



УДК 535.31:681.7.001

И.Л. Расковская¹, М.В. Есин¹, Б.С. Ринкевичюс¹, Д.А. Сергеев², А.В. Толкачев¹

¹Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: rinkevbs@mail.ru

²ИПФ РАН, Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

ИССЛЕДОВАНИЕ УЕДИНЕННЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Представлены предварительные экспериментальные результаты исследования возмущений в тонком переходном слое солестратифицированной жидкости методами лазерной рефрактографии и прямотеневым. Приводятся теоретические предпосылки по изучению возникающих в стратифицированных жидкостях нелинейных волн – солитонов. Создана экспериментальная установка для регистрации и изучения солитонов. Получены предварительные результаты по регистрации внутренних волн.

ЛАЗЕРНАЯ РЕФРАКТОГРАФИЯ, ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНАЯ СРЕДА, СОЛЕСТРАТИФИЦИРОВАННАЯ ЖИДКОСТЬ, ВОЗМУЩЕНИЯ В ПЕРЕХОДНОМ СЛОЕ, ЦИФРОВАЯ РЕГИСТРАЦИЯ РЕФРАКТОГРАММ, СОЛИТОН

ВВЕДЕНИЕ

Изучение стратифицированных по плотности жидкостей является одним из важных разделов современной гидрофизики. Большое количество работ в этом направлении [1 – 3, 5] обусловлено необходимостью выяснения физической природы широкого круга явлений, играющих важную роль в динамике окружающей среды и в современных технологических процессах. Устойчивая плотностная стратификация типична для природных водоемов, включая мировой океан. Как правило, она вызвана неоднородным прогревом толщи воды, а также распределением солености по глубине. Внутренние волны могут возникать на границе раздела двух жидкостей с различающимися характеристиками, например, на границе раздела между пресной и соленой водой, поскольку различны плотности обеих сред.

Одним из основных способов изучения внутренних волн является лабораторное моделирование. Самостоятельный интерес представляет исследование внутренних уединенных волн – солитонов. В этих модельных экспериментах основными проблемами является создание плотностной стратификации, измерение и контроль ее характеристик. Обычно в модельных лабораторных экспериментах создают солевую стратификацию. Уменьшая концентрацию соли по вертикали добиваются необходимого распределения плотности.

В настоящее время методы измерения плотности можно разделить на контактные и дистанционные (оптические). Контактные методы исследования солености (проводимости), температуры жидкости с помощью датчиков позволяют проводить высокоточные измерения в фиксированной точке. Однако, для измерения пространственного распределения физических характеристик необходимо использовать большое количество датчиков, либо применять сканирование. Это приводит к сильным возмущениям, вносимым в жидкости.

В представленной работе для исследования переходного слоя жидкости с градиентом солености применяется прямотеневой метод и метод лазерной рефрактографии (ЛР) [4, 6].

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЕДИНЕННЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

При описании внутренних волн исходят из известных уравнений динамики стратифицированной жидкости, для которой задаются равновесные распределения плотности и граничные условия на поверхности и на дне [4]. Солитоны умеренной амплитуды могут существовать лишь при наличии относительно тонкого слоя в водоеме (экспериментальной кювете), когда характерный масштаб волны Λ велик в сравнении с глубиной всего водоема или какого-либо его выделенного слоя. Рассмотрим простейшую двухслойную модель, когда зависимость плотности от глубины имеет вид скачка на некоторой глубине h , а выше и ниже этого уровня она постоянна. Тогда длинная волна, распространяющаяся вдоль горизонтальной оси x , описывается хорошо изученным уравнением Кортевега-де Вриза (КдВ).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial x} + \alpha \eta \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

где $z(x,t)$ – отклонение границы раздела слоев от невозмущенного уровня,

$$c = \sqrt{\frac{g(\rho_2 - \rho_1)h_1h_2}{\rho_2h_1 + \rho_1h_2}}, \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{3}{2} \frac{c}{h_1h_2} \frac{\rho_2h_1^2 - \rho_1h_2^2}{\rho_2h_1 + \rho_1h_2}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{ch_1h_2}{6} \frac{\rho_1h_1 + \rho_2h_2}{\rho_2h_1 + \rho_1h_2}, \quad (4)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности верхнего и нижнего слоев соответственно, h_1 и h_2 их толщины.

Солитонные решения уравнения (1) имеют следующий вид:

$$\eta(x,t) = \eta_0 \operatorname{sch}^2 \frac{x-Vt}{\Lambda}, \quad (5)$$

где скорость солитона V и его характерный полуразмер Λ связаны с амплитудой η_0 соотношениями:

$$V = c + \frac{\alpha\eta_0}{3}, \quad (6)$$

$$\Lambda^2 = \frac{12\beta}{\alpha\eta_0}, \quad (7)$$

В расчетах положим $h_1 = 0,050$ м, $h_2 = 0,15$ м, $\rho_1 = 1000$ кг/м³, $\rho_2 = 1030$ кг/м³, $\eta_0 = 0,03$ м, тогда расчетные параметры будут иметь следующие значения: $c = 0,104$ м/с, $\alpha = -2,054$ 1/с, $\beta = 0,00013$ м³/с, а скорость и характерный размер солитона соответственно равны $V = 0,124$ м/с и $\Lambda = 0,16$ м.

На рис. 1 показаны зависимости скорости и характерного размера солитона от характеристик стратифицированной жидкости.

Рис. 2 и 3 иллюстрируют форму солитона для указанных ниже условий эксперимента и положение солитона в кювете в различные моменты времени.

