

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МГУ

Памяти С.Я.Герценштейна и
И.В.Некрасова посвящается

МАТЕРИАЛЫ
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ»

01 марта -07 марта
Моск.обл., панс. «Звенигородский»
Российской Академии Наук

Москва
2010

УДК 532.516.532.517

ББК 35.114

М 43

М 43 Материалы международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» - 01 марта - 07 марта 2010 г. Моск. обл. панс. «Звенигородский» РАН – М: Издательство НИИ механики МГУ. 2010. - 196с.

В материалах отражено современное состояние теории гидродинамической устойчивости и турбулентности. Представлены экспериментальные и теоретические работы по прямому численному моделированию турбулентности и по переходу к турбулентности. Сборник будет полезен аспирантам, студентам и научным сотрудникам.

УДК 532.516.532.517

ББК 35.114

©НИИ механики МГУ
им. М.В.Ломоносова, 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

XIX школа-семинар (конференция) «Нелинейные Задачи Теории Гидродинамической Устойчивости и Турбулентность» состоялась в период с 1 по 7 марта 2010 г. в пансионате «Звенигородский» Всероссийской Академии Наук. В работе конференции приняли участие более 60 ученых, представляющих 14 регионов России. имелось и международное представительство: двое ученых (из Израиля и Португалии) участвовали лично и сделали устные доклады, еще трое (из Австралии, Израиля и Финляндии) выступили в качестве соавторов. Всего было прочитано 42 устных доклада и сделано около 30 стендовых презентаций.

В первый день работы конференции председатель оргкомитета академик Г.Г.Черный вручил премию имени академика Г.И. Петрова победителям конкурса – группе ученых из Новосибирского Института теоретической и прикладной механики СО РАН Ю.С. Качанову, А.В. Иванову и Б.И. Бородулину за цикл работ «Устойчивость и восприимчивость пограничных слоев к трехмерным возмущениям». В рамках работы конференции состоялся также конкурс работ молодых ученых. Почетными грамотами были награждены Л.А. Карасева, О.А. Соленая, Д.В. Кузнецова (все г. Москва), С.В. Полянских, В.С. Шелистов, А.В. Зайцева (г. Краснодар), Д.А. Мищенко, С.В. Кирилловский (г. Новосибирск) и М.Н. Романов (г. Ростов-на-Дону).

Прошедшая конференция является традиционной и проводится, начиная с 1976г. Главным организатором и душой школы НеЗаТеГиУс был профессор Семен Яковлевич Герценштейн. Все предшествующие годы одним из основных помощников С.Я. Герценштейна был Игорь Владимирович Некрасов. Именно этим людям принадлежит основная заслуга в том, что НеЗаТеГиУс в течение более 30 лет является «смотром» совре-

менных достижений в области теории гидродинамической устойчивости и турбулентности, служил мощным стимулом большому числу российских ученых к дальнейшим исследованиям. С глубокой болью сообществом российских ученых механиков было встречено известие о безвременной кончине С.Я. Герценштейна (15 марта 2009) и И.В. Некрасова (25 декабря 2008). Проведение очередной конференции в традиционные сроки было делом чести для организационного комитета и данью памяти близким людям, коллегам и верным друзьям С.Я. Герценштейну и И.В. Некрасову.

Оргкомитет школы-семинара надеется, что прошедшая конференция не принесла разочарования ее участникам и как и в прежние годы послужит источником новых идей. Мы желаем всем коллегам успешных продвижений в нашей актуальной и важной области науки.

Зам. председателя оргкомитета
д.ф.-м.н. Н.В. Никитин

**ПРОГРАММА
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ
УСТОЙЧИВОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ»**

ДОКЛАДЫ

1. Абрашкин А.А.
Четырехмерное течение в плоском канале.
2. Арсеньев С.А.
О мезомасштабной турбулентности в динамике атмосферы океана.
3. Астафьева Н.М.
Циркуляция атмосферы земли (зональные потоки, вихри и волны) и климатические тенденции по данным спутникового мониторинга.
4. Астафьева Н.М., Розанов Н.Н., Федоров С.В., Шацев А.Н.
«Нестандартные» траектории тропических циклонов и аналогии с движением вихревых лазерных солитонов.
5. Афанасьев А.А.
Фильтрационные течения бинарной смеси вода-углекислый газ в высокотемпературном геотермальном резервуаре.
6. Багиров Л.А.
Сверхзвуковые сепараторы компонент природного газа.
7. Баранов В.Б.
Кинетико-газодинамическая модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой и возможные физические свойства границы солнечной системы как тангенциального разрыва.
8. Бармин А.А.
Задачи устойчивости при моделировании вулканических процессов.
9. Бессонов О.А., Никитин С.А., Полежаев В.И.
Конвективные неустойчивости в расплавах при больших числах

Прандтля в модели метода Чохральского. Результаты международного теста.

10. Божко А.А., Глухов А.Ф., Путин Г.Ф., Суслов С.А., Тыньяла Т.
О конвективных течениях в магнитных наносuspensions.
11. Бунтин Д.А., Маслов А.А.
Нелинейные процессы в гиперзвуковом пограничном слое при переходе к турбулентности.
12. Бунтин Д.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С.
Биспектральный анализ нелинейных взаимодействий возмущений в гиперзвуковом ударном слое на пластине.
13. Быков Ф.Л., Гордин В.А.
Анализ атмосферных фронтов Земли.
14. Веденеев В.В.
Исследование устойчивости упругой пластины в сверхзвуковом потоке газа в случае изменения ее собственных мод под действием потока.
15. Доброхотов С.Ю., Маслов В.П., Шафаревич А.И.
Асимптотическое описание динамики локализованных вихрей и вихревых нитей с помощью канонического оператора.
16. Ермаков М.К.
Трехмерная устойчивость осесимметричных течений.
17. Желиговский В.А.
Оценки норм Жеврэ-Соболева решений уравнений гидродинамического типа.
18. Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э.
Турбулентные течения во вращающемся сферическом слое – пространственные структуры и динамическое поведение.
19. Захаренков М.Н.
Волны завихренности в задачах гидродинамической устойчивости.

20. Иванов А.В.
Механизмы возбуждения мод неустойчивости в пограничных слоях.
21. Капцов О.В., Шмидт А.В.
Редукция трехмерной полуэмпирической модели дальнего турбулентного следа к одномерной задаче.
22. Качанов Ю.С.
Резонансная природа слабонелинейных стадий возникновения турбулентности.
23. Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Денисов О.В., Зеленский Д.К.
Неявная методика расчета вязких турбулентных течений.
24. Колесов В.В., Романов М.Н.
Проблема Куэтта-Тейлора для проницаемых цилиндров.
25. Копьев В.Ф., Фараносов Г.А.
Излучение звука колебаниями вихревого кольца, движущегося в дозвуковой струе.
26. Краснопольский Б.И.
Об интенсивности теплообмена при обтекании кубических каверн ламинарным потоком.
27. Куликовский А.Г.
Возбуждение поперечных волн в слое нелинейно-упругой среды в условиях, близких к резонансу.
28. Ланда П.С.
Особенности перехода к турбулентности в гидродинамических системах.
29. Любимов Д.В.
Устойчивость систем с медленно меняющимися параметрами.
30. Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г., Мингалев В.С., Мингалев О.В.
Численное моделирование циклонов во внутритропической зоне конвекции и возможности их раннего обнаружения.

31. Могилевский Е.И., Шкадов В.Я.
Влияние профилирования удерживающих поверхностей и неньютоновских свойств жидкости на гидродинамическую устойчивость и нелинейные волны в капиллярных пленках, движущихся под действием внешних сил.
32. Монахов А.А., Ромашова Н.Б.
Кавитация и свечение жидкости в диэлектрической каверне.
33. Никитин Н.В.
Четырехмерное течение в плоском канале.
34. Осипцов А.Н.
Развитие лагранжева подхода в механике многофазных сред.
35. Петрова Л.И.
Развитие газодинамической неустойчивости, возникновение завихренности и турбулентности.
36. Подвигина О.М.
Устойчивость конвективных валов во внешнем магнитном поле.
37. Полежаев В.И.
Конвективные взаимодействия. Технические и технологические приложения.
38. Полежаев Ю.В.
Законы турбулентного горения струй.
39. Прокофьев В.В., Козлов И.И., Очеретяный С.А.
Экспериментальные исследования автоколебательных режимов при сверхкритических поддувах газа в каверну с отрицательным числом кавитации.
40. Рудяк В.Я.
Процессы переноса в наножидкостях: состояние и проблемы.
41. Судаков В.Г., Егоров И.В., Федоров А.В.
Численное моделирование процессов восприимчивости и устойчивости гиперзвуковых пограничных слоев.

42. Чернявский В.М., Монахов А.А.
Парадоксы теории Стокса: о силе трения на границе контакта сред.
Теория и эксперимент.
43. Чернявский В.М., Штемлер Ю.М.
Длинноволновая неустойчивость сдвигового слоя.
44. Чертовских Р.А.
Конвективное динамо во вращающемся слое.
45. Штеменко Л.С., Докунина О.И., Шугаев Ф.В., Терентьев Е.Н.
Давление за ударной волной в турбулентном потоке воздуха.
46. Щур Н.А.
Численное исследование условий возникновения турбулентной вихревой дорожки Кармана, сходящей с задней кромки профиля.
47. Яхот А.
Наблюдение переходящей турбулентности в стенозированных артериях.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ.

1. Антипина Н.А., Тарунин Е.Л.
Турбулентный режим гидродинамики и теплообмена в вихревой трубке.
2. Бельшева И.В., Мурсенкова И.В.
Экспериментальное исследование пограничного слоя в сверхзвуковом потоке воздуха при инициировании наносекундного распределенного поверхностного разряда.
3. Болдарева Л.Б., Сотина Н.Б.
Аналогия между уравнениями максвелла и уравнениями движения сплошной среды со свойствами сверхтекучего ^3He .
4. Боронин С.А.
Устойчивость течения Куэтта суспензий при наличии градиентов в концентрации включений.

5. Варгафтик Г.М.
Гидродинамика пленочного кипения в окрестности критической точки горения затупленного тела, движущегося в жидкости.
6. Виноградова А.С., Налетова В.А., Турков В.А.
Магнитожидкостная перемычка между цилиндрами в поле проводника с током.
7. Волкова Т.И., Налетова В.А., Турков В.А.
Форма объема тяжелой магнитной жидкости в поле катушки с током.
8. Гусарчук А.Н., Полянских С.В., Демехин Е.А.
Об электроконвективной неустойчивости.
9. Джалалова М.В., Зубков А.Ф.
Численное и экспериментальное исследование парашюта с различной степенью рифления.
10. Досаев М.З., Самсонов В.А., Селюцкий Ю.Д.
Об устойчивости стационарных режимов горизонтально-осевой ветроэнергетической установки.
11. Дружинин О.А., Троицкая Ю.И.
Генерация внутренних волн фонтанов в стратифицированной жидкости.
12. Зайцева А.В., Демехин Е.А.
Ветровая неустойчивость турбулентного слоя.
13. Захаренков М.Н.
Уравнение для возмущений завихренности.
14. Знаменская И.А., Орлов Д.М., Иванов И.Э., Коротева Е.Ю.
Турбулизация пограничного слоя за ударной волной, движущейся по области импульсного поверхностного разряда.
15. Зубарев В.М.
Пограничный слой в высокотурбулентном потоке жидкости.

16. Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.
Экспериментальное исследование возбуждения нестационарных вихрей Гертлера неоднородностями обтекаемой поверхности.
17. Калугин В.Т., Стрижак С.В.
Моделирование турбулентного слоя смешения за обратным уступом.
18. Карасева Л.А.
Характеристики устойчивости ускоряющейся струи при наличии сил плавучести.
19. Кирилловский С.В., Миронов С.Г., Поплавская Т.В.,
Цырюльников И.С.
Устойчивость и управление возмущениями гиперзвукового ударного слоя.
20. Кузнецова Д.В., Сибгатуллин И.Н.
Переходные режимы двухдиффузионной конвекции.
21. Лебедева Н.А.
Развитие нового комплексного Лагранжева подхода для моделирования плоских нестационарных дисперсных течений с вязкой несущей фазой.
22. Моденова В.В.
Моделирование нелинейной задачи разделения бинарной смеси газов.
23. Мурашкина К.Б., Пасконов В.М.
Применение параллельных вычислений для численного расчета течения в канале на основе модифицированных уравнений Навье-Стокса.
24. Налетова В.А., Турков В.А., Пелевина Д.А.
Движение капли магнитной жидкости на горизонтальной подложке в переменном однородном магнитном поле.
25. Налетова В.А., Турков В.А., Калмыков С.А.
Модель тонкого тела из вязкоупругого намагничивающегося полимера.

26. Невский Ю.А.
Гравитационная конвекция суспензий в двумерных областях с наклонными стенками.
27. Панин Д.Н.
Воздействие статических электрических полей на параметры кровотока кролика.
28. Полежаев Ю.В.
О турбулентных струях и физике струйно-факельного горения газов.
29. Полянских С.В., Демехин Е.А.
Устойчивость струи электролита в переменном электрическом поле произвольной частоты.
30. Поплавская Т.В., Цырюльников И.С.
Прямое численное моделирование нелинейных волновых процессов в гиперзвуковом ударном слое.
31. Подрябинкин Е.В., Рудяк В.Я.
О моменте и силе, действующих на внутреннюю трубу при течении ньютоновской и неньютоновских жидкостей в цилиндрическом зазоре с эксцентриситетом.
32. Прокунин А.Н., Водопьянов И.С.
О движении сферической частицы вдоль стенки в вязкой и вязкоупругой жидкости.
33. Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Трифонов В.В.
Экспериментальное и расчетное исследование пульсационного течения в слабо расширяющемся канале.
34. Романов М.Н.
Линейный анализ устойчивости основного режима движения жидкости между двумя вращающимися проницаемыми цилиндрами.
35. Сиковский Д.Ф.
Законы подобия пристенного турбулентного газодисперсного потока с осаждающимися частицами.

