

С. В. Исаенков¹, А. В. Черданцев^{1}*

Управление крупными волнами на поверхности турбулентных стекающих пленок жидкости

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: cherdantsev@itp.nsc.ru

Аннотация. В работе рассматривается возможность управления волновой структурой пленок жидкости, стекающих по внутренней стенке вертикальной трубы диаметром 20 мм при высоких числах Рейнольдса на больших расстояниях от входа в канал. Управление осуществлялось путем наложения гармонических пульсаций расхода жидкости заданной частоты и амплитуды на входе в канал. Эффект воздействия определялся при помощи метода лазерно-индуцированной флуоресценции, основанного на измерении яркости. Показано, что воздействие возможно в достаточно узком диапазоне частот (до 10 Гц), который расширяется при увеличении расхода жидкости. Тем не менее, перестройка структуры потока сохраняется на расстоянии 180 см от входа. По характеристикам возбужденные волны напоминают волны возмущения в кольцевом газожидкостном течении, однако волн быстрой ряби на их поверхности не наблюдается.

Ключевые слова: стекающие пленки жидкости, крупные волны, управление потоком, лазерно-индуцированная флуоресценция

S. V. Isaenkov¹, A. V. Cherdantsev^{1}*

Controlling Large Waves on Turbulent Falling Liquid Films

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: cherdantsev@itp.nsc.ru

Abstract. In this paper we considered possibility of controlling the wave flow of liquid films flowing down the inner surface of a 20-mm vertical pipe under large Reynolds numbers at large distances from the inlet. The control is carried out by applying periodic pulsations of liquid flow rate with preset frequency and amplitude at the inlet. The effect of flow pulsations was investigated using brightness-based laser-induced fluorescence technique. The control is possible within a relatively narrow range of frequencies (up to 10 Hz), which expands as liquid flow rate is increased. Nonetheless, the flow reorganization due to excitation is maintained at the distance of 180 cm from the inlet. The characteristics of the excited waves are reminiscent of the disturbance waves in gas-liquid annular flow. However, they do not generate fast ripples on their surface.

Keywords: falling liquid film, large waves, flow control, laser-induced fluorescence

Введение

Управление волновой структурой пленочных течений при помощи наложенных пульсаций расхода жидкости на входе в канал применялось уже в работах Капицы [1]. Эта процедура позволяет проводить детерминистское исследование волн [2] и исследовать эффект длины волны возмущения на его развитие,

в частности, получая дисперсионные соотношения [3]. Применимость такого подхода к течению пленок с высоким расходом жидкости, а тем более обдуваемых высокоскоростным потоком газа, не очевидна: можно ожидать, что турбулентные пульсации в жидкости и в газе будут способствовать хаотизации возмущения поверхности пленки и разрушать регулярную волновую структуру. До недавнего времени успешных экспериментов по управлению потоком в таких условиях не публиковалось. В работе [4] было выяснено, что управление характеристиками волн возмущения на толстых пленках жидкости, обдуваемых высокоскоростным потоком газа, возможно при достаточно высокой амплитуде пульсаций, а также в пределах сравнительно узкого диапазона частот, близких к частоте «естественных» волн возмущения вдали от входа в канал. Тем не менее, ряд вопросов остался невыясненным. Во-первых, неясно, насколько далеко вниз по потоку сохраняют регулярность возбужденные волны возмущения. Во-вторых, неизвестно, возможно ли создание регулярных долгоживущих крупных волн в отсутствие потока газа. В данной работе описано экспериментальное исследование, выполненное с целью ответить на эти вопросы.

Методы и материалы

Рабочий участок экспериментальной установки представляет собой вертикально установленную оргстеклянную трубу длиной два метра с внутренним диаметром 20 мм. При помощи насоса жидкость подается на внутренние стенки трубы через кольцевой щелевой зазор. Перед входом в распределитель установлено пульсационное устройство на основе катушки переменного тока с сердечником, соединенным с гибкой мембраной. Колебания мембраны создают пульсации расхода. Устройство управляется генератором гармонических сигналов через усилитель, что позволяет контролировать частоту и амплитуду пульсаций расхода.

