

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева

Сибирского отделения Российской академии наук

**Всероссийская конференция с международным участием
«Нелинейные волны – 2022»**

2 – 4 марта 2022 г.

Новосибирск 2022

Оглавление

Моделирование конвекции в двухфазной системе в условиях диффузионного испарения в замкнутой области (<i>Бекежанова В.Б., Гончарова О.Н., Овчарова А.С.</i>).....	4
Rankine – Hugoniot relations for multi-D shocks in dispersive media (<i>Gavrilyuk S.</i>)	4
О двух задачах теории струй (<i>Гайфуллин А.М., Жвик В.В.</i>)	4
Равномерные асимптотики в виде функций Пирси и решения задачи типа задачи Гуревича-Питаевского для уравнения i -Бюргера (<i>Доброхотов С.Ю.</i>).....	5
Устойчивость аневризмы в мембранной трубке с локализованной неоднородностью стенки, заполненной текущей неньютоновской жидкостью (<i>Ильичев А.Т., Шаргатов В.А.</i>)	6
Квазилинейное параболическое уравнение второго порядка с вырождением: теорема существования и точные решения (<i>Казаков А.Л.</i>)	6
Переход к турбулентности на скользящем крыле: сценарии и критерий начала турбулизации (<i>Качанов Ю.С., Бородулин В.И., Иванов А.В.</i>).....	7
Физические механизмы горения микроструй водорода (<i>Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г.</i>).....	7
Особые разрывы в решениях гиперболических систем уравнений законов сохранения и их структура (<i>Куликовский А.Г., Чугайнова А.П.</i>)	8
Модели распространения внутренних волн в многослойной жидкости (<i>Ляпидевский В.Ю., Чесноков А.А.</i>)	8
Взаимодействие мод в задаче о тепловой конвекции вязко-упругой жидкости, подогреваемой снизу (<i>Любимова Т.П., Крапивина Е.Н.</i>).....	9
Внутренние волны в двухслойных слабостратифицированных течениях (<i>Макаренко Н.И., Мальцева Ж.Л., Черевко А.А.</i>)	10
Групповая классификация двумерных уравнений Грина-Нагди с топографией дна зависящей от времени (<i>Мелешко С.В., Сириват П.</i>)	10
О "безмашинном энергоразделении" в газокапельном потоке (<i>Осипцов А.Н., Голубкина И.В.</i>).....	10
Новая платформа оптимизации установки церебральных анастомозов (<i>Паршин Д.В., Куянова Ю.О., Погосян В. Б.</i>).....	11
Цунами вулканического происхождения (<i>Пелиновский Е.Н.</i>)	11
Гиперболическая термодинамически согласованная модель волновых процессов в деформируемой пористой среде, насыщенной многофазной сжимаемой жидкостью (<i>Роменский Е.И., Решетова Г.В., Пешков И.М.</i>)	13
Гидродинамические солитоны огибающей: не слабонелинейные волны (<i>Слюняев А.В.</i>).....	13

Влияние эффектов неоднородности и вращения на динамику уединённых волн в жидкости переменной глубины (Хелфрик К.Р., Островский Л.А., Степанянц Ю.А.)	14
Колебания ледяного покрова в море при наличии горизонтального течения со сдвигом скорости (Стурова И.В., Ткачева Л.А.).....	15
Оценки потерь энергии при разрушении солитонов внутренних волн на шельфовых склонах (Талипова Т.Г., Терлецкая К., Мадерич В.).....	16
Моделирование взаимодействия длинных волн с берегом и прибрежными конструкциями (Чубаров Л.Б., Гусев О.И., Скиба В.С., Хакимзянов Г.С.)	17
Гемодинамика и реология аневризмы аорты (Чупахин А.П., Мержоева Л.Р., Карпенко А.А., Паршин Д.В., Липовка А.И., Тихвинский Д.В.).....	17

Моделирование конвекции в двухфазной системе в условиях диффузионного испарения в замкнутой области

Бекежанова В.Б., Гончарова О.Н., Овчарова А.С

Изучается задача о термокапиллярной конвекции при слабом испарении в плоском ограниченном массиве. Предложена математическая модель для исследования процессов тепломассобмена и параметров фазовых переходов в двухслойной системе в условиях локального нагрева. Двухсторонняя модель на основе приближения Буссинеска уравнений Навье-Стокса формулируется в терминах «функция тока-вихрь» и включает определяющие уравнения, граничные условия на межфазной границе, которые представляют собой следствия законов сохранения, и условия на внешних границах кюветы. Особое внимание уделяется исследованию эффектов испарения на термокапиллярной границе раздела. При этом рассматривается испарение диффузионного типа. Условия для функций температуры на внешних твёрдых стенках кюветы учитывают наличие нагревателей конечного размера. Дополнительно, в определяющих уравнениях, описывающих движение в газопаровом слое, учтено влияние эффектов Соре и Дюфура. Разработан численный метод для расчёта основных характеристик системы жидкость-газ и положения межфазной границы в каждый момент времени. Представлены результаты численного исследования эволюции поверхности раздела и нестационарных течений в кювете при нормальной гравитации.

Rankine – Hugoniot relations for multi-D shocks in dispersive media

Gavrilyuk S.