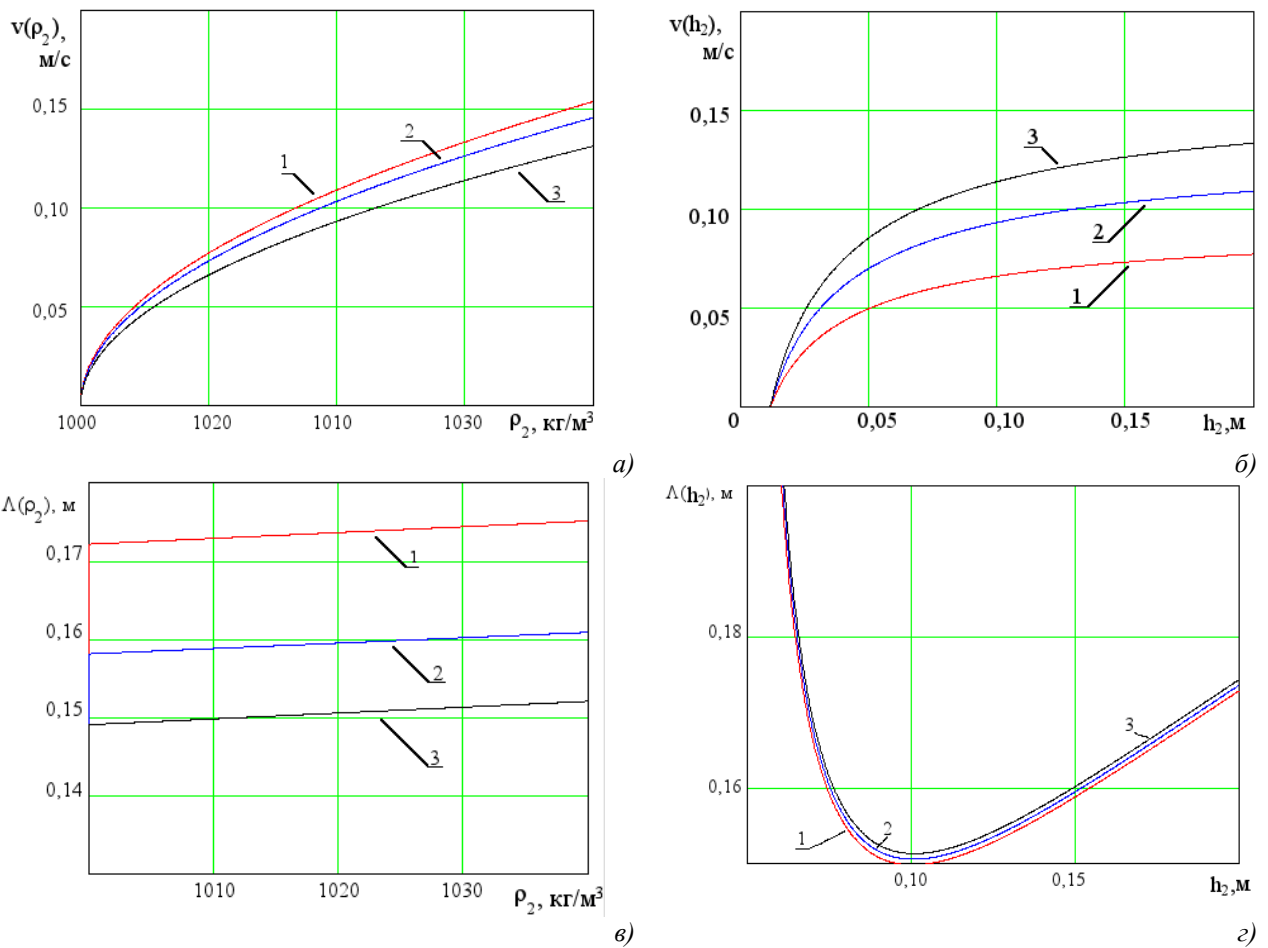


Рис. 1. Зависимости параметров солитона от характеристик стратифицированной жидкости:

а) зависимость скорости солитона от плотности нижнего слоя при разных значениях высоты этого слоя:

1 – $h_2 = 0,20$ м; 2 – $h_2 = 0,15$ м; 3 – $h_2 = 0,10$ м;

б) зависимость скорости солитона от высоты нижнего слоя при разных значениях плотности этого слоя: 1

– $\rho_2 = 1010$ кг/м³; 2 – $\rho_2 = 1020$ кг/м³; 3 – $\rho_2 = 1030$ кг/м³;

в) зависимость характерного размера солитона от плотности нижнего слоя при разных значениях высоты этого слоя: 1 – $h_2 = 0,20$ м; 2 – $h_2 = 0,15$ м; 3 – $h_2 = 0,10$ м;

г) зависимость характерного размера солитона от высоты нижнего слоя при разных значениях плотности этого слоя 1 – $\rho_2 = 1010$ кг/м³; 2 – $\rho_2 = 1020$ кг/м³; 3 – $\rho_2 = 1030$ кг/м³