36. Солёная О.А.
Эволюция вихревого кольца в вязком теплопроводном газе.
37. Суётнова Е.И., Чёрнявский В.М.
Некоторые особенности гидродинамического режима фильтрации при уплотнении наращиваемой слоисто-неоднородной пористой среды.
38. Шелистов В.С., Демехин Е.А.
Численное моделирование поверхностной турбулентности.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВАКУУМА

Абрашкин А.А.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Предложена квантово-гидродинамическая модель вакуума как сплошного континуума. Согласно принятой гипотезе он состоит из виртуальных частиц с планковскими масштабами (эфиронов). Их пространственный масштаб, время жизни и масса выражаются через значения скорости света, гравитационной постоянной и постоянной Планка. Частицы образуют бозе-конденсат.

С помощью преобразования Маделунга уравнение Шредингера для ансамбля невзаимодействующих эфиронов сводится к системе уравнений гидродинамики для идеальной сжимаемой жидкости. Плотность жидкости пропорциональна квадрату модуля волновой функции, а скорость пропорциональна градиенту ее фазы. Зависимость квантовомеханического давления от плотности нелокальна. Уравнения динамики вакуума инвариантны по отношению к преобразованиям Галилея. С гидродинамической точки зрения они описывают только потенциальные течения конденсата. Построены точные аналитические решения, описывающие круговые области с квантованной циркуляцией (вихри) и сферические стационарные структуры (структурные частицы).

Показано, что в однородном конденсате эфиронов распространяются квантовые продольные волны плотности. Это гравитационные волны. Согласно общей теории относительности гравитационные волны представляют периодические колебания метрики. Традиционно полагается, что они подобны электромагнитным волнам, то есть поперечные, бездисперсионные и распространяются со скоростью света. Мы отказались от идеи абсолютно пустого пространства и считаем, что гравитационные волны в вакууме представляют колебания его плотности, обусловленные действием квантового давления. Как результат этого, наше уравнение отличается от традиционного волнового. Оно имеет четвертый порядок и описывает продольные волны. Дисперсионное уравнение для волн содержит пространственную дисперсию.

Рассмотрено состояние однородной изотропной турбулентности, в котором эфиры играют роль мелкомасштабных пульсаций. Пространственный масштаб усреднения много больше планковской длины, а временной масштаб усреднения много больше планковского времени. На этих масштабах плотность конденсата можно считать однородной, а давление равным нулю. Показано, что в такой среде распространяются

поперечные упругие волны. Они аналогичны электромагнитным волнам. Магнитное и электрическое поля связаны соответственно с ротором усредненной скорости (завихренностью) и дивергенцией тензора напряжений Рейнольдса. Скорость волны равна скорости света. Таким образом, фотон интерпретируется как квазичастица турбулизованного планковского конденсата.

Обсуждаются космологические приложения модели. Высказана идея, что темная материя является реальным планковским конденсатом, находящимся в состоянии ламинарного движения. Его турбулизация эквивалентна возникновению электромагнитного излучения. При своем распространении в такой среде фотоны испытывают красное смещение вследствие диффузии турбулентных напряжений.

HYDRODYNAMICAL MODEL OF VACUUM

Anatoly Abrashkin

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

The model of a vacuum as a quantum-hydrodynamical continuum is proposed. According to the hypothesis a vacuum consists of virtual particles with Planck's scales named as etherons. Their length, lifetime and mass are expressed in terms of the velocity of light, the gravitational and Planck's constants. Particles form the Boze-condensate.

Due to the Madelung transformation the Schrödinger equation for an ensemble of non-interacting etherons is reduced to the system of hydrodynamic equations for an ideal compressible fluid. The density of the fluid is proportional to the squared modulus of the wave function. The velocity is proportional to the gradient of the phase of the wave function. The dependence of the quantum mechanical pressure versus the fluid density is nonlocal. The equations of dynamics of a vacuum are invariant to the Galilei transformations. From the hydrodynamic point of view they define potential flows only. Original solutions for two-dimensional flows with the quantified circulation and the spherical stationary structures are constructed. These structures are the examples of the simplest elementary particles.

It is shown that the quantum longitudinal waves of density propagate in a homogeneous vacuum as the gravity waves. According to the general relativity theory the gravity waves are periodical oscillations of metrics. Conventionally it is assumed that they are similar to the electromagnetic waves, i.e. are transverse, non-dispersive and propagate with the velocity of light. We reject the idea of an absolutely empty space and assume that the gravitational waves represent the density oscillations of vacuum induced by the quantum pressure.

As a result, our equation differs from the traditional wave equation. It is of the fourth order and describes the longitudinal waves. The dispersion equation for the waves contains the spatial dispersion. The value of their group velocity can't be higher than the velocity of light because the maximal wave number is limited by the inverse Plank's length.

The state of the homogeneous and isotropic vacuum turbulence is studied. The etherons play the role of pulsations. The spatial scale of average turbulent fields is much greater than the Plank's length and temporal scale of the fields considerably exceeds the Plank's time. At these scales the density is constant and the pressure is equal to zero. It is shown that the transverse elastic waves can propagate in such a medium. They are identical to the electromagnetic waves. The magnetic and electric fields relate to small perturbations of the average vorticity and to the divergence of Reynold's tensor respectively. The velocity of the wave is equal to the velocity of light. Thus, the photon is interpreted as a quasi-particle of a turbulent vacuum.

Cosmological applications of the model are discussed as well. It is assumed that the dark matter is a real continuum of etherons in the laminar state. The turbulent continuum radiates photons. But due to the turbulent diffusion the wavelength of the photon acquires the red shift.

ТУРБУЛЕНТНЫЙ РЕЖИМ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ВИХРЕВОЙ ТРУБКЕ

Антипина Н.А., Тарунин Е.Л.

Пермский государственный университет, Пермь

Благодаря своим особенностям вихревой эффект трубки Ранка – Хилша находит практическое применение в самых различных областях техники и производства (вихревые холодильные камеры, вихревые термостаты и вихревые вакуум-насосы осушители, сепараторы, элементы контрольно-измерительных приборов) [1]. Эффект температурного разделения газов был открыт в 1931 г. Жозефом Ранком. Согласно данным его опытов закрученный поток сжатого газа разделялся в вихревой трубе на два: холодный и горячий. Эксперименты немецкого учёного Хилша подтвердили опыты Ранка, и с 1946 года вихревой эффект стал объектом исследований учёных разных стран.

Трудности теоретического изучения процессов, происходящих в вихревых аппаратах, заключаются в том, что гидродинамика и теплообмен в них описывается сложной системой нелинейных уравнений в частных производных. Рассматриваемое течение является трехмерным и

турбулентным, велик перепад давления и существенными оказываются эффекты сжимаемости. Поэтому при численном исследовании использовались полные уравнения Навье – Стокса.

Гидродинамику и теплообмен в вихревой трубке Ранка - Хилша исследовали с применением модели турбулентности к-ε. Подтверждено наличие зоны возвратного течения, которое ранее было получено на ламинарных моделях [2]. Найдены зависимости интегральных характеристик от геометрических параметров.

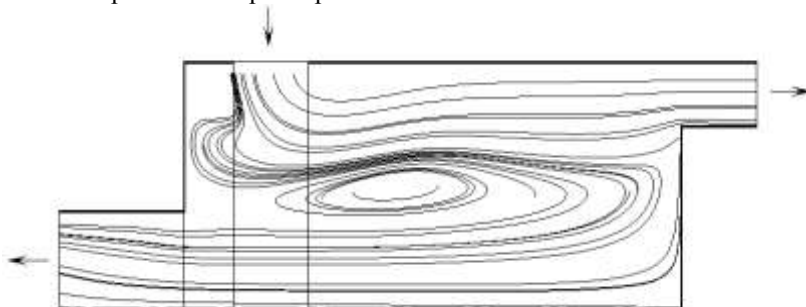


Рис. 1. Пример осесимметричной картины течения

ЛИТЕРАТУРА

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. – М., Машиностроение, 1969.-183с.
2. Tarunin E. L., Alikina O. N. Calculation of heat transfer in Ranque – Hilcsh’s vortex tube. International journal for numerical methods in fluids, 2005, №48, P. 107 – 113.

TURBULENT REGIME OF THE HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN THE RANQUE - HILSCH VORTEX TUBE

Antiipina N.A., Tarunin E.L.

The Perm state university (Perm, Russia)

Due to features the vortex effect finds practical application in many various areas of technique and manufacture (vortical refrigerating chambers, thermostats and vacuum pumps, driers, separators, elements of instrumentations) [1]. The effect of temperature division of gases was open by French scientist Ranque in 1931. According to his experiences a twirled stream of a compressed gas was separated in a vortex tube on two: cold and hot. After experiments of German scientist Hilsch (1946) which have confirmed experiences Ranque, the vortex effect became object of researches of scientists of different countries.

Difficulties of studying the processes occurring in vortex devices consist of hydrodynamics and heat exchange in them is described as a complex system of nonlinear equations in partial derivatives. The current in real vortex tubes is three-dimensional and turbulent, pressure difference is great and effects of compressibility are essential. For this reason at numerical researches full Navier – Stokes' and energy equations were used.

One example of current received as a result of calculations at the assumption axial symmetric of a vortex tube, is shown in figure 2. The main feature of the flow is the vortex zone of the recurrent flow, the existence of which was doubted in many papers [2]. Numerical experiences were fulfilled with different values of the parameters of the problem.

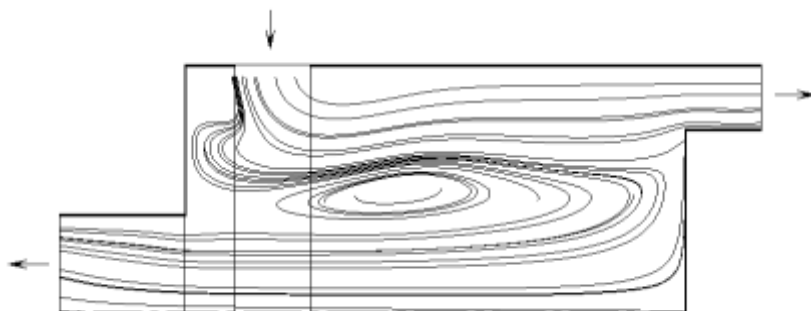


Fig. 1. One example of axial symmetric current

References

1. Merkulov A.P. Vortex effect and application in a technics of it. – Moscow., Machine-building, 1969.-183p.
2. Tarunin E. L., Alikina O. N. Calculation of heat transfer in Ranque – Hilsh's vortex tube. International journal for numerical methods in fluids, 2005, (48), p. 107 – 113.

О МЕЗОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ДИНАМИКЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

Арсеньев С.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва

Доклад посвящен представлению книги [1] публикуемой в 2010 году. Излагаемая в ней теория мезомасштабной турбулентности базируется на процедуре пространственного осреднения, которая приводит к асимметрии тензора турбулентных напряжений Рейнольдса и к необходимости использовать уравнения баланса углового момента среднего течения

и мезовихрей. Система уравнений замыкается законом сохранения момента инерции, пропорционального квадрату масштаба турбулентных мезовихрей. В качестве приложений теории рассмотрены задачи о формировании океанских течений на экваторе и глобальной циркуляции Мирового океана, расчет турбулентного следа за телом с учетом примесей и в потоках с перемежаемостью. Затронута проблема численного моделирования геомагнитного динамо. Применение метода разработки параллельных программ ParJava для кластерных вычислений позволило получить четырехмерные (4D) численные решения задачи зарождения и трансформации ураганов и торнадо (смерчей), наглядно иллюстрирующие динамику этих явлений природы и адекватность расчетов натурным наблюдениям. Отдельная глава посвящена проблемам расчета турбулентных течений и теплообмена в трубах и каналах, где применение мезомасштабной теории позволило полностью описать как классические профили скоростей турбулентных течений, так и обнаружить некоторые новые эффекты. В книге имеется обширный обзор литературы по проблеме описания вихревых течений в океане и атмосфере, в частности критический обзор современных достижений в области механико-математического моделирования торнадо и смерчей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсеньев С.А., Бабкин В.А., Губарь А.Ю., Николаевский В.Н. Мезомасштабная теория турбулентности. Вихри атмосферы и океана. Под ред. академика Г.С. Голицына. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2010. 362 с.

ABOUT MESO-SCALE TURBULENCE IN THE OCEAN-ATMOSPHERE DYNAMICS

S.A.Arsen'yev

O.Y. Schmidt's Institute of Physics of the Earth. Moscow

This talk presents the book [1] which is publishing in 2010 year [1]. Developed in [1] the theory of meso-scale turbulence is based on the spatial-averaging method that leads to asymmetry of the Reynolds's tensor of stresses and necessity to use the balance equations for angular moments of the averaged flow and meso-scale turbulent eddies. The system of equations is closed by the law of conservation for moment of inertia which is proportional to square of scale of turbulent eddies.

When applying the meso-scale theory to physics of atmosphere, the problems of turbulent wakes behind a body are considered including effects of suspensions and intermittency of flows. The geophysical applications include the problems of formation of ocean currents on equator and global oceanic circulation. The problem of the magnetic dynamo of the Earth is also touched upon. Two chapters are devoted to turbulent currents and heat exchange in pipes and channels where application of the meso-scale theory has allowed to completely describe the classical turbulent velocity structures as well as to find out some new effects. Implementation of the Par Java parallel program environment for cluster systems has allowed to receive four -dimensional (4D) numerical solutions of formation and evolution of tornado, which illustrate the kinematics of processes and the adequacy of calculation to natural observations. The book is offered to specialists in geophysics, hydrodynamics, meteorology, and computer implementations, as well as to students and post-graduates.

