

03.1

## Волновая структура пленок жидкости при переходе к турбулентному режиму течения

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

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: bobylev@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 25 февраля 2019 г.

В окончательной редакции 25 апреля 2019 г.

Принято к публикации 25 апреля 2019 г.

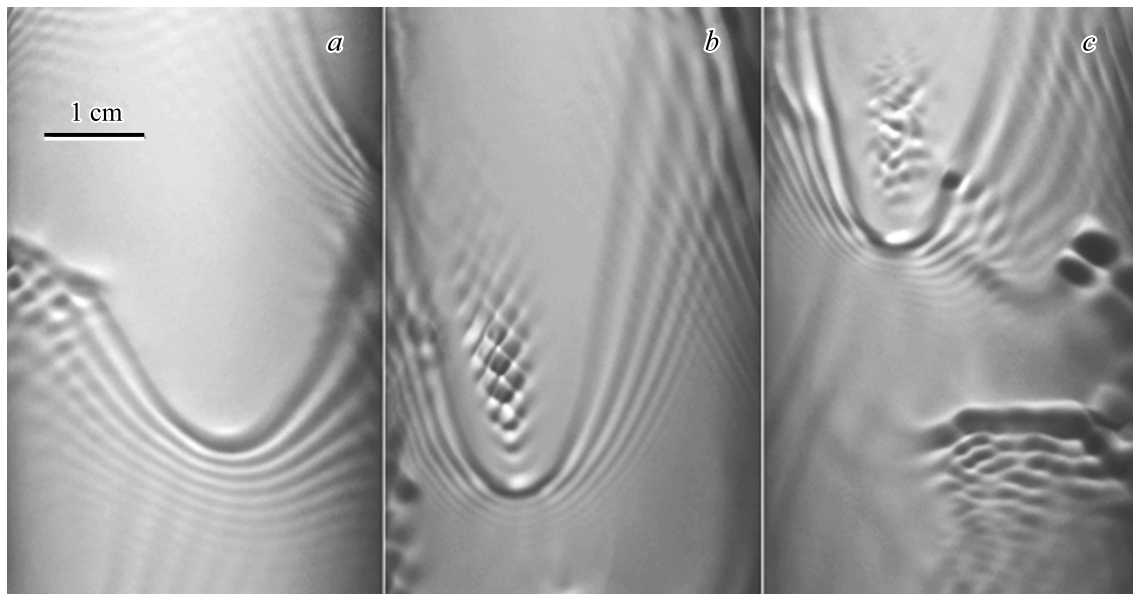
Приводятся результаты экспериментального исследования волн на поверхности вертикально стекающей пленки жидкости в диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения  $80 < Re < 420$ . Эксперименты проводились с использованием полевых оптических методов диагностики с высоким пространственным и временным разрешением. На гребнях крупных трехмерных волн зафиксирована генерация капиллярной ряби с малой длиной волны. Как отмечается в литературе, именно в этих областях трехмерных волн наблюдаются так называемые „пятна турбулентности“, с появлением которых связывается переход к турбулентному режиму течения. Также зарегистрированы долгоживущие округлые впадины с характерными поперечными размерами 1–3 мм, которые формируются в области взаимодействия капиллярных предвестников и затем распространяются как независимые структурные элементы течения.

**Ключевые слова:** стекающая пленка жидкости, 3D-волны, турбулентное течение, лазерно-индуцированная флуоресценция.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.15.48078.17754