Aix-Marseille University, France

Shock solutions can be numerically and analytically constructed for the simplest 1D dispersive equations (BBM, Serre-Green-Naghdi, ...) (SG, B. Nkonga, K. M. Shyue, L. Truskinovsky, 2020; SG, K. M. Shyue 2022). We propose a set of multi-D Rankine - Hugoniot relations for a generic continuous media describing, in particular, the second gradient fluids and bubbly fluids. This is a joint work with H. Gouin.

О двух задачах теории струй

Гайфуллин А.М., Жвик В.В.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский.

Созданию теории струй несжимаемой жидкости посвящено достаточно много работ. Интересно отметить, что путь построения теории не является гладким, он изобилует ошибочными утверждениями, в том числе и известных гидродинамиков. В докладе приводится решение двух струйных задач.

В первой задаче получена связь дальнего поля скорости с полем скорости в выходном сечении осесимметричной затопленной струи. Представлен обзор теоретических работ по осесимметричным затопленным струям несжимаемой

жидкости с расходом через начальное сечение. Примером может служить струя, вытекающая в затопленное пространство из цилиндрической трубы.

Впервые попытка получить решение уравнений Навье - Стокса для дальнего поля осесимметричной струи с начальным расходом была предпринята Ю.Б. Румером в 1952г. Дальнейшее развитие эта задача получила в работах М. А. Гольдштика, В.Н.Штерна, Н.И. Яворского; Л.Г. Лойцянского и др., в которых кроме решения в дальней области прилагались усилия связать характеристики течения в этой области с профилем скорости в выходном сечении струи. Для этого необходимо было найти новые неизвестные инварианты струйного течения, которые бы обеспечивали данную связь. В 2012 г. в работе Р. Нац был получен новый инвариант уравнений пограничного слоя для осесимметричных струй, который, как показали авторы данного доклада, и позволяет связать параметры течения в дальней области струи с профилем скорости в начальном сечении.

Полученные результаты без труда обобщаются на случай турбулентной струи, поскольку усредненное по времени поле скорости в турбулентной осесимметричной струе в рамках модели турбулентной вязкости описывается теми же уравнениями, что и ламинарная струя.

Во второй задаче рассматривается затопленная ламинарная струя вязкой несжимаемой жидкости, распространяющаяся вдоль твердой плоскости. Хорошо известно решение Н.И. Акатнова плоской задачи о затопленной струе, выдуваемой вдоль пластины из бесконечно тонкой щели. В приближении пограничного слоя данное течение является автомодельным. Показатель автомодельности определяется с помощью инварианта струи, размерность которого равна произведению потока импульса на расход. При этом мало что известно о затопленной струе, которая вытекает из трубки параллельно бесконечной твердой плоскости.

Авторами доклада в приближении пограничного слоя получено автомодельное решение для дальнего поля трехмерной пристенной ламинарной струи. Показатель автомодельности определен с помощью численного решения. Получены координатные разложения автомодельного решения при малых и больших значениях радиальной координаты. В главном приближении разложения по малой координате азимутальная скорость отсутствует, а продольная и радиальная компоненты скорости зависят от азимутального угла одинаковым образом. Решение Гамеля для течения в конфузоре является главным членом разложения по большим значениям радиальной координаты. Получены универсальные соотношения для профиля скорости.

Равномерные асимптотики в виде функций Пирси и решения задачи типа задачи Гуревича-Питаевского для уравнения i -Бюргера

Доброхотов С.Ю.

Институт проблем механики им А.Ю.Ишлинского РАН

Функции Пирси возникают при описании двумерных волновых полей в малой окрестности особенностей типа сборки. С геометрической точки зрения такие особенности появляются при проектировании двумерных лагранжевых многообразий на конфигурационное пространство, где соответствующие особенности имеют вид «искаженного клюва». Мы обсуждаем подход, позволяющий представить асимптотики равномерно в широкой окрестности (а иногда и глобально) этого «клюва» в

параметрической форме в виде суммы функции Пирси и ее производных сложного аргумента, причем параметрами являются координаты на соответствующем лагранжевом многообразии. В качестве примера мы обсуждаем решения нестационарного уравнения Шредингера для свободной частицы и решение задачи об опрокидывании волны для нелинейного уравнения Бюргерса с малой мнимой вязкостью (уравнения i -Бюргерса, вязкость играет роль дисперсии). Последняя задача аналогична задаче Гуревича-Питаевского для уравнения Кортевега де Фриза с малой дисперсией и описывает появление (и динамику) зоны осцилляций после обрушения предельной волны. В отличие от уравнения КДФ асимптотика решения уравнения i -Бюргерса в зоне осцилляций описывается функцией с двумя фазами. Хотя, по-видимому, физического смысла уравнение i -Бюргерса не имеет, тем не менее, получаемые нами формулы могут быть использованы как тестовые при численном моделировании в нелинейных задачах с малой дисперсией.

Работа выполнена совместно с В.Е.Назайкинским и А.В.Цветковой и поддержана грантом РФФИ 21-11-00341.

Устойчивость аневризмы в мембранной трубке с локализованной неоднородностью стенки, заполненной текущей неньютоновской жидкостью

Ильичев А.Т., Шаргатов В.А.

