

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

На правах рукописи

ЕЖОВА Екатерина Валерьевна

**НЕСТАЦИОНАРНАЯ ДИНАМИКА
ВЫНУЖДЕННЫХ ПЛАВУЧИХ СТРУЙ
В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2011

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Ю. И. Троицкая

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
М.В. Курганский
(Институт физики атмосферы
им. А.М. Обухова РАН)

доктор физико-математических наук
Ю. В. Чугунов
(Институт прикладной физики РАН)

Ведущая организация: Институт океанологии им. П.П. Ширшова
РАН

Защита состоится 12 мая 2011 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного
совета Д 002.069.01 в Институте прикладной физики РАН по адресу: 603950
г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института при-
кладной физики РАН.

Автореферат разослан “ 08 ” апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

А. И. Малеханов

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Турбулентная струя – классическая модель целого ряда течений в атмосфере и океане. Примерами являются течения в природных водоемах, атмосферные потоки, газовые выбросы при извержении вулканов, гидротермальные источники на поверхности земли и в глубине океана, источники пресной воды в прибрежной зоне, метановые струи, высвобождающиеся из разломов земной коры, мутьевые потоки, пылевые бури и лавины снежной пыли в атмосфере, следы, возникающие при обтекании препятствий. Модели плавучих струй также применимы к описанию промышленных выбросов в атмосферу из дымовых труб, газовых выхлопов отработанного топлива, горелок, используемых для рассеяния тумана на взлетных дорожках самолета, впрыска топлива в инжекторных двигателях, обогрева ангаров. Струйные течения играют ключевую роль в технологии утилизации жидких отходов прибрежных городов.

Детально исследованы стационарные режимы струйных течений [1*-3*]. В частности, для струй в однородной жидкости, импульс и плавучесть которых разного знака, и струй в стратифицированной жидкости разработаны интегральные модели, позволяющие рассчитать зависимость основных параметров течения от координат. Важным примером таких течений является фонтан – струя отрицательной плавучести, направленная вертикально вверх. Течение, подобное фонтану, может формироваться в жидкости со стратификацией, близкой к двухслойной, если в нижнем слое жидкости возникает турбулентная струя положительной плавучести. Тогда на входе в область скачка плотности (пикноклина) струя имеет положительный вертикальный импульс и плотность ее ниже, чем плотность верхнего слоя стратификации. В стационарном режиме фонтан характеризуется средней высотой подъема, около которой слабо флуктуирует его верхняя граница.

В последнее время большой интерес вызывают более сложные нестационарные режимы струйных течений. Можно выделить два типа таких течений. В одном случае нестационарность струи связана с нестационарностью источника массы или импульса. Примерами хорошо изученных течений от нестационарных источников являются термики и плавучие вихревые кольца [4*,5*]. В другом случае наблюдается нестационарное поведение струи от стационарного источника, которое связано с развитием гидродинамической неустойчивости. Исследованию неустойчивости струйных течений посвящено множество работ, как экспериментальных, так и теоретических (см., например, [6*-8*]). В зависимости от типа неустойчивости струйные течения могут проявлять свойства усилителей внешнего шума (конвективная неустойчивость) или генераторов (абсолютная неустойчивость). В первом случае возмущения сносятся вниз по течению и нарастают в пространстве. Во втором – возмущения нарастают в ограниченной области пространства. Абсолютная неустойчивость струйных течений, как правило, связана с противото-

ком на профилях продольной скорости или разницей плотностей струи и окружающей жидкости [9*]. Абсолютная неустойчивость является возможной причиной нестационарного режима фонтанов, для которого характерны периодические колебания верхней границы.

Впервые такие режимы описаны в работе Тернера [10*]. Нестационарная динамика фонтанов, бьющих из-под поверхности воды, обсуждается в работах [11*,12*]. Показано, что при определенном выборе параметров течения, фонтан совершает самоподдерживающиеся колебания, которые сопровождаются возбуждением поверхностных волн. В более поздних экспериментальных работах описываются периодические колебания затопленных фонтанов в однородной жидкости, которые наблюдаются как в турбулентном [13*], так и в ламинарном режимах [14*]. Можно ожидать, что в определенном диапазоне контрольных параметров (число Ричардсона Ri , число Рейнольдса Re) фонтан, образующийся в области пикноклина при распространении турбулентной струи положительной плавучести, будет функционировать в нестационарном режиме.

В настоящей работе впервые исследована нестационарная динамика вынужденных плавучих турбулентных струй в стратифицированной жидкости с резким перепадом плотности (пикноклином). Показано, что струя в области пикноклина совершает квазипериодические колебания в вертикальной плоскости, при этом экспериментально обнаружены признаки автоколебательного режима. Возможность развития автоколебаний подтверждена теоретическим расчетом: показано, что течение в этой области абсолютно неустойчиво.

В неоднородной жидкости неустойчивость струйных течений может приводить к генерации внутренних волн. Развитие гидродинамической неустойчивости плавучих и вынужденных струй сопровождается образованием на них вихрей. Возбуждение внутренних волн вихрями на конвективно неустойчивых горизонтальных струях, например, следах за препятствием, обсуждается в работах [15*,16*], а в работе [17*] описана автогенерация внутренних волн в турбулентном стратифицированном сдвиговом потоке. Нестационарная динамика вертикальной струи в области пикноклина также может приводить к генерации внутренних волн. Механизм возбуждения внутренних волн, при котором в качестве источника выступают колебания турбулентной плавучей струи в области пикноклина, впервые изучается в данной работе.

В натуральных условиях внутренние волны, возбуждаемые колебаниями плавучих струй в области пикноклина, могут отображаться на поверхности воды за счет трансформации поля поверхностных волн. Это дает возможность дистанционного мониторинга подводных струйных течений, таких как гидротермальные источники в глубине океана, источники пресной воды в прибрежной зоне, сбросовые системы подводных коллекторов, по их проявлениям на поверхности. В настоящей работе изучены поверхностные проявления внутренних волн, возбуждаемых вынужденными плавучими струями, моделируемыми стоки подводных коллекторов типичных сбросовых систем.

