

А. В. Бобылев^{1}, В. В. Гузанов¹, А. В. Черданцев¹*

Количественная визуализация перехода к трехмерным волнам на поверхности стекающей пленки жидкости

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

Аннотация. Работа посвящена экспериментальному исследованию развития волновой структуры пленки жидкости, стекающей по вертикальной поверхности под действием силы тяжести. Исследование перехода от двумерных волн к трехмерным проводится на длинной широкой пластине при помощи теневой визуализации течения. Продольная координата области перехода неравномерна в поперечном направлении, но стационарна во времени. Разработан автоматический алгоритм детектирования положения линии перехода в плоскости пластины.

Ключевые слова: стекающие пленки жидкости, трехмерная волновая структура, развитие волн, визуализация

A. V. Bobylev^{1}, V. V. Guzanov¹, A. V. Cherdantsev¹*

Quantitative Visualization of Transition to Three-Dimensional Waves on the Surface of a Falling Liquid Film

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

Abstract. The work is devoted to experimental study of development of wave structure of a liquid film flowing down a vertical surface under the action of gravity. Investigation of transition from two-dimensional to three-dimensional waves is carried out on a long and wide plate using shadow visualization technique. Longitudinal coordinate of the transition area has non-uniform distribution across the transverse direction, but does not change in time. An automatic algorithm for detection the transition line in the plane of the plate is developed.

Keywords: falling liquid film, three-dimensional wave structure, flow development, visualization

Введение

Поверхность тонкой пленки жидкости, стекающей под действием силы тяжести по вертикальной стенке, неустойчива к малым возмущениям [1]. После того, как жидкость покидает щель распределителя, можно выделить несколько этапов эволюции течения:

1) гладкая зона, которая характеризуется отсутствием волн на поверхности пленки, в начальной части которой происходит перестройка профиля скорости и установление толщины пленки;

2) область линейных волн, где развиваются синусоидальные волны; их исходно малая амплитуда экспоненциально растет вниз по течению [2];

3) область нелинейного развития: здесь, по достижении достаточно высокой амплитуды, происходит изменение формы волн и установление их параметров [3];

4) область трехмерных волн [4]: благодаря развитию поперечной неустойчивости двумерные нелинейные волны распадаются на уединенные трехмерные подковообразные волны.

В предшествующих работах [5–6] исследовалась динамика перехода к трехмерным волнам, однако не рассматривался вопрос об условиях, определяющих положение области перехода. Для их изучения требуется проведение экспериментов в широком диапазоне условий, в которых должно быть определено пространственное положение границы между двумерными и трехмерными волновыми режимами. В данной работе предложена процедура автоматического определения смены режимов с использованием простой экспериментальной методики.

Методы и материалы

Рабочий участок экспериментальной установки представляет собой прямоугольную стеклянную пластину размерами 1300 мм на 450 мм, заключенную в алюминиевую раму. Рама закреплена на карданном подвесе и опирается на крепления с варьируемым положением. Такая система позволяет изменять угол наклона пластины к горизонту в широком диапазоне значений. Тестовые эксперименты проводятся при вертикальном положении пластины. Рабочая жидкость подается на пластину через щелевой распределитель, ширина которого равна ширине пластины. Перед проведением экспериментов жидкость закачивается в напорный бак, расположенный на высоте 3 метра выше входа в рабочий участок; из бака жидкость поступает в рабочий участок самотеком. Расход жидкости контролируется поплавковым ротаметром. Для исследования волновых режимов на расход жидкости накладываются периодические пульсации заданной частоты.

Исследования проводятся при помощи скоростной камеры, наблюдающей всю пластину со стороны свободной поверхности жидкости. С той же стороны пластина освещается лампами, создающими тень волновой поверхности пленки на белом экране, расположенном за пластиной. Теневые изображения записываются с частотой 125 Гц. Пространственное разрешение составляет 1,27 мм/пиксель. В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода при комнатной температуре. Число Рейнольдса жидкости (определяемое как отношение объемного расхода жидкости к ширине пластины и кинематической вязкости жидкости), Re , варьируется от 10 до 40, частота наложенных возмущений расхода, f_0 , – от 0 до 30 Гц.