LITERATURE

1. Arsen'yev S.A., Babkin V.A., Gubar' A.Y., Nikolaevskiy V.N. The theory of meso-scale turbulence. The eddies of atmosphere and ocean. Ed. by academician G. S. Golitzin. Moscow- Izhevsk: Institute of the computer calculations, Scientific Research Center "Regular and chaotic dynamics". 2010 year. 316 pp.

К ТЕОРИИ ШКВАЛЬНЫХ БУРЬ, СМЕРЧЕЙ И ТОРНАДО

Арсеньев С.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва

По определению шквальная буря – это кратковременное (от 2 до 30 минут) увеличение скорости ветра до ураганных значений без вращения в районах тяжелых штормов или при прохождении быстрых циклонов, несущих облачность и дожди. В работе построена теория шквальных бурь. Показано, что шквальная буря является диссипативным (турбулентным) автосолитоном скорости ветра и давления в нижней тропосфере, возбуждаемым на подоблачной температурной инверсии ураганным ветром в средней и верхней тропосфере:

$$u = (\beta / H) \sec h^2 (\chi / \Delta), \quad (1)$$

$$P = p^0 + g \rho z - g \rho \frac{\beta}{\sqrt{g H}} \sec h^2 (\chi / \Delta), \quad (2)$$

где $\Delta = H (1-n) (4 A_L/3A)^{1/2}$ – ширина солитонов (1),(2), A_L и A – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной сдвиговой вязкости, соответственно. В формулах (1),(2): P – давление воздуха у поверхности Земли, p^0 – давление воздуха на инверсии, H – высота инверсии, g – ускорение силы тяжести, ρ – плотность воздуха, z – вертикальная координата, $\chi = x + Vt$ – бегущая координата, n – высота выступов шероховатости на поверхности Земли, $V = (gH)^{1/2}$ – скорость движения солитона. Теория находится в соответствии с наблюдениями шквальных бурь и позволяет их рассчитывать.

Если бегущий автолитон бури попадает в слабо вращающуюся торнадогенную грозовую суперячейку, то он вызывает дополнительное падение давления и усиливает вращение ветра, порождая торнадо. В работе найдены аналитические формулы, описывающие азимутальную составляющую скорости ветра в торнадо (в зависимости от радиуса). Расчеты по этим формулам сравниваются с наблюдениями радиального распределения азимутальной скорости ветра внутри торнадо, полученными с помощью передвижных доплеровских метеорологических радаров в США.

ON THE THEORY OF SQUALL STORMS AND TORNADOES

Arsen'yev S.A.

O.Y. Schmidt's Institute of Physics of the Earth. Moscow

By definition, the squall storm is brief (from 2 to 30 minutes) increase of wind velocity down to hurricane values without rotation, which is observed in the zone of severe thunderstorms or on propagation of rapid cyclones carrying cloudiness and rains. In present work the soliton theory of squall storms is constructed. It is shown that the squall storm is dissipative (turbulent) auto-soliton of the wind velocity and pressure in lower troposphere. This auto-soliton is exited on the under cloudy temperature inversion by hurricane winds in the middle and upper troposphere

$$u = (\beta / H) \sec h^2 (\chi / \Delta), \quad (1)$$

$$P = p^0 + g \rho z - g \rho \frac{\beta}{\sqrt{g H}} \sec h^2 (\chi / \Delta), \quad (2)$$

where $\Delta = H (1-n) (4 A_L/3A)^{1/2}$ is width of solitons (1),(2), A_L and A are coefficients of horizontal and vertical viscosity, correspondingly. In formulas (1),(2) also: P is air pressure nearby Earth's surface, p^0 is air pressure on in-

version, H is height of inversion, g is acceleration of gravity, ρ is air density, z is vertical coordinate, $\chi = x + Vt$ is progressing coordinate, n is relative roughness on the Earth's surface, $V = (gH)^{1/2}$ is velocity of soliton motion. The theory corresponds to observations of squall storms and it allows calculating of them.

If the progressing storm soliton hits into weakly rotating tornado-gene thunderstorm supercell, then it stimulates additional collapse of air pressure and increases wind rotation, generating tornado. In present work we discovered analytical formulas, which describe azimuth component of wind velocity in tornado (depending on radius). Theoretical calculations are compared with observations the wind velocity inside tornado, which was obtained with the help of mobile Doppler's weather radar in USA.

ЦИРКУЛЯЦИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ (ЗОНАЛЬНЫЕ ПОТОКИ, ВИХРИ И ВОЛНЫ) И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

Астафьева Н.М.

Институт космических исследований РАН

На основе данных спутникового мониторинга изучается воздействие феномена Южное колебание – Эль-Ниньо (ЮКЭН) и тропического циклогенеза (ТЦ) на структуру общей циркуляции атмосферы (ОЦА), погоду и климат планеты посредством телеконнекции — дальних пространственно-временных связей. Механизм дальних связей известен давно, но лишь недавно удалось проследить отклик сигнала от Эль-Ниньо (ЭН) в характере климатических изменений и структуры ОЦА над атлантико-европейским сектором. Согласно современным представлениям, основанным на спутниковых наблюдениях, существует также тесная связь ТЦ с крупномасштабной динамикой атмосферы: структурой и устойчивостью движений, характерных для тропических широт, — области с сильным муссонным ветром с неоднородным профилем скорости, муссонные ветры разного направления и генерация волн (вихрей) России зональными ветрами.

Упрощенная схема ОЦА такова: восточный и западный зональные потоки в низких и средних широтах с суб- и суперротацией, соответственно, и по три ячейки меридиональной циркуляции в каждом полушарии — ячейки Хедли, Феррела и полярная. Глобальная зональность барической структуры нарушается, поскольку из-за широтного градиен-

та притока солнечной радиации и различий энергетического баланса атмосферы над материками и сушей формируются квазистационарные барические структуры — крупномасштабные центры действия. Такое представление о структуре ОЦА очень упрощено и значимо только статистически. В действительности циркуляция атмосферы находится в непрерывном изменении в связи с сезонными вариациями в распределении источников и стоков тепла на земной поверхности и в атмосфере, а также в связи с неустойчивостью зональных потоков, приводящей к образованию волновых возмущений с разной энергетикой и разными пространственно-временными масштабами. Так, около 60% штормов и ураганов над Атлантикой возникают под воздействием восточных волн — длинных волн, которые возникают в восточном потоке между 5 и 15 град. с.ш. и движутся от Африки через Атлантику. Слабые волновые возмущения в приэкваториальном потоке мало меняют характер циркуляции. Но иногда (около 80 раз в год) в определенных районах внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) развиваются сильнейшие вихри — ТЦ, резко, даже катастрофически, меняющие установившийся режим циркуляции и погоду на своем пути в тропиках и за их пределами. В западном потоке внетропических широт развитие и прохождение циклонов (более крупных, но менее интенсивных, чем ТЦ) и антициклонов — явление повседневное и именно оно, в основном, определяет погоду (на территории России, в частности). Активная циклоническая деятельность — образование и перемещение в атмосфере циклонов и антициклонов разных пространственно-временных масштабов — одна из самых характерных черт земной атмосферы и придает ее циркуляции сложный и быстро меняющийся макротурбулентный характер. Циклоническая деятельность осуществляет одну из важнейших климатических функций — полярный перенос тепла и массы (влаги, особенно), связывая циркуляцию Хедли, где Земля получает больше тепла от Солнца, чем теряет, с циркуляцией Феррела. Активную роль в междуширотном переносе влаги (и латентного тепла) играют ТЦ, продвигающиеся в более высокие широты, вплоть до 70–75 град. широты. Так нами показано, что ураган Alberto вырвал из тропической зоны и унес на себе около 30% ее суточного запаса влаги.

К еще более значительным и длительным нарушениям структуры ОЦА приводит ЭН — наибольшее по мощности возмущение климата с периодом повторяемости от 2 до 10 лет. Согласно многочисленным исследованиям непосредственная его причина — появление аномалий температуры поверхности океана вследствие динамического дисбаланса между полем приземного ветра и положением термоклина в океане. В

качестве основного механизма распространения сигнала ЮКЭН во вне-тропические широты рассматриваются крупномасштабные волны Рос-сби, причина возникновения которых — аномалии тепла в тропической атмосфере, а следствие — циклонические и антициклонические анома-лии ОЦА (в западном потоке) над Европой и Северной Америкой. Собы-тия ЭН влияют на погоду умеренных широт — наиболее сильный отклик на ЭН над Россией обнаружен нами в Петербурге, с продвижением на восток отклик заметно ослабевает в Оренбурге, почти не заметен в Ир-кутске и исчезает в Комсомольске на Амуре, что на первый взгляд странно, т.к. город находится вблизи побережья Тихого океана. Все объ-ясняется, если учесть, что важным элементом взаимодействия между восточным и западным потоками являются ТЦ, которые в Атлантике выходят в гораздо более северные широты, чем в Тихом океане, и ока-зывают более сильное воздействие на западный поток следующий далее на восток. Возможно, такое влияние осуществляется и через верхнюю тропосферу, также испытывающую воздействие ТЦ.

Наши исследования показали, что ЭН и его холодная стадия замет-но воздействуют на структуру восточного зонального потока не только над акваторией Тихого, но и Атлантического океана, и могут способ-ствовать развитию неустойчивостей или гасить их. В результате снижа-ется волновая и вихревая активность зонального потока и заметно сни-жается количество ТЦ, которые в период активного циклогенеза выносят большие количества энергии из ВЗК в более высокие широты. Нами вы-работан критерий, позволяющий не только регистрировать наступление ЭН, но и судить о его интенсивности, что важно, учитывая катастрофи-ческие последствия, к которым приводят интенсивные ЭН.

«НЕСТАНДАРТНЫЕ» ТРАЕКТОРИИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ И АНАЛОГИИ С ДВИЖЕНИЕМ ВИХРЕВЫХ ЛАЗЕРНЫХ СОЛИТОНОВ

Астафьева Н.М. (1), Розанов Н.Н. (2), Федоров С.В. (2), Шацев А.Н. (2)

(1) Институт космических исследований РАН,

(2) ФГУП "НПК Гос. оптический институт им. С.И. Вавилова",

Диссипативные солитоны, или автосолитоны, представляют собой структуры поля, локализованные за счет баланса входящих потоков энергии и/или вещества, входящих в область локализации и выходящих или диссипируемых в ней. Такие солитоны известны в различных обла-

стях науки — физики, химии, биологии. В настоящее время, по-видимому, наиболее полно разработаны представления о свойствах оптических диссипативных солитонов. Проводится аналогия между интенсивными природными атмосферными вихрями (тропическими циклонами) и диссипативными солитонами (вихревыми лазерными солитонами) при их столкновении с неоднородностями поля. Диссипативные вихревые солитоны и тропические циклоны — это вихревые структуры полей, сохраняющие локализацию при своем распространении. Важным свойством диссипативных солитонов и тропических циклонов является зависимость их движения от неоднородностей системы — например, неоднородностей поля температуры поверхности океана, а также полей давления, температуры, влажности и других характеристик атмосферы для циклонов. Последовательная неэмпирическая математическая модель тайфуна и его движения чрезвычайно сложна и недостаточно разработана. В то же время для диссипативных систем основные физические механизмы значительно более просты, особенно в оптических системах.

Представлены результаты численного моделирования взаимодействия вихревого лазерного солитона с различными неоднородностями и сравнение их с движением некоторых тропических циклонов по данным микроволнового спутникового мониторинга (ежесуточным глобальным радиотепловым полям Земли из электронной коллекции GLOBAL-Field, <http://www.iki.rssi.ru>). Аналогия этого типа диссипативных солитонов с тропическими циклонами имеет лишь качественный характер, однако представляет интерес для объяснения некоторых свойств тропических циклонов. Например, наблюдаемых и непредсказуемых на первый взгляд резких изменений траекторий циклонов или частое появление циклонов с "нестандартными" траекториями. Известно, как важен прогноз движения и энергетики этих мощных вихрей, приводящих при их выходе на сушу к огромным разрушениям и жертвам, и, в то же время, известно, как часто официальный прогноз не справляется со своими задачами из-за того, что тропический циклон может в короткое время резко изменить направление своего движения. Аналогия вихревых лазерных солитонов с тайфунами поможет понять некоторые физические причины, приводящие к такого рода изменениям их траекторий. Показано, что неоднородности поля, по которому вихрь передвигается, даже не очень значительные, могут заметно изменить траекторию вихря — как вихревого лазерного солитона, так и тропического циклона. Работа частично поддержана грантом РФФИ 07-02000294а.

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ ВОДА-УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГЕОТЕРМАЛЬНОМ РЕЗЕРВУАРЕ

Афанасьев А.А.

Институт механики МГУ, Москва

Совместные фильтрационные течения воды и углекислого газа могут иметь место как в природных процессах, например, сопровождающих вулканические извержения, так и в прикладных задачах, связанных с работой геотермальных электростанций или с захоронением в недрах Земли продуктов горения. В подобных течениях давление и температура могут существенно превосходить их критические значения для воды. К настоящему моменту времени отсутствуют модели, позволяющие в совокупности описывать как свойства бинарной смеси вода-углекислый газ при до- и закритических давлениях и температурах, так и гидродинамику её течений при таких условиях. Таким образом, влияние критической точки на процесс фильтрации флюида остаётся неисследованным.

В настоящей работе для описания свойств бинарной смеси вода-углекислый газ в широком диапазоне термобарических условий, включающем критические условия для смеси, применяется кубическое уравнение состояния вещества. Используемое уравнение обобщает широко известное уравнение Пенга-Робинсона и может применяться для описания свойств не только углеводородов, но и воды и углекислого газа. Коэффициенты уравнения состояния были определены с привлечением методов регрессионного анализа по данным измерений состава смеси при относительно низких температурах. Результаты расчёта свойств смеси хорошо совпадают с экспериментальными данными: например, ошибка в расчёте плотности воды не превышает 10 процентов. Разработаны алгоритмы, позволяющие эффективно определять фазовое равновесие в зависимости от давления, энтальпии и состава смеси.