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода при комнатной температуре. В жидкости растворен флюоресцентный краситель Родамин 6Ж в малой (5 мг/л) концентрации. Эксперименты проводились для чисел Рейнольдса жидкости от 140 до 400; число Рейнольдса определялось как отношение объемного расхода жидкости к периметру канала и кинематической вязкости жидкости. Частота пульсаций изменяется от 0 до 15 Гц.

Измерения проводились методом лазерно-индуцированной флюоресценции. Областью измерений служит продольное сечение канала длиной 35 см, начинающееся на расстоянии 145 см от входа в канал. Это сечение освещается лазерным ножом для возбуждения флюоресцентного свечения. Свечение регистрируется строкой пикселей скоростной камеры, оснащенной светофильтром, отсекающим рассеянный свет лазера. Процедура перевода локальной мгновенной яркости флюоресценции в локальную мгновенную толщину слоя жидкости подробно описана в [5].

В каждый момент времени система регистрирует мгновенный профиль толщины пленки вдоль линии длиной 350 мм с пространственным разрешением 0,34 мм/пиксель. Каждая запись состоит из 25000 таких мгновенных профилей, запи-

санных с частотой 5 кГц. Таким образом, длительность записи составляет 5 секунд.

Результаты

Фрагменты пространственно-временных записей толщины пленки для одного расхода жидкости и разных частот возбуждения приведены на рис. 1 в графической форме: яркость пикселя изображения прямо пропорциональна толщине пленки в соответствующей ячейке матрицы. Черный цвет соответствует нулевой толщине пленки, белый – 2,5 мм и выше. По оси абсцисс отложено расстояние от входа в канал, показан интервал от 145 до 180 см от входа. По оси ординат отложено время, длина фрагмента составляет 1 секунду.

В отсутствие возбуждения пленка покрыта нерегулярными волнами: временной интервал, скорость и амплитуда могут сильно различаться между отдельными волнами. При наложении пульсаций расхода с частотой 3 Гц картина течения перестраивается: волны следуют с регулярным интервалом, имеют близкие значения скорости и амплитуды. Скорость и амплитуда возбужденных волн увеличиваются по сравнению с естественными волнами. Также значительно изменяется остаточный слой жидкости между волнами. Он становится заметно тоньше, а его поверхность покрыта мелкомасштабными волнами медленной ряби, генерируемыми на задних склонах крупных волн и распространяющимися по остаточному слою с низкой скоростью, пока их не поглотит следующая крупная волна. Такие участки встречаются и в отсутствие возбуждения, но они сравнительно редки.

Пульсации на частоте 5 Гц также создают регулярные волны, однако их амплитуда и скорость меньше, чем на частоте 3 Гц. На частотах возбуждения 7 Гц и 10 Гц регулярность возбужденных волн уже не очевидна. Для выработки количественного критерия восприимчивости пленки жидкости к пульсациям данной частоты был проведен спектральный анализ. Каждая пространственно-временная запись состоит из 1024 (по числу задействованных пикселей) временных записей толщины пленки. Ко всем записям было применено быстрое преобразование Фурье, полученные спектры суммировались. Рис. 2 демонстрирует спектры сигнала для записей, фрагменты которых приведены на рис. 1. При длине записи 5 секунд и частоте съемки 5 кГц шаг по частоте составляет 0,2 Гц. Частота Найквиста составляет 2,5 кГц, однако для свободно стекающих пленок жидкости основная энергия содержится в области низких частот. Поэтому на рис. 2 показаны лишь частоты до 30 Гц.

