

СЕКЦИЯ 9. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И ТЕЧЕНИЯ

Критические числа Рейнольдса в задачах на собственные значения для уравнения Орра-Зоммерфельда

Д.В. Георгиевский2

Внутренние волны в системе течений с циркуляцией, струей и придонным потоком

И.Н. Иванова, Б.И. Самолюбов3

Диффузия пятна тяжелых частиц на дне тонкого слоя вязкой жидкости в поле параметрически возбуждаемых стоячих волн

В.О. Аффенченко, С.В. Кияшко, А.В. Назаровский7

Генерация роликовых структур при параметрическом возбуждении капиллярных волн в кюветах сложной формы

С.В. Кияшко10

Усиление ветровых волн в неглубоких водоемах

О.Н. Мельникова, К.В. Показеев, Ф.Р. Потапов12

Дрейфовая скорость в области усиления ветровых волн

А.А. Рожновская, О.Н. Мельникова14

КРИТИЧЕСКИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА
В ЗАДАЧАХ НА СОБСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ
ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ОРРА – ЗОММЕРФЕЛЬДА

Д.В. Георгиевский

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
georgiev@mech.math.msu.su

На основе метода интегральных соотношений аналитически исследуется ряд задач на собственные значения для хорошо известного в линеаризованной теории гидродинамической устойчивости уравнения Орра – Зоммерфельда [1-3] и ряда его обобщений [4]. Такие задачи моделируют развитие со временем плоской картины возмущений, налагаемых на одномерный плоскопараллельный сдвиг ньютоновской вязкой жидкости либо среды с более сложными определяющими соотношениями. В качестве граничных условий выбирается один из трёх вариантов:

- кинематические условия прилипания на обеих границах слоя;
- условия прилипания на одной из границ и задание касательной компоненты вектора напряжения и нормальной компоненты скорости на другой;
- условия прилипания на одной границе и требование того, чтобы другая была свободна от напряжений (в этом случае в сами граничные условия явно входит спектральный параметр).

Развивается техника анализа энергетических неравенств и минимизации возникающих квадратичных функционалов, составляющих основу метода интегральных соотношений [5, 6], что приводит к новым, более сильным, нижним оценкам критических чисел Рейнольдса и других параметров устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Betchov, W.O. Criminale “Stability of Parallel Flows” N.-Y., London: Acad. Press, 1967 = Р. Бетчов, В. Криминале “Вопросы гидродинамической устойчивости” М.: Мир, 1971.
2. В.Б. Лидский, В.А. Садовничий // Изв. АН СССР. Сер. математ. 1968. Т. 32. № 3. С. 633-648.
3. S.A. Orszag // J. Fluid Mech. 1971. V. 50. No. 4. P. 689-703.
4. Д.М. Климов, А.Г. Петров, Д.В. Георгиевский “Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость, перемешивание” М.: Наука, 2005.
5. Д.В. Георгиевский // Современ. математ. Фундамент. направления. 2007. Т. 23. С. 96-146.
6. Д.В. Георгиевский // ПММ. 2010. Т. 74. № 4. С. 633-644.

ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В СИСТЕМЕ ТЕЧЕНИЙ С ЦИРКУЛЯЦИЕЙ, СТРУЕЙ И ПРИДОННЫМ ПОТОКОМ

И.Н. Иванова, Б.И. Самолубов

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет
e-mail: ivair@yandex.ru

Внутренние волны и, прежде всего крупномасштабные (сейшевой природы), существенно влияют динамику систем стратифицированных течений. Под системой течений понимается совокупность потоков, развивающихся на разных глубинах и взаимодействующих между собой. В ходе волновых преобразований меняются толщины течений и градиенты скорости. Это ведет к изменениям градиентов давления и турбулентных характеристик течений. Обзор результатов натурных исследований свидетельствует о том, что без учета волновых процессов недостаточно эффективны математические модели течений и переноса примесей [1, 2]. Исследованию внутренних волн и их влияния на систему течений с циркуляцией, струей и придонным потоком при разной устойчивости стратификации посвящена данная работа. Измерения параметров течений и состава воды выполнялись в Петрозаводской губе Онежского озера. Применялись доплеровский профилограф RDCP-600 и зонд RCM 9 LW (Aanderaa) [1]. Профили скорости течения регистрировались каждые 10 мин при шаге по глубине 0,5 м. Измерялись также профили температуры, электропроводности, концентраций кислорода и взвеси. Точности измерений указаны в [1]. Параллельно регистрировалась скорость ветра.