Результаты моделирования термодинамических свойств бинарной смеси были использованы в исследовании её фильтрационных течений в геотермальной системе Solfatara (Campi Flegrei). В этой системе фильтрационные течения формируются под влиянием магматического очага, расположенного на глубине 9 км. В результате дегазации магмы перегретая закритическая смесь воды и углекислого газа поднимается в поверхностные слои геотермальной системы и там смешивается с метеорной водой, изначально заполнявшей геотермальную систему. В настоящей работе рассмотрена задача однокомпонентной фильтрации воды,

которая происходит под влиянием источника закритической воды, расположенного на глубине 4 км. При помощи источника моделируется приток жидкости в геотермальную систему от магматического очага. Задача рассматривалась в одномерной и трёхмерной постановках. В одномерном решении выявлена немонотонная динамика развития процесса, обусловленная фазовыми переходами и существованием у воды критической точки. Показано, что переход через критическую температуру происходит только в один, изолированный момент времени, после которого начинается интенсивный процесс испарения воды. При этом образуется двухфазная зона фильтрации пароводяной смеси, которая быстро расширяется как вверх, к поверхности Земли, так и вниз. Выявлено, что в трёхмерном решении задачи переход через критическую температуру происходит во все моменты времени после реализации критических условий. При этом над источником закритической жидкости, на оси симметрии задачи реализуется однофазное течение – происходит непрерывный переход от закритической жидкости к пару. Области двухфазного течения и критические условия реализуются на периферийных областях, где горячая жидкость из недр смешивается с холодной водой, изначально заполнявшей пористую среду.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 09-01-92434) и программы «Ведущие научные школы» (грант НШ 1959.2009.1).

HIGH-TEMPERATURE WATER-CARBON DIOXIDE FLOWS IN POROUS MEDIA

Afanasyev A.

Institute of mechanics MSU, Moscow

Coupled water and carbon dioxide flows in porous media can take place both in natural flows like those forced by volcanic eruptions and in man-made processes like underground carbon dioxide storage or geothermal energy recovery. The pressure and temperature in these flows can considerably exceed their values in water critical point. Today there are no adequate mathematical models that can in aggregate describe both water and water-carbon dioxide mixture properties in sub- and supercritical regions and the dynamics of their flows in such conditions. Thereby the influence of critical point on water flows in porous media is not well understood.

In the paper cubic equation of state is used to describe water-carbon dioxide mixture in wide range of conditions including critical conditions for

mixture. The equation generalizes well known Peng-Robinson equation and can be used to describe properties not only of hydrocarbons but also of carbon-dioxide and water. The real mixture properties measurements are used to determine the equation coefficients. Comparison between experimental measurements and data calculated via the equation of state shows a good agreement between the data. For example the error in water density calculation is less than 10 percent. There are worked out effective and fast algorithms for phase equilibrium calculation via pressure, enthalpy and mixture composition – those thermodynamic variables that are most suitable for near critical flows calculation.

The mixture properties simulations are used in research of it flows in porous media with application to flows in Solfatara volcano (Campi Flegrei). The flows in porous media that take place in the system are forced by magmatic chamber located at depth of 9 km. Magma degassing make hot supercritical plume of water-carbon dioxide mixture ascend to shallow layers where the fluid from the chamber mixes with cold meteoric water. In the paper the dynamic of high-temperature water plume is studied that is developed because of high-temperature water source located at depth of 4 km. The source simulates the mixture flux from the magmatic chamber. The problem is studied in one-dimensional and three-dimensional cases. There is discovered that in one-dimensional case there exists a single temporal value when water critical conditions are reached. At this time intense phase transfer process starts and two-phase flow region rapidly develops and expands both in upper and lower directions. In three-dimensional case the water critical temperature and pressure exist permanently after the moment they are reached in the flow. There is discovered that there exist not a single spatial point but a whole line where the critical conditions are reached. There is shown that as the system tends to steady state there is vapor single-phase flow exactly over the source. The two-phase flow zones develop only in peripheral regions where the hot plume interacts with cold meteoric water.

The work is supported by Russian foundation for basic research (N 09-01-92434) and grant for leading scientific schools (1959.2009.1).

СВЕРХЗВУКОВЫЕ СЕПАРАТОРЫ КОМПОНЕНТ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Багиров Л.А.
Центр ЭНГО, Москва

В докладе будет рассказано о новом газодинамическом устройстве - сверхзвуковом сепараторе, который разработан группой российских ученых и инженеров в последние 10 лет и нашел применение в газовой промышленности.

Будут поставлены задачи, решение которых необходимо для повышения эффективности этого устройства и расширению областей его применения.

КИНЕТИКО-ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДОЙ И ВОЗМОЖНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАНИЦЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ КАК ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА.

Баранов В.Б.
Институт проблем механики РАН им. акад. А.Ю. Ишлинского,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
механико-математический факультет.

В докладе приводится математическая постановка задачи, связанной с построением модели взаимодействия сверхзвукового потока солнечного ветра со сверхзвуковым поступательным потоком локальной межзвездной среды. Солнечный ветер и межзвездный газ представляют собой, в основном, потоки полностью и частично ионизированной водородной плазмы, соответственно. И если взаимодействие заряженных компонент можно описать в рамках механики сплошной среды (в рамках уравнений Эйлера), то нейтральные атомы, взаимодействующие с протонами через процессы резонансной перезарядки, имеют длину свободного пробега порядка характерного масштаба явления (размера гелиосферы), т.е. число Кнудсена для них порядка единицы. В этом случае для их описания приходится использовать кинетическое уравнение Больцмана. Таким образом, задача сводится к совместному решению уравнений Эйлера с «источниковыми» членами, описывающими влияние ато-

мов на заряженную компоненту и уравнения Больцмана для функции распределения атомов H (кинетико-газодинамическая модель).

В докладе приводятся основные результаты численного решения задачи, которые предсказали многие физические явления, полученные при помощи космических аппаратов, исследующих внешние области солнечной системы (Voyager 1 и 2, Hubble Space Telescope, Ulysses, IBEX и др.). Так аппараты Voyager 1 и 2 пересекли ударную волну торможения солнечного ветра в 2004 и 2007 г.г., соответственно на расстоянии, предсказанном задолго теоретической моделью с точностью до нескольких процентов. В настоящее время эти аппараты вошли во внутренний ударный слой и движутся к тангенциальному разрыву (гелиопаузе), которая нами определяется как граница солнечной системы. Возможные физические свойства этой границы (влияние перезарядки на скачки параметров, устойчивость течения вблизи критической точки, возможная структура гелиопаузы и пр.) также обсуждаются в представляемом докладе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ НАНОСЕКУНДНОГО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА

Бельшева И.В., Мурсенкова И.В.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва

Одним из основных параметров в приповерхностных турбулентных течениях является масштаб турбулентности, который анализируется в данной работе на основе экспериментальных результатов.

Исследовался пограничный слой в сверхзвуковом потоке воздуха за плоской ударной волной в канале ударной трубы. Создавались потоки с числами Маха 1.1-1.5 (скоростью до 1600 м/с). Длина однородного течения за фронтом ударной волны составляла ~30 см, толщина ламинарного пограничного слоя ~0.5 мм. Пограничный слой становился турбулентным на определенном расстоянии от фронта ударной волны [1].

Течение в пограничном слое визуализировалось свечением поверхностного скользящего разряда наносекундной длительности (плазменного листа). Импульсный скользящий поверхностный разряд длительностью 200 нс представляет собой систему каналов, скользящих по поверхности диэлектрика; толщина плазменного слоя ~0,4 мм. В потоке разряд развивался в поперечном потоку направлении. Вследствие зави-

симости локальной интенсивности излучения плазмы разряда от приведенного электрического поля E/N (E – напряженность электрического поля, N – концентрация) и малой длительности разряда по сравнению с газодинамическими временами распределение интенсивности излучения плазмы разряда соответствует мгновенному распределению плотности газа. Так как характер течения в пограничном слое влияет на геометрию развития разряда, наблюдаются существенные различия в структуре свечения плазмы разряда в различных областях пограничного слоя: в ламинарной области свечение однородно, в турбулентной области становится неоднородным, образуются характерные структуры различных масштабов [1, 2].

Путем обработки изображений свечения разряда в различных областях пограничного слоя получены распределения интенсивностей свечения в пограничном слое в продольном потоке направлении. Методом Фурье-преобразования полученных распределений интенсивности найдены характерные пространственные масштабы и частоты изменения интенсивности свечения для ламинарной и турбулентной областей (рис. 1).

Низкочастотная составляющая изменения интенсивности свечения в турбулентной области явно выражена, в то время как в ламинарной области амплитуды низко- и высокочастотных составляющих близки. Низкочастотные составляющие в турбулентной области определяют крупные пространственные структуры, минимальная частота соответствует продольным структурам ~ 6 мм, что превышает толщину турбулентного пограничного слоя. При удалении от фронта УВ наблюдалось возрастание масштаба турбулентности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-08-90003-Бел_а.

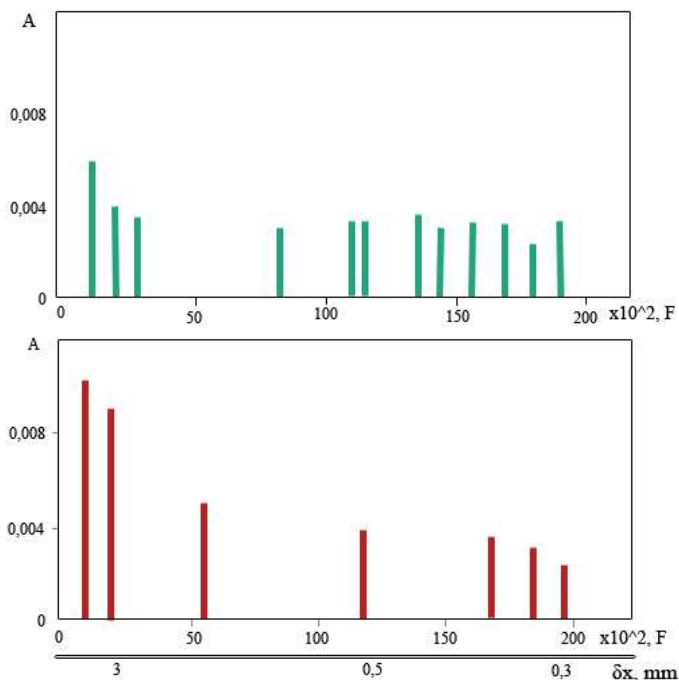


Рис. 1 Амплитудно-частотный состав интенсивности свечения разряда в сверхзвуковом пограничном слое:
а) ламинарная область, б) турбулентная область.

ЛИТЕРАТУРА

1. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В. Ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое при инициировании импульсного поверхностного разряда. // Письма в ЖТФ, 2008. Т. 34. Вып. 15. С. 75-80.
2. Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Мурсенкова И.В. Поверхностный поперечный распределенный наносекундный разряд в сверхзвуковом пограничном слое.// Доклады Академии Наук, 2009. Т. 427. № 1. С. 32-34.

КОНВЕКТИВНЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В РАСПЛАВАХ ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ ПРАНДТЛЯ В МОДЕЛИ МЕТОДА ЧОХРАЛЬСКОГО. РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДУНАРОДНОГО ТЕСТА

Бессонов О.А., Никитин С.А., Полежаев В.И.

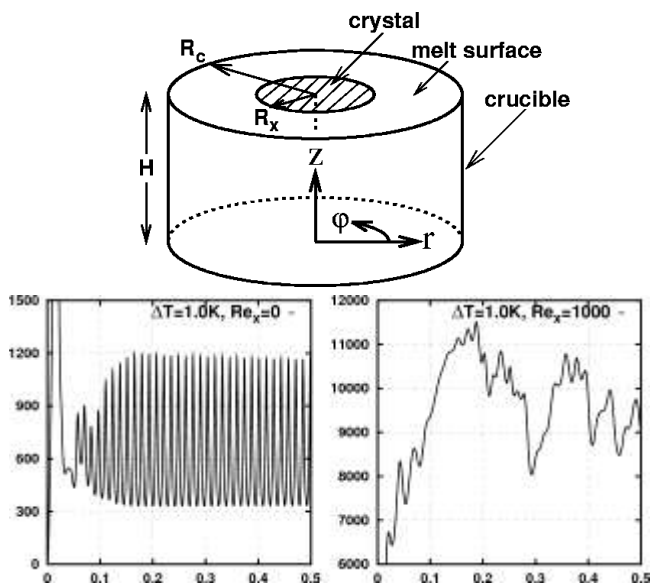
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Колебания температуры расплава, изучаемые на основе гидродинамической модели метода Чохральского и являющиеся главной причиной полосчатой неоднородности кристаллов, наиболее полно рассмотрены при малых числах Прандтля ($Pr=0.05$) в рамках известного теста Вилера (см. [1]). В настоящей работе рассматриваются результаты решения новой тестовой задачи, представленной на Международной конференции «Instabilities and Bifurcations in Fluid Dynamics 2009». В задаче изучаются течения для числа Прандтля $Pr=9.2$ при совокупном воздействии тепловой гравитационной конвекции, термокапиллярной конвекции и вращения кристалла. Моделирование проводится в полости радиуса $R_c=1$, высоты $H=0.92$ и размере кристалла $R_x=0.5$ при заданном профиле температуры на дне тигля [2]. Перепад температур между изотермической боковой стенкой и границей кристалл–расплав определяется как масштабный параметр задачи ΔT . Другим параметром задачи является скорость вращения кристалла Re_z . Вычисления проведены по двум частям теста: раздел 1 (стационарное течение) и раздел 3 (нестационарная модель). Для расчетов использовался нестационарный вычислительный код, основанный на методе конечных объемов, в осесимметричной и (для некоторых тестов) пространственной конфигурациях на подробных сетках.

