

УДК 532.536

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ СОЛИТОНОВ В ВЕРТИКАЛЬНО СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ<sup>1</sup>***Калайдин Е. Н.<sup>2</sup>, Селин А. С.<sup>3</sup>, Шапарь С. М.<sup>4</sup>***EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THREE-DIMENSIONAL SOLITONS IN VERTICALLY FALLING LIQUID FILMS**

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

Experimental investigation of solitary three-dimensional wave structures on the surface of a falling liquid thin film is performed. Theoretical data of mass and volume of three-dimensional soliton is used for the creation of such wave structures. The measurements results of the wave velocity and wave amplitudes are presented. Comparison of theoretical and experimental data is carried out.

Keywords: liquid film, three-dimensional soliton, instability, wave modes.

**Введение**

Анализ множества экспериментальных данных [1–3] для вертикально стекающих пленок жидкости обнаруживает существование пяти возможных конечных волновых режимов, зависящих от числа Рейнольдса. Режимы, при которых волны являются двумерными, достаточно хорошо изучены как экспериментально [2], так и теоретически [3].

При числах Рейнольдса, находящихся в диапазоне от 40 до 400, поверхность пленки покрыта детерминированными трехмерными локализованными структурами, которые представляют собой взаимодействующие «подковоподобные» волны. Такой поверхностный режим часто называют режимом «поверхностной турбулентности». В [4,5] были теоретически изучены неустойчивости и переходы, приводящие к образованию трехмерных нелинейных локализованных структур, а также были найдены трехмерные одиночные волны. В данной работе описаны эксперименты, выполненные с целью изучения этих трехмерных волновых режимов и подтверждения теории [6].

Трехмерные солитоны являются результатом длинной и сложной эволюции вниз по течению [1], в режиме «поверхностной турбулентности» эти волновые структуры взаимодействуют друг с другом. Поэтому очень трудно выделить и измерить параметры одной структуры. С целью преодоления этих трудностей был разработан экспериментальный метод, позволяющий получить единственный трехмерный солитон и измерить его параметры. Результаты экспериментов хорошо согласуются с теоретическими данными [6].

**1. Описание установки и методики экспериментов**

Использовался прямоугольный канал, рабочая область которого была сделана из специального стекла. Длина вертикального канала составляла 25 см, а ширина — 15 см. Несущая рама установки была сделана из алюминиевых балок, общая масса конструкции — 144 кг.

Начало канала соединено с большим резервуаром, размеры которого составляли 25×15×10 см, он состоял из двух отсеков

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке РФФИ (05-08-33585а).

<sup>2</sup>Калайдин Евгений Николаевич, канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой экономико-математических методов и моделей Кубанского государственного университета; e-mail: kalaidin@econ.kubsu.ru.

<sup>3</sup>Селин Александр Сергеевич, аспирант кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: selin\_a@mail.ru.

<sup>4</sup>Шапарь Сергей Михайлович, аспирант кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: jok@mail.ru.

и буфера с закругленным концом на входе канала. Вместимость резервуара составляла 120 л. Нижняя часть канала была соединена с приемным резервуаром.

Цифровой насос располагался в нижней части установки. Жидкость накачивалась через резиновую трубку для наполнения верхнего резервуара, из которого она поступала на тестируемую область. На трубопроводе было установлено два водяных фильтра, предназначенных для очистки от пыли и других твердых частиц, так как попадание каких-либо твердых частиц в канал могло бы создать искажения при измерении волн и повлиять на устойчивость потока.

Подача жидкости в канал осуществлялась методом перелива через край жидкости из верхнего резервуара. Известная принципиальная сложность экспериментов с переливом жидкости связана с поддержанием однородности потока в его начале и далее по течению. Водяная пленка является очень тонкой, малейшее возмущение на входе тестируемой области может привести поток к свертыванию в капли или струи. Для того чтобы предотвратить этот эффект была выбрана небольшая ширина канала, на входе канала установлена полимерная сеть, что уменьшает тангенциальную компоненту скорости. Кроме того, на входе были вырезаны маленькие канавки длиной 15 мм имеющие треугольную форму в направлении течения. Эти меры значительно стабилизировали поток.