Основной целью диссертации является теоретическое и экспериментальное исследование нестационарной динамики турбулентных струйных течений в жидкости со стратификацией пикноклинного типа, а также изучение поля внутренних волн, генерируемых такими течениями, и оценка их поверхностных проявлений. В соответствии с этой целью в настоящей работе решались следующие конкретные задачи:

1. Экспериментальное исследование динамики вынужденных плавучих струй в стратифицированной жидкости с использованием методов оптической цифровой анемометрии.
2. Изучение механизма генерации внутренних волн вынужденными плавучими струями.
3. Масштабное лабораторное моделирование струйных течений от стоков подводных сбросовых систем.
4. Исследование структуры, дисперсионных свойств и проявлений на поверхности воды внутренних волн, генерируемых плавучими струями.
5. Оценка гидродинамических контрастов, создаваемых внутренними волнами в поле поверхностных волн в натуральных условиях, на основании данных масштабного моделирования.

Научная обоснованность и достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается сравнением полученных экспериментальных результатов с теоретическими расчетами. Все программы расчетов тестировались на известных аналитических зависимостях, описанных в литературе. Основы теоретических моделей, используемых в настоящей работе, опубликованы в книгах и научных журналах и применяются на настоящий день при исследованиях. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих российских журналах, докладывались на российских и международных конференциях.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту. Научная новизна диссертационной работы определяется полученными в ней оригинальными результатами:

1. Вынужденные плавучие турбулентные струи в стратифицированной жидкости с резким скачком плотности (пикноклином) могут совершать квазипериодические колебания, которые эффективно генерируют внутренние волны.
2. Внутренние волны преимущественно возбуждаются осесимметричной модой колебаний турбулентного струйного течения, которая развивается на непараллельной струе с автомоделными профилями скорости, моделирующей течение в нижней части пикноклина.
3. Турбулентная струя кругового сечения в области пикноклина демонстрирует поведение, характерное для автоколебательного режима. Возможность автоколебаний обусловлена абсолютной неустойчивостью струйного течения.

4. Сдвиговое течение под пикноклином, формирующееся при растекании плавучей струи на горизонте нейтральной плавучести, оказывает существенное влияние на структуру и дисперсионные свойства внутренних волн. Плавучие турбулентные струи возбуждают две низшие моды внутренних волн, первая из которых локализована в области пикноклина, а вторая - в области горизонтального струйного течения.
5. Гидродинамические контрасты, создаваемые в поле поверхностных волн внутренними волнами, генерируемыми вынужденными плавучими струями от типичного подводного коллектора сточных вод, могут быть обнаружены современными дистанционными методами.

Практическая значимость.

В работе показано, что плавучие струи в жидкости со стратификацией пикноклинного типа, характерной для верхнего слоя океана, эффективно генерируют внутренние волны, проявления которых на поверхности могут быть зарегистрированы дистанционными методами. Результаты диссертации могут использоваться при разработке дистанционных методов мониторинга функционирования сбросовых систем сточных вод, а также применяться для обнаружения струйных течений в океане, например, гидротермальных источников в глубине океана, источников пресной воды в прибрежной зоне.

Результаты работы использовались при выполнении проектов РФФИ (04-05-64264-а, 06-05-64473-а, 06-05-64890-а, 07-05-00565-а, 08-05-97013-р_поволжье_а, 09-05-97012-р_поволжье_а, 09-05-00779-а, 09-05-00487-а), Гранта Президента МК 1982.2009.5, гранта Ведущей научной школы НШ-6043.2006.2 академика В.И. Таланова, работ по договору с ЗАО НПО «ИСИНТЕК» о выполнении НИР на тему «Разработка моделей проявления заглубленной струи сточных вод на поверхности моря», программ Министерства образования и науки РФ.

Публикации и апробация результатов. Основные результаты диссертации представлялись на Нижегородской сессии молодых ученых (Н.Новгород, 2007, 2008, 2009, 2010), Нижегородской конференции по радиофизике (Н. Новгород, 2007, 2008), на международной конференции “Frontiers of Nonlinear Physics” (Нижний Новгород, 2007), на ассамблее Международного союза геодезии и геофизики “IUGG 2007 Perugia” (Перуджа, 2007), на международной конференции «Fluxes and structures in fluids - 2007» (Санкт-Петербург, 2007), на 18 международной конференции “18ème Congrès Français de Mécanique” (Гренобль, 2007), на всероссийской научной школе «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2008, 2010), на всероссийской научной школе-семинаре «Волны в неоднородных средах» (Звенигород, 2008), на международной конференции «Mixing of coastal, estuarine and riverine shallow flows» (Анкара, 2008), на международной конференции “Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность” (Москва, 2009), на межведомственной конференции «Проявление глубинных процессов на морской поверхности» (Нижний Новгород,

2009), на международной конференции “Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres” (Москва, 2009), на международном симпозиуме “Turbulence, Heat and Mass Transfer 6” (Рим, 2009), на расширенном семинаре ИКИ РАН «Актуальные задачи компьютерного моделирования» (Таруса, 2010), на международной ассамблее Европейского геофизического союза “EGU-2010” (Вена, 2010), докладывались на семинарах ИПФ РАН и опубликованы в журналах «Доклады академии наук» (1 статья), «Известия РАН. Серия физическая» (1 статья), «Известия РАН. Физика атмосферы и океана» (3 статьи), препринтах ИПФ РАН (1 препринт), 10 статьях в трудах конференций. Результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах.

Личный вклад автора. Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимала участие в эксперименте, в написании программ для обработки экспериментальных данных и проводила обработку. Автором построены и реализованы численно все теоретические модели, используемые в работе.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы 126 страниц, включая 52 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 142 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении освещается современное состояние рассматриваемых в диссертации проблем, обосновывается актуальность темы работы и ее практическая значимость, кратко излагается ее содержание, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор исследований нестационарных режимов струйных течений и методов анализа их устойчивости, а также внимание уделено одному из важнейших приложений моделей плавучих струй - исследованию полей сточных вод от заглубленных сбросовых систем.

В § 1.2 рассмотрены экспериментальные исследования нестационарной динамики фонтанов. Обсуждаются особенности таких режимов для фонтанов, бьющих из-под поверхности воды, капиллярных фонтанов воды в воздухе, затопленных фонтанов в однородной жидкости (ламинарных и турбулентных). По данным экспериментальных работ для последних построена плоскость контрольных параметров, на которую нанесены области неустойчивости.