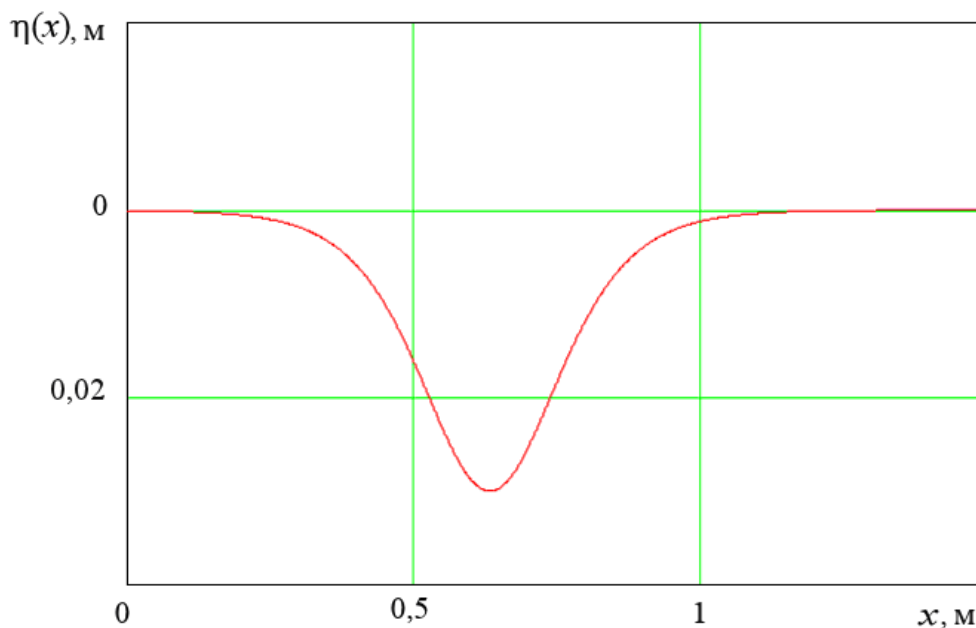


Рис. 2. Форма уединенной волны, рассчитанная для указанных условий эксперимента

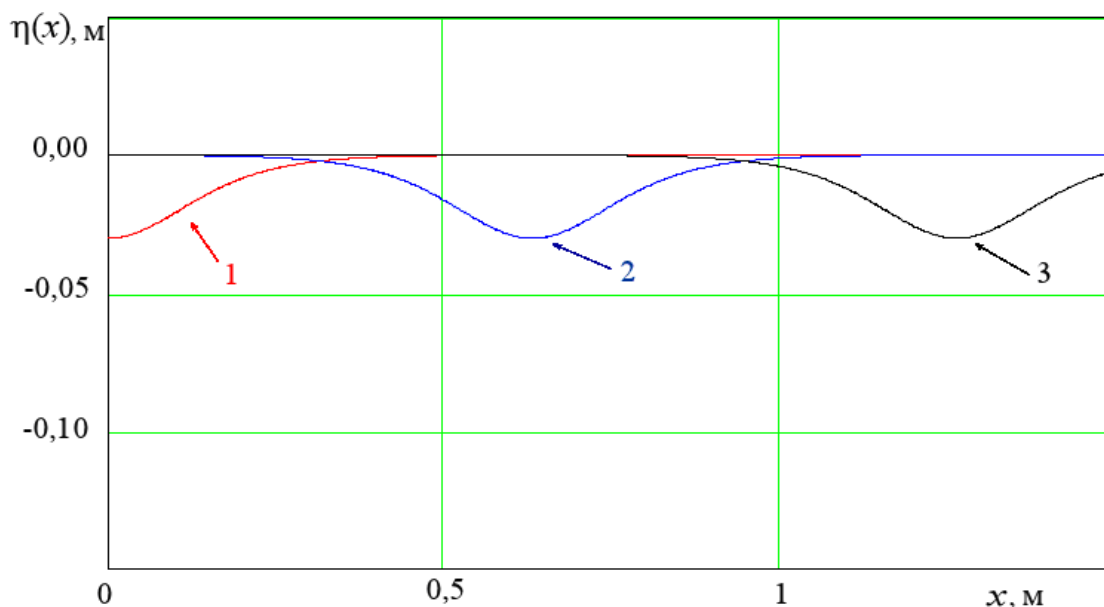


Рис. 3. Положение солитона в кювете в разные моменты времени
1 - $t = 0$ с; 2 - $t = 5$ с; 3 - $t = 10$ с

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Разрабатываемая установка должна решать две задачи: во-первых, обеспечивать генерацию внутренних возмущений (внутренних солитонов) в переходном слое между пресной и соленой водой, то есть в условиях двухслойной стратификации; во-вторых, должна визуализировать исследуемые процессы с их последующей цифровой регистрацией для получения количественной информации о параметрах внутренних солитонов.

Для решения первой задачи была разработана и создана экспериментальная кювета из полированного стекла толщиной 5 мм с внутренними размерами 1500x302x302 мм.

Кювета располагалась на горизонтальном массивном основании экспериментального стенда. На рис. 4 показан внешний вид кюветы, заполненной жидкостью.