Вся экспериментальная установка представляла собой замкнутый цикл — из разгрузочного резервуара жидкость снова попадала в насос и закачивалась в верхний резервуар.

Для измерения объема расходуемой жидкости использовался расходомер Omega (модель FL-1502A). Для соединения входа канала с расходомером использовалась гибкая виниловая трубка. Такая трубка позволяла адсорбировать вибрации здания, шумы и вибрации насоса.

Расход насоса менялся от 7 до 150 см<sup>3</sup>/с, поэтому числа Рейнольдса варьировались в диапазоне от 4,5 до 110. Число Рейнольдса  $Re$  измерялось как отношение расхода на единицу ширины к вязкости  $\nu$ .

В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Температура держалась на уровне  $15 \pm 0,5$  градусов, и, следовательно, вязкость  $\nu = 1,14 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с<sup>2</sup>, число Капицы  $\gamma = \sigma \rho^{-1} \nu^{-4/3} g^{1/3} = 2900$ .

Для проведения экспериментов использовалась модификация метода, описанного

в [7]. Авторы работы [7] для создания трехмерных солитонов использовали в качестве начального возбуждения тонкую струю, выпускаемую на плоский слой жидкости. В отличие от [7] в данном экспериментальном исследовании на устойчивую поверхность плоского подслоя размещалась капля, имеющая массу трехмерного солитона, эта масса была теоретически посчитана в [6] и зависела от числа Рейнольдса подслоя течения.

Капли, масса которых равнялась массе стационарного солитона, попадая на поверхность, вовлекались в процесс движения пленки и быстро трансформировались в стационарные локализованные структуры, минуя при этом все промежуточные стадии эволюции.

Для осуществления этого метода использовались специальные пипетки с переменным объемом, меняющимся дискретно в некотором интервале. Для того, чтобы покрыть весь интервал масс солитонов, использовались три пипетки с объемами капли 0,5–10 мл с шагом 0,1 мл; 5–40 мл с шагом 0,5 мл и 40–200 мл с шагом 1 мл. Самая маленькая капля имела диаметр 2 мм, самая большая — 7 мм.

Пипетка располагалась в верхней части установки с возможностью изменения расстояния и угла между ней и поверхностью пленки жидкости. Пипетку необходимо расположить таким образом, чтобы капля достигла требуемого размера при соединении с пленкой. Около пипетки устанавливались специальные линзы, увеличивающие изображение с целью точной корректировки угла пипетки и расстояния между пипеткой и пленкой жидкости. Расстояние и угол менялись с помощью микрометрических винтов.

В таблице приведены значения объема капли, использованные в ходе эксперимента. Если масса капли варьировалась от 1,2 до 1,5 массы стационарного солитона, то формирующийся солитон сбрасывал лишнюю массу, которая отставала от него по причине меньшей скорости движения. В этом случае лишняя масса не оказывала никакого влияния на формирование волновой структуры. Если же масса капли была меньше массы стационарного солитона, формирующийся солитон подсасывал массу из подслоя, в этом случае существовала возможность образования сухих пятен. Если масса капли превышала теоретически рассчитанное значение вдвое, то в процессе движения по подслою из капли формировались две когерентные структуры. Схематически эксперимент показан на рис. 1.

Объем капли  $J$ , число Рейнольдса  $Re$ , экспериментальная скорость солитона  $C$ , максимальная толщина волны  $h_{max}$ , расход насоса  $Q$