В § 1.3 описан критерий определения типа неустойчивости плоскопараллельного струйного течения (абсолютной или конвективной), который является базовым при исследовании отклика системы по отношению к внешним возмущениям, т.е. позволяет определить, проявляет ли течение свойства усилителя или генератора.

Предметом §1.4 является глобальная устойчивость струйных пространственно развивающихся течений. Обсуждается понятие глобальных мод и метод определения их частот в линейных задачах, а также связь локальной и

глобальной устойчивости струйных слабо непараллельных течений. Описаны два типа нелинейных глобальных мод, являющихся решениями уравнения Гинзбурга-Ландау.

В §1.5 обсуждается использование критерия абсолютной/конвективной неустойчивости в гидродинамике, в частности, его применение к исследованию нестационарной динамики струйных течений. Продемонстрировано, что наличие области абсолютной неустойчивости вдоль направления распространения струи приводит к автоколебаниям в системе, которые для струйных пространственно развивающихся течений связаны с возбуждением неустойчивой глобальной моды колебаний. Приведены примеры глобально неустойчивых течений.

В §1.6 изложены результаты работ по исследованию полей сточных вод от заглубленных коллекторов сбросовых систем прибрежных городов. Для решения этой важной экологической задачи используется целый комплекс методов, включающий математическое моделирование, лабораторное моделирование, проведение контактных и дистанционных измерений. Обсуждается применение различных методов для решения задач проектирования новых сбросовых систем и мониторинга существующих.

В последнее время большой интерес вызывает применение аэрокосмических дистанционных методов [18*-20*] для мониторинга зон подводных коллекторов. Эксперименты в натуральных условиях [20*] показали, что в спектрах оптических изображений области вблизи коллектора есть пики, которые соответствуют поверхностным аномалиям в виде полос. При этом выход сточных вод на поверхность во время проведения эксперимента не был зафиксирован. В настоящей работе проверяется гипотеза, согласно которой аномалии могут возникать вследствие отображения на поверхность внутренних волн, к генерации которых приводит нестационарная динамика вынужденных плавучих струй от коллектора. Исследование течений вблизи коллектора проведено на основе масштабного лабораторного моделирования.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию нестационарной динамики вынужденных плавучих струй в стратифицированной жидкости и полей возбуждаемых струйными течениями внутренних волн.

В §2.2 обсуждаются условия выполнения масштабного лабораторного моделирования сбросовых систем сточных вод. Приведена система уравнений для интегральных параметров турбулентной плавучей осесимметричной струи в стратифицированной жидкости (потоков массы, плавучести, импульса) и определены безразмерные параметры, совпадение которых обеспечивает полную аналогию между натурными процессами и лабораторным экспериментом.

В §2.3 описаны эксперименты в Большом опытовом термостратифицированном бассейне ИПФ РАН (БОСБ), посвященные масштабному лабораторному моделированию типичного коллектора сточных вод. Модель коллектора представляла собой заглубленную с одного конца металлическую трубку, на боковой поверхности которой имелось 5 отверстий. Трубка располагалась горизонтально, посередине и поперек бассейна на глубине H от поверхности (рис. 1).

Оси отверстий располагались горизонтально. Через свободный конец модель коллектора шлангом соединялась с баком с раствором этилового спирта. Эксперименты проводились для 4-х различных скоростей истечения плавучей жидкости из модели коллектора от 40 см/с до 150 см/с, в условиях стандартной стратификации и стратификации с мелким термоклином (заглубление центра термоклина 40 см и 13 см, соответственно). В ходе экспериментов колебания температуры фиксировались с использованием антенны термодатчиков; профили скорости горизонтальных течений под термоклином, формирующихся при растекании плавучих струй, измерялись трехкомпонентным доплеровским измерителем скорости. Показано, что при истечении плавучей жидкости из модели коллектора в бассейне интенсивно генерировались внутренние волны.

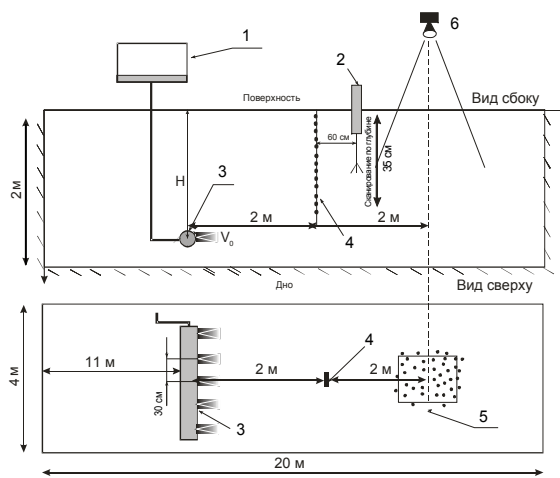


Рис. 1. Схема эксперимента в БОСБ. 1 – бак с раствором этилового спирта (плотность 0.93 г/см³), 2 – ультразвуковой трехкомпонентный датчик скорости, 3 – модель коллектора (трубка с 5 отверстиями диаметром 3 мм), 4 – антенна из 13 датчиков температуры. $H=160$ см для экспериментов со стандартной стратификацией, $H=120$ см для условий стратификации с мелким термоклином. В условиях мелкого термоклина дополнительно использовались: 5 – область наблюдения за частицами, 6 – камера.

В условиях стратификации с мелким термоклином были измерены поверхностные проявления внутренних волн методом цифровой оптической анемометрии Particle Tracking Velocimetry (PTV) [21*]. Для этого прямоугольная область на поверхности бассейна засеивалась частицами, движение которых фиксировалось при помощи видеокамеры (рис. 1). Особенности эксперимента с измерением горизонтальных поверхностных течений и его результаты описаны в §2.4. В ходе выполнения данной серии экспериментов возникли трудности, связанные, во-первых, с образованием пленки на поверхности бассейна, и во-вторых, с наличием крупномасштабных вихревых течений в приповерхностном слое. Параметры пленки измерялись экспериментально и учитывались при теоретической оценке величин горизонтальной скорости течений на поверхности. Наличие фонового течения привело к необходимости модификации метода PTV. Число частиц в области наблюдения быстро убывало со временем, при этом оказалось возможным определить только осредненное по области наблюдения значение скорости течения. Для этого находились траектории частиц,

проходящих через эту область, и вычислялись их скорости в каждый момент времени. Далее определялось значение скорости, осредненное по всем частицам, которые в данный момент времени находились в области наблюдения. Чтобы исключить фоновые низкочастотные тренды скорости частиц, обусловленные средними течениями, присутствовавшими в бассейне, проводилась низкочастотная фильтрация спектров сигналов.