Производится исследование устойчивости стоячих локализованных структур, формирующихся в заполненной жидкостью осесимметричной мембранной трубке. Предполагается, что стенка трубки неоднородна и подвержена локализованному утоньшению. Так как в случае неоднородной стенки задача не имеет трансляционной инвариантности, под устойчивостью стоячей локализованной структуры, расположенной в центре неоднородности стенки трубки, понимается обычная, а не орбитальная устойчивость с точностью до сдвига. Рассматривается спектральная устойчивость локализованных волн возвышения уровня в контексте формирования аневризмы на человеческих сосудах. Жидкость, протекающая внутри трубки, предполагается неньютоновской степенной и профиль ее продольной скорости непостоянен по вертикальному сечению трубки. Спектральная устойчивость установлена доказательством отсутствия собственных значений с положительной вещественной частью, отвечающих экспоненциально растущим по времени возмущениям, являющихся решениями линеаризованных уравнений задачи. Исследование устойчивости проводится при помощи построения функции Эванса, зависящей только от спектрального параметра и аналитической в правой комплексной полуплоскости. Нули функции Эванса там совпадают с неустойчивыми собственными значениями задачи. Отсутствие нулей в правой комплексной полуплоскости доказывается при помощи применения принципа аргумента из комплексного анализа.

Квазилинейное параболическое уравнение второго порядка с вырождением: теорема существования и точные решения

Казаков А.Л.

Рассматривается нелинейное (квазилинейное) параболическое уравнение второго порядка с двумя независимыми переменными, для которого исследуется проблема существования и построения решений, имеющих вид диффузионной волны, распространяющихся по нулевому фону с конечной скоростью. Отметим, что частными случаями рассмотренного уравнения являются известные модели механики сплошных сред, включая уравнение нелинейной теплопроводности, уравнение конвекции-диффузии и другие. Для некоторых из них данная проблема была изучена нами ранее. В докладе будут представлены новая теорема существования и единственности, а также построены и исследованы точные решения рассматриваемого вида, построение которых сводится к интегрированию задач Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений

Переход к турбулентности на скользящем крыле: сценарии и критерий начала турбуликации

Качанов Ю.С., Бородулин В.И., Иванов А.В.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск

Обсуждаются результаты серии экспериментальных исследований характеристик ламинарно-турбулентного перехода, возникающего в пограничном слое скользящего крыла с доминированием неустойчивости поперечного течения. Эксперименты проводились в 39 различных режимах в условиях как низких, так и повышенных степеней турбулентности набегающего потока, как при отсутствии, так и в присутствии стационарных вихрей свободного потока различных амплитуд и масштабов для двух типов распределенной шероховатости обтекаемой поверхности. Исследованы сценарии нелинейных стадий перехода и критерии начала турбуликации потока. Показано, что во всех обсуждаемых случаях возникновение турбулентности начинается с механизма слабонелинейного взаимодействия возмущений типа локальной высокочастотной вторичной неустойчивости исходного потока, возмущенного волнами и вихрями первичной неустойчивости поперечного течения. Установлено, что во всех изученных случаях в качестве упрощенного критерия начала турбуликации течения может быть использован 30%-й уровень пороговой ноль-пик амплитуды комбинированных возмущений пограничного слоя, т.е. суммы максимальных мгновенных амплитуд стационарных и нестационарных возмущений. Показана очень важная, часто доминирующая, роль чрезвычайно слабых, почти неизмеримых, затухающих стационарных вихрей набегающего потока, создаваемых турбулизирующими сетками.

Физические механизмы горения микроструй водорода

Козлов В. В.^{1,2)}, Литвиненко М. В.¹⁾, Литвиненко Ю. А.^{1,2)}, Шмаков А. Г.^{2,3)}

- 1) Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск, Россия
- 2) Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия
- 3) Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В докладе представлены результаты цикла экспериментальных исследований структуры и характеристик развития механизма диффузионного горения водорода дозвуковых и сверхзвуковых круглых и плоских микроструй [1].

Показаны особенности горения данных течений в зависимости от изменений начальных условий на срезе сопла, скорости их истечения и горения водорода в смеси с другими газами. Обнаружено новое явление при горении микроструи водорода, связанное с образованием так называемой «области перетяжки пламени» и явление «запирание» микроструи при истечении в трансзвуковой области.

Список литературы

1. Г. Р. Грек, В. В. Козлов, М. В. Литвиненко, Ю. А. Литвиненко, А. Г. Шмаков Физические механизмы горения микроструй водорода // Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2020. — 374 с

Особые разрывы в решениях гиперболических систем уравнений законов сохранения и их структура

Куликовский А.Г., Чугайнова А.П.

Законы сохранения приводят к соотношениям, которые должны выполняться на всех разрывах. Под "особыми" разрывами здесь понимаются разрывы, на которых помимо упомянутых "обязательных" соотношений, должны выполняться "дополнительные" соотношения. Рассматривается случай, когда дополнительное соотношение представляет условие существования структуры рассматриваемого разрыва. В качестве примера рассмотрены разрывы, распространяющиеся по стержню, в которых рвутся продольно-крутильные деформации и рассмотрена их структура. Найдены условия существования особых разрывов.

Модели распространения внутренних волн в многослойной жидкости

Ляпидевский В.Ю., Чесноков А.А.