По современным представлениям для вертикально стекающих пленок жидкости плавный переход от ламинарного волнового к турбулентному волновому режиму течения происходит в диапазоне чисел Рейнольдса  $100 < Re < 400$  [1]. Здесь  $Re = q/\nu$ ,  $q$  — удельный объемный расход жидкости,  $\nu$  — кинематическая вязкость. Как правило, в промышленных установках, где встречается пленочное течение, реализуются режимы, которые соответствуют диапазону  $Re$  от 50 до 1000 [2]. Таким образом, особенности переходных к турбулентности режимов течения должны оказывать существенное влияние на эффективность работы технологического оборудования. В то же время волновые характеристики пленок жидкости в переходных режимах исследованы недостаточно подробно, что связано с техническими ограничениями методов измерения и сложной трехмерной (3D) волновой структурой течения. Использование полевых методов измерения предоставляет большие возможности для исследования трехмерных волновых режимов пленочного течения и соответственно позволяет уточнить существующую классификацию режимов течения в зависимости от числа Рейнольдса и геометрических параметров задачи. В настоящее время с использованием широко применяемого метода теневых визуализаций наряду с методами локальных измерений подробно описаны двумерные (2D) режимы течения в различной геометрии, в том числе и на вертикально стекающей пленке [1]. С применением полевого метода флуоресцентной визуализации и его модификации — метода лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) — исследованы сценарии перехода от 2D- к 3D-волновым режимам течения пленок для случаев наклонной и

вертикальной пластины [3,4]. С использованием полевых методов измерений в ряде работ [5–7] получена детальная информация о различных структурных элементах волновых полей и проведена классификация 3D-волновых режимов течения для чисел Рейнольдса  $Re < 100$ . Вместе с тем в литературе можно найти совсем немного экспериментальных работ, в которых полевыми методами исследуется волновая структура пленки при переходе к турбулентному режиму течения. Одной из таких публикаций является работа [5], в которой исследовались волновые режимы течения на вертикально стекающей пленке жидкости при  $27 < Re < 200$ . В [5] при  $Re > 70$  методом флуоресцентной визуализации на гребнях крупных 3D-волн были обнаружены области оптической засветки, которые авторы объясняют наличием в этих областях „пятен турбулентности“, где за счет турбулизации пленки ее поверхность имеет большие углы наклона по отношению к стенке канала, что и приводит к засветкам в использованной авторами компоновке измерительной системы. Частота появления пятен засветки, их количество и размеры растут с увеличением числа Рейнольдса. Авторы [5] использовали компоновку оптической системы, при которой возбуждение и регистрация флуоресценции осуществляются со стороны прозрачной стенки, по противоположной стороне которой стекает пленка. При такой компоновке засветка возникает из-за фокусировок отраженного света под волновой поверхностью пленки и в тех областях, где наклон свободной поверхности пленки приближается к углу полного внутреннего отражения или превосходит его. Из-за ограничений метода флуоресцентной визуализации в данной компоновке волновая структура этих



**Рис. 1.** Теневые снимки трехмерных волн в области установившегося течения на расстоянии 80 см от распределителя, ВГР. *a* — 3D-волна с гладким гребнем при  $Re = 80$ , *b* — ячеистая структура на поверхности 3D-волны при  $Re = 190$ , *c* — размывание ячеистой структуры при  $Re = 220$ .

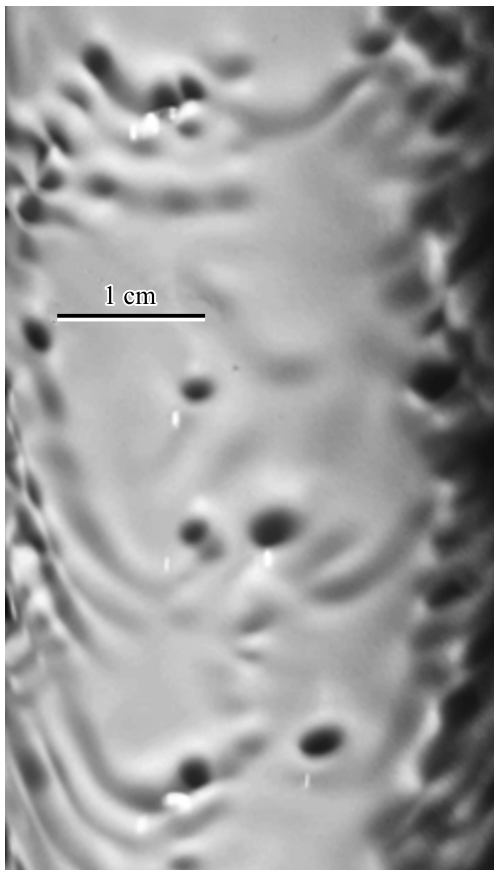
пятен остается неисследованной, а области засветки считаются участками турбулентного течения, с появлением и дальнейшим ростом которых начинается переход к турбулентному пленочному течению [5,8]. В связи с этим возникает вопрос об исследовании волновой структуры „пятен турбулентности“ с использованием оптической схемы измерения, позволяющей разрешить мелкокомасштабные элементы волновой поверхности пленки жидкости. Задачей настоящей работы является экспериментальное исследование волновой поверхности пленки в переходных к турбулентному режимам пленочного течения, в которых наблюдаются „пятна турбулентности“.