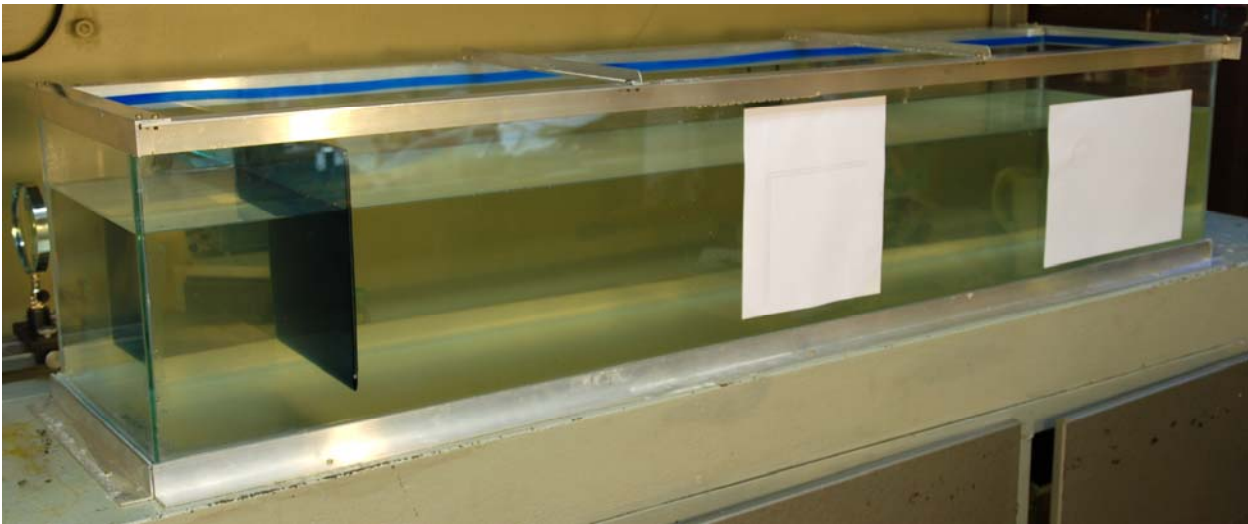


Рис. 4. Внешний вид кюветы.
На передней стенке кюветы наклеены матовые экраны

Для получения двухслойной стратификации в кювету первоначально заливалось 67,5 л воды, в которых были растворены 2 кг поваренной соли (раствор NaCl в воде - уровень h_2), затем на поверхности этого слоя размещались плавающие прослойки, на смоченную поверхность которых тоненькими струйками направлялась пресная вода. Таким образом, над слоем раствора поваренной соли образовывался слой пресной воды объемом 22,5 литра (уровень h_1). Между раствором поваренной соли и пресной водой образовывался слой их перемешивания, параметры которого определялись концентрацией поваренной соли в воде, температурой и объемом жидкостей.

Для генерации внутренних солитонов в двухслойной стратификации в кювете имелась шлюзовая камера с выдвигающейся заслонкой (место расположения заслонки в кювете относительно левой боковой стенки L может изменяться от 100 до 200 мм). Боковые грани заслонки плотно прилегали к внутренним боковым поверхностям кюветы. Между нижней гранью заслонки и дном кюветы устанавливался зазор $z = (20 - 30)$ мм.

В шлюзовую камеру медленно по влажной поверхности плавающей прослойки дополнительно заливалась пресная вода, объем которой определялся условиями проведения эксперимента (1,5 – 3,5 литра). В результате из шлюзовой камеры через нижний зазор в кювету начинал перетекать раствор поваренной соли и при этом в шлюзовой камере опускался слой перемешивания жидкостей. Общий уровень жидкостей в кювете поднимался незначительно. Таким образом, устанавливалась определенная разность уровней η_0 , на которых располагались слои перемешивания жидкостей в основной части кюветы и в шлюзовой камере. Ниже приведен видеокادر прямой теневой картины, на котором отчетливо наблюдается эта разность уровней слоев смешения жидкостей. На этом подготовка кюветы к эксперименту завершалась.

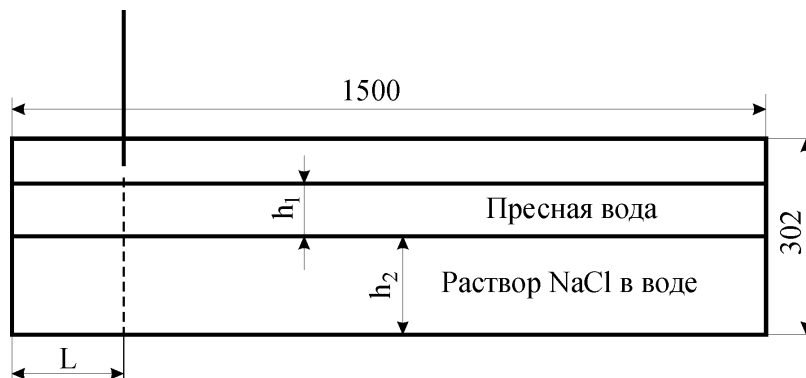
Генерация внутреннего солитона в двухслойной стратификации происходила при резком выдергивании вверх заслонки шлюзовой камеры. Образовавшийся солитон начинал перемещаться от шлюзовой камеры вдоль слоя перемешивания жидкостей в основной части кюветы.

На рис. 5 показано схематическое изображение кюветы (вид спереди) с указанием положения уровней исследуемых жидкостей, слоя их перемешивания, расположения шлюзовой камеры и ее заслонки.

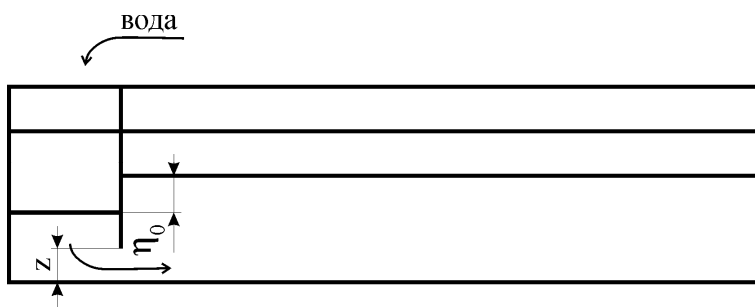
Для решения второй задачи, связанной с визуализацией солитона и определением его параметров было предложено и реализовано одновременное применение компьютерно-лазерных прямолинейного и рефрактометрического методов диагностики.

На рис. 6 приведена структурная схема измерительной части экспериментальной установки и расположение ее элементов около кюветы.