Рассматривается нелинейная система уравнений, описывающая в приближении Буссинеска распространение придонных и приповерхностных внутренних волн большой амплитуды в многослойной стратифицированной мелкой воде под крышкой. Получены гладкие стационарные солитоноподобные решения уравнений движения в виде симметричных и несимметричных волн второй моды, примыкающих к заданному постоянному потоку. Показано, что построение гладкого решения, в котором один из слоев имеет конечную длину (захваченное ядро), может привести к образованию сингулярности. В классе функций с кусочно-гладкими первыми производными предложен метод построения решений с захваченным ядром. Приведены примеры стационарных решений многослойных уравнений мелкой воды, описывающих солитоноподобные структуры и течения с захваченным ядром.

Предложенные уравнения теории многослойной мелкой воды применены для моделирования нестационарных гидрофизических процессов в шельфовой зоне приливного моря. Выполнен расчет вертикального распределения температуры и

горизонтальной компоненты скорости вдоль прямолинейной трассы на основе данных о вариации температуры на заданных горизонтах, полученных на одной из донных станций. Результаты численного моделирования верифицированы с использованием данных других контрольных станций, расположенных вдоль рассматриваемой трассы. Показано, что многослойная модель качественно воспроизводит структуру наблюдаемого волнового пакета, а уравнения двухслойного течения описывают динамику центральной части термоклина даже в том случае, когда стратификация существенно отличается от двухслойной. Сравнение результатов расчета с натурными данными позволяет сделать вывод о том, что гипотеза о квазидвумерном характере течения на шельфе, лежащая в основе применяемого подхода, соответствует реальности.

Взаимодействие мод в задаче о тепловой конвекции вязко-упругой жидкости, подогреваемой снизу

Любимова Т.П., Крапивина Е.Н.

Известно, что при малых временах релаксации напряжений за неустойчивость механического равновесия вязко-упругой жидкости, подогреваемой снизу, ответственны монотонные возмущения, порог конвекции не зависит от времени релаксации напряжений и совпадает с тем, что в случае ньютоновской жидкости. При временах релаксации, превышающих некоторое значение, наиболее опасными являются колебательные возмущения. В настоящей работе исследуются устойчивость механического равновесия и надкритические режимы конвекции вязко-упругой жидкости в горизонтальном цилиндре квадратного сечения, подогреваемом снизу. Для описания реологического поведения жидкости используется модель Олдройда-В. Расчеты, проведенные при малых временах релаксации показали, что при числах Грасгофа, больших критического, эволюция начальных возмущений приводит к одновихревому стационарному движению, интенсивность которого монотонно растет с увеличением числа Грасгофа. Однако, уже при сравнительно небольшой надкритичности это стационарное течение теряет устойчивость, и в результате переходного процесса устанавливаются стационарные колебания с малой амплитудой и ненулевым средним. При временах релаксации, больших критического, эволюция начальных возмущений при числах Грасгофа, больших критического, приводит к установлению стационарных колебаний с нулевым средним. Амплитуда колебаний монотонно растет с увеличением числа Грасгофа. При увеличении числа Грасгофа стационарные колебания теряют устойчивость и сменяются квазипериодическими движениями. Получены диаграммы существования различных режимов конвекции на плоскости параметров число Грасгофа - безразмерное время релаксации напряжений для нескольких значений отношения времен запаздывания деформаций и релаксации напряжений. Исследована также устойчивость механического равновесия по отношению к возмущениям двухвихревой структуры. Обнаружено, что критическое значение времени релаксации, при котором колебательные возмущения двухвихревой структуры становятся более опасными, чем монотонные, существенно меньше, чем для одновихревого движения. В результате, в некотором диапазоне значений отношения времен запаздывания деформаций и релаксации напряжений имеют место пересечения бифуркационных поверхностей для возмущений разной симметрии. Для выяснения

особенностей поведения решений вблизи точек пересечения проведен слабо-нелинейный анализ взаимодействия мод.

Внутренние волны в двухслойных слабостратифицированных течениях

Макаренко Н.И., Мальцева Ж.Л., Черевко А.А.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Рассматривается математическая модель нелинейных внутренних волн с дисперсией, учитывающая специфику глубоководной стратификации. Исходной является система уравнений Эйлера движения тяжелой неоднородной жидкости, в рамках которой рассматривается схема течения с непрерывной стратификацией внутри слоев и скачком плотности и скорости на поверхности раздела слоев. Задача о бегущих внутренних волнах сводится к решению квазилинейного эллиптического уравнения Дюбрей-Жакотэн-Лонга с граничными условиями на контактной поверхности. Методом разложения по параметру слабой стратификации выведено нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение второго приближения теории длинных волн. Построена параметрическая область существования уединенных волн и описаны их предельные режимы. Исследован спектральный портрет нормальных мод в плоскости чисел Фруда и охарактеризованы сценарии возникновения сдвиговой неустойчивости

Групповая классификация двумерных уравнений Грина-Нагди с топографией дна зависящей от времени

Мелешко С.В., Сириват П.

В работе исследуются двумерные уравнения Грина-Нагди с неровным рельефом дна. Функция, определяющая топографию дна, может зависеть от времени. Групповая классификация этих уравнений проводится относительно функции, описывающей топографию дна. Используется алгебраический подход для анализа классифицирующих уравнений. Также обсуждается лагранжиан и построение законов сохранения в лагранжевых координатах.