Спектр сигнала без возбуждения имеет несколько пиков в районе 5 Гц. Пики близки по амплитуде, что дает высокую погрешность при измерении частоты следования волн по положению максимума в спектре. При наложении пульсаций частотой 3 Гц в спектре возникает пик на частоте f_0 , амплитуда которого на порядок выше пиков, наблюдаемых без возбуждения. Возбужденные волны с частотой $f_0 = 3$ Гц сильно нелинейны, что проявляется в наличии сильных кратных гармоник основной частоты, прописывающихся в спектре вплоть до 27 Гц, а также полукратных гармоник (от 13,5 до 28,5 Гц). Для $f_0 = 5$ Гц амплитуда основ-

ного пика уменьшается, и в спектре четко выражены лишь две кратные гармоники. Для $f_0 = 7$ Гц, несмотря на кажущееся отсутствие регулярности на пространственно-временной записи (рис. 1), выражен основной пик, однако кратные гармоники очень слабы. При $f_0 = 10$ Гц спектр практически идентичен спектру без возбуждения; выраженные пики отсутствуют.

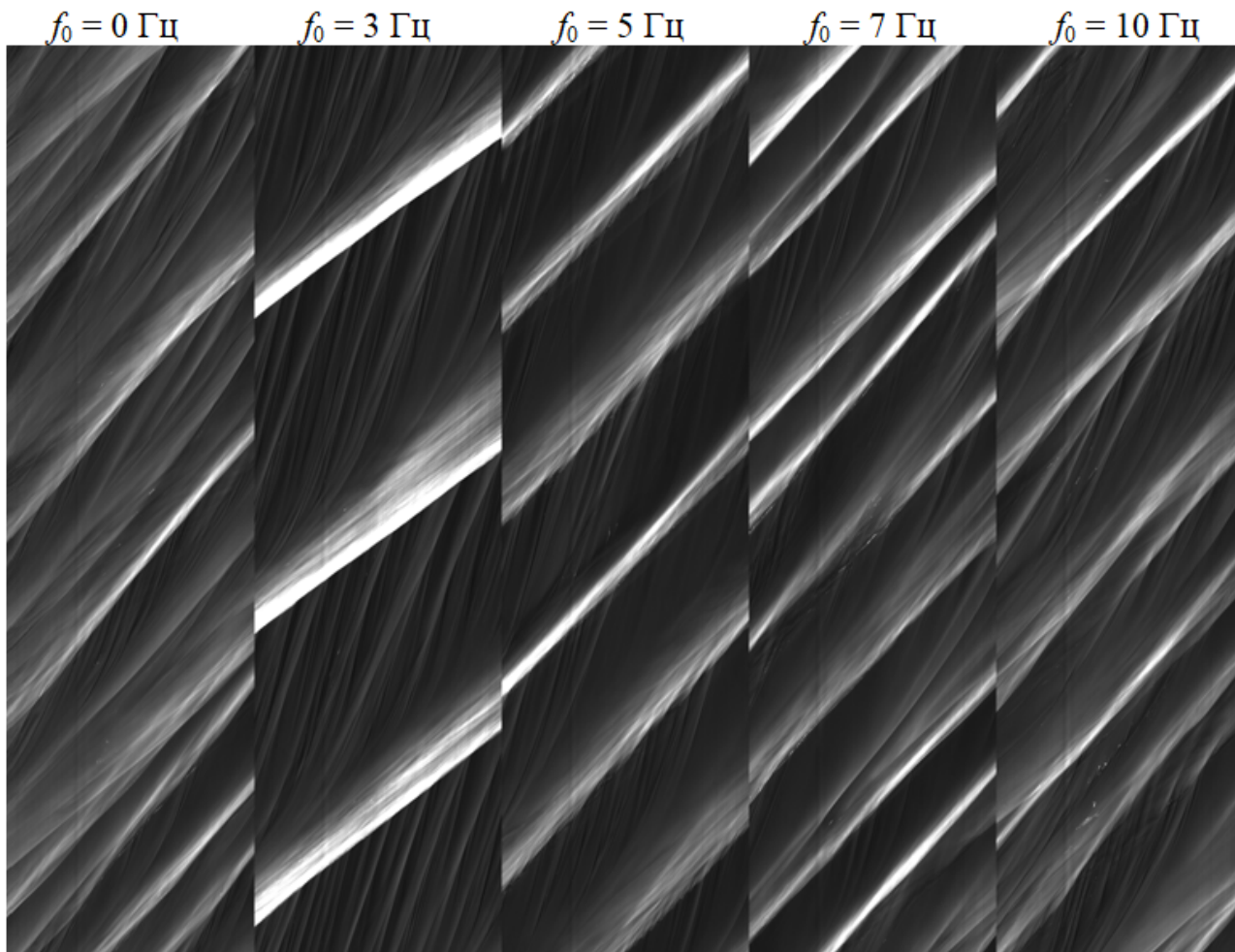


Рис. 1. Пространственно-временные записи толщины пленки жидкости при различной частоте наложенных колебаний. $Re = 300$

Таким образом, управление потоком возможно в достаточно узком диапазоне частот. Анализ пространственно-временных записей и их спектров для других расходов жидкости показывает, что ширина диапазона восприимчивости возрастает с расходом жидкости.