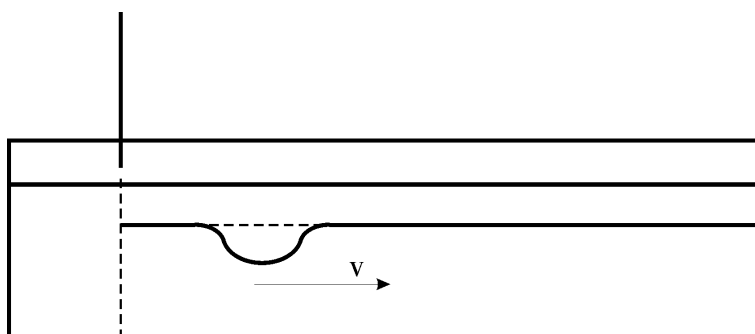
Таким образом, кювета 1 со шлюзовой камерой 2 и выдвигающейся заслонкой 3 были предназначены для генерации солитона. Элементы с 4-го по 10-й предназначены для реализации прямотеневого метода визуализации солитона и образуют первый лазерный измерительный канал установки.



а) заслонка шлюзовой камеры выдвинута; h_2 – уровень раствора поваренной соли; h_1 – уровень чистой воды; L – расположение заслонки в кювете



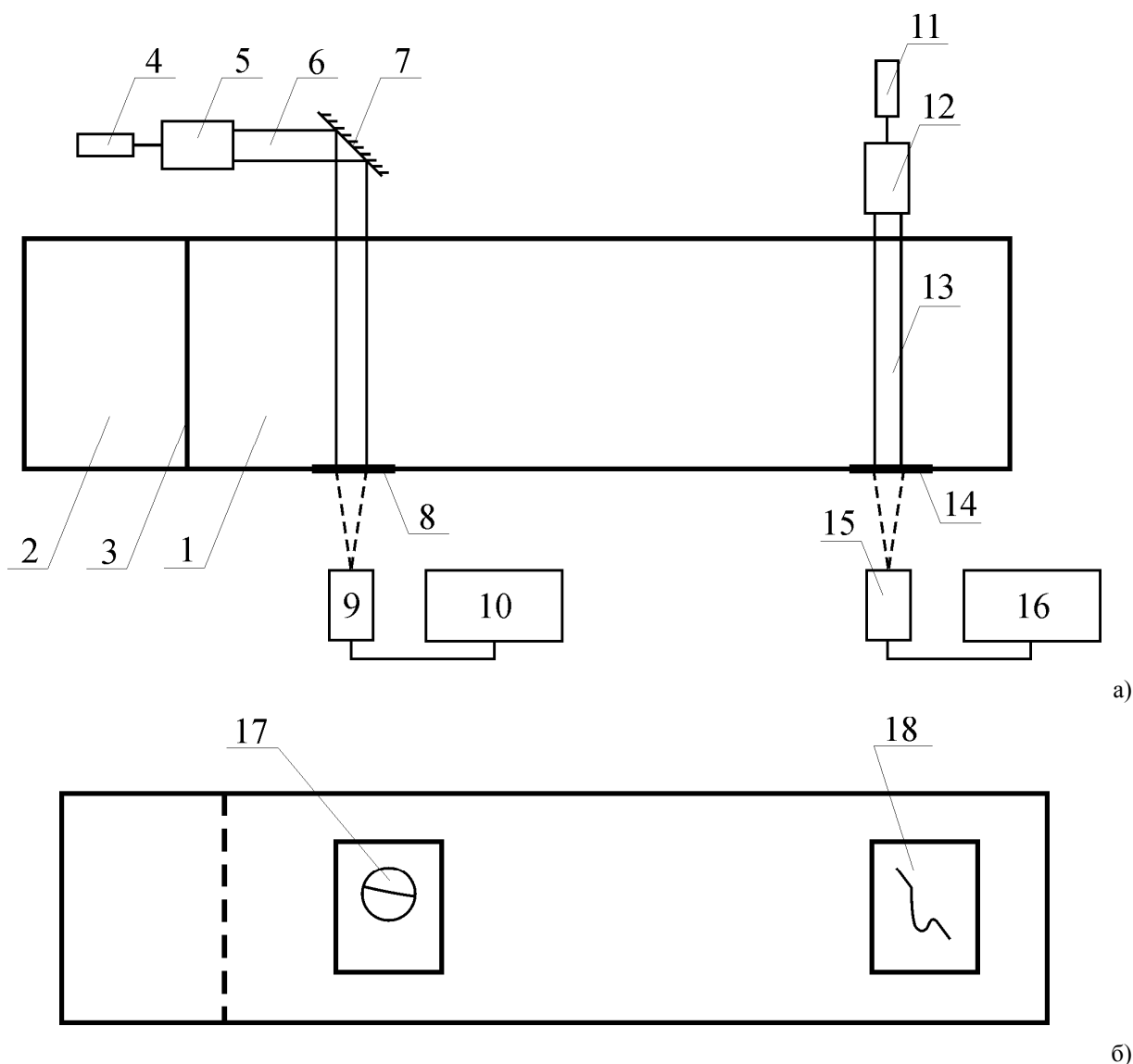
б) заслонка вставлена; z – зазор между заслонкой и дном кюветы; η_0 – величина уменьшения уровня смешения жидкостей в шлюзовой камере



в) заслонка быстро вынута из шлюзовой камеры; солитон со скоростью V движется в основной части кюветы вдоль слоя смешения жидкостей

Рис. 5. Схематическое изображение кюветы со шлюзовой камерой (вид спереди)

Узкий пучок излучения лазера 4 (длина волны излучения 532 нм и мощность излучения 100 мВт) с помощью телескопической системы 5 трансформируется в широкий (100 мм в диаметре) пучок 6, который с помощью наружного зеркала 7 направляется на матовый экран 8, закрепленный на передней стенке кюветы.