О "безмашинном энергоразделении" в газочапельном потоке

Осипцов А.Н., Голубкина И.В.

Представлены новые результаты исследования безмашинного газодинамического энергоразделения по схеме А.И. Леонтьева с использованием примеси мелких жидких капель в сверхзвуковом потоке. Безмашинное энергоразделение - это разделение однородного газового потока, протекающего через замкнутый объем, на два потока, имеющих заметно отличающиеся температуры торможения, без совершения работы и внешнего теплообмена. Схема Леонтьева представляет собой альтернативу широко используемым вихревым трубкам Ранка-Хилша, отличающуюся низкими потерями полного давления, но имеющую невысокую эффективность. В указанной схеме однородный дозвуковой поток, втекающий в канал, разделяется продольной

перегородкой на две части. В одной части канала газ протекает через сопло Лавалья, ускоряется до сверхзвуковой скорости и сильно охлаждается. В другой части канала поток сохраняет свои исходные параметры. Далее, до- и сверхзвуковой потоки контактируют через тонкую теплопроводную перегородку и обмениваются теплом. В результате, на выходе из канала имеется заметное различие в температурах торможения до- и сверхзвукового потоков. Эффективность данной схемы энергоразделения может быть значительно повышена за счет введения в сверхзвуковое течение примеси мелких жидких капель, осаждение которых на разделительную перегородку существенно снижает температуру восстановления на стенке со стороны сверхзвукового потока. Этот факт подтвержден параметрическими численными расчетами влияния примеси конденсирующихся и испаряющихся капель на температуру восстановления стенки со стороны сверхзвукового потока. Еще одним направлением дальнейшего увеличения эффективности энергоразделения является использование центральных тел в сверхзвуковой части газокапельного потока, приводящих к возникновению косых ударных волн, приходящих на разделительную перегородку и усиливающих эффект осаждения капель. В связи с этим, в заключительной части доклада проведен теоретический анализ прямых и косых ударных волн с частичной и полной дисперсией параметров в газокапельном потоке с испаряющимися каплями. Выведены обобщенные условия Рэнкина-Гюгонио, учитывающие поглощение тепла в зоне релаксации за счет испарения капель. Найдены диапазоны существования качественно различных по структуре ударных волн. Впервые исследовано взаимодействие пересекающихся косых ударных волн в газокапельной среде с испаряющимися каплями. Обнаружена возможность существования до десяти различных волновых структур при симметричном регулярном взаимодействии волн. Определены условия, при которых отраженные волны вырождаются в волны с полной дисперсией или полностью исчезают.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-19-00234.

Новая платформа оптимизации установки церебральных анастомозов

Паршин Д.В., Куянова Ю.О., Погосян В. Б.

Сосудистые анастомозы составляют значимую часть всех сосудистых операций, в том числе и в нейрохирургии. Перед врачом стоит целый ряд задач таких как: сама необходимость его установи, угол, место, а также материал, из которого следует использовать шунт (вена, артерия). Выбор врача зачастую определяет эффективность работы анастомоза, а также вероятность возникновения послеоперационных осложнений. В работе демонстрируется платформа на уровне клиентского приложения, в основе которой лежит модель роевого интеллекта. Подобная платформа сможет быстро и эффективно формировать для хирургов второе мнение, которое они могут учитывать прямо в ходе выполнения оперативного вмешательства.

Цунами вулканического происхождения

Пелиновский Е.Н.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Случившееся 15 января 2022 года эксплозивное извержение вулкана Hunga Tonga-hunga Ha'apai Volcano в королевстве Тонга (юго-восточная часть Тихого океана) привело к цунами с максимальной высотой около 15 м и человеческим жертвам. Извержение привело к сильным атмосферным возмущениям, и взрывная акустическая волна обогнула земной шар; она была зарегистрирована, в частности, в Южно-Сахалинске, Новосибирске и Москве. Колебания водной поверхности отмечались во многих морях и океанах, в том числе на противоположной стороне Земли в Карибском море. Они связываются с прямой генерацией волн движущимися атмосферными возмущениями (метео-цунами), и время их появления совпадает со временем прихода атмосферной волны. Такого же рода возмущения уже отмечались ранее при катастрофическом извержении вулкана Кракатау в 1883 году.

В докладе обсуждаются гидродинамические модели волн цунами вулканического происхождения, обращая особое внимание на описание очага цунами, а также нелинейные и дисперсионные свойства генерируемых волн. Приведены результаты моделирования некоторых случаев реальных событий, связанных с извержениями вулканов: Кракатау (Индонезия) в 1883 году, Муōjin-Shō (Япония) в 1952 г, Карымский (Камчатка) в 1996 году, Montserrat (Малые Антильские острова) в 2003 году, и Анак Кракатау (Индонезия) в 2018 году. Публикации на эту тему приведены ниже.

Исследования поддержаны грантом РФФИ 20-05-00162.