В условиях слабой плотностной стратификации (средняя по глубине частота Вайсяля-Брента $N=2-3 \cdot 10^{-2}$ Гц) измерения выполнялись на суточной станции 17-18.09.2007 г. Характер течения определялся

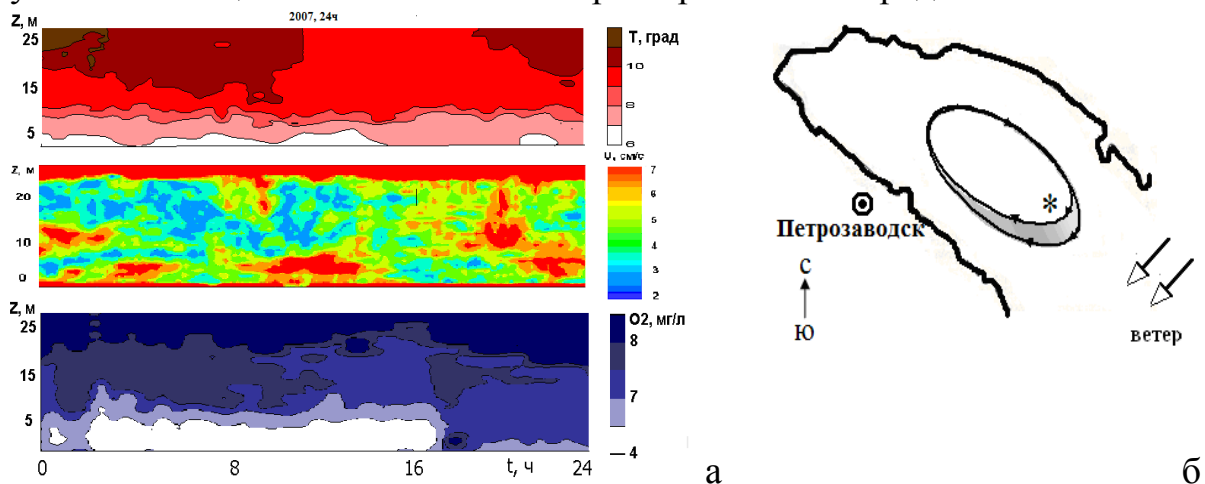


Рис. 1. а) Распределения температуры, модуля скорости течения и растворённого в воде кислорода по высоте над уровнем дна и во времени; б) карта-схема Петрозаводской губы и циркуляции и в период слабой стратификации 17-18.09.2007 г. Расположение вертикали зондирования показано символом*.

северо-восточным ветром со скоростью $U_w = 3 - 10$ м/с (рис. 1). Были зарегистрированы процессы воздействия внутренних волн на энергопередачу от дрейфового течения в глубинные слои и эффект размыва дна течением. Развивавшаяся циркуляция, обеспечивала поступление холодных вод открытого озера в залив. Зарегистрированы колебания изотерм в области термоклина с основным периодом озерных сейш (~ 4 ч) [3]. С тем же периодом вдоль дна проходили холодные линзы высотой до 4 м и протяженностью до 3 км. Анаэробная зона под термоклином постепенно исчезала к концу 24-ч серии измерений из-за сглаживания стратификации вод под влиянием циркуляции.

При сильной стратификации (средняя по глубине частота Вэйсяля-Брента $N=2.3 \cdot 10^{-2}$ Гц) и ветре со скоростью $U_w=5-12$ м/с получены данные об эволюции структур течений и параметров состава воды в ходе 36-часовой серии зондирований 13-15.08.2008 г. (рис. 2).

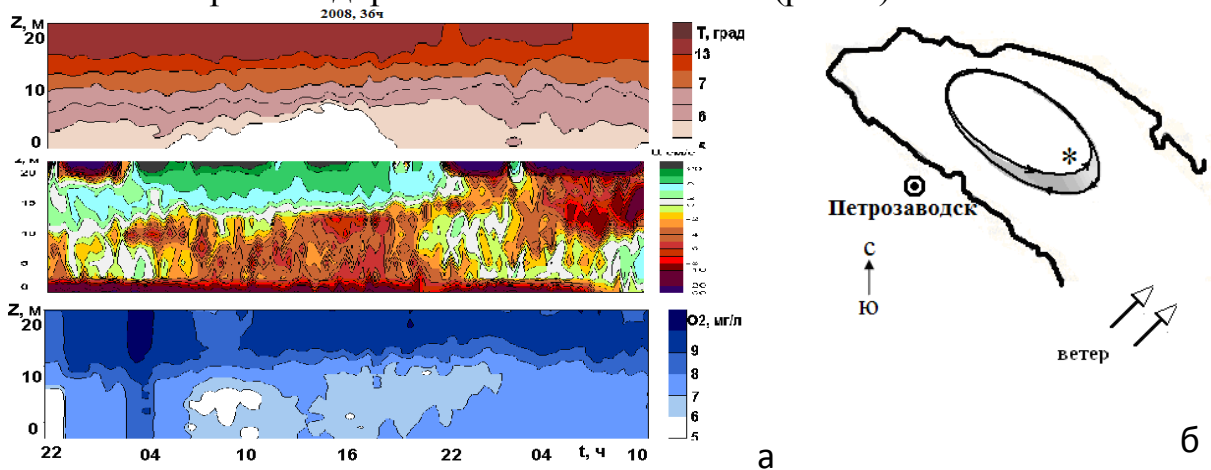


Рис. 2. Распределения температуры, продольной (вдоль по губе) компоненты скорости течения и растворённого в воде кислорода по высоте над уровнем дна и во времени - а; карта-схема Петрозаводской губы и циркуляционного течения при устойчивой стратификации 13 – 15.08.2008 – б.