На приведенном рисунке показана модель метода Чохральского, а также пример эволюции полной кинетической энергии для двух наборов параметров. По результатам моделирования в большинстве режимов было выявлено осциллирующее поведение – как периодическое, так и непериодическое. Основные характеристики течений, рассматриваемые в докладе, включают в себя полную кинетическую энергию, нормы компонент скорости, значения среднего числа Нуссельта на различных границах и периоды колебаний. В диапазоне рассмотренных параметров ($Gr = 1.9 \cdot 10^5 \Delta T$, число Марангони $Mn = 586 \Delta T$, $\Delta T = 0.15 K - 1.0 K$, $Re_x = 0 - 1500$) потеря осевой симметрии не обнаружена ни в одном из трехмерных расчетов. Также не было выявлено явления гистерезиса или бифуркации.

Представленные результаты отличаются от результатов работы [2], где течение является стационарным для многих режимов. Это объясня-

ется свойствами настоящей вычислительной модели, в которой реализована корректная схема интегрирования по времени для нестационарных процессов, в то время как в коде [2] реализуется существенно (и принудительно) стационарная модель вычислений. Для сравнения с результатами [2] проведен расчет режима с параметрами $\Delta T = 1.0$ К, $Re_z = 0$ по методике “false transient” с выходом на псевдостационарное течение. Полученные результаты близки к результатам, представленным в [2] и на упомянутой конференции. Проведенные расчеты и сравнения с результатами других авторов показывают, что разработка цилиндрических кодов требует создания новых тестовых задач – существенно неосесимметричных [3], а также основанных на результатах экспериментов.



В заключение в докладе дается сравнительный анализ конвективных неустойчивостей в модели метода Чохральского при малых и больших числах Прандтля, и обсуждаются особенности управления ими. Данный анализ основан на результатах многолетней работы коллектива (см. обзор [4]).

Работа выполнена при поддержке Ведущей научной школы 2496.2008.8 и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-08-00230).

ЛИТЕРАТУРА.

1. V. Polezhaev, O. Bessonov, N. Nikitin, S. Nikitin. Three-dimensional stability and direct simulation analysis of the thermal convection in low Prandtl melt of Czochralski model. The Twelfth International Conference in Crystal Growth, Jerusalem, Israel, Abstracts, 1998, 178.
2. N. Crnogorac, H. Wilke, K.A. Cliffe, A.Yu. Gelfgat, E. Kit. Numerical modelling of instability and supercritical oscillatory states in Czochralski model system of oxide melts. Cryst. Res. Technol., 2008, 43(6), 606-615.
3. O. Bessonov, V. Brailovskaya, L. Feoktistova, V. Zilberberg. Numerical simulation of 2D and 3D convection in water-soluble crystal growth processes. International Conference "Advanced Problems in Thermal Convection", Perm, Russia, Proceedings. Perm, 2004, 325-330.
4. Никитин Н.В. , Никитин С.А. , Полежаев В.И. . Конвективные неустойчивости в гидродинамической модели роста кристаллов методом Чохральского. Успехи механики, 2003, т.2, №4, с.63-105.

О КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЯХ В МАГНИТНЫХ НАНОСУСПЕНЗИЯХ

Божко А.А.¹, Глухов А.Ф.¹, Путин Г.Ф.¹, Суслов С.А.², Тыньяла Т.³

¹Пермский государственный университет, Пермь

²Суинбергский Технический Университет, Мельбурн, Австралия

³Лапееврантовский Технический Университет, Лапеевранта,
Финляндия

Магнитные наносuspензии (МНС) представляют собой одну из разновидностей наножидкостей – это коллоидные суспензии однодоменных частиц со средним размером 10 нм. В неоднородно намагниченной непроводящей жидкости в магнитном поле возникают объемные силы двоякого рода. Во-первых, движущие магнитные силы, способные при определенных условиях возбудить конвективное движение. Во-вторых, деформации магнитного поля, индуцируемые течением жидкости, могут создавать «тормозящие» силы. Неоднородности намагниченности в МНС могут быть обусловлены неизотермичностью среды и неравномерным распределением магнитных частиц по объему. Соответственно, имеются два основных механизма магнитной конвекции - термический и концентрационный магнитофорез, термофорез). Кроме того, в поле тяжести должны быть учтены еще термогравитационный и концентрационно-гравитационный

механизмы конвекции, причем снова следует принимать во внимание различные причины появления концентрационных неоднородностей – вследствие термодиффузии и гравитационной седиментации частиц.

Показано, что конвекция в МНС носит колебательный характер. Нерегулярные колебательные режимы наблюдались в одно-, двух- и трехмерных движениях, реализуемых в конвективной петле, сферической полости, горизонтальном, наклонном и вертикальном слоя, соответственно. Обнаружены спонтанное затухание и самовозбуждение конвекции, режимы бегущих и стоячих волн, хаотически локализованные состояния. Изучено влияние однородного продольного и поперечного магнитных полей на устойчивость механического равновесия, течений и тепло-массоперенос. Рассмотрено взаимодействие термомагнитных и термогравитационных течений, представлена эволюция конвективных структур.

Знания о закономерностях магнитной конвекции нужны для применения МНС в преобразователях энергии, различных датчиках, в альтернативных системах охлаждения в микроэлектронике и микрогравитации; для управления тепломассопереносом при выращивании кристаллов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 07-08-96039.

CONVECTIVE FLOWS IN MAGNETIC NANO-SUSPENSIONS

A.A. Bozhko.¹, A.F. Glukhov.¹, G.F. Putin.¹, S.A. Suslov.²,
T. Tanjala³

¹Perm State University, Perm, Russia

²Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia

³Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland

Magnetic nano-suspensions (MNS) belong to one of the types of nano-fluids – colloid suspensions of single-domain particles with the average size of 10 nm. Two types of body forces arise in a non-uniformly magnetized non-conducting fluid placed in a magnetic field. First are the driving magnetic forces that can induce convective motion under certain conditions. The second type are the “resistive” forces which arise because of the distortion of a magnetic field due to the fluid motion. The magnetization non-uniformity in MNS can be caused by the temperature variation in the medium and by the non-uniformity of the volumetric distribution of magnetic particles. Therefore

there exist two main mechanisms of magnetic convection: thermal and concentration-driven (magnetophoresis, thermophoresis). In addition, one has to take into account gravitational mechanisms of convection that also have two origins: thermal expansion and variation of concentration of a solid phase due to both the thermal diffusion and gravitational sedimentation of particles.

It has been shown that convection in MNS is of an oscillatory type. Irregular oscillations were observed in one-, two- and three-dimensional flows arising in a convection loop, spherical cavity and horizontal, inclined and vertical layers, respectively. A spontaneous excitation and decay of convection have been observed and regimes of chaotic localized states and of standing and propagating waves have been detected. The influence of longitudinal and transverse magnetic fields on the mechanical equilibrium and flows of fluid and the heat and mass transfer has been investigated. The interaction of thermo-magnetic and thermo-gravitational flows has been considered in order to determine the evolution of convective patterns.

Understanding of the nature of magneto-convection is required for the use of MNS in such applications as energy conversion devices, various sensors, alternative cooling in micro-electronics and micro-gravitation and in crystal growth control.

The work was supported by the grant № 07-08-96039 from the Russian Fund for Basic Research.

АНАЛОГИЯ МЕЖДУ УРАВНЕНИЯМИ МАКСВЕЛЛА И УРАВНЕНИЯМИ ДВИЖЕНИЯ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ СО СВОЙСТВАМИ СВЕРХТЕКУЧЕГО ^3He

Болдырева Л.Б., Сотина Н.Б.

Модель, представленная в статье, базируется на следующих результатах экспериментов, выполненных со сверхтекучим ^3He [1].

1) Во вращающемся сверхтекучем ^3He генерируются квантованные вихревые линии.

2) В стационарном случае вихри не диффундируют.

3) Имеют место спиновые сверхтоки.

4) Вдоль оси вихрей возникают электрические и магнитные диполи.

Первые два свойства могут быть описаны в терминах гидродинамики при условии, что сверхтекучий ^3He имеет вращательную вязкость, проявляющуюся только в нестационарном случае.

Таким образом, в нестационарном случае в завихрённой области, динамика ^3He может быть описана моделью идеальной спиновой жидко-

сти (то есть, жидкостью с внутренними степенями свободы, которая характеризуется как вектором \mathbf{K} спиновой поляризации элемента среды, так и вращательной вязкостью.)

В статье показано, что уравнения Максвелла могут быть интерпретированы в линейном приближении (при больших $\partial v / \partial t$) как уравнения движения спиновой жидкости, если связать скорость движения жидкости \mathbf{v} с напряжённостью магнитного поля \mathbf{H} , а вектор спиновой поляризации элемента среды \mathbf{K} с вектором электрической поляризации \mathbf{E} [2]. Причём, $\text{rot}\mathbf{E}$ интерпретируется не как вихревое движение в электрическом поле, а как циркуляция \mathbf{E} , возникающая в результате электрической поляризации частиц среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Salomaa M.M. & Volovik G.E. Quantized vortices in superfluid ^3He . *Reviews of Modern Physics* **59** (1987) p.533
2. Boldyreva L.B. & Sotina N.B. Superfluid Vacuum with Intrinsic Degrees of Freedom. *Physics Essays* 1992; 5: 510.
3. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М. 2002 г.

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА СУСПЕНЗИИ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАДИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ ВКЛЮЧЕНИЙ

Боронин С.А.

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Исследуется устойчивость течения дисперсной среды между двумя движущимися друг относительно друга пластинами (плоское течение Куэтта) с учетом конечной объемной доли частиц. Для описания движения суспензии используется модифицированная модель взаимопроникающих континуумов. Предполагается, что вязкость эффективной среды, а также межфазная сила зависят от объемной доли частиц. Целью исследования является изучение механизмов неустойчивости течений сплошной среды, появляющихся вследствие стратификации концентрации включений.

Система уравнений в безразмерном виде, описывающая течения дисперсной среды с конечной долей частиц, такова [1-3]:

$$\text{div}((1-C)\mathbf{v} + C\mathbf{v}_s) = 0, \quad (1-C)\frac{d\mathbf{v}}{dt} + \eta C \frac{d_s \mathbf{v}_s}{dt} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} (\nabla_j \tau^{ij} \mathbf{e}_i)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \operatorname{div}(C \mathbf{v}_s) = 0, \quad \frac{d_s \mathbf{v}_s}{dt} = \beta(\mathbf{v} - \mathbf{v}_s) \left(1 + \sqrt{\frac{9C}{2}} \right)$$

Здесь индексом s отмечены параметры, относящиеся к дисперсной фазе, C – объемная доля частиц, индивидуальная производная d_s/dt рассчитывается вдоль траекторий частиц. Выбраны следующие масштабы: U – половина относительной скорости пластин, L – половина расстояния между пластинами, μ_0 , ρ^0 – вязкость и плотность материала несущей фазы. Безразмерные параметры: $\operatorname{Re} = UL\rho^0/\mu_0$ – число Рейнольдса, $\beta = 6\pi\sigma\mu_0 L/(mU)$ – параметр инерционности частиц, $\eta = \rho_s^0/\rho^0$ – отношение плотностей материалов фаз.

Профиль концентрации частиц в основном течении C_0 задан аналитически и соответствует накоплению частиц на срединной плоскости между пластинами (аналогично исследованию устойчивости стратифицированной суспензии в плоском канале [3]). Профиль концентрации задается следующими безразмерными параметрами: C_1 , C_2 – значение концентрации частиц в окрестности пластин, ε – градиент концентрации частиц, y_0 – ширина однородного распределения частиц.

После линеаризации задача исследования устойчивости сведена к нахождению собственных значений краевой задачи для обыкновенного дифференциального уравнения четвертого порядка относительно амплитуды возмущения функции тока. Для поиска собственных значений использовался метод ортогонализации [4].

В исследовании [5] был проведен анализ устойчивости течения Куэтта запыленного газа с неоднородным профилем концентрации включений в виде гауссовского распределения. Было получено, что течение дисперсной среды теряет устойчивость в определенном диапазоне чисел Рейнольдса, начиная с определенного значения максимума массовой концентрации частиц ($\alpha > 0.23$). Постановка задачи, рассмотренная в [5], в рамках настоящего исследования соответствует предельному случаю $C_2 \ll 1$, $C_2\eta \sim 1$ и $y_0 = 0$. Результаты численных расчетов согласуются с данными [5].

Получено, что в случае $y_0 > 0$ появляются нарастающие волны уже при малых значениях числа Рейнольдса. Максимальная скорость нарастания возмущений $\max \omega(k)$ достигается при $\operatorname{Re} \sim 10$. Численные расчеты позволяют сделать вывод о том, что отношение плотностей фаз качественно не влияет на устойчивость течения суспензии. Существенное

влияние на устойчивость течения суспензии оказывает форма профиля концентрации частиц $C_0(y)$.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (№ МК-622.2009.1) и гранта РФФИ (№ 08-01-00195).

ЛИТЕРАТУРА

1. Marble, F.E. Dynamics of dusty gases // *Ann. Rev. Fluid Mech* 1970, v.2, 397 – 446.
2. Боронин С.А. Исследование устойчивости течения суспензии в плоском канале с учетом конечной объемной доли частиц // *Изв. РАН. МЖГ*. 2008. № 6. С. 40–53.
3. Боронин С.А. Гидродинамическая устойчивость стратифицированного течения суспензии в плоском канале // *Доклады Академии Наук*, 2009, Т. 429, № 4, С. 477–480.
4. Годунов С.К. О численном решении краевых задач для систем линейных дифференциальных уравнений // *Успехи мат. наук*. 1961. Т. 16. Вып. 3. С. 171 – 174.
5. Рудяк В.Я., Исаков Е.Б., Борд Е.Г. Неустойчивость плоского течения Куэтта двухфазных жидкостей // *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 24. № 5. С. 76 – 80.