В §2.5 описан эксперимент по изучению динамики вынужденной плавучей струи в области пикноклина в малом бассейне (50 см×50 см×120 см) с солевой стратификацией. В эксперименте использовалась горизонтально расположенная у дна бассейна трубка с одним отверстием, из которого вытекала пресная вода. Подача пресной воды в трубку производилась посредством гибкого шланга, соединенного с баком. Для измерения полей скорости в жидкость добавлялись частицы полиамида, которые подсвечивались вертикальным лазерным ножом в плоскости, проходящей через ось струи. Движение частиц в струе снималось на цифровую CCD-камеру. Видеосъемка показала, что верхняя граница струи совершает колебания в вертикальной плоскости, при этом спектр колебаний имеет выраженный пик.

Обработка видеопленки с применением метода оптической цифровой анемометрии PIV (Particle Image Velocimetry) [21*] позволила рассчитать мгновенные векторные поля скорости в плоскости сечения лазерного ножа, результаты измерений использовались при теоретическом исследовании механизма колебаний (§ 3.2, 3.4).

В §2.6 описаны эксперименты в БОСБ по исследованию механизма генерации внутренних волн осесимметричными турбулентными струями. При проведении экспериментов выполнена подводная видеосъемка струй в области термоклина и измерены внутренние волны, что позволило сравнить частоту внутренних волн с частотой осцилляций струи. В эксперименте струя с начальным импульсом и плотностью, равной плотности нижнего слоя стратификации, вытекала вертикально вверх из П-образной трубки круглого сечения (рис. 2). Трубка располагалась у дна бассейна, ее свободный конец шлангом соединялся с баком с водой. Эксперименты проводились для 5 выходных скоростей в диапазоне от 110 см/с до 210 см/с. Параметры струйного течения в этом эксперименте выбирались так, чтобы условия взаимодействия турбулентной струи с термоклином были близки к условиям экспериментов по масштабному лабораторному моделированию сбросовых систем, описанных в §2.3 (обеспечивалось равенство поперечных масштабов струй и их осевых скоростей на входе в термоклин; плотность плавучей струи на входе в термоклин близка к плотности нижнего слоя жидкости). Колебания температуры в окружающей среде, вызванные струей, фиксировались с помощью антенны температурных датчиков. Для визуализации струи в жидкость, находящуюся в баке, добавлялись частицы полиамида. Течение в струе с частицами подсвечивалось световым ножом, сформированным цилиндрической линзой из лазерного луча. Вид сбоку снимался на цифровую видеокамеру, помещенную в

специальный водонепроницаемый бокс, погруженный до уровня термоклина. Съемка длилась 20 мин, колебания температуры фиксировались в течение 1 ч.

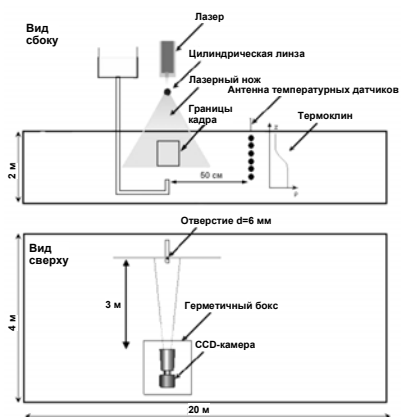


Рис. 2. Схема эксперимента в БОСБ по изучению механизма генерации внутренних волн осесимметричными турбулентными струями.

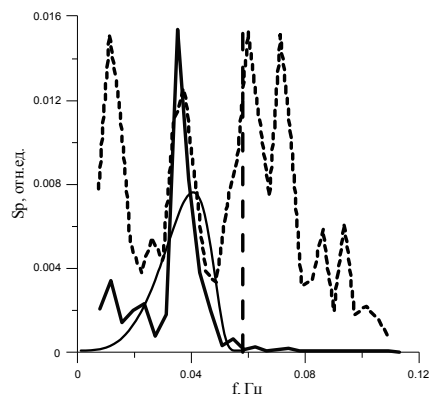


Рис. 3. Спектры колебаний струи (пунктир) и внутренних волн (сплошная линия). Прямой отмечена максимальная частоты плавучести, кривая соответствует частотной зависимости коэффициента возбуждения низшей моды.

Графические данные обрабатывались при помощи специально написанной программы, одна из функций которой состояла в измерении средней интенсивности изображения в выделенной области кадра, что позволило изучить колебания верхней границы струи по изменению интенсивности. Пример спектров осцилляций струи и внутренних волн для одной из реализаций эксперимента показан на рис. 3. На спектре внутренних волн присутствует выраженный пик на частоте примерно $0.7N_0$, а спектр колебаний струи широкий, но в нем имеется выраженный пик на частоте внутренних волн. Различие спектров можно объяснить частотной зависимостью коэффициента возбуждения внутренних волн. [22*].

Для измерения полей скорости в струе использовался метод оптической цифровой анемометрии PIV [21*]. На основании полученных данных определен тип моды, генерирующей внутренние волны. При этом найдены зависимости границ струи от времени для нескольких поперечных сечений струи в области термоклина и рассчитаны их кросскорреляционные функции. Минимум функции в нуле соответствует спиральной моде, максимум – осесимметричной. На рис. 4 приведен пример кросскорреляционных функций для одного из экспериментов. Видно, что на струе преимущественно нарастает осесимметричная мода колебаний. При этом профили средней скорости течения таковы, что осесимметричная мода для него является устойчивой в рамках классической теории гидродинамической устойчивости параллельных течений. Теоретическое объяснение этого явления дано в главе 3.

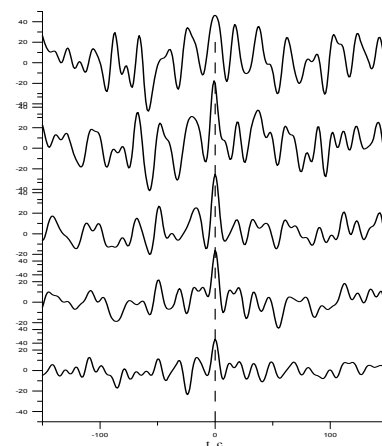


Рис. 4. Примеры кросскорреляционных спектров границ струи в различных поперечных сечениях струи в области термоклина.

