возбуждения волн имеют практически одинаковую структуру при разных расходах жидкости и разной ширине ривулетах. Эта структура заметно отличается от той, что наблюдалась в случае развитых волн на поверхности ривулета, стекающего по нижней части наклонного цилиндра, где в области горба волны наблюдалось ярко выраженное вихревое движение [10].

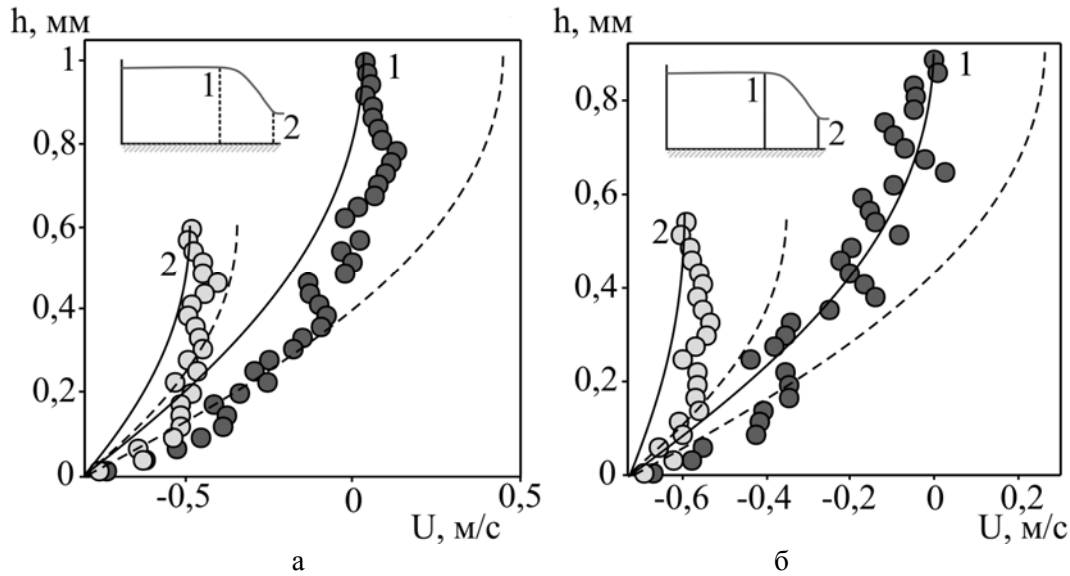


Рис. 7. Профили продольной компоненты скорости в сечениях, проходящих через максимум волны (сечение 1) и минимум капиллярного предвестника (сечение 2): а – $Q = 1,8$ мл/с, $Re = 97$, $\alpha = 12,6^\circ$, $F = 12$ Гц, $C = 0,8$ м/с, координата минимума предвестника $X = 2,75$ мм; б – $Q = 0,8$ мл/с, $Re = 46$, $F = 4$ Гц, $\alpha = 9,8^\circ$, $C = 0,73$ м/с, координата минимума предвестника $X = 2$ мм

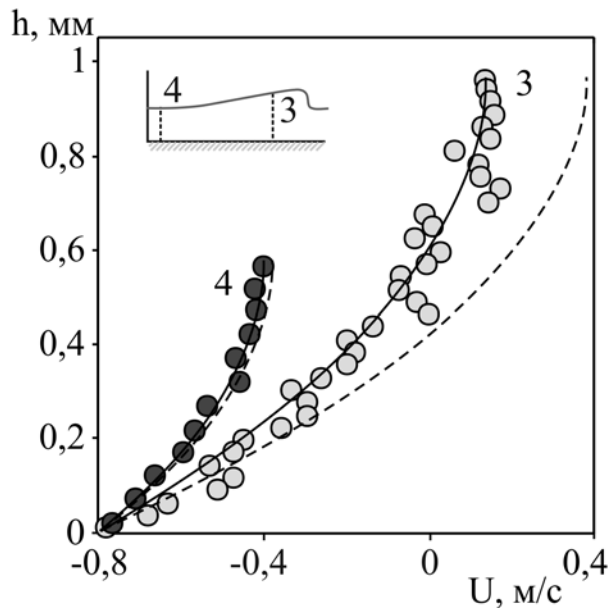


Рис. 8. Профили продольной компоненты скорости U в сечениях заднего фронта волны: $Q = 1,8$ мл/с; $Re = 97$; $\alpha = 12,6^\circ$; $F = 12$ Гц; $C = 0,8$ м/с

Характерный вид поля скорости в окрестностях переднего фронта низкочастотной волны при разных расходах жидкости и ширине ривулета 7 мм приведен на рис. 5, 6. Координате $X = 0$ соответствует положение максимума волны. Как видно из рис. 6, в системе отсчета, движущейся со скоростью волны, под гребнем волны наблюдается застойная область со слабо выраженным стохастическим движением жидкости.