В поле скорости течения имела место циркуляция сгонно-нагонного типа с противоположными направлениями дрейфового и придонного течений. В придонной области заметны волновые всплески толщины потока и развивающиеся в противофазе аналогичные колебания толщины промежуточной струи. Изотермы колеблются на частотах, которые внутренних волн. Волновое повышение скорости приводит к размыву дна течением, направленным на вертикали зондирований вверх по губе. Продукты размыва дна не покидают залив, поэтому выявленный эффект приводит к снижению качества воды в Петрозаводской губе.

При спектральном анализе результатов измерений в условиях слабой стратификации выявлены следующие основные энергонесущие периоды: 4 ч, 3 ч, 1ч 40 мин и 1 ч (рис. 3. а – е). Согласно [3], период 4 ч близок к одноузловой продольной сейше основной котловины Онежского озера, период 1 ч соответствует одноузловой продольной сейше Петрозаводской

губы. Остальные выявленные моды также связаны по природе со свободными и внутренними сейшами. Максимум на спектре флуктуаций скорости течения смещается в низкочастотную область с ростом высоты над уровнем дна.

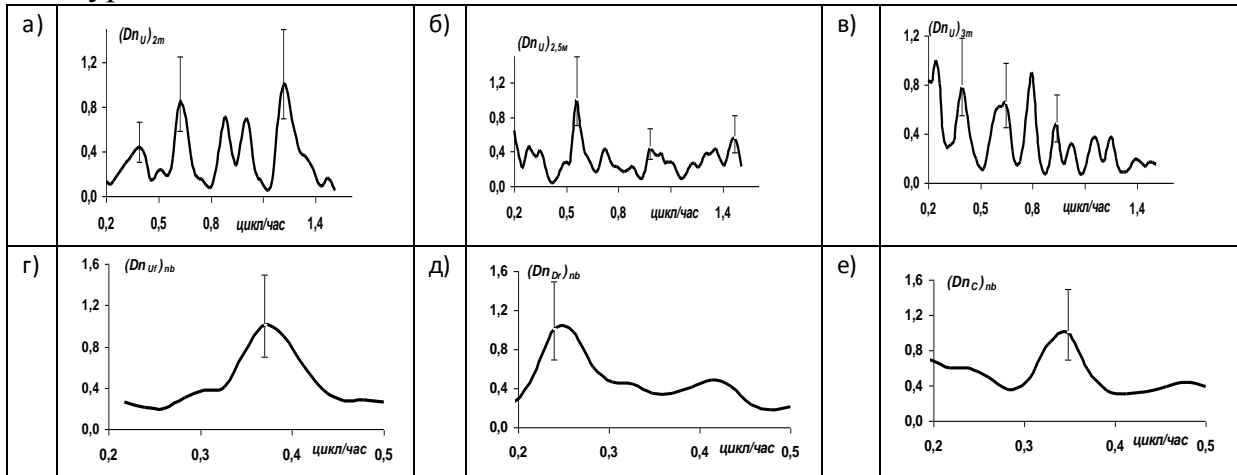


Рис.3. Спектры флуктуаций а, б, в, г - скорости течения на уровнях $z=2, 2,5, 3$ м и на верхней границе плотностного потока, д - плотности воды (средней по толщине придонного течения), е- минерализации воды (средней по всей глубине).

Аналогичное смещение наблюдалось на спектрах, полученных при сильной плотностной стратификации. Вид спектров (рис. 4) свидетельствует о сходном смещении основной моды с ростом высоты над уровнем максимума градиента плотности в верхних слоях ($z=16-22$ м). Основная мода на спектре при $z=22$ м (на глубине 0,5 м) совпадает с зарегистрированной на спектре флуктуаций ветра. Периоды для главных мод 3 ч 10 мин, 2 ч 20 мин, 1 ч 20 мин, 1 ч соответствуют внутренним сейшам губы и озера (2 ч 20 мин, 1 ч 20 мин, 1 ч). [3]