| $Q$ , см <sup>3</sup> /с | $Re$  | $J$ , мл | $C$ , см/с | $h_{max}$ , мм |
|--------------------------|-------|----------|------------|----------------|
| 7,50                     | 4,38  | 2,00     | –          | –              |
| 9,00                     | 5,26  | 3,00     | –          | –              |
| 10,5                     | 6,27  | 5,00     | 22,5       | 0,20           |
| 12,0                     | 7,02  | 9,00     | 24,5       | 0,28           |
| 13,5                     | 7,89  | 15,0     | 27,7       | 0,32           |
| 15,0                     | 8,77  | 20,0     | 31,1       | 0,35           |
| 16,5                     | 9,65  | 25,0     | 33,9       | 0,41           |
| 19,5                     | 11,40 | 40,0     | 37,5       | 0,39           |
| 21,0                     | 12,28 | 45,0     | 39,3       | 0,40           |
| 22,5                     | 13,16 | 60,0     | 42,6       | 0,43           |
| 24,0                     | 14,03 | 60,0     | 43,2       | 0,47           |
| 24,0                     | 14,03 | 70,0     | 42,1       | 0,48           |
| 27,0                     | 14,91 | 75,0     | 41,1       | 0,51           |
| 27,0                     | 15,79 | 80,0     | 46,0       | 0,47           |
| 28,5                     | 16,67 | 90,0     | 47,8       | 0,48           |
| 30,0                     | 17,54 | 100,0    | 48,9       | 0,50           |

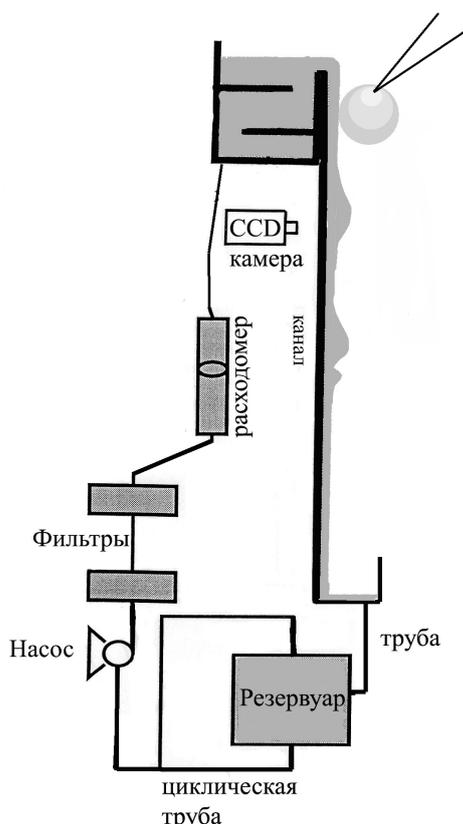


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для измерения профиля волн использовались два метода: флуоресцентный и электрический. Оригинальный флуоресцентный метод был описан в работе [8]. Данный метод не предполагал использование обычного ис-

точника света, т.е. при использовании такого метода не происходило возникновения теней, а значит, не искажались конечные результаты. В жидкость добавлялась небольшая концентрация флуоресцентного красителя. Над поверхностью канала располагалось восемь ультрафиолетовых ламп. На противоположной стороне канала располагалась камера. В [8] было показано, что интенсивность отражаемого света линейна относительно толщины пленки. Таким образом, с помощью этого метода было возможно получение сигнала, пропорционального локальной толщине пленки.

Съемка производилась цифровой видеокамерой Panasonic NV-GS75. Данные записывались на цифровой носитель, далее обрабатывались с помощью компьютера. Пространственное разрешение  $720 \times 540$  достаточно для детального построения поверхностной формы волны. Обработка цифрового изображения производилась с помощью Toolbox Image Processing (Matlab).

С помощью электрического метода измерялся только максимум солитона. В этом случае использовалась специальная стальная игла, расположенная на некотором расстоянии от канала. Это расстояние регулировалось с помощью микровинтов. Касание солитоном иглы регистрировалось замыканием электрической цепи между иглой и жидкостью. Для повышения уровня проводимости в жидкость добавлялось некоторое коли-

