УДК 532.536

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУМЕРНО-ТРЕХМЕРНОГО ПЕРЕХОДА ВОЛНОВЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНО СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

***Калайдин Е. Н.*[1], *Селин А. С.*[2], *Шапарь С. М.*[3]**

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF 2D–3D TRANSFORMATION OF WAVE STRUCTURES ON THE SURFACE OF VERTICALLY FALLING LIQUID FILMS

Kalaidin E. N., Selin A. S., Shapar S. M.

Experimental investigation of 2D-3D transformation of wave structures on the surface of a falling liquid thin film is carried out. Spanwise modulations with different wavelengths are imposed on 2D waves for the development of 3D wave structures. Comparison of theoretical and experimental data is performed.

Keywords: liquid film, two-dimensional wave, three-dimensional wave, instability, wave structures.

На сегодняшний день пленки жидкости применяют при создании межфазных течений жидкости и газа как эффективной среды для протекания различных физических и химических процессов. Эффективность технологических процессов с межфазным взаимодействием пленки и газа напрямую зависит от формы и скорости волн на поверхности пленки. В связи с этим важны исследования эволюции поверхностных волновых режимов.

Такая эволюция представляет собой последовательное формирование структур возрастающей сложности. Наиболее изучены структуры, появляющиеся на ранних стадиях эволюции, т. е. имеющие доминирующее свойство двумерности. Теоретических и экспериментальных результатов для более сложных структур значительно меньше.

Вопросы развития двумерных и трехмерных волн на поверхности пленки жидкости были рассмотрены в теоретических работах [1, 2]. В [1] исследованы сценарии двумерно-трехмерного перехода волновых режимов, объяснен механизм возникновения трехмерных локализованных образований на поверхности пленки. В экспериментальной работе [4] исследованы формы образующихся трехмерных структур в зависимости от длины поперечных возмущений, накладываемых на двумерные волны. Практический интерес представляет определение расстояния, на котором образуются характерные трехмерные волны, в зависимости от типа поперечных возмущений. Целью данной работы является экспериментальное изучение этой зависимости и сравнение экспериментальных результатов с теоретическими [1].

Основные элементы гидродинамического цикла используемой экспериментальной установки схожи с элементами установки, используемой в [5]. Это касается верхнего и нижнего резервуара, соединяющих труб, системы поступления жидкости в канал (по средствам перелива через край), а также последовательности расположения насоса, фильтров и канала.

Сначала рассматривались эксперименты, проведенные с учетом только естественных возмущений. Визуальное наблюдение показало, что поверхность пленки при числах Рейнольдса $Re < 5$ остается плоской, даже при $Re = 7$ проявления волн очень сла-

[1]Калайдин Евгений Николаевич, канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой экономико-математических методов и моделей Кубанского государственного университета; e-mail: kalaidin@econ.kubsu.ru.

[2]Селин Александр Сергеевич, аспирант кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: selin_a@mail.ru.

[3]Шапарь Сергей Михайлович, аспирант кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: jok@mail.ru.

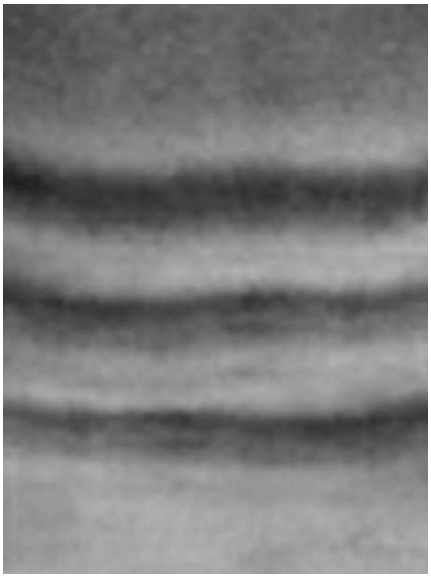

Рис. 1. Фотография искусственных двумерных волн

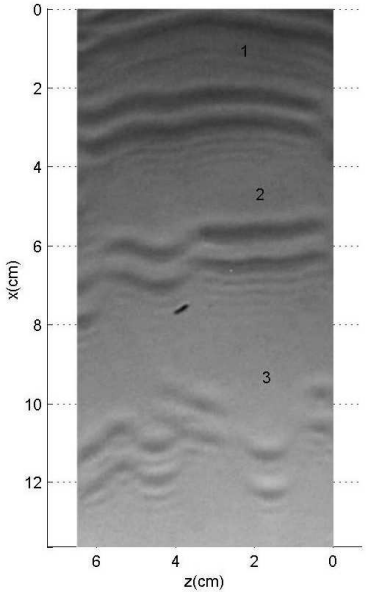

Рис. 2. Эволюция волновой структуры при двумерно-трехмерном переходе

бые. Эти волны сохраняют структуру двумерных уединенных волн, но искажены трехмерной составляющей, имеющей стационарный или пульсационный характер. Поэтому такие волны называют квазидвумерными. Расстояние от точки волнообразования до установления двумерного режима, при котором прекращается рост амплитуды, составляло около 3 см.

Двумерные волны описаны в [3], где экспериментально показано, что законы распространения естественных и искусственных двумерных волн совпадают в области стационарности. Был сделан вывод о том, что различие между искусственными и естественными волнами состоит лишь в способах волнообразования.

Для получения искусственных двумерных волн в данном эксперименте на основное течение накладывались периодические пульсации расхода жидкости, эти искусственные возмущения подавляли естественный шум, и в результате реализовывалась последовательность двумерных стационарных уединенных волн (рис. 1). Волны образовывались почти у самого начала рабочего участка. Область их двухмерности сохранялась на протяжении всего канала.