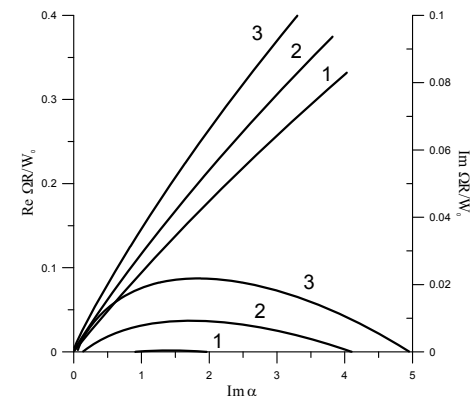


Рис. 5. Аналоги дисперсионных кривых при $Re=50$: $\epsilon = 0.08$ (1), $\epsilon = 0.1$ (2), $\epsilon = 0.12$ (3) ($Im \alpha$ – аналог волнового числа, Ω/W_0 – безразмерная частота).

Третья глава посвящена теоретическому изучению механизма возбуждения внутренних волн осесимметричными турбулентными струями. В настоящей работе в качестве источника внутренних волн предлагаются автоколебания струи в области пикноклина.

В §3.2 исследована устойчивость осесимметричной моды колебаний непараллельного течения с автомоделными профилями скорости, удовлетворяющего струю в нижней части термоклина, и показано, что мода становится неустойчивой. Дисперсионные кривые для различных параметров непараллельности при одном и том же числе Рейнольдса показаны на рис. 5. Оценки частот колебаний осесимметричной моды для параметров, соответствующих условиям эксперимента, согласуются с частотой пика в спектрах внутренних волн.

Заметим, что в главе 2 настоящей работы показано, что и верхняя граница струи также совершает осцилляции с частотой, близкой к частоте внутренних волн. Колебания струи в нижней части термоклина и над термоклином происходят на одной частоте, что является признаком автоколебательного режима струйных пространственно развивающихся течений [9*]. Причиной абсолютной неустойчивости течения и развития автоколебаний может стать противок [9*], который наблюдается в экспериментах на профилях скорости течения в верхней части термоклина. Автоколебательный режим струйных течений связан с развитием неустойчивой глобальной моды [9*]. В §3.3 приведены признаки возбуждения неустойчивой глобальной моды осесимметричной струи, наблюдаемые в эксперименте. Помимо совпадения частоты колебаний в различных поперечных сечениях струи в области термоклина, необходимо отметить присутствие узкого пика

на спектрах внутренних волн (рис. 3). Согласно [9*], данный признак является косвенным указанием на развитие автоколебательного режима.

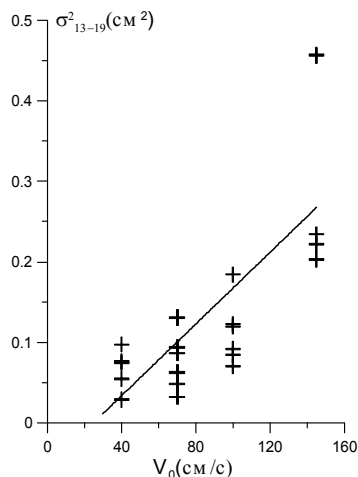


Рис. 6. Зависимость средних дисперсий колебаний изотерм в области термоклина от скорости истечения (усреднение по изотермам 13-19°C),

$$\langle \sigma_{\eta}^2 \rangle = |a|^2,$$

дисперсия каждой изотермы рассчитывалась по формуле:

$$\langle \sigma_{\eta}^2 \rangle = \int_{f_0}^{f_{\max}} Sp(f) df,$$

где $Sp(f)$ – спектр изотермы, $f_0=0.02$ Гц, $f_{\max}=0.05$ Гц.

В работе [9*] также показано, что при наличии в системе глобальной моды, ее амплитуда a удовлетворяет уравнению Ландау [23*]:

$$\frac{da}{dt} = a(\mu(R - R_c) - \nu|a|^2), \quad (1)$$

где R – управляющий параметр, R_c – его критическое значение, ν – параметр нелинейного затухания. Амплитуда установившихся колебаний при этом удовлетворяет уравнению:

$$\left((R - R_c) - \frac{\nu}{\mu} |a|^2 \right) a = 0. \quad (2)$$

Характерная зависимость амплитуды колебаний от контрольного параметра задачи (рис. 6) считается достоверным признаком возбуждения неустойчивой глобальной моды [9*].

В §3.4 для экспериментов с визуализацией струи в БОСБ и в малом бассейне проведен анализ типа неустойчивости осесимметричной моды колебаний струи. В экспериментах в малом бассейне число Рейнольдса было равно 800, в то время как для серии в БОСБ этот параметр составлял от 3000 до 6000. В результате в малом бассейне формировалось течение с прямоугольным (П-образным) профилем скорости, в отличие от колоколообразных профилей, наблюдаемых в эксперименте в БОСБ. Для П-образных профилей скорости осесимметричная мода неустойчива в приближении параллельного течения.

При анализе устойчивости использовался критерий Бриггса, согласно которому неустойчивость будет абсолютной, если мнимая часть абсолютной частоты положительна, и конвективной, если она отрицательна. Абсолютная

частота определяется из условия равенства комплексной групповой скорости возмущения нулю:

$$\frac{d\omega}{dk}(k_0) = 0 \quad (3)$$

и соответствует седловой точке в комплексной плоскости волновых чисел.

Для данных эксперимента в БОСБ, в рамках модели, учитывающей непараллельность течения, показано, что противоток на профилях продольной скорости струи в верхней части термоклина является причиной абсолютной неустойчивости осесимметричной моды колебаний, необходимой для развития глобальной моды и перехода системы к автоколебаниям. Пример линий уровня комплексного дисперсионного соотношения для типичного профиля скорости течения в верхней части термоклина показан на рис. 7. Из рисунка видно, что мнимая часть абсолютной частоты положительна.