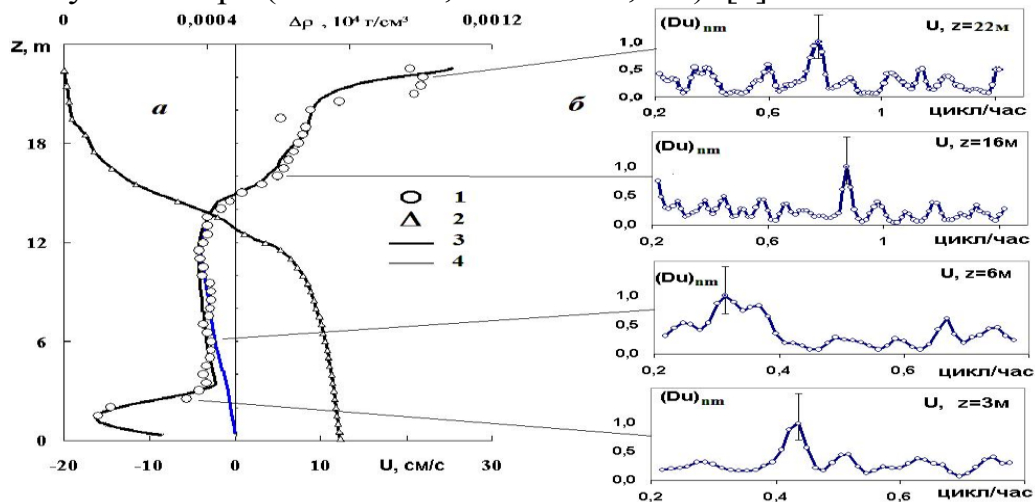


Рис. 4. а) распределения скорости течения $U(z)$ и изменения плотности воды с глубиной $\Delta\rho(z)$ по данным измерений 1,2 и расчёта U по моделям течения по всей глубине 3 и отдельно для циркуляционного потока 4; б) нормированные спектры флуктуаций скорости при $z=3, 6, 16$ и 22 м.

Расположение уровней, на которых доминируют низшие моды внутренних волн, согласуется с наблюдавшимися колебаниями термоклина в целом и слоя смещения придонного потока на частотах, соответствующих указанным модам. Профиль скорости течения на (рис. 4), осреднённый по 90 вертикальным распределениям $U(z)$ в период со стабильным по направлению Ю-З ветром с 03:00 до 18:00.14.08.2008 г., сопоставлен с теоретической кривой $U(z)$ из [2].

На основании полученных данных предложена гипотеза о механизме переноса импульса из придонного потока в вышележащую струю. По этой гипотезе внутренняя волна ускоряет поток, вызывая развитие неустойчивости в пограничном слое с генерацией вихреобразований, дальнейший подъем которых модулирован волновыми колебаниями верхней границы течения. Профили возмущений скорости построены с применением теории из [4], дополненной зависимостями возмущений скорости от устойчивости, высоты придонного потока и параметров волны. По этим зависимостям определяются коэффициент затухания, фаза и амплитуда возмущений. Теоретическое распределение скорости течения, включающее осреднённый профиль скорости и профиль ее возмущений, согласуется с данными измерений. Качественно аналогичный процесс без анализа профилей возмущений представлен в [5] по результатам численного моделирования подъема придонной взвеси в прибрежной зоне моря.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-05-01146-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Самолюбов Б.И., Иванова И.Н. Влияние волновых процессов на структуру стратифицированных течений в заливе. Известия РАН. Серия физическая, 2010 г, т.74, № 12, стр.1770-1774.
2. Samolubov B.I., Ivanova I.N. Transformations of turbulent viscosity distribution under the action of internal waves in the system of stratified currents. Physics of Wave Phenomena, Vol.19, 4, 2011 г.
3. Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.: Гидрометиздат, 1983.
4. Бетчов В., Криминале В. Вопросы гидродинамической устойчивости. М.: "Мир", 1971.
5. M. Stastna, K.G. Lamb. //J. of Geoph. Res. 2008. V. 113, C10016

ДИФФУЗИЯ ПЯТНА ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ НА ДНЕ
ТОНКОГО СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПОЛЕ
ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ВОЗБУЖДАЕМЫХ СТОЯЧИХ ВОЛН

В.О. Афенченко, С.В. Кияшко, А.В. Назаровский
Институт Прикладной Физики РАН, Нижний Новгород
afen@appl.sci-nnov.ru

Нами была исследована динамика пятна тяжелых частиц на дне тонкого слоя вязкой жидкости под действием поля параметрически возбуждаемых стоячих волн. Подобные задачи о движении частиц в поле гидродинамических течений часто возникают при исследовании процессов, происходящих в океанологии, биофизике, астрофизике, а также и при решении различных прикладных проблем, возникающих при разработке технологий [1]. Исследование движения частиц в параметрически возбуждаемой капиллярной ряби проводилось в ряде работ [2,3,4] для случая, когда при превышении порога генерации на поверхности протяженного слоя жидкости малой вязкости, колеблющегося в вертикальном направлении, возникают две взаимно ортогональные стоячие волны. В настоящей работе мы экспериментально исследуем перенос поверхностными волнами тяжелых частиц примеси, находящихся изначально на дне, в отличие от исследованных ранее случаев взвешенной или плавающей на поверхности примеси. В этом случае для переноса примеси в жидкости должны создаваться силы, способные сдвинуть тяжелые частицы из состояния равновесия на дне.

Эксперимент проводился следующим образом. В кювету из алюминия с диаметром 140 мм. помещался слой жидкости с глубиной 0,7-1,5 мм. Затем на дне кюветы создавалось круглое пятно из микрочастиц меди толщиной 0,05-0,5 мм. Для создания двумерной структуры параметрически возбуждаемых стоячих волн кювета с жидкостью помещалась на стол вибростенда фирмы TIRA VIB. После включения вибростенда при увеличении амплитуды внешней силы выше некоторой критической величины на поверхности жидкости возникала квадратная структура из двух пар взаимно ортогональных стоячих волн. При малых надкритичностях структуры стоячих волн были регулярными, а при больших надкритичностях возникали дефекты и далее хаос дефектов. При этом при появлении дефектов регулярная структура стоячего поля нарушалась, дефекты возникали случайным образом во времени и в пространстве. Далее с ростом числа дефектов происходил переход к пространственно-временному хаосу.