Литература

1. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 1996.
2. Mirchina N.R., Pelinovsky E.N. Estimation of underwater eruption energy based on tsunami wave data. *Natural Hazards*, 1988, vol. 1, No. 3, 277 - 283.
3. Choi B.H., Pelinovsky E., Kim K.O., Lee J.S. Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 Krakatau volcanic eruption. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, vol. 3, No. 5, 321 – 332.
4. Pelinovsky E., Choi B.H., Stromkov A., Didenkulova I., Kim H.S. Analysis of tide-gauge records of the 1883 Krakatau tsunami. *Tsunamis: case studies and recent developments, Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol. 23, Springer, 2005, 57-77.
5. Pelinovsky E., Zahibo N., Dunkley P., Edmonds M., Herd R., Talipova T., Kozelkov A., Nikolkina I. Tsunami generated by the volcano eruption on July 12-13 2003 at Montserrat, Lesser Antilles. *Science of Tsunami Hazards*, 2004, vol. 22, No. 1, 44-57.
6. Torsvik, T., Paris, R., Didenkulova, I., Pelinovsky, E., Belousov, A., Belousova, M. Numerical simulation of tsunami event during the 1996 volcanic eruption in Karymskoe lake, Kamchatka, Russia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, vol. 10, 2359-2369.
7. Dogan G.G., Annunziato A., Hidayat R., Husrin S., Prasetya G., Kongko W., Zaytsev A., Pelinovsky E., Imamura F., and Yalciner A.C. Numerical simulations of December 22, 2018 Anak Krakatau tsunami and examination of possible submarine landslide scenarios. *Pure and Applied Geophysics*, 2021, vol. 178, No. 1, 1-20.

Гиперболическая термодинамически согласованная модель волновых процессов в деформируемой пористой среде, насыщенной многофазной сжимаемой жидкостью

Роменский Е.И., Решетова Г.В., Пешков И.М.

Обсуждается новый подход к моделированию насыщенной деформируемой пористой среды, рассматриваемой как многофазная смесь, на основе теории симметрических гиперболических термодинамически согласованных систем.

Представлена модель, учитывающая конечные деформации скелета, насыщенного смесью сжимаемых жидкостей и газов. Модель позволяет учитывать вязкость насыщающей жидкости и неупругие деформации пористой среды. Определяющие дифференциальные уравнения модели удовлетворяют законам неравновесной термодинамики и образуют симметрическую гиперболическую систему. Структура уравнений, включающих уравнения для объемных концентраций фаз, позволяет применить метод диффузных границ для расчета процессов с области с включениями чистых фаз упругой или жидкой среды. При этом граница раздела фаз моделируется скачком объемной концентрации.

Сформулированы линеаризованные уравнения модели для расчета распространения волн малой амплитуды в насыщенной пористой среде. Приведена серия численных расчетов, демонстрирующих возможности модели.

Гидродинамические солитоны огибающей: не слабонелинейные волны

Слюняев А.В.

В последнее десятилетие выяснилось, что солитоны огибающей нелинейного уравнения Шредингера, формально полученные в слабонелинейном пределе длинных модуляций однонаправленных волн на поверхности глубокой воды, довольно хорошо себя чувствуют в пределе сильной нелинейности, вплоть до порога локального обрушения волн. Для их описания во многих случаях достаточно представлений о солитонах НУШ и их обобщений в рамках слабонелинейной теории. Применимы в режиме сильной нелинейности и некоторые другие родственные решения НУШ. Все это интересно и может быть полезным для решения проблемы морских волн-убийц. По этой теме у меня вышел ряд статей. Ключевые:

1. A. Slunyaev, G.F. Clauss, M. Klein, M. Onorato, Simulations and experiments of short intense envelope solitons of surface water waves. *Phys. Fluids* 25, 067105,1-17 (2013).
2. A. Slunyaev, E. Pelinovsky, A. Sergeeva, A. Chabchoub, N. Hoffmann, M. Onorato, N. Akhmediev, Super rogue waves in simulations based on weakly nonlinear and fully nonlinear hydrodynamic equations. *Phys. Rev. E* 88, 012909–1-10 (2013).
3. A.V. Slunyaev, V.I. Shrira, On the highest non-breaking wave in a group: fully nonlinear water wave breathers vs weakly nonlinear theory. *J. Fluid Mech.* 735, 203-248 (2013).
4. V.I. Shrira, A.V. Slunyaev, Nonlinear dynamics of trapped waves on jet currents and rogue waves. *Phys. Rev. E.* 89, 041002(R) 1–5 (2014).
5. A. Slunyaev, M. Klein, G.F. Clauss, Laboratory and numerical study of intense envelope solitons of water waves: generation, reflection from a wall and collisions. *Physics of Fluids* 29, 047103 (2017).

6. A.V. Slunyaev, A.V. Kokorina, Soliton groups as the reason for extreme statistics of unidirectional sea waves. *J. Ocean Eng. Marine Energy* 3, 395-408 (2017).
7. A.V. Slunyaev, Effects of coherent dynamics of stochastic deep-water waves. *Phys. Rev. E* 101, 062214 (2020).
8. A.V. Slunyaev, Persistence of hydrodynamic envelope solitons: detection and rogue wave occurrence. *Physics of Fluids* 33, 036606 (2021).
9. G. Ducrozet, A.V. Slunyaev, Y.A. Stepanyants, Transformation of envelope solitons on a bottom step. *Physics of Fluids* 33, 066606 (2021).