а) вид на установку сверху; б) вид на установку спереди
(матовые экраны 8 и 14, закрепленные на передней стенке кюветы)

Рис. 6. Структурная схема экспериментальной установки

Прямотеневая картина 17 на экране 8 регистрируется цифровой видеокамерой 9 фирмы «SONY», сопряженной с персональным компьютером 10, непосредственно в память которого осуществлялась запись видеофильмов.

Элементы с 11-го по 16-й реализуют рефрактографический метод диагностики. Компьютерно-лазерный рефрактографический диагностический канал включает в себя полупроводниковый лазерный модуль 11 (длина волны излучения 550 нм и мощность излучения 3 мВт), систему преобразования 12 исходного лазерного пучка в параллельную лазерную плоскость 13 шириной 160 мм, повернутую на некоторый угол (от 30 до 75 градусов к горизонтали). На матовом экране 14 наблюдается след этой лазерной плоскости, являющийся рефрактограммой 18, искажения формы которой обусловлены прохождением лазерной плоскости через область жидкости с имеющимися в ней оптическими неоднородностями. Изменение формы рефрактограммы во времени регистрируется цифровой видеокамерой фирмы «ВИДЕО-СКАН» 15, также сопряженной с персональным компьютером 16. Прохождение солитона вдоль слоя смешения жидкостей приводит к изменению во времени вида прямой теневой картины и рефрактограмм. На рис. 7 показан внешний вид экспериментальной установки.

Принцип использования прямотеневого метода для получения информации об исследуемом явлении проиллюстрирован на следующем примере.

Для понимания физических принципов зарождения солитона в двухслойной стратификации была предпринята попытка визуализации этого процесса прямотеневым методом. С этой целью области слева и справа от заслонки шлюзовой камеры освещались широким лазерным пучком.

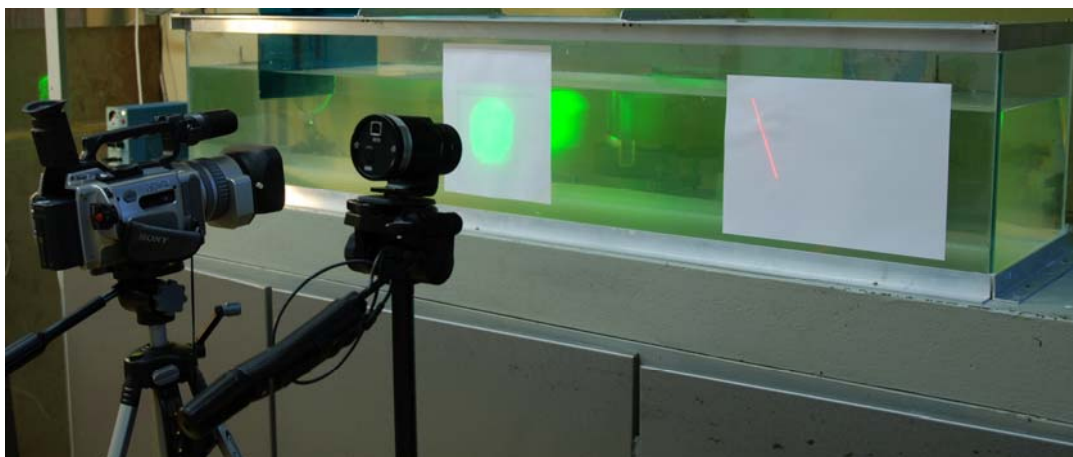
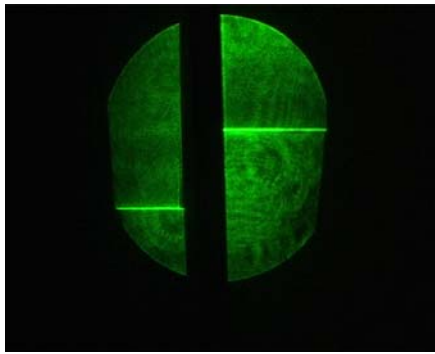


Рис. 7. - Внешний вид экспериментальной установки

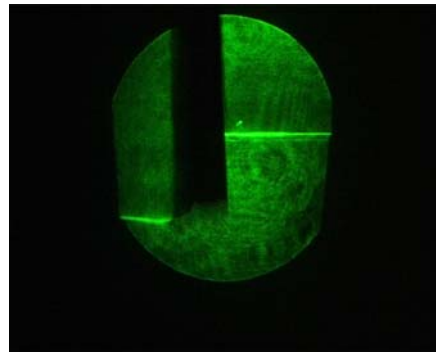
На рис. 8 приведена последовательность видеок кадров иллюстрирующих ход процесса зарождения солитона и начала его движения в кювете вдоль слоя смешения жидкостей. Пояснения даны в подписях к видеок кадрам.

Первый кадр хорошо иллюстрирует начальную разность η_0 уровней слоев смешения жидкостей в шлюзовой камере (слева от заслонки) и в основной части кюветы (справа от заслонки). Такое расположение уровней слоев смешения жидкостей было получено после вливания дополнительного объема чистой воды в шлюзовую камеру.