Результаты

Пример мгновенного теневого изображения поверхности пленки представлен на рис. 1(а). В верхней части пластины видны регулярные двумерные горизонтально ориентированные волны, которые ниже по потоку распадаются на ха-

отичные трехмерные волны. Переход от двумерных волн к трехмерным происходит неравномерно по ширине пластины. Максимальная длина области трехмерных волн наблюдается на участке, помеченном штриховой линией. У краев пластины переход происходит ближе к распределителю. При этом положение точки перехода для фиксированной поперечной координаты слабо меняется во времени.

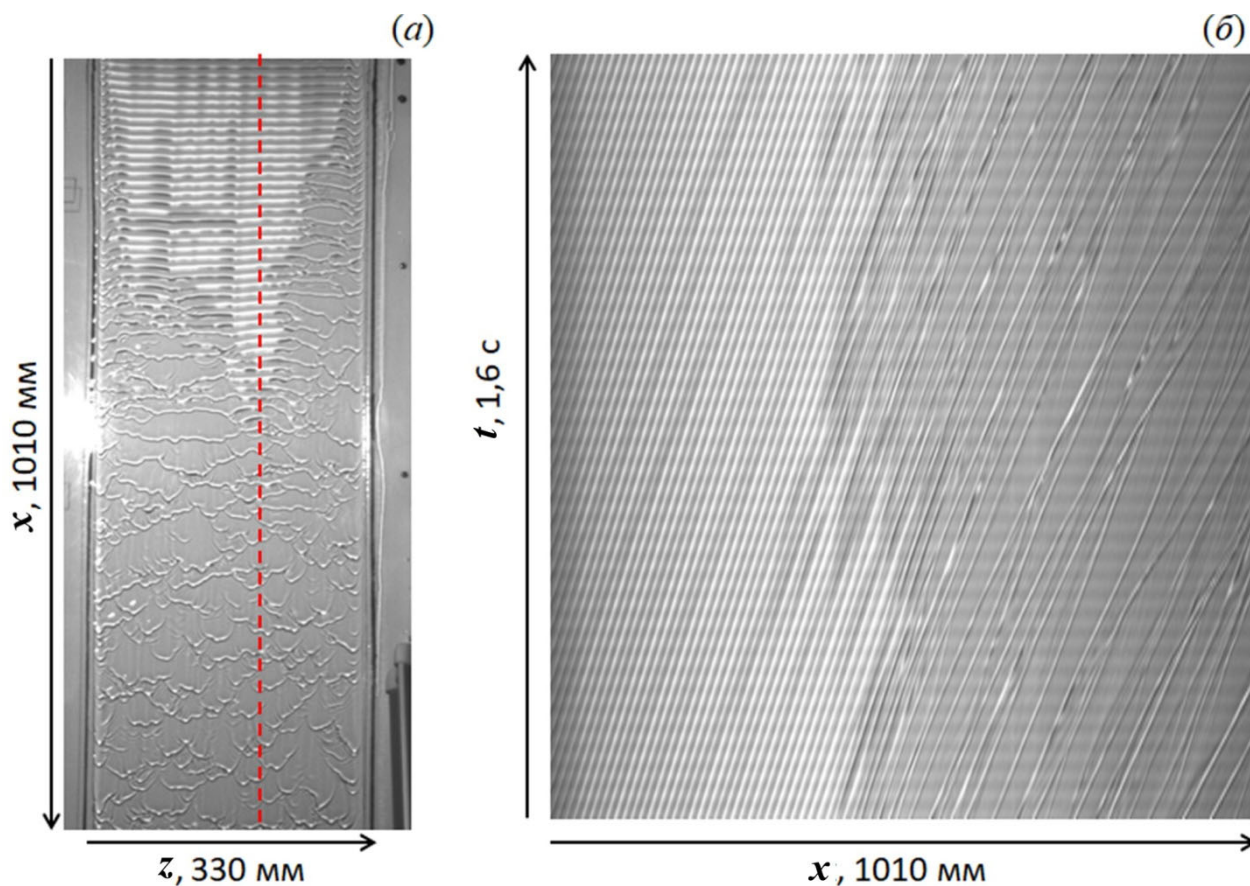


Рис. 1. Развитие волновой картины вниз по потоку, $Re = 18$, $f_0 = 18$ Гц: (а) – мгновенное теневое изображение пластины, (б) – временная развертка вдоль красной штриховой линии на рисунке (а)