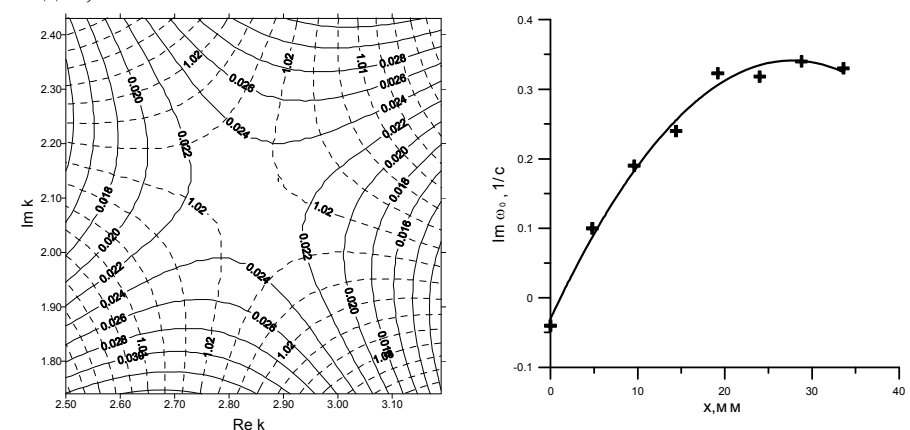


Рис. 7. Пример картины линий уровня $Re \omega(Re k, Im k)$ (пунктирные кривые), $Im \omega(Re k, Im k)$ (сплошные кривые) для одного из профилей скорости струи с противотоком.

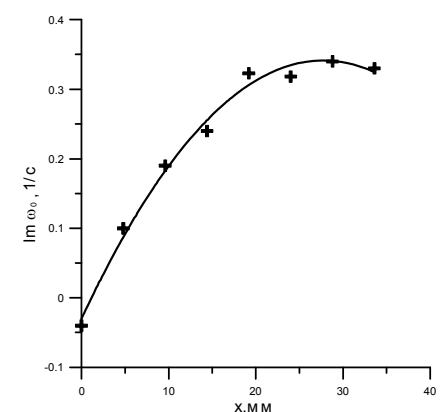


Рис. 8. Область абсолютной неустойчивости вдоль направления распространения струи для данных эксперимента в малом бассейне.

При проведении расчета абсолютной частоты для параметров эксперимента в малом бассейне плавучая струя в области пикноклина была разделена на участки, каждый из которых считался квазипараллельным, и для него находилось комплексное дисперсионное соотношение. Наличие противотока на профилях скорости также приводит к появлению конечного участка абсолютной неустойчивости вдоль направления распространения струи (рис. 8), при этом выполняется необходимое условие возбуждения неустойчивой глобальной моды [9*]. Оценки возможной частоты моды (автоколебаний) согласуются с частотой колебаний верхней границы струи, определенной по данным видеосъемки в §2.5.

В четвертой главе приведены результаты теоретического исследования структуры поля и поверхностных проявлений внутренних волн, возбуждаемых вынужденными плавучими струями в стратифицированной жидкости.

В § 4.2 описана теоретическая модель поля внутренних волн в стратифицированной жидкости при наличии сдвигового течения под пикноклином, образующегося в результате растекания струи на горизонте нейтральной плавучести. Модель основана на решении уравнения Тейлора-Голдстейна с нулевыми граничными условиями на дне и поверхности.

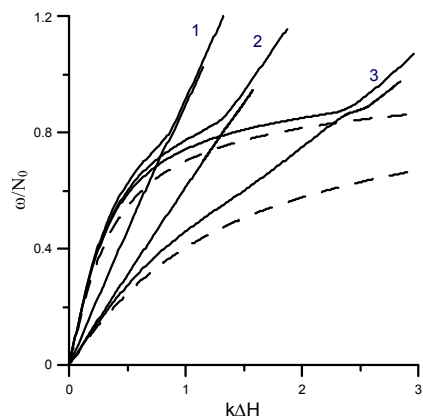


Рис. 9. Дисперсионные характеристики для первой и второй мод при $Ri=1.3$ (1), $Ri=3$ (2), $Ri=10$ (3). Пунктиром изображены дисперсионные характеристики первой и второй мод в покоящейся стратифицированной жидкости.

В § 4.3 исследуются дисперсионные свойства внутренних волн. Дисперсионные характеристики первой и второй мод внутренних волн для различных значений числа Ричардсона Ri , полученных в эксперименте, показаны на рис. 9. Из рисунка видно, что горизонтальное течение под термоклином оказывает значительное влияние на свойства внутренних волн. Сделаны оценки групповой скорости на частоте, соответствующей спектральному пику. Проведено их сравнение со скоростью распространения фронта возмущений, определенной по разнице времени между приходом сигнала на термодатчики и в область измерения движений на поверхности. Полученное согласие подтверждает, что горизонтальные течения, зарегистрированные в области наблюдения, вызваны внутренними волнами.

В §4.4 изучается модовая структура поля внутренних волн. При этом экспериментальная кривая дисперсии смещений изотерм аппроксимируется двумя первыми собственными модами системы методом наименьших квадратов. Показано, что поле внутренних волн удовлетворительно описывается двумя низшими модами (рис.10), при этом первая мода локализована в области термоклина, а вторая – в области сдвигового течения, формирующегося при растекании плавучих струй на горизонте нейтральной плавучести.

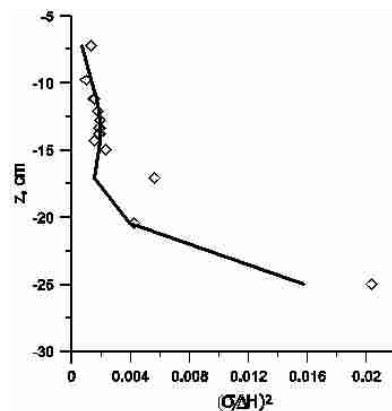


Рис. 10. Пример аппроксимации вертикальной структуры поля внутренних волн для выходной скорости $V_0=100$ см/с (\diamond -экспериментальные данные).

В §4.5 на основании данных модового анализа сделаны теоретические оценки горизонтальных течений на поверхности, создаваемых внутренними волнами. Оценки амплитуд скорости течения для чистой воды значительно превышают экспериментальные данные. В §4.6 проведены расчеты, учитывающие наличие на поверхности жидкости пленки, модуль упругости которой был измерен в ходе экспериментов. При учете пленки на поверхности теоретические оценки согласуются с экспериментальными данными.