Эксперименты проводились на прозрачной вертикальной пластине размером  $45 \times 140$  см (детальное описание установки можно найти в [7]) и внешней поверхности вертикального цилиндра диаметром 60 мм и высотой 150 см. Исследовались режимы пленочного течения с естественной волновой эволюцией на воде и 25% водоглицериновом растворе (ВГР) с плотностью  $\rho = 1.06 \text{ g/cm}^3$  и  $\nu = 1.7 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$  в диапазоне чисел Рейнольдса  $80 < Re < 420$ . В работе применялись скоростные полевые методы ЛИФ и теневой визуализации [7]. С их помощью были получены общие картины течения по всей длине рабочего участка (теневой метод) и локальные распределения толщины волновой пленки жидкости в областях размером от  $4 \times 13$  до  $15 \times 15$  см с разрешением 0.13 мм на пиксель на расстояниях до 1.4 м от щелевого пленкоформирователя (методом ЛИФ). Во всех случаях съемка течения осуществлялась скоростной камерой с частотой 1 kHz, временем экспозиции 1 ms и длительностью 2 s, что позволило наблюдать в динамике особенности волновой эволюции

исследованных режимов. При использовании метода ЛИФ в рабочей жидкости растворялся Родамин 6Ж в количествах 20–30 mg/l, флуоресценция которого возбуждалась непрерывным лазером зеленого цвета. В отличие от [5] освещение и регистрация осуществлялись со стороны свободной поверхности пленки, что позволило избавиться от ряда причин, приводящих к засветке полученных изображений. При использованной нами компоновке измерительной системы не возникает случаев полного внутреннего отражения света внутри пленки жидкости, а фокусировки под волновой поверхностью пленки происходят на расстояниях, в 7–8 раз больших, чем в работе [5], что позволяет без существенных искажений разрешить мелкокомасштабную структуру, возникающую на гребнях больших волн.

Сопоставление волновых картин течения для случаев пластины и цилиндра показало, что тип рабочего участка не влияет на волновую структуру течения. Незначительные различия в волновых режимах течения для случаев воды и ВГР выражаются главным образом в том, что одинаковые режимы реализуются при более высоких значениях числа Рейнольдса для ВГР ( $\Delta Re \approx 20$ ).

Появление новых структурных элементов волновой картины по сравнению с описанными в [7] становится заметным при  $Re \approx 150$ . Хотя при увеличении числа Рейнольдса основным элементом волновой структуры по-прежнему являются хаотично взаимодействующие друг с другом 3D-волны, при  $150 < Re < 220$  начинает меняться сам вид этих волн. Если при меньших  $Re$  все гребни 3D-волн остаются гладкими (рис. 1, *a*), то при увеличении  $Re$  появляются 3D-волны, основной гребень которых покрыт капиллярной рябью (рис. 1, *b*).



**Рис. 2.** Система глубоких впадин на поверхности пленки, возникшая в результате взаимодействия капиллярных предвестников трехмерных волн, ВГР,  $Re = 220$ .