Подобная картина наблюдалась при низких частотах возбуждения для всех исследованных режимов течения ривулета в диапазоне $40 < Re < 200$. Протяженность

застойной области не имела выраженной зависимости от Re и F и составляла 2,5–3,5 мм.

Профили скорости жидкости, характерные для различных областей низкочастотных волн, приведены на рис. 7, 8. Там же для соответствующих сечений сплошными линиями показаны автомодельные параболические профили, построенные по максимальной толщине ривулета H_{max} и измеренной поверхностной скорости жидкости U_0 :

$$U = 2U_0 \left[\frac{y}{H_{max}} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{H_{max}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Пунктирными линиями показаны профили, построенные по формуле Нуссельта для ламинарного пленочного течения:

$$U = \frac{gH_{\max}^2}{\nu} \left[\frac{y}{H_{\max}} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{H_{\max}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Как видно, наибольшие отклонения измеренных профилей скорости от параболических наблюдаются в области капиллярного предвестника и в застойной области под гребнем волны (рис. 7).

Характерные профили для заднего фронта волны и остаточного слоя жидкости приведены на рис. 8. На расстоянии 2–3 мм за максимумом волны профиль скорости хорошо описывается автомодельным профилем (1), а на расстоянии 5–6 мм близок к профилю, описываемому формулой Нуссельта (2).

Заключение

С использованием полевых методов PIV и ЛИФ проведено взаимодополняющее измерение полей толщины и полей скорости течения жидкости в волновых ривулетах, стекающих по вертикальной пластине.

При низких частотах возбуждения волн, под их гребнями наблюдается застойная область, в которой жидкость движется со скоростью волны. Протяженность застойной области не имеет выраженной зависимости от режимных параметров течения и составляет 2,5–3, 5 мм.

Получены профили продольной компоненты скорости течения жидкости в различных частях волны. Наибольшие отклонения профилей скорости от автомодельных параболических профилей наблюдаются в области капиллярного предвестника и в застойной области под гребнем волны.

Список литературы

1. Johnson M. F. G., Schluter R. A., Miksis M. J. *et al.* Experimental Study of Rivulet

Formation on an Inclined Plate by Fluorescent Imaging // *J. Fluid Mech.* 1999. Vol. 394. P. 339–354.

2. Kim H., Kim J., Kang B. H. Meandering Instability of a Rivulet // *J. Fluid Mech.* 2004. Vol. 498. P. 245–256.

3. Алексеенко С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. 256 с.

4. Young G. W., Davis S. H. Rivulet Instabilities // *J. Fluid Mech.* 1987. Vol. 176. P. 1–31.

5. Doniec A. Flow of a Laminar Liquid Film down a Vertical Surface // *Chem. Eng. Sci.* 1988. Vol. 43. No. 4. P. 847–854.

6. Kuibin P. A. An Asymptotic Description of the Rivulet Flow Along an Inclined Cylinder // *Russian J. Eng. Thermophys.* 1996. Vol. 6. P. 33–45.

7. Geshev P. I., Kuibin P. A. Waves on Rivulet Flow Along Inclined Cylinder // *Proc. of 9th Int. Conf. Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow.* 1995. Vol. 9. Pt 2. P. 996–1006.

8. Alekseenko S. V., Markovich D. M., Shtork S. I. Wave Flow of Rivulets on the Outer Surface of an Inclined Cylinder // *Phys. Fluids.* 1996. Vol. 8. P. 3288–3299.

9. Raffel M., Willert C. E., Wereley S. T. *et al.* Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Springer, 1998. 460 p.

10. Alekseenko S. V., Antipin V. A., Bobylev A. V. *et al.* Application of PIV to Velocity Measurements in a Liquid Film Flowing down an Inclined Cylinder // *Exp. Fluids.* 2007. Vol. 43. No. 2–3. P. 197–207.

11. Liu J., Paul J. D., Gollub J. P. Measurement of the Primary Instabilities of Film Flow // *J. Fluid Mech.* 1993. Vol. 250. P. 69–101.

12. Алексеенко С. В., Бобылев А. В., Гузанов В. В. и др. Регулярные волны на вертикально стекающих ривулетах при разных углах смачивания // *Теплофизика и аэромеханика.* 2010. Т. 17, № 3. С. 371–384.

Материал поступил в редколлегию 11.06.2013

A. V. Bobylev, D. M. Markovich, S. M. Kharlamov

INVESTIGATION OF THE VELOCITY FIELD IN THE WAVE RIVULET FLOWING DOWN THE VERTICAL PLATE

Joint measurements of thickness and fluid velocity in wavy rivulets were performed using PIV and LIF methods. The stagnant regions in which fluid moves with the velocity of the waves were found under the humps of low-frequency high-amplitude waves. The profiles of longitudinal velocity of the fluid were reconstructed for different regions of the waves. These profiles greatly deviate from self-similar parabolic profiles in the stagnant regions and in the regions of capillary precursor of the waves.

Keywords: rivulet flow, regular waves, laser-induced fluorescence, velocity field.