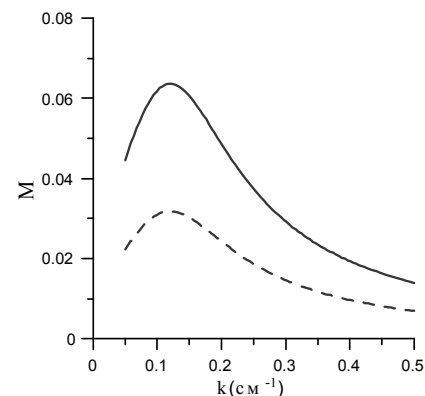


Рис. 11. График зависимости коэффициента модуляции коротких волн $|M(k)|$ для следующих параметров внутренних волн и течений на поверхности: $\omega/k = 9.6$ см/с, $u_* = 18$ см/с (скорость ветра 5 м/с), максимально (сплошная линия) и минимально (пунктирная линия) возможные скорости на поверхности.

В §4.7 на основе данных масштабного лабораторного моделирования выполнены оценки параметров внутренних волн и гидродинамических контрастов, создаваемых ими в поле поверхностных волн в натуральных условиях. Параметры внутренних волн согласуются с доступными данными натуральных наблюдений [24*]. Для оценки гидродинамических контрастов использовалось кинетическое уравнение для спектральной плотности волнового действия, где при аппроксимации интеграла столкновения применялась релаксационная модель. Зависимость коэффициента модуляции поверхностных волн $|M(k)|$ представлена на рис. 11. Видно, что максимум контраста достигается при $k=0.12$ см⁻¹ (длина волны примерно 50 см) и составляет 0.035-0.07. Такие контрасты могут быть выделены с использованием когерентной обработки.

Заметим, что можно ожидать усиления гидродинамического контраста в 7-8 раз на коротких нелинейных волнах, представляющих собой гармоники волн дециметрового диапазона, так называемых связанных волнах [25*]. В натуральных условиях в поле ветровых волн наряду со связанными короткими волнами присутствуют свободные волны, которые слабо модулируются в присутствии рассматриваемых здесь внутренних волн из-за двух причин: сильной отстройки от группового резонанса и малого времени релаксации. Согласно измерениям Планта [26*], доля связанных волн при скорости ветра 5 м/с равна 0.5. Это дает оценку контраста в поле коротких волн, равную 0.12-0.3, которая уверенно обнаруживается дистанционными методами.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты работы

1. Экспериментально обнаружено, что вынужденная плавучая турбулентная струя кругового сечения в стратифицированной жидкости с резким скачком плотности (пикноклином) совершает квазипериодические колебания в вертикальной плоскости, которые приводят к эффективной генерации внутренних волн.

2. Установлено, что источником внутренних волн является осесимметричная мода колебаний струи. Для такой моды плоскопараллельного течения с экспериментально измеренными профилями скорости выполняется критерий устойчивости. Показано теоретически, что осесимметричная мода нарастает на непараллельном течении с автомодельными профилями скорости, моделирующем струю в нижней части пикноклина.

3. Экспериментально обнаружены признаки автоколебательного режима вынужденной плавучей струи кругового сечения в области пикноклина. Возможность автоколебаний осесимметричной моды струи подтверждена теоретически: показано, что течение в области пикноклина абсолютно неустойчиво.

4. Построена теоретическая модель поля внутренних волн, излучаемых плавучей турбулентной струей, в присутствии сдвигового течения под пикноклином, которое формируется при растекании струи на горизонте нейтральной плавучести. Обнаружен бимодальный режим возбуждения внутренних волн, когда первая мода локализована в области пикноклина, а вторая - в области горизонтального струйного течения. Величины горизонтальных скоростей на поверхности, рассчитанные в рамках предложенной теоретической модели, согласуются с результатами эксперимента при учете пленки поверхностно-активных веществ, модуль упругости которой измерялся в ходе эксперимента.

5. Выполнено масштабное лабораторное моделирование течения вблизи типичного подводного коллектора сточных вод. С использованием коэффициентов масштабного лабораторного моделирования оценены параметры внутренних волн, генерируемых плавучими струями от типичного подводного коллектора, показано, что они соответствуют доступным данным натуральных экспериментов.

6. На основании кинетического уравнения для спектральной плотности волнового действия рассчитаны гидродинамические контрасты, создаваемые внутренними волнами в поле свободных и связанных поверхностных волн при умеренных ветрах. Показано, что контрасты могут быть обнаружены современными дистанционными методами.

Список цитированной литературы

- 1.* Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир. 1977. - 432 с.
- 2.* Теория турбулентных струй / Под ред. Г.Н. Абрамовича. М.: Наука. 1984. - 716 с.
- 3.* List E.J. Turbulent jets and plumes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1982. V. 14. P. 189-212.
- 4.* Turner J.S. The dynamics of spheroidal masses of buoyant fluid // *J. Fluid Mech.* 1964. V.18. P.195-208.
- 5.* Scorer R.S. Experiments on convection of isolated masses of buoyant fluid // *J. Fluid Mech.* 1957. V. 2. P. 583-594.