Влияние эффектов неоднородности и вращения на динамику уединённых волн в жидкости переменной глубины

Хелфрик К.Р.¹⁾, Островский Л.А.²⁾, Степанянц Ю.А.³⁾

¹⁾Department of Physical Oceanography, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA USA. Email: Khelfrich@whoi.edu

²⁾University of Colorado, Boulder, USA. Email: Lev.Ostrovsky@gmail.com

³⁾School of Mathematics, Physics and Computing, University of Southern Queensland, Toowoomba, QLD, 4350, Australia. Email: Yury.Stepanyants@usq.edu.au

Мы представляем результаты наших недавних исследований [1–4] динамики нелинейных уединённых волн в мелководных районах океана при влиянии комбинированных эффектов нелинейности, вращения Земли и переменной глубины. Наше рассмотрение основано на обобщённой модели уравнения Кортевега–де Фриза (КдФ), учитывающей как квадратичную, так и кубическую нелинейность с дополнительными членами, описывающими медленно меняющуюся глубину и слабое влияние вращения Земли. Сложная взаимосвязь этих факторов исследуется с помощью приближенного адиабатического подхода и путем численного решения основного модельного уравнения. Показано, что для уединённых волн, движущихся к берегу, терминальное затухание, вызванное вращением жидкости, может быть подавлено эффектом обмеления. Подробно проанализированы два основных примера профиля дна. Один из них представляет собой дно с постоянным уклоном, а другой – специфический профиль дна, обеспечивающий постоянство амплитуды уединённой волны. Оценки с реальными океаническими параметрами показывают, что предсказанные эффекты устойчивой солитонной динамики в прибрежной зоне могут иметь место, в частности, для внутренних волн.

Отдельно рассмотрена динамика высокочастотного цуга (солитона огибающей) в двухслойной вращающейся жидкости с линейно изменяющимся дном [2]. Показано, что наиболее вероятной частотой несущей волны, составляющей цуг, является частота, на которой инкремент модуляционной неустойчивости максимален. Солитон огибающей на этой частоте может быть описан нелинейным уравнением Шредингера. Когда такой солитон входит в прибрежную зону, где глубина линейно уменьшается с расстоянием, он испытывает адиабатическую перестройку. Это приводит к плавному увеличению амплитуды солитона, его скорости и периода несущей волны при уменьшении длительности огибающей. При этом солитон становится выше и уже, трансформируясь в бризер – узкую нестационарную уединённую волну. Приведенные

оценки для реального океана показывают, что подобного рода бризеры вполне могут формироваться во внутренних волнах на мелководье.

1. Stepanyants Y.A. The effects of interplay between the rotation and shoaling for a solitary wave on variable topography. *Stud. Appl. Math.*, 2019, v. 142, 465–486.
2. Stepanyants Y.A. Dynamics of internal envelope solitons in a rotating fluid of a variable depth. *Fluids*, 2019, v. 4, n. 1, 56.
3. Ostrovsky L., Helfrich K.R. Some new aspects of the joint effect of rotation and topography on internal solitary waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 2019, v. 49, 1639–1649.
4. Helfrich K., Ostrovsky L. Effects of rotation and topography on internal solitary waves governed by the rotating-Gardner equation. *Nonlin. Proc. Geophys.*, 2022, in press.

Колебания ледяного покрова в море при наличии горизонтального течения со сдвигом скорости

Стурова И.В., Ткачева Л.А.

В последние десятилетия активно исследуются волновые движения, возникающие в жидкости, которая ограничена сверху плавающей тонкой упругой пластиной. Это необходимо для проектирования и эксплуатации искусственных платформ больших размеров, а также учета плавающего ледяного покрова. Волны, возникающие в такой жидкости, называются изгибно-гравитационными (ИГВ), так как их свойства зависят как от свойств жидкости, так и от свойств упругого покрытия. К настоящему времени сравнительно хорошо исследованы процессы генерации, развития и распространения пространственных ИГВ в покоящейся в невозмущенном состоянии среде или в потоке жидкости, текущей с постоянной по глубине скоростью. Однако в реальных морских условиях вертикальное распределение скорости течения в некоторых случаях показывает значительные изменения величины и направления по глубине. Этот факт свидетельствует о том, что исследование ИГВ следует проводить также в рамках таких теоретических моделей, которые учитывают вертикальную структуру течений. Большое число исследований посвящено развитию поверхностных волн при наличии сдвиговых течений в жидкости под свободной поверхностью. Трехмерные задачи о поведении ИГВ в жидкости со сдвиговым течением до сих пор не рассматривались.

В данной работе представлены решения трех линейных начально-краевых задач о поведении плавающего ледяного покрова под действием осесимметричного возмущения. Рассматривается безграничный в горизонтальных направлениях поток идеальной несжимаемой однородной жидкости конечной глубины с вертикальным сдвигом скорости. В первых двух задачах линейное сдвиговое течение задано только для одной компоненты горизонтальной скорости жидкости. Исследованы случаи как импульсного, так и периодического воздействия внешнего давления. Для третьей задачи в невозмущенном состоянии обе горизонтальные компоненты жидкости линейно изменяются по глубине и начальное возмущение вызвано возвышением верхней границы жидкости. Ледяной покров во всех трех случаях моделируется тонкой упругой пластиной с учетом равномерного (в первых двух случаях) и неравномерного (в третьем случае) сжатия. Получены интегральные представления решений, описывающих нестационарное поведение ледяного покрова. Выполненные расчеты

показали, что наличие сжимающих усилий в ледяном покрове и сдвигового течения в жидкости существенно влияет на поведение вертикальных прогибов ледяного покрова.