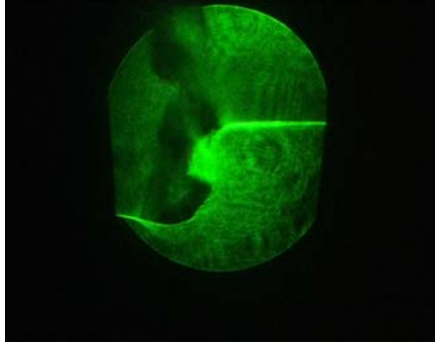
Работа рефрактографического компьютерно-лазерного канала экспериментальной установки может быть пояснена на примере регистрации рефрактограмм, вид которых изменяется во времени при движении внутреннего возмущения (внутреннего солитона) вдоль кюветы. С этой целью одновременно с регистрацией параметров солитона прямотеневым методом проводилась регистрация параметров солитона и компьютерно- лазерным рефрактографическим методом. На рис. 9 приведены видеок кадры с изображениями рефрактограмм, отображающими динамику прохождения солитона через лазерную плоскость. На первом видеок кадре показан вид рефрактограммы, получающейся при прохождении лазерной плоскости через слой смешения исследуемых жидкостей в отсутствии солитона (стационарное состояние невозмущенного слоя смешения жидкостей). На последующих видеок кадрах показано изменение вида рефрактограмм, отображающее динамику перемещения солитона вдоль слоя смешения жидкостей.



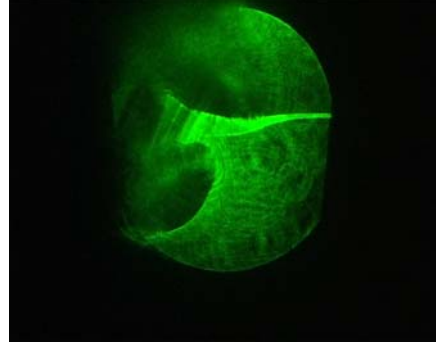
Заслонка шлюзовой камеры опущена



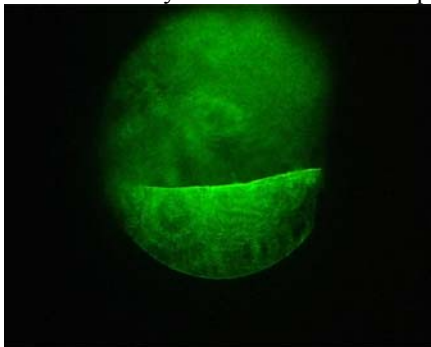
Начало подъема заслонки шлюзовой камеры



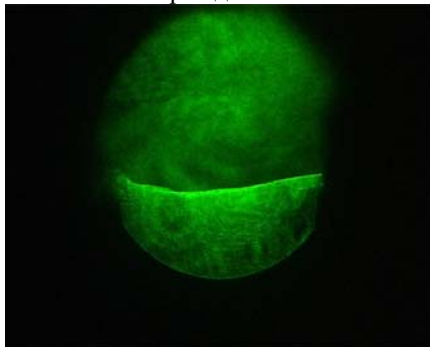
Заслонка вынута из шлюзовой камеры



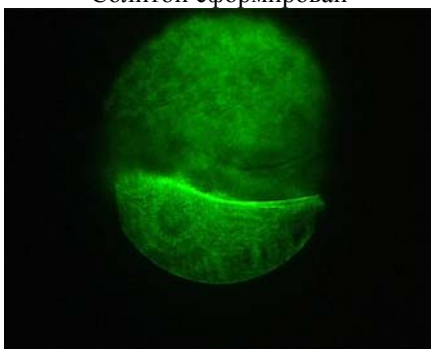
Начало зарождения солитона



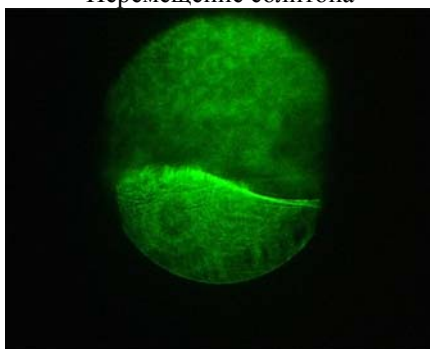
Солитон сформирован



Перемещение солитона

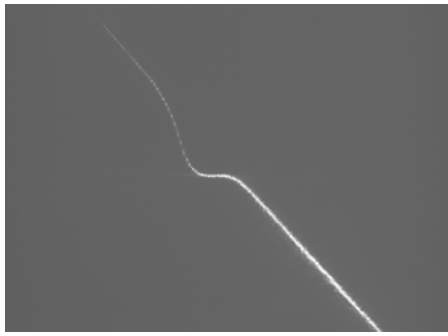


Перемещение солитона

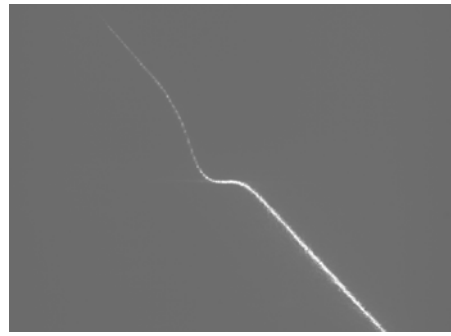


Перемещение солитона

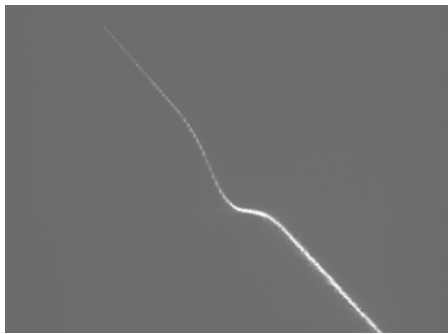
Рис. 8. Последовательность видеок кадров, иллюстрирующих ход процесса зарождения солитона и начала его движения в кювете вдоль слоя смешения жидкостей