Известно, что дальнейшая эволюция двумерных волн предполагает их разрушение и преобразование в трехмерные структуры, т. е. происходит двумерно-трехмерный переход. Для того чтобы начать процесс распада двумерных волн в трехмерные локализованные когерентные структуры, на двумерные уединенные волны накладываются искусственные поперечные возмущения [4]. Специальные иголки помещались на некотором расстоянии l друг от друга так, чтобы волны возмущались в поперечном направлении. Регулярная структура двумерных волн сразу же нарушалась. На некотором расстоянии от входа появлялись трехмерные модуляции, накладываемые на двумерные волны. Эти модуляции росли вниз по течению и разрушали двумерные уединенные волны. Характерные трехмерные локализованные структуры появлялись на некотором расстоянии L от входа канала. Типичный снимок такой эволюции показан на рис. 2 ($Re = 10$, $l = 25$ мм).

Эксперименты были выполнены для различных l от 10 до 35 мм с шагом 2,5 мм. Для достаточно малых расстояний ($l < 10$ мм) трехмерные возмущения угасали вниз по течению, т. е. поверхностный режим оставался двумерным на всей протяженности канала. От одного эксперимента к другому величина L колебалась с амплитудой около 0,5 см.

Для $Re = 10$ результаты наблюдений были обобщены и представлены в виде функции, зависящей от l. На рис. 3 пунктиром изображен график теоретически полученной функции расстояния, а вертикальными ин-

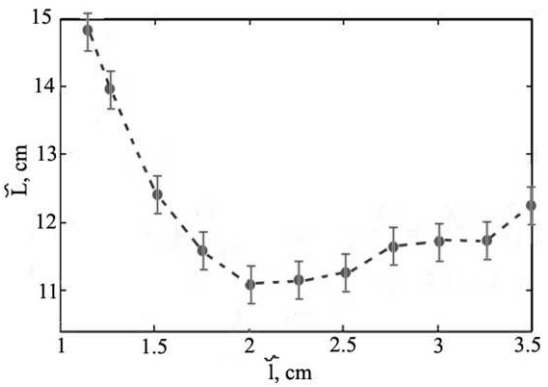

Рис. 3. Зависимость расстояния, после которого наблюдается двумерно-трехмерный переход от расстояния между иголками ($Re = 10$)

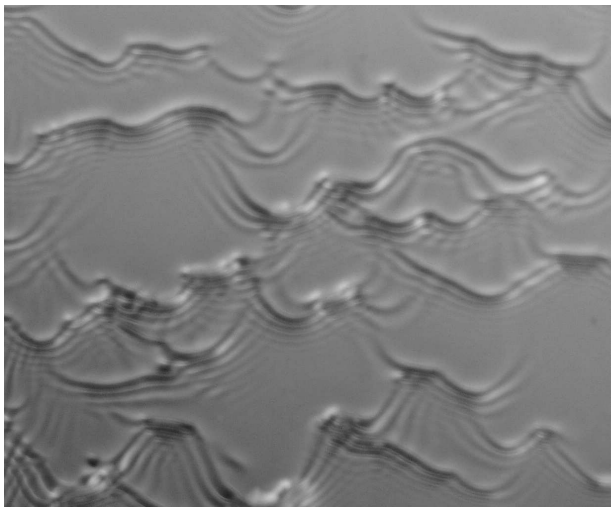

Рис. 4. Фотография развитого режима трехмерных когерентных структур при $Re = 60$

тервалами изображены результаты экспериментальных измерений с учетом погрешности. Величина абсолютной погрешности измерений эксперимента составляла не более 6 мм. Зависимость четко выражена, начиная от $l = 2$ см и соответствует теоретическим прогнозам [1]. В точке $l = 2$ см функция расстояния имеет максимум. Более того, значения расстояния полного распада L от 5 до 10 см, также хорошо согласуется с теоретически предсказанными [1].

На рис. 4 изображен хорошо развитый трехмерный режим, полученный экспериментально с применением метода наложения трехмерных возмущений.

Результаты проведенных экспериментов в некоторой степени позволят выявить те технические условия и характеристики, которые дадут возможность контролировать поверхность пленки в пленочных аппаратах, т. е. управлять волновыми режимами.

Литература

1. *Demekhin E. A., Kalaidin E. N., Kalliadasis S., Vlaskin S. Yu.* Three-dimensional localized coherent structures of surface turbulence. I. Scenarios of two-dimensional-three-dimensional transition // Physics of fluids. 2006. Vol. 19. Pp. 114103–114103.
2. *Demekhin E. A., Kalaidin E. N., Kalliadasis S., Vlaskin S. Yu.* Three-dimensional localized coherent structures of surface turbulence. II. Lambda solitons // Physics of fluids. 2007. Vol. 19. Pp. 114104–114115.
3. *Park C. D., Nosoko T.* Three-dimensional dynamics of waves on a falling film and associated mass transfer // AIChE J. 2003. Vol. 49. No. 11. P. 2715–2727.
4. *Калайдин Е. Н., Селин А. С., Шапарь С. М.* Экспериментальное исследваоние трехмерных солитонов в вретикально стекающей пленке жидкости // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2008. № 4. С. 58–63.
5. *Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Алексеенко С. В.* Стационарные двумерные катящиеся волны на вертикальной пленке жидкости // Инженерно-физический журнал. 1976. Т. 30. № 5. С. 780–785.

Ключевые слова: пленка жидкости, двумерные волны, трехмерные волны, неустойчивость, волновые режимы.

Статья поступила 2 февраля 2009 г.
Кубанский государственный университет, г. Краснодар
© Калайдин Е. Н., Селин А. С., Шапарь С. М., 2009