STABILITY OF SUSPENSION COUTTE FLOW UNDER THE PRESENCE OF PARTICLE CONCENTRATION GRADIENTS

Boronin S.A.

Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow

We consider the stability of the dispersed flow between two plates moving relative to each other (plane Couette flow) taking into account the finite volume fraction of particles. The suspension flow is described within the framework of a modified two-fluid model. It is assumed that the suspension effective viscosity as well as the interphase force depend on the particle volume fraction. The study is aimed at analyzing instability mechanism of particle-laden flows which arise due to a stratification of the concentration of inclusions.

The system of governing equations for the suspension flow in the non-dimensional form is as follows [1-3]:

$$\operatorname{div}((1-C)\mathbf{v} + C\mathbf{v}_s) = 0, \quad (1-C)\frac{d\mathbf{v}}{dt} + \eta C \frac{d_s \mathbf{v}_s}{dt} = -\nabla p + \frac{1}{\operatorname{Re}} (\nabla_j \tau^{ij} \mathbf{e}_i)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \operatorname{div}(C\mathbf{v}_s) = 0, \quad \frac{d_s \mathbf{v}_s}{dt} = \beta(\mathbf{v} - \mathbf{v}_s) \left(1 + \sqrt{\frac{9C}{2}} \right)$$

Here, parameters of particulate phase are denoted by index s ; C is the volume fraction of particles; individual derivative d_s/dt is calculated along the particle trajectories. The scales of the flow are as follows: U is the half of the relative velocity of plates; L is the half of the height between the plates; μ_0, ρ^0 are viscosity and density of the carrier phase. Non-dimensional parameters include: $\operatorname{Re} = UL\rho^0/\mu_0$ is the Reynolds number, $\beta = 6\pi\alpha\mu_0 L/(mU)$ is the particle inertia parameter (inversed Stokes number), $\eta = \rho_s^0/\rho^0$ is the particle-to-fluid substance density ratio.

Main-flow particle concentration profile C_0 is specified analytically and corresponds to the particle accumulation in the vicinity of middle-plane of the flow (the same as in the study of a stratified suspension flow in the plane channel [3]). The particle concentration profile is specified by the following non-dimensional parameter: C_1, C_2 are particle volume fractions in the vicinity of plates and in the vicinity of the flow middle-plane respectively, ε is the particle concentration gradient, y_0 is the width of the zone of uniform particle distribution.

After the linearization, the problem of linear stability is reduced to the eigenvalue problem for the fourth-order ordinary differential equation in terms of the magnitude of the stream-function perturbation. The eigenvalues are calculated by means of the orthohonalization method [4].

In the study [5], the stability of plane Couette flow of the dusty gas with the non-uniform particle concentration profile was analyzed. It was shown that the dispersed flow is unstable in the range of Reynolds number values if the magnitude of the particle mass concentration exceeds some threshold value ($\alpha > 0.23$). The problem formulation presented in [5], in the framework of the present study corresponds to the limiting case $C_2 \ll 1$, $C_2 \eta \sim 1$ and $y_0 = 0$. The results of the calculations is in agreement with the study [5].

It is found that in the case of $y_0 > 0$ the growing waves exist even at low Reynolds numbers. Maximal increment of the wave growth $\max \omega(k)$ is reached at $\operatorname{Re} \sim 10$. Numerical calculations show that both particle-to-fluid density ratio and particle inertia parameter do not affect the stability of the suspension flow significantly. Major effect on the stability is produced by the variation of shape of the particle concentration profile $C_0(y)$.

The work is supported by the grant of the President of Russian Federation for the support of young Russian researchers with Ph.D. degree (№ МК-622.2009.1) and RFBR grant (№ 08-01-00195).

REFERENCES

1. Marble, F.E. Dynamics of dusty gases // Ann. Rev. Fluid Mech 1970. V.2. P. 397 – 446.
2. Boronin S.A. Investigation of the stability of a plane-channel suspension flow with account for finite particle volume fraction // Fluid Dynamics. 2008. V. 43. № 6. pp. 873–884.
3. Boronin S.A. Hydrodynamic stability of stratified suspension flow in a plane channel // Doklady Physics. 2009. V. 54. № 12. P. 477-480.
4. Godunov S.K. On the numerical solution of the boundary-value problem for the solution of the system of linear differential equations // Uspekhi Mat. Nauk [in Russian]. 1961. V. 16. Iss. 3. P. 171 – 174.
5. Rudyak V.Ya., Isakov E.B., Bord E.G. Instability of the plane Couette flow of two-phase fluids // Letters to ZhTF [in Russian]. 1998. V. 24. № 5. P. 76 – 80.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Бунтин Д.А., Маслов А.А.

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

Представлены результаты изучения нелинейных процессов в пограничном слое острого конуса со сплошной и пористой стенками на слабонелинейной стадии ламинарно-турбулентного перехода.

Эксперименты проводились в гиперзвуковой аэродинамической трубе Т-326 ИТПМ СО РАН. Число Маха набегающего потока составляло $M = 6$, единичное число Рейнольдса равнялось $Re_{1\infty} = 11.9 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Пульсации массового расхода измерялись термоанемометром постоянного тока. Модель представляла собой остроконечный стальной конус длиной 500 мм и углом полураствора 7°. Модель устанавливалась под нулевым углом атаки. Одна половина конуса была покрыта пористым материалом, другая была сплошной. Исследовалось два типа пористого покрытия: а) регулярная пористость представляла собой металлический лист, перфорированный равноотстоящими друг от друга глухими цилиндрическими отверстиями с диаметром отверстий - 50 мкм и расстоянием

между ними – около 100 мкм; б) хаотичная пористость представляла собой металлический фетр из спеченных проволочек диаметром 30 мкм.

Для выявления нелинейных взаимодействий и определения их характеристик в работе использовались спектры бикогерентности и статистический анализ. Амплитуда бикогерентности обозначает квадратичную степень связанности по фазе волн с частотами f_1 , f_2 и $f_3 = f_1 + f_2$. Амплитуда бикогерентности может принимать значения от 0 (что соответствует независимым волнами) до 1 (что соответствует полностью связанными волнами). Статистический анализ позволяет выявить присутствие нелинейных процессов по величине отклонения функции распределения пульсаций сигнала от Гауссова распределения.

В работе детально изучены характеристики нелинейных взаимодействий в пограничном слое на сплошной стенке. Показано, что все основные виды нелинейных процессов в слое максимальных пульсаций связаны со второй модой возмущений. Получено, что самым интенсивным нелинейным взаимодействием в области максимальных пульсаций является субгармонический резонанс с расстройкой. Обнаружены нелинейные процессы, приводящие к возбуждению первой гармоники второй моды [1].

Нелинейные процессы у верхней границы пограничного слоя в области низких частот (до 50 кГц) возникают задолго до их появления в слое максимальных пульсаций. Нелинейные взаимодействия в области низких частот развиваются также ниже критического слоя. Причем нелинейные процессы в областях выше и ниже критического слоя интенсивно протекают даже тогда, когда в слое максимальных пульсаций нелинейные взаимодействия (квадратичного типа) уже практически исчезли. На поздних стадиях перехода нелинейные процессы выходят за пограничный слой, что свидетельствует о начале формирования турбулентного пограничного слоя [1].

Изучено влияние пористого покрытия на нелинейные процессы в пограничном слое. Нелинейное взаимодействие волн в случае сплошной поверхности проявляется ближе к носику модели, чем для случая пористого покрытия. Нелинейные взаимодействия в слое максимальных пульсаций сильно ослаблены на пористой поверхности, что связано с подавлением возмущений второй моды. В частности, субгармонический резонанс существенно подавляется пористым покрытием (Рис. 1) [2,3].

В области сильных взаимодействий происходит заполнение спектров бикогерентности в диапазоне вплоть до частоты второй моды как для пористой, так и для сплошной поверхностей. Нелинейные процессы на пористой поверхности отстают в своем развитии от процессов на

сплошной поверхности. Такое поведение может указывать на то, что субгармонический резонанс, вызванный возмущениями второй моды, является катализатором при передаче энергии от среднего течения к низкочастотным возмущениям в процессе перехода, аналогично тому, как это происходит в дозвуковом пограничном слое.

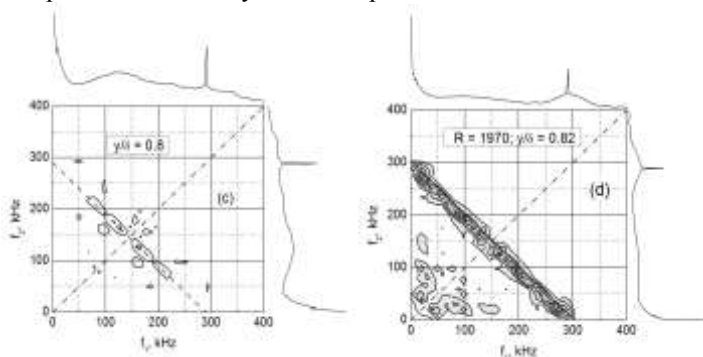


Рис. 1. Спектры бекогерентности для пористой (с) и сплошной поверхностей (d). Ненулевые амплитуды вдоль линии $f_1 + f_2 = 300$ кГц показывают интенсивность субгармонического резонанса

ЛИТЕРАТУРА

1. Bountin, D., Shplyuk, A. & Maslov, A. Evolution of nonlinear processes in a hypersonic boundary layer on a sharp cone. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008 v. 611, p. 427-442.
2. А.Н. Шиплюк, Д.А. Бунтин, А.А. Маслов, Н. Чокани «Нелинейные механизмы начальной стадии ламинарно-турбулентного перехода при гиперзвуковых скоростях»/ ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 64-71.
3. Ndaona Chokani; Dimitry A. Bountin; Alexander N. Shplyuk; Anatoly A. Maslov Nonlinear Aspects of Hypersonic Boundary-Layer Stability on a Porous Surface// *AIAA J.* 2005. vol. 43. No.1. P. 149-155.

NONLINEAR PROCESSES IN HYPERSONIC BOUNDARY LAYER AT TRANSITION TO TURBULENCE

Bountin D., Maslov A.A.

Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics Novosibirsk

Investigation of nonlinear processes in a sharp cone boundary layer over solid and porous wall is presented for the weak nonlinear stage of transition to turbulence.

The experiments are performed in the T-326 hypersonic blowdown wind tunnel of the ITAM SB RAS at a free-stream Mach number $M_\infty = 6$ and free-stream Reynolds number $Re_{l_\infty} = 12 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$. The fluctuations of the mass flux are measured by a constant-current hot-wire anemometer. The model is a 7 degree half angle steel cone 0.5 m long, sharp nosed. The model is mounted at zero incidence with an accuracy of 0.1° . One longitudinal half of the back part is a solid (roughness is approximately $5\mu\text{m}$) surface. The other longitudinal half is porous. Two types of porous surface were used: a) regular porosity, which is a perforated sheet, which constitutes the porous surface; the diameter of the holes in the sheet is $50\mu\text{m}$ and the spacing between holes is $100\mu\text{m}$; the open area (porosity) is 0.2; b) random porosity, which is a felt-metal coating, which is composed of stainless steel fibres of diameter $d = 30 \mu\text{m}$; the porosity is 0.75.

To reveal nonlinear interactions and their details the bicoherence spectra and statistical analysis are used. The nonlinear phase locking between the three unstable modes can then be detected by measuring the bicoherence spectrum. The bicoherence is bounded by values of zero (no phase locking) and one (absolute phase locking). Statistical analysis allows to detect nonlinear interactions by measuring a deviation of distribution function from normal distribution.

The nonlinear interactions in boundary layer over solid wall have been investigated in detail. It has been found that the all main type of nonlinear interactions in the layer of the maximum rms voltage fluctuation involves second-mode disturbances. The most intensive interaction is found to be the subharmonic resonance with detuning. A nonlinear interaction leading to excitation of the second-mode harmonic is shown [1].

Nonlinear processes at the boundary-layer edge in the range of low frequencies (up to 50 kHz) arise far before they appear in the layer of the maximum rms voltage fluctuation. Nonlinear processes in the regions above and below the maximum rms layer are fairly intense even when nonlinear interactions (of the quadratic type) have almost disappear from the layer of the maximum rms voltage fluctuation. At the late stages of the transition, the nonlinear processes reach beyond the boundary layer, forming a turbulent boundary layer [1].

Influence of porous coating on nonlinear interactions has been studied. Nonlinear interactions on the porous wall appear more downstream than for the solid wall. Nonlinear processes in the layer of the maximum rms fluctuation are damped, in particular subharmonic resonance is damped (Fig. 1) [2,3]. Nonlinear interactions are more intense out of maximum rms fluctuation

layer (lower and over of the layer). Nonlinear processes are delayed on porous surface, but porosity does not change basic mechanisms of the nonlinearity. Such behavior can mean that subharmonic resonance plays catalytic role in energy transfer from the mean flow to the low frequency disturbances, as it happened in subsonic case.

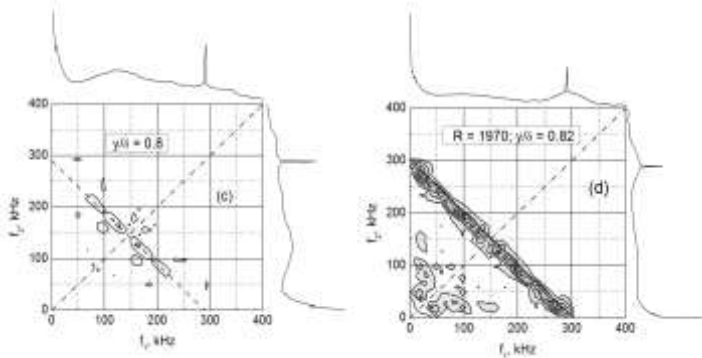


Fig.1. Bicoherence spectra for porous (c) and solid wall (d). Nonzero amplitudes along the line $f_1 + f_2 = 300$ kHz show intensity of the subharmonic resonance.