Оценки потерь энергии при разрушении солитонов внутренних волн на шельфовых склонах

Талипова Т.Г.¹, Терлецкая К.², Мадерич В.²

1 Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation

2 Institute of Mathematical Machine and System Problems, Glushkov av., 42, Kyiv 03187, Ukraine

Внутренние уединенные волны (МВУ) возникают в океане и морях в различной форме и обрушиваются в шельфовых зонах разнообразными путями, приводящими к интенсивному перемешиванию, влияющему на такие процессы, как биологическая продуктивность и перенос наносов. Солитоны внутренних волн, обычно отрицательной полярности, распространяются в океане, стратификация которого часто рассматривается как двухслойная, из глубинной части на шельф, где и разрушаются. Наиболее часто встречаются два основных механизма разрушения. Первый представляет собой разрушение волны над наклонным шельфом, когда нелинейная добавка к скорости частиц воды становится настолько большой, что вызывает опрокидывание волны. Вторым механизмом – это смена полярности солитона внутренней волны в точке переворота (для приближения двухслойной среды в этой точке глубины верхнего и нижнего слоев равны). Идеализированными параметрами, которые описывают процесс взаимодействия уединенной внутренней волны с идеализированным же наклонным шельфом, описываемым только углом наклона дна, являются: (i) безразмерная амплитуда волны, нормированная на толщину верхнего слоя жидкости, которая остается постоянной в данной формулировке проблемы; (ii) параметр блокировки - отношение высоты придонного слоя на шельфе к амплитуде падающей волны (переменный параметр); (iii) угол уклона дна. Нами предложена трехмерная классификационная диаграмма типов разрушения волн над склоном, основанная на этих параметрах. Согласно этой классификации, внутренние волны могут распространяться над склоном без разрушения и смены полярности; со сменой полярности, но без разрушения; разрушаясь, но без смены полярности; и, наконец, разрушаясь со сменой полярности над склоном. Соответствующие процессы были промоделированы в численном лотке, и определены потери энергии солитонов внутренних волн в зависимости от угла уклона шельфа и параметра блокировки волны. Показано, что максимум потерь энергии приходится на область значений параметра блокировки от -0.5 до 0.5 при всех углах уклона и достигает 55% от энергии падающей волны. (Отрицательный параметр блокировки соответствует заплеску внутренней волны и образованию болуса). Результаты численных расчетов потерь энергии хорошо согласуются с результатами лабораторных измерений, проведенных ранее Хуттером (1996) и Ченом (2007). Шельфовая зона Южно – Китайского моря в районе Луфенг была аппроксимирована наклонным шельфом, и для нее были определены области «hot

spots», то есть области с высоким уровнем потерь энергии внутренних волн при разрушении.

Моделирование взаимодействия длинных волн с берегом и прибрежными конструкциями

Гусев О.И., Скиба В.С., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б.

Содержание доклада связано с разработкой иерархии математических моделей и соответствующих численных алгоритмов для исследования характеристик трансформации длинных поверхностных волн в прибрежных акваториях и воздействия этих волн на гидротехнические сооружения, размещаемые в этих акваториях. Необходимость создания такого вычислительного инструментария вызвана активизацией хозяйственного освоения побережья, примыкающего к океанам и морям, омывающим континентальные границы России.

В настоящее время проектируются, создаются и вводятся в эксплуатацию прибрежные хранилища сжиженного газа, регазификационные установки, плавучие атомные энергетические установки. Планируются прибрежные рекреационные объекты. Каждый из этих объектов нуждается в оценке возможного волнового воздействия. В частности, объекты, размещаемые вблизи Дальневосточного и Черноморского побережий, требуют оценки опасности, связанной с вероятным воздействием волн цунами сейсмического, оползневого и метеорологического происхождения.

В докладе будет представлена иерархия нелинейно-дисперсионных моделей мелкой воды, результаты валидации моделей и верификации алгоритмов на представительном наборе тестовых задач – результатах лабораторных экспериментов, точных решениях и результатах иных авторов. Ключевые характеристики приближенных моделей сопоставляются с аналогичными характеристиками "эталонной" модели потенциальных течений идеальной жидкости со свободными границами. Демонстрируются также результаты решения задач, поставленных реальными практическими проблемами.

Гемодинамика и реология аневризмы аорты

Мержоева Л.Р., Карпенко А.А., Паршин Д.В., Липовка А.И., Тихвинский Д.В.,
Чупахин А.П.

Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН
Новосибирский государственный университет
НМИЦ им. Е.Н.Мешалкина

Аневризма брюшного отдела аорты – это широкораспространенное заболевание сердечно-сосудистой системы, выражающееся в образовании раздутия вблизи или непосредственно на бифуркации аорты на подвздошные артерии. Эти две компоненты системы-бифуркация и балдж-взаимно влияют друг на друга и исследование этого взаимодействия важно как для практической медицины, так и фундаментального понимания гидродинамики тройников. В докладе будут представлены результаты

исследования ее прочностных свойств и данные 3D компьютерного моделирования гемодинамики аорты с аневризмой.