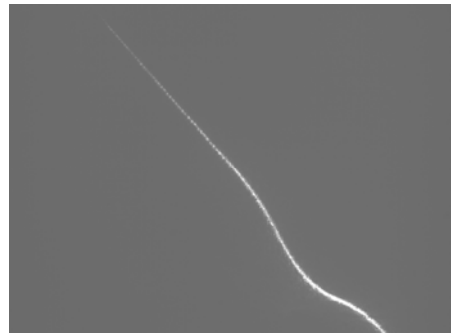
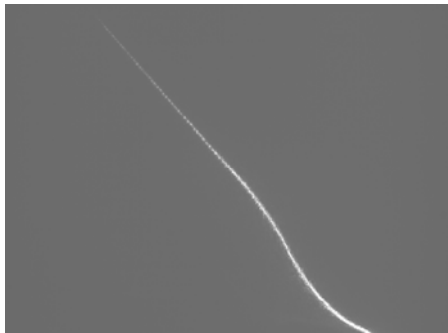
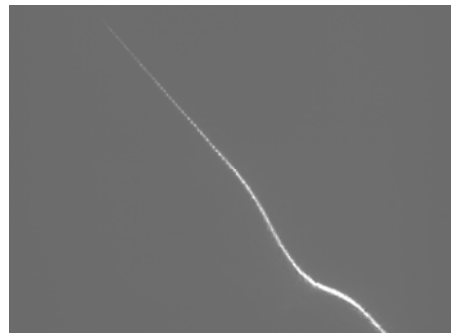
Вид невозмущенной рефрактограммы



Начало прохождения солитона через наклоненную лазерную плоскость



Нижняя точка солитона проходит через наклоненную лазерную плоскость



Солитон прошел через наклоненную лазерную плоскость (Вид рефрактограммы соответствует начальному состоянию)

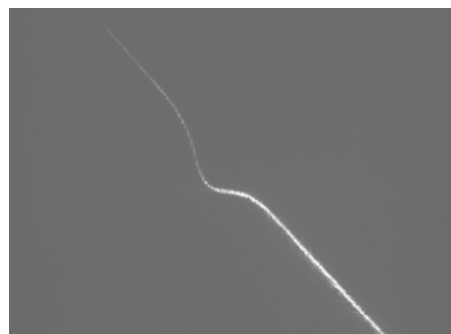
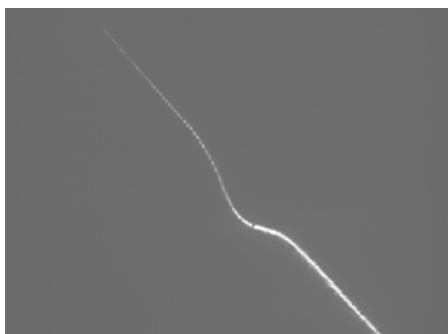


Рис. 9. Динамика изменения вида рефрактограмм при прохождении солитона вдоль слоя смешения жидкостей

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена экспериментальная установка, созданная для регистрации и изучения возмущений в тонком переходном слое солестратифицированной жидкости рефрактографическим и прямотеневым методами. Представлены первые экспериментальные результаты и теоретические выкладки, определившие габаритные размеры создаваемой установки и условия проведения экспериментов. Дальнейшая компьютерная обработка полученных картин визуализации позволила получить такие параметры нелинейных возмущений как амплитуда, период и скорость перемещения солитона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты ГК № 02.740.11.0449 и ГК-14.740.11.0594)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Океанология.** Физика океана. Т.1. Гидрофизика океана. Т.2. Гидрофизика океана /под редакцией В. М. Каменковича, А. С. Моница. М.: Наука, 1978. Т.1.-371 с., Т.2.-452 с.
2. **Арабаджи В.В., Богатырев С.Д., Баханов В.В. и др.** Лабораторное моделирование гидродинамических процессов в верхнем слое океана (Большой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН) // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: Сб. трудов / Под ред. В.И.Таланова, Е.Н. Пелиновского. – Н. Новгород, ИПФ РАН, 1999, т. 2, с. 231-251.
3. **Дружинин О.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.** Лабораторное и численное моделирование течения в дальнем следе в стратифицированной жидкости // Изв. РАН. ФАО.2006, Т. 42. №5. С. 1–18.
4. **Расковская И.Л., Сергеев Д.А., Ширинская Е.С.** Диагностика характеристик солестратифицированной жидкости методом лазерной рефрактографии. // Измерительная техника, 2010, №10, С. 36-38.
5. Методы гидродинамических исследований. Волны и вихри / ИПФ АН СССР. Горький, 1987.
6. **Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Лазерная рефрактография. – М.: Физматлит, 2008, 176 с.

I.L. Raskovskaya¹, M.V. Yesin¹, B.S. Rinkevichyus¹, D.A. Sergeev², A.V. Tolkachev¹

*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: rinkevbs@mail.ru*

²IAP RAS, 46 Ulyanov Street , 603950, Nizhny Novgorod , Russia

INVESTIGATION OF SINGLE INTERNAL WAVES IN SALT-STRATIFIED LIQUIDS

First experimental results of disturbance in transitional layer of salt-stratified liquids investigation with help of laser refractography and shadow methods are presented. Theoretical explanation of solitons in salt-stratified liquids are taken into account. Experimental set-up for soliton investigation is created.

LASER REFRACTOGRAPHY, OPTICALLY INHOMOGENEOUS MEDIA, SALT-STRATIFIED LIQUIDS, DISTURBANCE IN THE TRANSITIONAL LAYER, DIGITAL REFRACTOGRAPHY, SOLITON