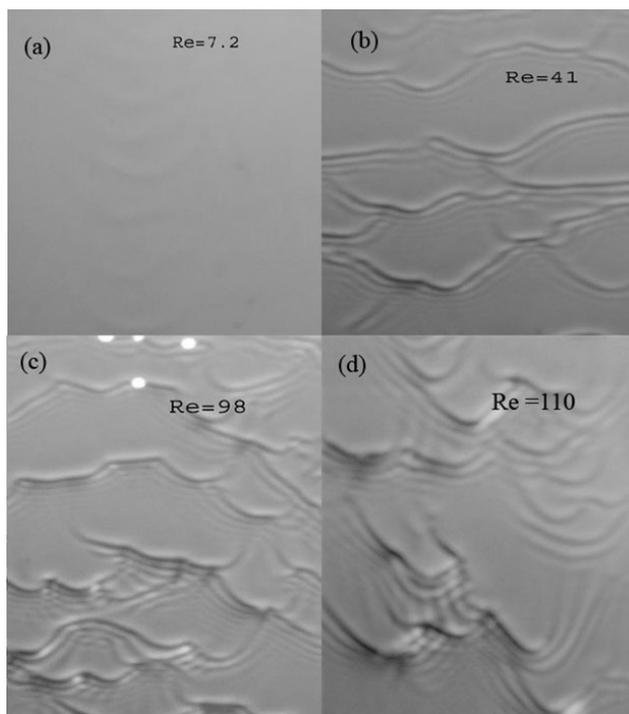


Рис. 2. Волновые режимы вертикально стекающей пленки, наблюдаемые на эксперименте, при различных числах Рейнольдса

чество хлорида натрия. Электрическая цепь состояла из батареи с разностью потенциала 4 В и амперметра.

Способ измерения скорости предполагал формирование множества снимков, каждую 1/30 с. При сравнении расположения волны на различных снимках можно было найти ее скорость в данной точке.

## 2. Результаты экспериментов и их сравнение с теорией

При отсутствии каких-либо искусственных возмущений, визуальное наблюдение показало, что поверхность была абсолютно плоской при числах Рейнольдса  $Re < 4-5$ . Даже при  $Re = 7$  проявления волн очень слабые. Эти волны сохраняют структуру двумерных уединенных волн (рис. 2а). Двумерные возмущения, такие как колебание расхода насоса, приводили к тому, что волны становились регулярными. Экспериментально было получено, что переход из двумерного режима в трехмерный происходил при  $Re \approx 40-50$ . Из результатов экспериментов видно, что сращивание двумерных волн увеличивает трехмерную их составляющую и делает процесс разрушения быстрее (рис. 2б, 2с). Типичный хорошо развитый трехмерный режим показан на рис. 2д.

Для реализации идеи формирования трехмерного солитона из капли необходимо создать участок плоского течения. Т. е. необходимо было выбрать такие параметры течения, при которых можно не опасаться того, что первичная неустойчивость плоского слоя разрушит искусственно созданные трехмерные образования. Эксперименты по формированию солитона проводились при различных числах Рейнольдса подслоя. При  $Re < 6$  после слияния капли с подслоем наблюдалось расширяющееся пятно с хаотическими волнами, что подтверждает теорию [6] о неустойчивости трехмерных солитонов при достаточно малых числах Рейнольдса. Поэтому для первых двух чисел Рейнольдса (таблица) сгенерировать трехмерный солитон не удалось. При  $Re > 6$  и правильном подборе массы на расстоянии порядка 5–10 см от входа образовывался стационарный трехмерный солитон (рис. 3).

Размерные значения скорости солитона и его амплитуды изображены на рис. 4а и 4б соответственно. Результаты измерений изображены треугольниками, а расчетные данные — сплошной линией. Сравнение сечений вдоль оси симметрии солитонов, полученных из теории [6] (прерывистая) и эксперимента (сплошная) показано на рис. 5. Теоретические результаты, использовавшиеся для