При определенной глубине слоя жидкости проводились серии экспериментов при фиксированных параметрах жидкости для различных размеров и толщин пятна тяжёлых частиц. В каждой серии экспериментов при фиксированной частоте и амплитуде внешней силы делались

видеозаписи динамики пятна длительностью до десяти минут. После чего они обрабатывались на компьютере и строились графики зависимости размеров пятна и плотности частиц в пятне для различных моментов времени. Подобные серии экспериментов проводились для различных размеров и толщине слоя частиц, типичная картина распределения примеси показана на Рис.1.

Было экспериментально установлено, что в исследуемом диапазоне частот основными параметрами, которые влияют на качественно различное поведение динамики пятна примеси являются амплитуда колебаний стоячих волн в месте нахождения частиц примеси (которая зависит от надкритичности и глубины слоя жидкости) и исходная толщина слоя частиц. Выяснилось, что процесс образования структуры из пятна примеси тяжелых частиц носит пороговый характер и при малых надкритичностях размывание пятна не происходит, а процесс начинается при превышении надкритичностью некоторой пороговой величины. В измеренном диапазоне частот накачки от (34-121Гц) эта величина была $\sim 0,25$. При превышении амплитуды накачки критической во всем частотном диапазоне наблюдался процесс переноса примеси. В результате происходило образование пространственно периодической структуры распределения плотности частиц из однородного распределения частиц в исходном пятне. Исходный размер пятна частиц при этом практически не изменялся. После установления стационарного распределения плотности частиц в пространстве процесс образования структуры прекращался. С ростом надкритичности скорость процесса также увеличивалась.

При увеличении исходной толщины слоя процесс оставался подобен лишь до некоторой толщины исходного слоя. Эксперименты показали, что существует предельное значение толщины, после которого процесс качественно меняется и начинается процесс диффузионного увеличения площади пятна. Характерное время установления стационарного распределения при этом увеличивается на порядок. При этом одновременно происходил, как и ранее, процесс образования структуры по всей площади исходного пятна и одновременно диффузия излишнего объёма частиц по краям пятна. Процесс диффузии прекращался после того, как по всей площади исходного пятна устанавливалось распределение, близкое к стационарному. Как уже указывалось ранее, при увеличении надкритичности накачки на фоне регулярной периодической структуры стоячего поля могут возникать нарушения порядка в виде отдельных дефектов, а далее при увеличении их числа поле становится хаотическим в пространстве и времени. Обнаружено, что при этом поведение в системе качественно скачком меняется и скорости диффузионных процессов увеличиваются в несколько раз. Предложены модельные уравнения, описывающие диффузию исходного пятна примеси и установление стационарной структуры распределения примеси.

Предложено объяснение существования пороговой толщины слоя, от которой качественно зависит характер переноса примеси.

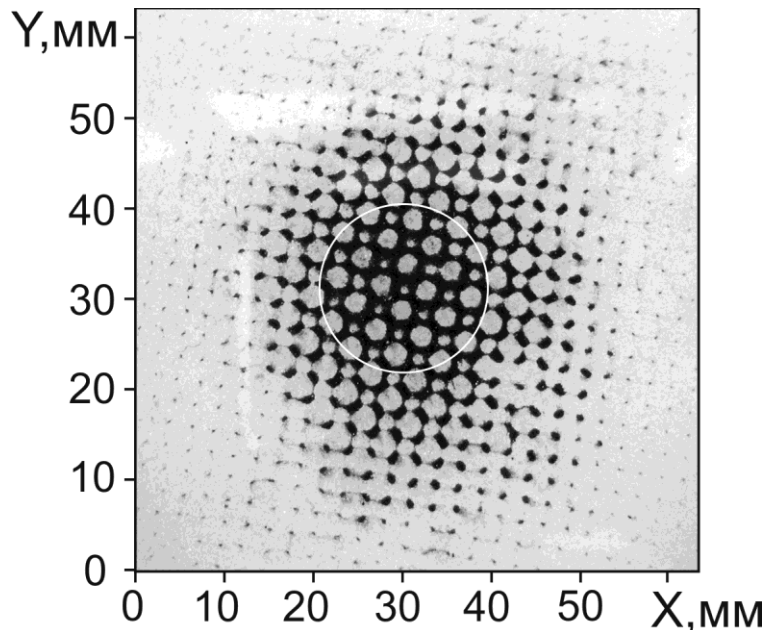


Рис. 1. Типичная картина распределения плотности частиц примеси в пространстве через 500 сек. после включения внешнего поля в случае большой толщины исходного слоя частиц примеси ($h_0 = 0,12\text{мм}$, $\varepsilon = 0,37$, $H = 1,2\text{мм}$, $F = 61\text{Гц}$). Белая окружность соответствует размеру исходного пятну примеси ($R = 11\text{мм}$).