- 6.* Drazin P. G. Introduction to hydrodynamic stability. Cambridge University Press. 2002. 258 p.
- 7.* Betchov R., Criminale Jr. W.O. Stability of parallel flows. New York, London: Academic Press Inc. 1967. - 330 p.
- 8.* Godreche C., Manneville P. Hydrodynamics and nonlinear instabilities. Cambridge University Press. 1998. - 681 p.
- 9.* Huerre P., Monkewitz P.A. Local and global instabilities in spatially developing flows // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1990. V.22. P.473-537.
- 10.* Turner J. S. Jets and plumes with negative or reversing buoyancy // *J. Fluid. Mech.* 1966. V. 26. P. 779-792.
- 11.* В.П.Карликов, О.В.Трушина. Об автоколебаниях плоских затопленных фонтанов // *ДАН.* 1998. Т.361. №3. С. 340-344.
- 12.* Maurel A., Cremer S., Jenffer P. Experimental study of a submerged fountain // *Europhys. Lett.* 1997. V. 39(5). P.503-508.
- 13.* Friedman P.D., Vadkoot V.D., Meyer W.J., Carey S. Instability threshold of a negatively buoyant fountain // *Exps. Fluids.* 2007. V.42. P. 751-759.
- 14.* Williamson N., Srinarayana N., Armsfield S.W., McBain G.D., Lin W. Low-Reynolds-number fountain behaviour // *J. Fluid Mech.* 2008. V. 608. P. 297 – 317.
- 15.* Miles J.W. Internal waves generated by a horizontally moving source // *Geophys. Fluid Dyn.* 1971. V.2. P. 63-87.
- 16.* Bonneton P., Chomaz J.M., Hopfinger E.J. Internal waves produced by the turbulent wake of a sphere moving horizontally in a stratified fluid // *J. Fluid Mech.* 1993. V. 254. P. 1-21.
- 17.* Казаков В.И., Коротков Д.П., Серин Б.В., Таланов В.И., Троицкая Ю.И. Автоколебания в турбулентном стратифицированном сдвиговом потоке // *Изв. РАН. ФАО.* 2002. Т. 38. №4. С. 1-11.
- 18.* Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии. / В кн. «Новые идеи в океанологии. М.: Наука. Т1: Физика. Химия. Биология. 2004. С. 55-117+8 цв. вкл.
- 19.* Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // *Исследование Земли из космоса.* 2001. № 6. С. 49-67.
- 20.* Bondur V., Keeler R., Gibson C. Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean // *GRL.* 2005. V.32. L12610. doi:10.1029/2005GL022390.
- 21.* Adrian R.J. Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1991. V. 23. P. 261-304.
- 22.* Мареев Е.А., Чугунов Ю.В. Возбуждение внутренних волн осциллятором в пикноклине // *Известия АН СССР. ФАО.* 1986. №6. С.663-665.
- 23.* А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. Теория колебаний. М.: Наука. 1981. - 918 с.
- 24.* Воробьев В.Е., Амахина Е.А., Бондур В.Г. Исследование пространственных спектральных характеристик оптических изображений поверхности океана в зонах антропогенных воздействий/ В Тр. 3-ей Открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2005. С.139.
- 25.* Ермаков С.А., Салашин С.Г. Об эффекте сильной модуляции капиллярно-гравитационной ряби внутренними волнами // *ДАН.* 1994. Т.337. №1. С.108-111.
- 26.* Plant W. J. A new interpretation of sea-surface slope probability density functions // *J. Geophys. Res.* 2003. V.108 (C9). doi:10.1029/2003JC001870.

Список публикаций по теме диссертации

1. Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Ежова Е.В., Соустова И.А., Казаков В.И. Автогенерация внутренних волн всплывающими струями в стратифицированном бассейне // *ДАН.* 2008. Т.419. №2. С. 388-392.

2. Ежова Е.В., Сергеев Д.А., Соустова И.А., Казаков В.И., Троицкая Ю.И. Изучение структуры внутренних волн, генерируемых плавучими струями в стратифицированной жидкости// Изв. РАН. Серия физическая. 2008. Т.72. №12. С. 1797-1800.
3. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В., Казаков В.И., Сергеев Д.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 1. Механизм генерации внутренних волн// Изв. РАН. ФАО. 2009. Т.45. №6. С.833-845.
4. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В., Казаков В.И., Сергеев Д.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 2. Структура внутренних волн// Изв. РАН. ФАО. 2010. Т.46. №3. С. 376-389.
5. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В., Казаков В.И., Сергеев Д.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 3. Поверхностные проявления внутренних волн // Изв. РАН. ФАО. 2010. Т.46. №4. С. 519-529.
6. Ezhova E., Sergeev D., Troitskaya Yu. «Self-sustained oscillations excited by turbulent buoyant plumes in thermocline-like stratified fluid»// Proc. 3rd Int. Conf. "Frontiers of Nonlinear Physics". 2007. P. 142-143.
7. Troitskaya Yu, Sergeev D., Ezhova E. «Evolution of turbulent jet with positive buoyancy in stratified fluid» // Proc. Int. Conf. "Fluxes and structures in fluids". 2007. P.130-133.
8. Troitskaya Yu., Sergeev D., Ezhova E., Soustova I., Kazakov V. «Dynamics of turbulent jet with positive buoyancy in stratified fluid» // Proc. Int. 18ème Congrès Français de Mécanique. 2007. P. 1-6.
9. Ежова Е.В., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. «Автогенерация внутренних волн плавучими струями в стратифицированной жидкости»// Тезисы докладов конференции молодых ученых «Нелинейные волновые процессы» (XIV научная школа «Нелинейные волны-2008»). 2008. С.44-45.
10. Ежова Е.В., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. «Изучение структуры внутренних волн, генерируемых плавучими струями в стратифицированной жидкости»// Сборник трудов Всерос. научной школы-семинара «Волны в неоднородных средах». 2008. С.24-26.
11. Ezhova E.V., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I., Soustova I.A., Kazakov V.I. «The structure and surface manifestations of the internal waves excited by turbulent buoyant plumes in stratified fluid»// Proc. Int. Symposium "Turbulence, Heat and Mass Transfer 6". 2009. P.547-550.
12. Druzhinin O.A., Ezhova E.V., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I. "Self-sustained oscillations excited by turbulent buoyant plumes in thermocline-like stratified fluid"// Proc. Int. Symposium "Turbulence, Heat and Mass Transfer 6". 2009. P.559-562.
13. Ezhova E.V., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I., Soustova I.A., Kazakov V.I. "The structure and surface manifestations of the internal waves excited by turbulent buoyant plumes in stratified fluid"// В Тр. международной конференции "Потоки и структуры в жидкостях: физика геосфер". 2009. С.213-216.
14. Ezhova E.V., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I. "On the surface manifestations of the internal waves induced by turbulent buoyant plumes"// В Тр. международной конференции "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность". 2009. С.117-122.
15. Ежова Е.В., Кандауров А.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. «Генерация внутренних волн плавучей турбулентной струей»// Тезисы докладов конференции молодых ученых «Нелинейные волновые процессы» (XV научная школа «Нелинейные волны-2010»). 2010. С.34-35.
16. Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Ежова Е.В., Соустова И.А., Казаков В.И. Масштабное лабораторное моделирование генерации внутренних волн стоками подводных коллекторов сточных вод: препринт №751 ИПФ РАН. – Н.Новгород, 2008. – 23 с.

ЕЖОВА Екатерина Валерьевна

**НЕСТАЦИОНАРНАЯ ДИНАМИКА
ВЫНУЖДЕННЫХ ПЛАВУЧИХ СТРУЙ
В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ**

Автореферат

Подписано к печати 1.2.2011 г.
Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Заказ № 34 (2011).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46