Капиллярная рябь на поверхности 3D-волн возникает, как правило, вследствие их взаимодействия с малыми возмущениями на остаточном слое. После возникновения такая рябь, имеющая регулярную полосчатую или ячеистую структуру с длиной волны 1–2 мм, быстро захватывает большую часть волны и смещается к ее заднему склону, одновременно затухая. Время жизни ряби составляет несколько сотых долей секунды. После ее затухания гребень волны становится гладким. Максимальная амплитуда капиллярной ряби зафиксирована на уровне 0.25 мм при характерном значении толщины пленки в гребне волны 0.9–1.1 мм для режимов в области  $Re \sim 200$ . При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса капиллярные структуры на гребнях 3D-волн начинают терять регулярность (рис. 1, *c*). Их максимальная амплитуда снижается до 0.1 мм. Одновременно появляется все больше волн, взаимодействие которых с возмущениями на остаточном слое или между собой происходит настолько часто, что капиллярная рябь от предыдущего возмущения не успевает затухнуть. В результате поверхность таких волн оказывается покрытой хаотической рябью и принимает вид областей, занятых турбулентным движением жидкости. На фоне капил-

лярных предвестников, захватывающих большие участки поверхности гладкой пленки между большими волнами, эти области не выделяются при спектральной обработке: они вносят небольшой вклад в тех же областях спектра, что и волны капиллярного предвестника.

По достижении режимов  $Re > 400$  поверхность подавляющей части трехмерных волн покрыта хаотической капиллярной рябью, которую можно считать признаком перехода к гидродинамической турбулентности.

Интересной особенностью в исследованном диапазоне  $Re$  также является образование системы углублений округлой формы — „кратеров“ с поперечными размерами 1–3 мм (рис. 2), возникающих в областях взаимодействия капиллярных предвестников соседних 3D-волн. После образования такие структуры движутся по остаточному слою как независимые элементы и исчезают в процессе взаимодействия при встрече с 3D-волной. Характерное время жизни „кратеров“ составляет 0.1 с. По данным ЛИФ-измерений толщина пленки в их центре на 0.2–0.3 мм меньше, чем в окружающей жидкости.

Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает, что переход к обычной гидродинамической турбулентности при пленочном течении жидкости может начинаться с генерации высокочастотной капиллярной ряби на поверхности отдельных трехмерных волн. Что касается другого типа мелкомасштабных структур — „кратеров“ с пониженной толщиной остаточного слоя, то их влияние на волновые процессы неочевидно. С одной стороны, они являются дополнительным источником возмущений, приводящих к возникновению капиллярной ряби на крупных волнах. С другой стороны, их количество хотя и возрастает с числом Рейнольдса, но остается в исследованном диапазоне расходов довольно малым по сравнению с другими источниками возмущений. Возможно, их роль проявится при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-01-00682).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Алексеев С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. 256 с.
- [2] Mukhopadhyay S., Chhay M., Ruyer-Quil C. Modelling transitional falling liquid films // 23 Congress Francais de Mecanique. Lille, France, 2017. 9 p.
- [3] Liu J., Schneider J.B., Gollub J.P. // Phys. Fluids. 1995. V. 7. N 1. P. 55–67.

- [4] *Kharlamov S.M., Guzanov V.V., Bobylev A.V., Alekseenko S.V., Markovich D.M.* // *Phys. Fluids*. 2015. V. 27. N 11. P. 114106.
- [5] *Adomeit P., Renz U.* // *Int. J. Multiphase Flow*. 2000. V. 26. N 7. P. 1183–1208.
- [6] *Park C.D., Nosoko T.* // *AIChE J.* 2003. V. 49. N 11. P. 2715–2727.
- [7] *Guzanov V.V., Bobylev A.V., Hienz O.M., Kharlamov S.M., Kvon A.Z., Markovich D.M.* // *Int. J. Multiphase Flow*. 2018. V. 99. P. 474–484.
- [8] *Demekhin E.A., Kalaidin E.N., Kalliadasis S., Vlaskin S.Y.* // *Phys. Fluids*. 2007. V. 19. N 11. P. 114103.