На рис. 1(б) представлен пример пространственно-временной эволюции волновой поверхности в продольном сечении, показанном штриховой линией. Диаграмма позволяет проследить, как во времени изменяется положение каждого отдельного возмущения поверхности пленки вдоль линии с фиксированной поперечной координатой z . Скорость распространения возмущений равна тангенсу угла наклона траектории к оси времени. В верхней части пластины волны движутся с регулярным интервалом, высокой частотой следования и постоянной скоростью. При распаде на трехмерные волны (для данного значения поперечной координаты z это происходит примерно в середине пластины) нарушается регулярность волн, и снижается частота следования. При этом возрастает скорость волн, и увеличивается расстояние между волнами.

Хотя данные, полученные методом теневой визуализации, не содержат информации о толщине пленки, на их основе можно измерить ряд волновых характеристик, а также определить положение границы областей существования двумерных и трехмерных волн. Последнее выполняется на основе пространственно-временных записей, полученных для каждого значения координаты z . Процедура обработки таких записей и результат идентификации границы представлены на рис. 2.

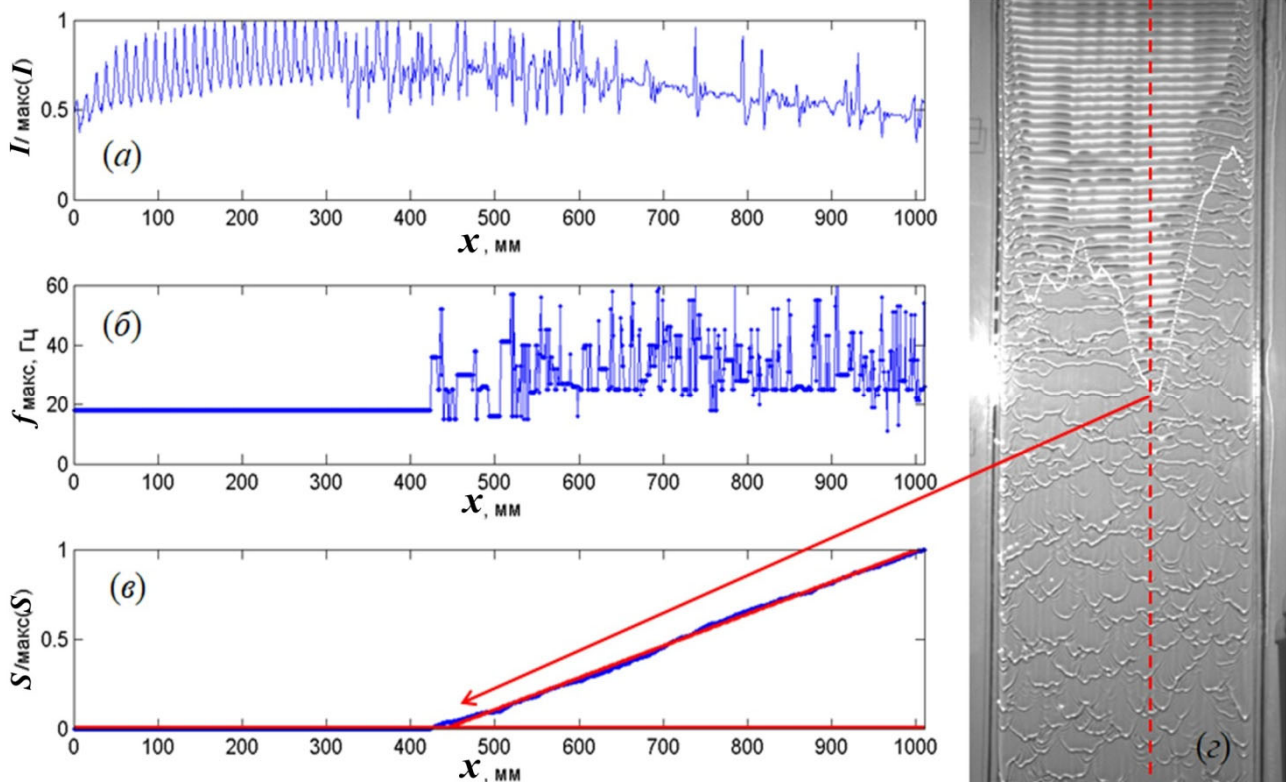


Рис. 2. Обработка пространственно-временных записей: (а) – мгновенный профиль яркости вдоль исследуемого продольного сечения пластины, (б) – частота максимума в спектре временной записи сигнала при данном x , (в) – нормированное кумулятивное отклонение частоты максимума в спектре от частоты возбуждения, (г) – найденная граница между областями двумерных и трехмерных волн (помечена белыми точками)