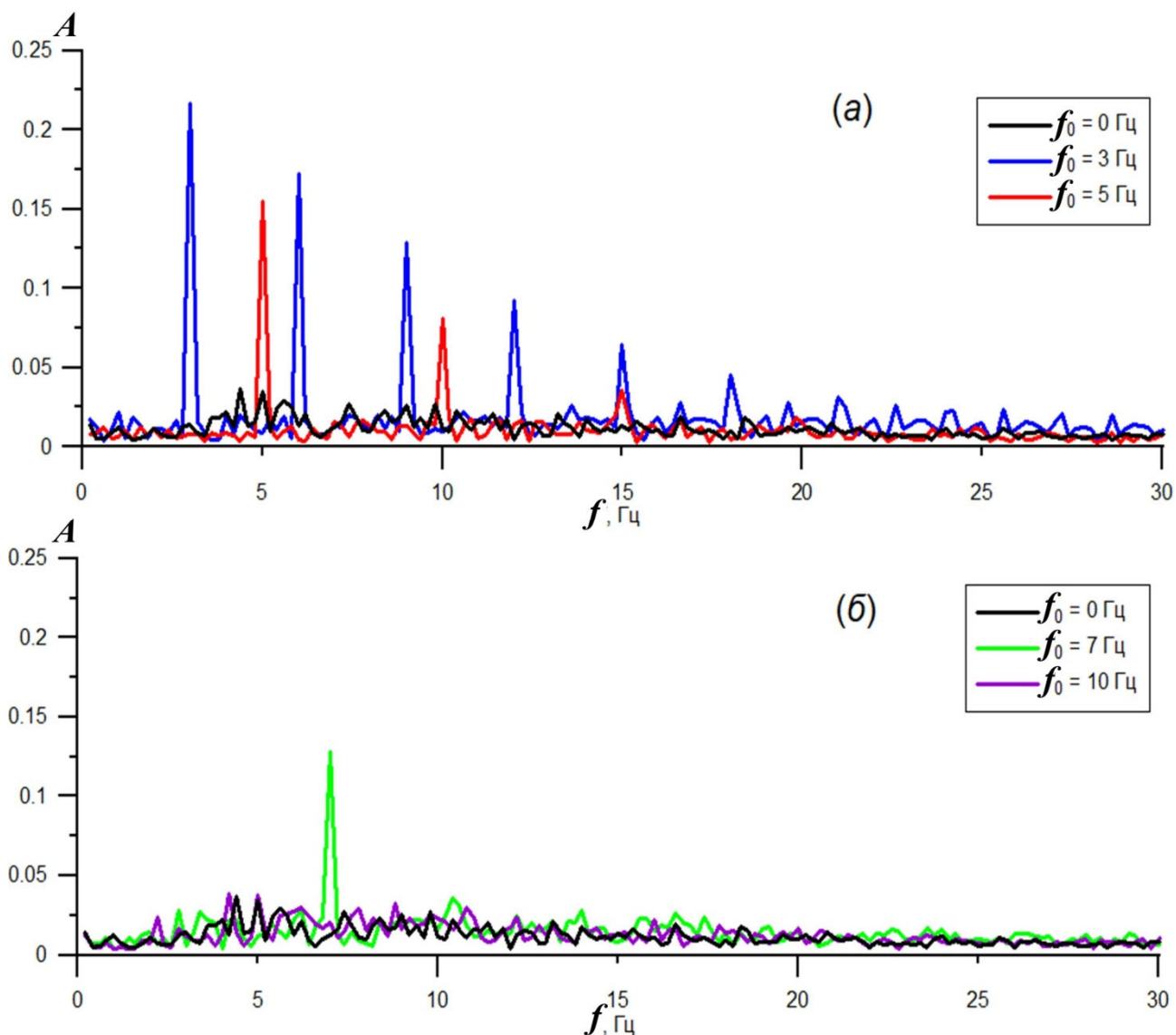


Рис. 2. Спектр записей толщины пленки при разных частотах возбуждения

Отдельный интерес представляет сравнение крупных возбужденных волн с волнами возмущения в дисперсно-кольцевых газожидкостных потоках. Сравнительный визуальный анализ волн на пространственно-временных записях показывает, определенное сходство. Во-первых, в обоих случаях волны разделены тонким остаточным слоем, покрытым волнами медленной ряби, генерируемыми на задних склонах крупных волн. Во-вторых, в обоих случаях поверхность крупных волн не является гладкой. Ключевое различие состоит в том, что рябь на поверхности волн возмущения движется быстрее породившей их волны, а рябь на поверхности крупных волн в отсутствие обдува движется с той же или меньшей скоростью по сравнению с крупной волной.

Заключение

Проведено исследование частотной восприимчивости стекающих пленок жидкости с большим расходом к пульсациям расхода на входе в канал. Методом лазерно-индуцированной флюоресценции получены пространственно-временные записи толщины пленки на расстояниях 145 – 180 см от входа в канал. Показано, что наложение низкочастотных пульсаций расхода приводит к перестройке структуры течения, а именно, появлению регулярных волн с высокой скоростью и амплитудой, а также тонкого остаточного слоя жидкости, покрытого волнами медленной ряби. Количественно восприимчивость определяется наличием выраженного пика в спектре сигнала на частоте возбуждения, а также его кратных гармоник. Ширина диапазона восприимчивости увеличивается с ростом расхода жидкости.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Капица, П.Л., Капица, С.П. (1949). Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости. III. Опытное изучение волнового режима течения. –ЖЭТФ, 19(2). – С. 105–120.
2. Charogiannis, A., An, J. S., & Markides, C. N. (2015). A simultaneous planar laser-induced fluorescence, particle image velocimetry and particle tracking velocimetry technique for the investigation of thin liquid-film flows. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 68, 516–536.
3. Alekseenko, S.V., Aktershev, S.P., Cherdantsev, A.V., Kharlamov, S.M., & Markovich, D.M. (2009). Primary instabilities of liquid film flow sheared by turbulent gas stream. *Int.J. Multiph. Flow*, 35(7), 617–627.
4. Cherdantsev, A.V., Isaenkov, S.V., Cherdantsev, M.V., & Markovich, D.M. (2021). The effect of high-frequency oscillations on the disturbance waves in annular flow. *Int. J. Multiph. Flow*, 143, 103754.
5. Cherdantsev, A., Bobylev, A., Guzanov, V., Kvon, A., & Kharlamov, S. (2023). Measuring liquid film thickness based on the brightness level of the fluorescence: Methodical overview. *Int. J. Multiph. Flow*, 104570.

© С.В. Исаенков, А. В. Черданцев, 2024