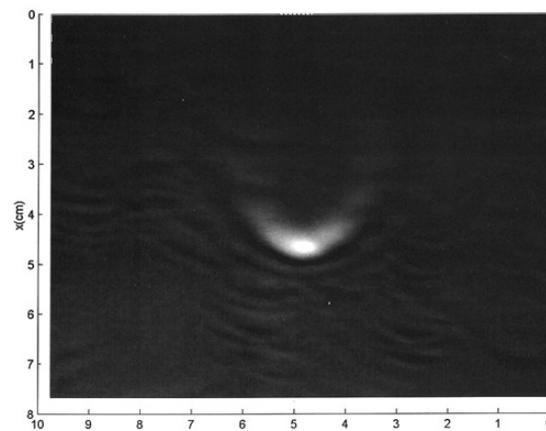


Рис. 3. Трехмерный солитон, сформировавшийся из капли при  $Re \approx 7$

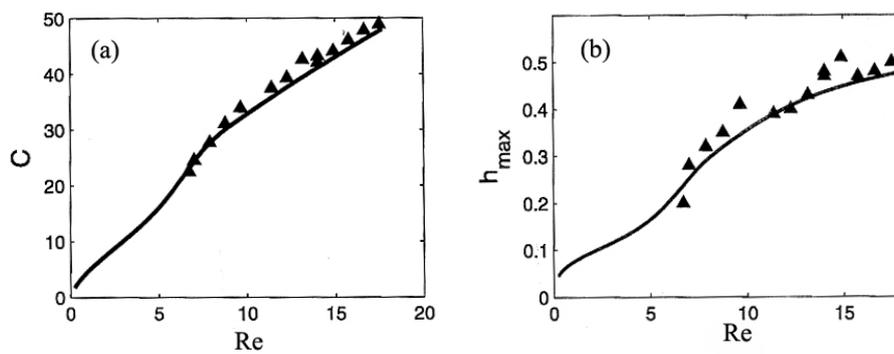


Рис. 4. Сравнение теоретических данных (сплошная линия) и результатов экспериментов (треугольники): а) размерная скорость  $C$ ; б) размерная амплитуда  $h_{max}$

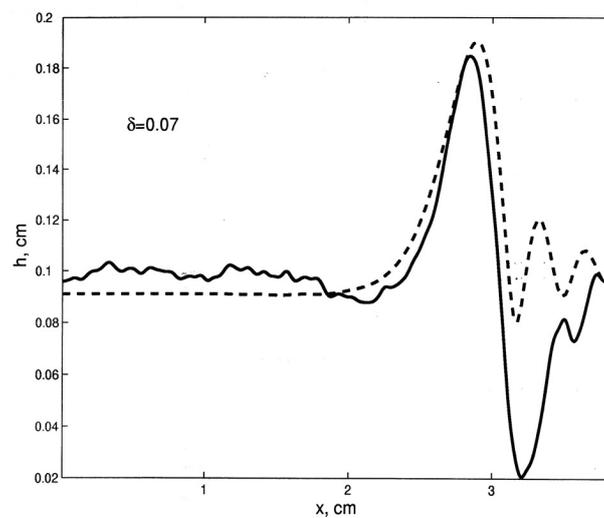


Рис. 5. Сравнение сечений вдоль оси симметрии профилей солитонов при  $Re = 7, 5$ , полученный из эксперимента (сплошная) и теории (прерывистая)

сравнения, основаны на системе Капицы–Шкадова уравнений пограничного слоя. Получено хорошее сходство теоретических и экспериментальных параметров трехмерных уединенных волн.

### Литература

1. *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.
2. *Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Алексеенко С. В.* Стационарные двумерные катящиеся волны на вертикальной пленке жидкости // *ИФЖ.* 1976. Т. 30. № 5. С. 780–785.
3. *Алексеенко С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г.* Волновое течение жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. 256 с.
4. *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. P. 114103–114103.
5. *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. P. 114104–114115.
6. *Калайдин Е. Н., Власкин С. Ю., Демехин Е. А., Каллиадасис С.* О трехмерных солитонах в стекающей пленке жидкости // *ДАН.* 2006. Vol. 406. № 1. С. 37–39.
7. *Гузанов В. В., Харламов С. М.* Экспериментальное исследование эволюции трехмерных волн на поверхности вертикально стекающих пленок жидкости // *Вестник НГУ: Физика.* 2007. Т. 2. № 3. С. 3–8.
8. *Liu J., Paul J. D., Gollub J. P.* Measurements of the primary instabilities of film flows // *J. Fluid Mech.* 1993. Vol. 220. P. 69–101.

Ключевые слова: пленка жидкости, трехмерный солитон, неустойчивость, волновые режимы.

---

Статья поступила 21 октября 2008 г.  
 Кубанский государственный университет, г. Краснодар  
 © Калайдин Е. Н., Селин А. С., Шапарь С. М., 2008