1. Bountin, D., Shiplyuk, A. & Maslov, A. Evolution of nonlinear processes in a hypersonic boundary layer on a sharp cone. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008 v. 611, p. 427-442.

2. А.Н. Шиплюк, Д.А. Бунтин, А.А. Маслов, Н. Чокани «Нелинейные механизмы начальной стадии ламинарно-турбулентного перехода при гиперзвуковых скоростях»/ ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 64-71.

3. Ndaona Chokani; Dmitry A. Bountin; Alexander N. Shiplyuk; Anatoly A. Maslov Nonlinear Aspects of Hypersonic Boundary-Layer Stability on a Porous Surface// *AIAA J.* 2005. vol. 43. No.1. P. 149-155.

БИСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВОЗМУЩЕНИЙ В ГИПЕРЗВУКОВОМ УДАРНОМ СЛОЕ НА ПЛАСТИНЕ

Бунтин Д.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С.
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирский государственный университет

Представлены результаты комплексного расчетно-экспериментального исследования нелинейных волновых процессов в гиперзвуковом

ударном слое на пластине под воздействием возмущений, вводимых в ударный слой с поверхности модели.

Расчетное исследование выполнено с использованием пакета программ, созданного в ИТПМ СО РАН, на основе решения полных двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса с использованием схем сквозного счета высокого порядка точности. Возмущения типа периодического вдува-отсоса, генерируемые на поверхности тела вблизи передней кромки, моделировались заданием граничного условия для поперечного массового расхода на некотором участке поверхности пластины. Изучалось поведение пульсаций плотности и пульсаций давления в ударном слое на пластине с изменением угла атаки. Проведены параметрические исследования, включающие вариации интенсивности и положения источника возмущений. На рисунках приведены значения амплитуд пульсаций плотности для основной частоты и первой гармоники в зависимости от амплитуды начального возмущения. Видно, что нелинейность на основной частоте не проявляется (рис.1), тем не менее наблюдается быстрый рост первой гармоники (рис.2).

Эксперименты были выполнены в гиперзвуковой азотной аэродинамической трубе Т-327А ИТПМ СО РАН при числе Маха $M_\infty = 21$, фиксированном единичном числе Рейнольдса $Re_{l_\infty} = 6 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ и температуре торможения $T_0 = 1200\text{К}$. Для введения возмущений в ударный слой на пластине использовался цилиндрический кососрезный газодинамический свисток. Величина средней плотности и пульсаций плотности измерялись методом электронно-пучковой флюоресценции. Обнаружено возникновение высших гармоник в спектре пульсаций плотности, а также их интенсивный рост с возрастанием угла атаки пластины. Получено хорошее согласие с данными прямого численного моделирования.

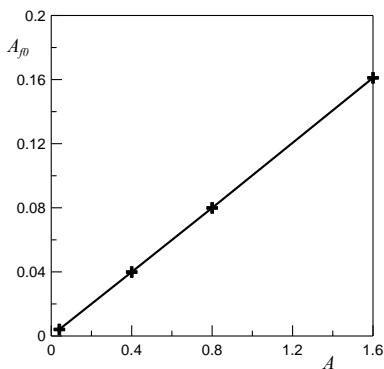


Рис. 1

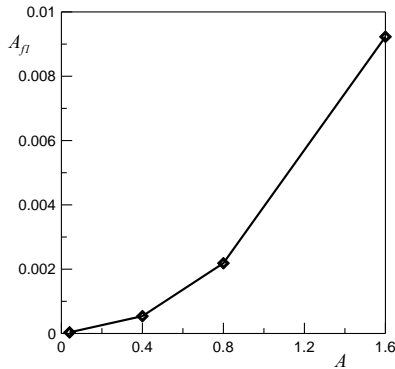


Рис.2.

Для выявления эффектов нелинейности экспериментальные данные и данные прямого численного моделирования анализировались при помощи спектров бикогерентности. Метод бикогерентности позволяет не только выявить нелинейные процессы, но определить некоторые характеристики нелинейных взаимодействий: амплитуду взаимодействий и частоты волн, участвующих во взаимодействиях. Метод бикогерентности впервые был применен для анализа расчетных данных. Для применения к данным расчета метод был несколько усовершенствован.

По спектрам бикогерентности определено, что гармоника вводимых возмущений, как для эксперимента, так и для расчетных данных, растет благодаря нелинейному взаимодействию. Выявлены другие нелинейные взаимодействия, не видимые в явной форме на спектрах пульсаций. В частности, при помощи метода бикогерентности обнаружена генерация второй гармоники вводимых возмущений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №09-08-00679), АЦВП (проекта №2.1.1/3963) и программы фундаментальных исследований Президиума РАН №11 (проект №9).

BISPECTRAL ANALYSIS OF NONLINEAR INTERACTION OF DISTURBANCES IN THE HYPERSONIC SHOCK LAYER OVER THE PLATE

Bountin D., Mironov S.G., Poplavskaya T.V., Ciryulnikov I.S.
Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics Novosibirsk

Results of the complex experimental-calculation research of nonlinear wave processes are presented for hypersonic shock layer on a flat plate with introduction of the artificial disturbances entered into a shock layer from a surface.

Calculations are based on the code created in ITAM SB RAS in a frame of the solution of full two-dimensional non-stationary Navie-Stocks equations using shock-capturing method of high order accuracy. Disturbances of periodic blowing-suction type were generated over a model surface near to a leading edge and were modeled by a boundary condition for the cross-section mass flow on some area of a surface of the plate. The behavior of density and pressure pulsations in the shock layer over the plate with change of an angle of attack is studied.

The parametrical researches including variations of intensity and position of the source of disturbances are carried out. Values of pulsation amplitudes of density for the basic frequency and the first harmonic depending on amplitude of initial disturbances are shown in figures. It is seen, that nonlinearity on the basic frequency does not exist (fig. 1), but at the same time fast growth of the first harmonic is observed (fig. 2).

Experiments were carried out in hypersonic nitrogen wind tunnel T-327A of ITAM SB RAS at a free stream Mach number 21, fixed unit Reynolds number $6 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$ and total temperature 1200 K. To inject disturbances in the shock layer of the model cylindrical oblique-cut gas-dynamic whistle is used. Value of mean density and pulsation of density are measured by means of method of electron-beam fluorescence. High harmonics presence in a spectrum of density pulsation is detected and fast growth of the harmonics under model angle of attack increase is detected as well. Good agreement with calculation results is obtained.

To reveal nonlinear phenomena, experimental and DNS calculation data have been analyzed by bicoherence method. This method allows not only to reveal nonlinear processes, but also to determine some characteristics of nonlinear interaction: interaction amplitude and frequencies of waves participat-

ing in interaction. For the first time bicoherence method has been applied for calculation data. For the correct application this method has been improved.

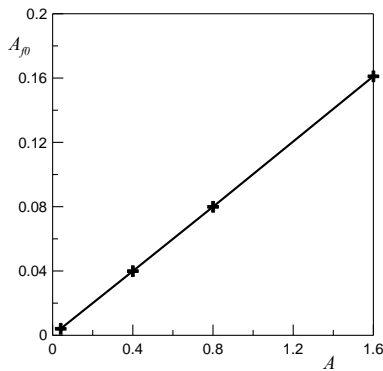


Рис. 1

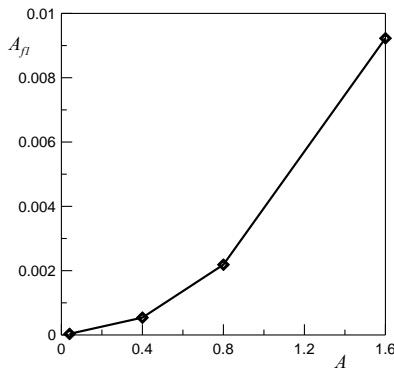


Рис.2.

Using bicoherence spectra it is shown that harmonic of injected disturbances in the experiment and calculation grows up due to nonlinear interaction. Nonlinear interactions not visible in explicit form in pulsation spectra are revealed. In particular, appearance of the second harmonic of injected disturbances is obtained with the help of bicoherence method.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant 09-08-00679), ADTP (project No.2.1.1/3963) and Program of basic research of Presidium RAS (project No. 9).

АНАЛИЗ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ ЗЕМЛИ

Быков Ф.Л., Гордин В. А
Гидрометцентр РФ, Высшая школа экономики

Проблема определения местоположения атмосферных фронтов по данным измерений или по прогностическим полям, заданным в регулярной 3D сетке, одна из важнейших в прогнозе погоды – прохождение атмосферного фронта обычно связано с резким изменением погоды (температуры, силы и направления ветра, осадков). Атмосферный фронт с точки зрения идеальной газовой динамики – контактный разрыв. Поскольку динамика атмосферы неидеальна, реальный фронт – зона с толщиной от десятков километров до сотен метров и протяженностью в тысячи километров. Эта зона имеет наклон (угол порядка 1° с поверхностью Земли) и нелинейную геометрию. Определение этой геометрии по данным на дискретной сетке (например, широтно-долготной $1^\circ \times 1^\circ$) представляет собой сложную вычислительную задачу, решенную последовательным использованием разнообразных математических методов.

1. Предиктор атмосферного фронта. Атмосферный фронт - гребень в поле предиктора.
2. Атмосферный фронт в поле давления на уровне моря и геопотенциала. Лапласиан и матрица Гессе. Ее собственные значения.
3. Сравнение диагностики по лапласиану и собственному значению.
4. Атмосферный фронт в поле ветра. Вертикальная компонента ротора ветра и собственные значения симметрической части матрицы Якоби.
5. Атмосферный фронт в поле температуры. Градиент температуры.
6. Невозможность оптимальной диагностики по одному полю.
7. Методы вычисления производных: двумерное преобразование Фурье на сфере и компактные схемы 4-го порядка точности на плоскости.
8. Метод построения фронтальных зон по полю предиктора. Определение условия: разделены ли две точки фронтальной зоной.
9. Двумерные (зависящие от барического уровня и расстояния) корреляционные функции (КФ) для основных метеорологических полей. Возможные варианты нормировки.
10. Вычисление КФ для точек, разделенных фронтом и не разделенных фронтальными зонами по архиву наблюдений и объективного анализа. Интегральная оценка разницы между ними.

11. Оптимизация предиктора фронта, зависящего определенным образом от предикторов из пп. 2, 4, 5, таким образом, чтобы разница между КФ была наибольшей.

12. Результаты вычисления КФ для точек, разделенных и не разделенных "оптимальными" фронтальными зонами. Пример КФ.

13. Зависимость коэффициентов оптимального предиктора от уровня и месяца.

ГИДРОДИНАМИКА ПЛЕНОЧНОГО КИПЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ГОРЯЧЕГО ЗАТУПЛЕННОГО ТЕЛА, ДВИЖУЩЕГОСЯ В ЖИДКОСТИ

Варгафтик Г.М.
НИИ механики МГУ

Исследуется динамика паровой прослойки, формирующейся при натекании несжимаемой вязкой жидкости на горячую твердую стенку, расположенную перпендикулярно потоку и нагретую до температуры, превышающей температуру кипения [1]. Предполагается, что имеет место пленочный режим кипения, причем толщина парового слоя сравнима с толщиной пограничного слоя в жидкости [2]. В двумерной постановке, в приближении пограничного слоя в работе сформулированы уравнения динамики жидкой и паровой фаз, записаны законы сохранения массы, импульса и энергии на поверхности паровой прослойки [3,4,5].

Рассматривается малая окрестность точки торможения на обтекаемой поверхности, в которой толщину паровой пленки можно считать независимой от продольной координаты. В результате разложения решения уравнений комбинированного нестационарного пограничного слоя с внутренней поверхностью раздела фаз [6] в ряд по продольной координате, для главных членов разложения получена система уравнений в частных производных параболического типа [7]. Для системы поставлена краевая задача 10го порядка, часть граничных условий которой заданы на неизвестной заранее межфазной границе. Указанная задача решается численно, конечно-разностным методом на прямолинейной сетке. Анализ параметров подобия позволяет рассматривать упрощенные постановки, в которых можно пренебречь отношением вязкостей и теплопроводностей пара и жидкости, а также полную постановку задачи. Во всех вариантах постановки основным параметром подобия и единственным варьируемым в широких пределах, является безразмерный пара-

метр, в который входит отношение скрытой теплоты парообразования к перепаду температур внешнего потока жидкости и стенки.

На основании параметрических численных расчетов в работе исследованы области изменения указанного параметра и начальной безразмерной толщины пленки пара, для которых существует стационарная асимптотика течения при больших временах. Найдены также области параметров, для которых не существует устойчивого стационарного режима пленочного кипения. Приведены примеры предельных стационарных распределений скоростей и температур в паре и жидкости, а также примеры нестационарного поведения толщины паровой прослойки.

Представленная работа содержит новые результаты исследования пленочного кипения, важные для моделирования явления «парового взрыва» [8].