ЛИТЕРАТУРА

1. J.M.Ottino, The kinematics of mixing: stretching, chaos, and turbulence. Cambridge University press, Cambridge 1989.
2. J.P.Gollub // Physica D, 1991, V.51, P.501.
3. O.N.Mesquita, S.Kane, J.P.Gollub // Phys.Rev. A, 1992, V.45, No.6, P.3700.
4. R.Ramshankar, D.Berlin, J.P.Gollub // Phys. Fluids A 2, 1990, P.1955.
5. V. O. Afenchenko, A. B. Ezersky, B. S. Kaverin, S. V. Kiyashko, and S. A. Chesnokov // Physics of Wave Phenomena, 2011, Vol. 19, No. 1, pp. 68–73.

ГЕНЕРАЦИЯ РОЛИКОВЫХ СТРУКТУР ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН В КЮВЕТАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

С.В. Кияшко

Институт Прикладной Физики РАН, Нижний Новгород
kiyashko@appl.sci-nnov.ru

При экспериментальном исследовании процессов генерации в автоколебательных системах часто наблюдается мультистабильность, т.е. при неизменных параметрах системы после включения возникают различные устойчивые режимы. Появление того или иного устойчивого состояния зависит лишь от начальных условий в процессе неустойчивости. При этом стационарные состояния могут отличаться и пространственной структурой поля. Подобная ситуация рассматривается в настоящем сообщении, где представлены результаты экспериментальных исследований процессов возникновения роликовых структур, образованных стоячими волнами на поверхности слоя вязкой жидкости в осциллирующем поле тяжести [1]. Неустойчивость при этом создается параметрической накачкой, а ограничение роста амплитуды стоячих волн происходит из-за нелинейной зависимости вязких потерь от амплитуды. При большой вязкости жидкости из-за сильной конкуренции могут существовать только роликовые структуры стоячих волн, что и наблюдается в нашем эксперименте.

В представленной работе экспериментально исследуется процесс генерации роликовых структур в кюветах сложной формы при наличии возмущений на поверхности жидкости. В качестве рабочей жидкости мы использовали силиконовое масло ПМС-100 большой вязкости (вязкость в 100 раз больше вязкости воды). Кюветы изготавливались из толстого оргстекла и фиксировались болтами к вибростенду. Для улучшения равномерности осцилляций по площади кюветы использовался демпфирующий материал между вибростендом и дном кюветы. Затем при фиксированной глубине жидкости и частоте внешнего сигнала на вход усилителя вибростенда подавали синусоидальное напряжение. Созданные вертикальные колебания кюветы приводили к параметрическому возбуждению поверхностных волн в слое жидкости. В ходе эксперимента амплитуду и частоту колебаний кюветы $\sim 41-81$ Гц, а также глубины жидкости 4-8 мм. Изображение паттернов, образованных капиллярными волнами, записывалось с помощью цифровой видеокамеры, а затем вводилось в компьютер для дальнейшей обработки.

Проводились серии экспериментов с кюветами прямоугольной формы и квадратной с внутренним закруглением. При включении накачки на вертикальной границе кюветы возникали сильно затухающие сдвиговые волны, которые служили начальными возмущениями для возбуждения

стоячих роликовых структур. Эти возмущения повторяют форму кюветы, что приводит к установлению различных стационарных режимов зависящих от формы кюветы. В прямоугольной кювете наблюдаются прямые ролики, параллельные одной из стенок, в круглой кювете – круговые, а в кювете с закругленными краями – изогнутые.

Экспериментально обнаружено, что процесс установления стационарных роликовых структур происходит в два этапа. На первом этапе в результате роста начальных возмущений возникают роликовые домены с различной ориентацией в пространстве. Затем начинается на порядок более медленный процесс нелинейной конкуренции этих доменов [2]. Конкурирующие домены взаимодействуют на границе их раздела. При этом одни домены увеличивают свою площадь за счет других доменов, постепенно поглощая их.

Экспериментально найдены основные сценарии перестройки доменов, которые были различны в зависимости от случайных начальных возмущений. Показано, что при наличии случайных возмущений на поверхности жидкости возможна также генерация спиральных волн.

Во второй серии экспериментов изучалась генерация спиральной волны при наличии неоднородных начальных условий в кюветах квадратной и круглой формы. Для этого над центром кюветы помещали два цилиндра с диаметрами меньше четверти длины волны до касания поверхности жидкости. Затем плавно увеличивали амплитуду внешнего поля до возникновения неустойчивости. Так как из-за мениска вблизи полупогруженных цилиндров средняя глубина жидкости больше, то неустойчивость начинается вблизи от них, и возникающая при этом структура поля будет выполнять роль неоднородных начальных условий для генерации спиральной структуры стоячего поля. Затем цилиндры извлекались из жидкости, и устанавливалась одна из возможных стационарных структур. Изменяя расстояние между цилиндрами и повторяя процедуру многократно можно было получить генерацию спиральной волны с различным числом ее рукавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kiyashko S.V., Korzinov L.N., Rabinovich M.I., Tsimring L.S. Rotating spirals in a Faraday experiment, *Phys. Rev. E* 1996, vol. 54, No. 5 p. 5037-5040.
2. Afenchenko V.O., Kiyashko S.V., Piskunova L.V. Motion of front at competition of roll domains of parametrically excited capillary waves, *Izv. VUZov, ser. fizich.* 2004, vol. 68, No. 12, p. 1771-1775.

УСИЛЕНИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В НЕГЛУБОКИХ ВОДОЕМАХ

О.Н. Мельникова, К.В. Показеев, Ф.Р. Потапов

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,

физический факультет

olamel@yandex.ru

Известно, что в зоне генерации волн горизонтальным ветровым потоком формируются плоские гравитационно-капиллярные волны. Пока скорость воздушного потока выше фазовой скорости волн $u > c$, амплитуда, длина и фазовая скорость волн растут. Усиление волн обусловлено неравномерным распределением давления воздуха вдоль волны. Ранее нами экспериментально показано, что при $u > c$ на переднем склоне плоских и трехмерных волн происходит периодическая остановка вязкого слоя воздуха за счет силы трения на нижней границе слоя и обратного градиента давления на его верхней границе. При этом формируются вихри, покидающие вязкий слой после его остановки. Экспериментально доказано, что вихри, формирующиеся в вязком слое тормозящегося в направлении движения потока воздуха над передним склоном волны, деформируют ее профиль. В результате такой деформации растет амплитуда и крутизна волны. Деформация склона волны рассчитывается по простой схеме: каждый вихрь успевает поднять полоску поверхности

воды до своей границы на высоту D , за время $\tau = \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{g}}$, где D – расстояние

между вихрем и водой, g – ускорение силы тяжести. Количество вихрей и период их образования рассчитывается по модели, полученной нами, включающей скорость ветра и градиент скорости над склоном волны как параметры [1]. Крутизна плоской диспергирующей волны растет при воздействии вихрей на переднем склоне до критического значения $a_k = 0.31$, затем распадается на две длинные трехмерные волны. Новые трехмерные волны растут и при достижении критического значения крутизны распадаются на еще более длинные волны. Процесс усиления представляет собой циклический процесс роста и распада волн. Построен простой метод прогноза усиления диспергирующих волн на глубокой воде. Целью настоящей работы является построение метода прогноза усиления волн ветром в водоеме конечной глубины при действии постоянного штормового ветра.

При распаде плоской диспергирующей волны критической крутизны возникают две более длинные волны с поперечной модуляцией фронта: новые волны уже не являются плоскими. При распаде выполняются условия фазового синхронизма для частот $\omega_j = \omega_j(\vec{k}_j)$ и волновых чисел k , амплитуды связаны условием сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3 &= 0 & k_0 &= k_1 \\ \vec{k}_1 \pm \vec{k}_2 \pm \vec{k}_3 &= 0 & a_0^2 &= a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\omega = kc$ (c – фазовая скорость), индекс 0, после распада этой длине волны соответствует индекс 1, более длинные волны – индексы 2, 3, причем, чем длиннее волна, тем больше ее амплитуда. Соотношение между длинами волн в зависимости от числа Фруда ($Fr = c / \sqrt{gh}$, h – глубина) получено экспериментально [1]. Для чисел Фруда $0.4 < Fr < 0.73$ при распаде появляются волны, длина которых во много раз превышает длину распавшейся волны предельной крутизны, а для $Fr > 0.73$ явление не наблюдается. Расчеты показывают, что крутизна новых волн достаточно мала $ak_{2,3} < 0.11$ и их фазовая скорость удовлетворяет дисперсионному соотношению для линейных волн на глубокой воде. Для водоемов конечной глубины фазовая скорость длинной волны, возникающей при распаде, оказывается несколько меньше скорости линейной волны. Получено выражение зависимости фазовой скорости длинных волн от крутизны и числа Фруда. Это позволило построить метод расчета увеличения амплитуды волны по схеме, приведенной в [1]. Метод проверен для натурных исследований волн в Азовском море, расчетные данные хорошо соответствуют натурным вдоль всего разгона, что не удастся получить существующими методами, основанными на стохастической модели поля волн. Кроме того, предложенная модель позволяет объяснить возникновение инфра-гравитационных волн (период более 20с) на больших разгонах в мелких водоемах. Если штормовой ветер дует достаточно долго, формируя длинные ветровые волны (большие числа Фруда), то при распаде может появиться длинная волна, во много раз превышающая длину распавшейся волны. Результаты расчета для Азовского моря при частом штормовом ветре юго-западного направления предсказывают появления длинной волны порядка 100 м и высотой 1 м в центральной части моря (150 км вдоль разгона), что соответствует наблюдениям. В Таганрогской бухте (конечный участок разгона) амплитуда волны растет на мелководье и достигает 2-2.5 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Е. Гущин, О. Н. Мельникова, К. В. Показеев. //Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 12, с. 1742.