На рис. 2(а) показан пример мгновенного профиля яркости сигнала вдоль исследуемого продольного сечения пластины, $I(x)$. Положение границы области существования коротких регулярных волн примерно понятно из этой записи, однако для повышения объективности и достоверности результатов обработка будет проводиться во временной области. Для каждого значения x строится запись $I(t)$. Применение быстрого преобразования Фурье позволяет определить основную частоту волн по положению максимума в спектре сигнала, f_{max} . Зависимость $f_{\text{max}}(x)$ представлена на рис. 2(б). Для регулярных волн f_{max} равна частоте наложенных возмущений f_0 . При потере регулярности величина f_{max} испытывает зна-

чительный разброс. Интересно отметить, что, хотя частота следования волн снижается при переходе к трехмерным волнам, частота максимума в спектре сигнала оказывается в целом выше f_0 , что говорит о неприменимости спектральных методов для измерения частоты нерегулярных волн.

Даже на этапе регулярных волн величина f_{\max} может испытывать отдельные отклонения от f_0 . Поэтому для определения режимного перехода требуется критерий с низкой чувствительностью к отдельным отклонениям. В качестве опорной величины для построения такого критерия выбрано кумулятивное отклонение f_{\max} от f_0 для данного x , а именно:

$$S(x) = \sum_{i=1}^x |f_{\max}(i) - f_0|.$$

На рис. 2(в) синей линией показана зависимость $S(x)$, нормированная на полную сумму отклонения по всей длине области. Для определения точки смены режима применяется кусочная аппроксимация зависимости $S(x)$ в виде:

$$S_A(x) = \begin{cases} a, & x < x_0 \\ kx + b, & x > x_0 \end{cases}.$$

Здесь a , k и b – постоянные коэффициенты, зависящие от координаты x_0 . Аппроксимация строится в максимально широком диапазоне величины x_0 . Значение x_0 , при котором суммарное отклонение аппроксимации минимально, соответствует положению границы между двумерными и трехмерными волнами. Аппроксимация для оптимального значения x_0 показана на рис. 2(в) красными линиями.

Результатом такой обработки для каждой комбинации режимных параметров является зависимость $x_0(z)$. На рис. 2(г) эта зависимость наложена на мгновенное теневое изображение пленки жидкости. Положение границы, определяемое в результате обработки данных, хорошо соответствует наблюдаемому визуально.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование области существования двумерных регулярных волн на поверхности стекающей пленки жидкости. При помощи теневой визуализации течения изучена пространственно-временная эволюция волн с расстоянием вниз по потоку. Предложен критерий, позволяющий автоматически определить положение перехода к трехмерным нерегулярным волнам в плоскости пластины. В дальнейшем планируется провести параметрическое исследование области существования регулярных волн в широком диапазоне параметров.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alekseenko, S. V., Nakoryakov, V. E., & Pokusaev, B. G. Wave flow of liquid films. Begell House, New York, 1994.
2. 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.
3. Chang, H. C., & Demekhin, E. A. Complex wave dynamics on thin films. Elsevier, Amsterdam, 2002.
4. Adomeit, P., & Renz, U. (2000). Hydrodynamics of three-dimensional waves in laminar falling films. *Int. J. Multiph. Flow*, 26(7), 1183–1208.
5. Kharlamov, S. M., Guzanov, V. V., Bobylev, A. V., Alekseenko, S. V., & Markovich, D. M. (2015). The transition from two-dimensional to three-dimensional waves in falling liquid films: Wave patterns and transverse redistribution of local flow rates. *Phys. Fluids*, 27(11), 114106.
6. Guzanov, V.V., Bobylev, A.V., Heinz, O.M., Kharlamov, S.M., Kvon, A.Z., & Markovich, D.M. (2018). Characterization of 3-D wave flow regimes on falling liquid films. *Int. J. Multiph. Flow*, 99, 474–484.

© А. В. Бобылев, В. В. Гузанов, А. В. Черданцев, 2024