ДРЕЙФОВАЯ СКОРОСТЬ В ОБЛАСТИ УСИЛЕНИЯ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

А.А Рожновская¹, О.Н. Мельникова²

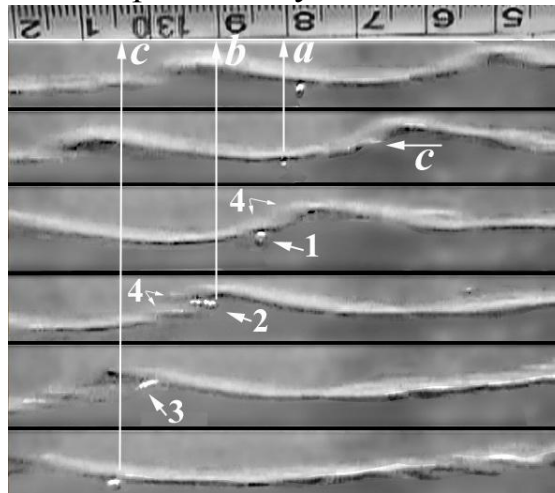
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет

¹nastya.sniper@mail.ru, ²olamel@yandex.ru

Для прогнозирования распространения поверхностного загрязнения в океане, решения фундаментальных проблем генерации и усиления ветром волн необходимо определение ветрового дрейфового течения. До настоящего времени составляющая дрейфовой скорости u_{dr} , связанная с силой трения изучена очень слабо в отличие от волновой составляющей. Ветровые волны на воде обычно возникают одновременно с появлением течения, обусловленного силами вязкости. Условия обтекания волны ветром существенно различны на заднем и переднем склонах: в первом случае поток ускоряется в направлении движения, во втором – замедляется. В результате замедления воздушного потока над передним склоном волны происходит отрыв вихрей в вязком слое воздуха, приводящий к снижению силы трения. В [1] было показано, что частота отрыва вихрей пропорциональна скорости ветра, продольному градиенту скорости и, соответственно, крутизне волны. Крутизна волны может меняться существенно при заданной скорости ветра. Возможно, что поэтому интервалы измеренных значений дрейфовой скорости для одной и той же скорости ветра весьма широки. Измерения дрейфовой скорости, осредненной по длине волны, в натуральных и лабораторных исследованиях показали, что отношение $u_{dr} \cdot u^{-1}$ составляет по разным источникам от 0.008 до 0.05 [2-4]. Существенные отличия в величине дрейфовой скорости на гладкой и взволнованной поверхности воды при одной и той же скорости ветра были обнаружены в [2]. Подробно процесс развития дрейфового течения в области усиления ветровых волн не изучался, что и является целью нашей работы. Задача решалась экспериментально.

Эксперименты проводились в прямом ветровом канале с прозрачными стенками длиной 3.5 м. Для определения дрейфового течения на поверхности воды выполнялась видеозапись перемещения частицы нейтральной плавучести из полистирола на нижней границе водной поверхности (без соприкосновения с воздухом) на оси потока. Дрейфовая скорость в каждой точке определялась как разность скорости перемещения вдоль поверхности (по записи) и проекции скорости волнового движения на касательную к поверхности. Учитывалось дрейфовое движение жидкости, возникающее в нелинейной волне на поверхности вязкой жидкости [5]. Однако эта составляющая более чем на порядок меньше ветровой и может быть опущена в пределах ошибки эксперимента.

Изучался дрейф на заднем и переднем склонах волны. На рисунке приведены последовательные кадры записи ветровой волны и частички под поверхностью воды. Смещение частицы на переднем склоне волны (ab) в полтора раза меньше, чем на заднем склоне (bc). Над передним склоном волны (где поток воздуха замедляется) происходит периодическое разрушение вязкого слоя воздуха вылетающими вихрями, что резко ослабляет воздействие воздушного потока на дрейф жидкости. Однако за счет вязкости течение не успевает остановиться [5]. Можно сделать вывод, что наблюдаемая разность скорости на заднем и переднем склонах волны связана с особенностями движения вязкого слоя воды в области формирования и отрыва вихрей в воздухе.



Размер частички у подножья переднего склона резко возрастает, форма близка к окружности (1). Выше по склону частичка оставляет треки под углом к водной поверхности (2,3). Это позволяет предположить, что частичка вовлечена в вихревое движение. Такое движение может возникнуть при смещении водной поверхности при каждом вылете вихрей из вязкого слоя воздуха. Деформация поверхности переднего склона показана на рисунке цифрой 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. О.Н. Мельникова, Т.А. Нивина // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2008. Т.72. № 12. С. 1789. (O. N. Melnikova, T. V. Nivina // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2008, Vol. 72, No. 12, pp. 1693–1696. © Allerton Press, Inc., 2008.)
2. G.T. Csanady // J. Phys. Oceanogr. 1985. № 15. P. 1486.
3. M.L Banner, W.K. Melvill // J. Fluid Mech. 1976. V. 77. P.825.
4. Н. Камура, У. Тоба // J. Fluid Mech. 1988. V. 197. P.105.
5. Д.Ф. Белоножко, А.В. Козин // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. В. 4. С. 32.