ЛИТЕРАТУРА:

1. *S. Nikiyama* The maximum and minimum values of the heat transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure. // *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.9, 1966, pp. 1419-1433.
2. *Несис Е.И.* Кипение жидкостей. // М.: Наука, 1973г.
3. *Kobayashi K.* Film boiling heat transfer around a sphere in forced-convection. // *J. Nucl. Science and Techn.*, vol.2, №2, 1965.
4. *Takehiro Ito, Kaneyasu Nishikawa.* Two-phase boundary-layer treatment of forced-convection film boiling. // *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.9, 1966.
5. *Epstein M., Hauser G.M.* Subcooled forced-convection film boiling in the forward stagnation region of a sphere or cylinder. // *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.23, 1980.
6. *Черный Г. Г.* Ламинарные движения газа и жидкости в пограничном слое с поверхностью разрыва. // *Изв. АН СССР, ОТН*, № 12, 1954г.
7. *M. Van Dyke* Perturbation Methods In Fluid Mechanics // Stanford, The Parabolic Press, 1975.
8. *Y.Mariyama et al.* Unit Sphere Concept for Triggering of Large-scale Vapor Explosions // *Nuc. Sci. Technol.*, 39[8], p. 854-864

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА В СЛУЧАЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЕЁ СОБСТВЕННЫХ МОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА

Веденеев В. В.

МГУ им. М. В. Ломоносова, механико-математический факультет,
Москва

В работе [1] была рассмотрена задача об устойчивости (флаттере) прямоугольной пластины в сверхзвуковом потоке газа. Для решения использовался метод [2]: исследовалось распространение возмущений в виде «участков» плоских волн вдоль соответствующих им замкнутых траекторий движения. Если на всех траекториях усиление возмущений одинаково, то такой подход позволяет решить задачу до конца: найти собственные частоты колебаний пластины в потоке и получить критерий устойчивости. Если же на разных траекториях усиление (или затухание) различно, то помимо распространения возмущений вдоль траекторий, происходит «расплывание» возмущений в направлениях, перпендикулярных им. В настоящей работе рассматривается этот случай.

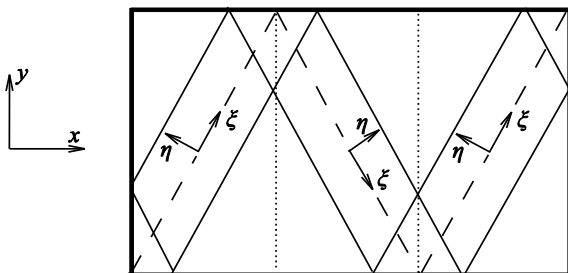


Рис. 1

Введём систему координат (ξ, η) , в которой ось ξ направлена вдоль траекторий (рис. 1). Собственные функции ищутся в виде

$$w(\xi, \eta, t) = \sin(k_0 \xi + \varphi) A(\eta) e^{-i\omega t},$$

где w — прогиб пластины. Подставляя это выражение в уравнение движения, после ряда преобразований получаем уравнение на функцию $A(\eta)$, сводящееся к уравнению Эйри. В работе в явном виде найдены собственные функции $A(\eta)$, затухающие при $|\eta| \rightarrow \infty$, и собственные частоты. Получено условие устойчивости.

Особенностью решения является то, что одной собственной моде пластины в вакууме (рис. 2, а) соответствует счётное число собственных мод в потоке, которые кардинально отличны как от мод в вакууме, так и от мод в потоке, рассмотренных в [1] — они сконцентрированы в окрестности одной из траекторий, соединяющей противоположные углы пластины (рис. 2, б).

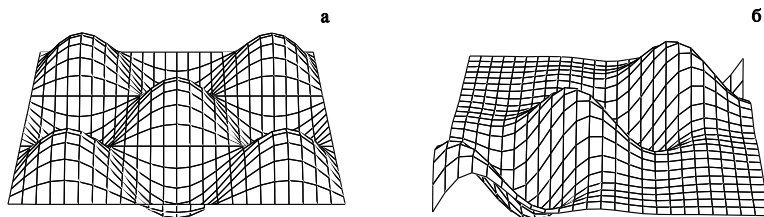


Рис. 2

Работа поддержана грантами РФФИ 08-01-00618 и МК-2313.2009.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веденеев В.В. Высокочастотный флаттер прямоугольной пластины// Известия РАН. МЖГ. 2006. № 4. С. 173-181.
2. Куликовский А.Г. О глобальной неустойчивости однородных течений в неоднородных областях// Известия РАН. ПММ. 2006. Т. 70. Вып. 2. С. 257-263.

МАГНИТОЖИДКОСТНАЯ ПЕРЕМЫЧКА МЕЖДУ ЦИЛИНДРАМИ В ПОЛЕ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ

Виноградова А.С., Налетова В.А., Турков В.А

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Механико-математический факультет, НИИ механики МГУ, Москва

Изучено поведение магнитной жидкости, перекрывающей зазор между двумя коаксиальными цилиндрами кругового сечения, на оси которых находится линейный проводник с током. Учитывалась произвольность углов смачивания жидкостью стенок цилиндров. Показано, что существует критическое значение тока (или параметра Ланжевена), при превышении которого не существует жидкой перемычки между цилиндрами. Оказалось, что критическое значение тока больше в случае не-

смачивания жидкостью стенок цилиндров. Показано, что условия разрушения перемычки при токах меньших критического значения имеют качественно разный вид в случаях смачивания и несмачивания стенок цилиндров жидкостью. В случае несмачивания перемычка может распасться только при увеличении тока в проводнике, а в случае смачивания распад может происходить как при увеличении, так и при уменьшении тока. При распаде перемычки возникает капля магнитной жидкости на линейном проводнике с током. Вычислены зависимости объема капли от толщины капли при постоянном токе. Обнаружено, что существуют три критических значения параметра Ланжевена, при которых вид этих зависимостей качественно меняется. Показано, что при параметрах Ланжевена, которые превышают меньшее из критических значений, могут наблюдаться и скачкообразные, и гистерезисные изменения толщины капли при изменении тока. При уменьшении тока толщина капли на проводнике, возникшей при разрушении перемычки, увеличивается, и восстановление перемычки может происходить при токе меньшем, чем ток, при котором перемычка разрушилась, или перемычка может и не восстановиться при уменьшении тока до нуля. Возможность гистерезисного поведения формы жидкости надо учитывать при конструировании различных устройств с управляемыми объемами магнитных жидкостей, в которых периодически меняется магнитное поле.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-01-90001 и ИИХ-3323.2010.1.

A MAGNETIC FLUID BRIDGE BETWEEN CYLINDERS IN THE MAGNETIC FIELD OF A LINE CONDUCTOR

Vinogradova A.S., Naletova V.A., Turkov V.A.
Lomonosov Moscow State University, Department of Mechanics and
Mathematics, Institute of Mechanics MSU, Moscow

The behavior of a magnetic fluid situated between two concentric cylinders with circular cross section (there is a line conductor in the bulk of the inner cylinder) is investigated. The arbitrariness of wetting angles θ ($0 < \theta < \pi$) is considered. It is shown that a critical value of the current (or the Langevin's parameter) exists and for currents greater than this critical one there is no bridge between cylinders. It was found that a critical value of the current is greater in the case non-wetting ($\pi/2 < \theta$). It is shown that conditions of the bridge break-up for currents lesser than a critical value have the mainly different appearance in cases of wetting ($0 < \theta < \pi/2$) and non-wetting. In the case of

non-wetting the bridge can break up only for the increase of a current in the conductor, and in the case of wetting the break-up can occur in both the increase and the decrease of a current. A drop of a magnetic fluid appears on the line conductor after the bridge break-up. The dependences of the volume of the drop on the drop thickness are calculated for the constant current. It was shown that three critical values of the Langevin's parameter exist, for which the appearance of these dependences changes greatly. It is shown that for the Langevin's parameters greater than the least value of the critical ones both discontinuous and hysteresis changes of the drop thickness can be observed for the change of a current. For the decrease of a current the thickness of the drop on the conductor, which has appeared after the bridge break-up, increases and the bridge rebuilding can occur for the current lesser than the current of the bridge break-up, or the bridge can not rebuild even for the decrease of a current to zero. The possibility of hysteresis behavior of a fluid shape should be considered for the design of different devices with controlled volumes of a magnetic fluid, in which a magnetic field is periodically changed.

This study is supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 10-01-90001) and the State support of leading scientific schools (project 3323.2010.1).

ФОРМА ОБЪЕМА ТЯЖЕЛОЙ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ПОЛЕ КАТУШКИ С ТОКОМ

Волкова Т.И., Налетова В.А., Турков В.А.

Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова, Механико-математический факультет,
НИИ механики МГУ, Москва

В [1] была вычислена зависимость максимального расстояния между горизонтальными пластинами, при котором разрушается магнитожидкостная перемычка между ними (плоский случай), от тока в линейном проводнике на верхней пластине. Эта зависимость качественно совпала с экспериментально измеренной в работе [2], в которой исследовалось неплоское магнитное поле. В данной работе исследована статическая форма конечного объема тяжелой магнитной жидкости между двумя горизонтальными пластинами в осесимметричном магнитном поле катушки с током, находящейся на верхней пластине. Сбоку жидкость ограничена цилиндрической поверхностью, ось которой совпадает с осью катушки. Рассчитано максимальное расстояние между пластинами, при котором существует жидкостная перемычка между ними, как функ-

ция тока в катушке. Кривая немонотонна и имеет один максимум. Определен минимальный объем жидкости, необходимый для создания перемычки при заданных параметрах задачи. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-01-90001, НШ-3323.2010.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Налетова В.А., Волкова Т.И., Рекс А.Г., Турков В.А. Тяжелая магнитная жидкость между горизонтальными плоскостями в поле горизонтального проводника. В сб.: IX Международная научная конференция «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», Санкт-Петербург, Физ. ф-т СПбГУ, с. 360-364.

2. Налетова В.А., Рекс А.Г., Савчук Е.Л., Тайнова А.А., Цвирко М.И. Устойчивость капли магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле. В сб.: 13-я Международная плесская конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям, Плес, 2008. С. 269-274.

VOLUME FORM OF THE HEAVY MAGNETIC FLUID IN A FIELD COIL

Volkova T.I., Naletova V.A., Turkov V.A.
Lomonosov Moscow State University, Department of Mechanics and
Mathematics, Institute of Mechanics MSU, Moscow

In [1] was calculated the dependence of the maximum distance between the horizontal plates, in which the ferrofluid bridge destroyed between them (flat case), of the current in a linear conductor on the top plate. This dependence is qualitatively coincided with the experimentally measured in [2], which investigated the non-planar magnetic field. In this paper studied the static form of finite volume of heavy magnetic fluid between two horizontal plates in axially symmetric magnetic field coil located on the top plate. One side of the liquid is limited by a cylindrical surface whose axis coincides with the axis of the coil. Was calculated the maximum distance between the plates, in which there is a ferrofluid bridge between them, as a function of current in the coil. It is worth to note that the curve is nonmonotonic and has one maximum. Specified minimum amount of magnetic liquid needed to create ferrofluid bridge for given parameters of the problem.

This study is supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 10-01-90001) and the Science School-3323.2010.1.

REFERENCES

1. Naletova V.A., Volkova T.I., Reks A.G., Turkov V.A. Heavy magnetic fluid between horizontal planes in the magnetic field of a line conductor. IX International scientific conference "Modern problems of electrophysics and electrohydrodynamics liquids", St. Petersburg, Physics Department, St. Petersburg State University, p. 360-364.
2. Naletova V.A., Reks A.G., Savchuk E.L., Taynova A.A., Tsvirko M.I. Stability of magnetic fluid drop in a nonuniform magnetic field. 13th International Conference nanodispersed magnetic fluids, Ples, 2008, p. 269-274.

ОБ ЭЛЕКТРОКОНВЕКТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Гусарчук А. Н., Полянских С. В., Демехин Е. А.
Кубанский государственный университет, Краснодар

Рассматривается задача об электрогидродинамической неустойчивости, возникающей в электролите, в области, ограниченной полупроницаемыми мембранами, при прохождении через него электрического тока. Важность проблемы определяется ее многочисленными приложениями в микро- и нанотечениях. Задача описывается системой уравнений переноса ионов, уравнением Пуассона для электрического поля, уравнением Стокса для ползущих течений и уравнением неразрывности. Как аналитически, так и численно найдено одномерное решение, при котором адвекция ионов отсутствует и электромиграция балансируется диффузией ([1], [2]). Аналитическое решение получено асимптотически в предположении малости дебаевской толщины по отношению к внешнему характерному масштабу. Численное решение находится квазиспектральным тау-методом по пространственной переменной с полиномами Чебышёва в качестве базисных функций. Найденное решение исследуется на устойчивость к малым возмущениям, возбуждающим электроконвективное движение. Применяются как численные, так и аналитические методы, полученные результаты хорошо согласуются друг с другом.

Работа финансировалась грантом РФФИ, проект 08-01-00005-а

ЛИТЕРАТУРА

1. Zaltzman B., Rubinstein I., Electroosmotic slip and electroconvective instability// J. Fluid Mech. 2007. V.579, P.173.

2. Демехин Е. А., Шапарь Е. М., Лапченко В. В., К возникновению электроконвекции в полупроницаемых электрических мембранах // Доклады академии наук. 2008. Т. 421, № 4. С. 1-4.

ABOUT ELECTROCONVECTIVE INSTABILITY¹

Gusarchuk A. N., Polyanskikh S. V., Demekhin E. A.
Kuban State University, Krasnodar

The problem of electrohydrodynamic instability arising in the electrolyte solution in the area bounded by a semipermeable membrane due to passage of electric current is under consideration. The importance of the problem is defined by its numerous applications in micro- and nanofluidics. The problem is described by the ion transport equations, Poisson equation for the electric field, the Stokes equation for creeping flow and the continuity equation. One-dimensional solution of the problem with no ion advection is found both numerically and asymptotically. This solution is also determined by balance between electro migration and diffusion ([1], [2]). Asymptotical methods are applied due to assumption that the Debye thickness based on the outer characteristic linear scale is small. Numerical solution is found by quasispectral tau-method with Chebyshev polynomials as basis functions. Solution obtained is examined for stability to small perturbations, exciting electroconvective movement. The calculations made showed good agreement between numerical and asymptotical solution.

The research was partially financed by the Russian Foundation for Basic Research grants № 08-01-00005-a

REFERENCES

3. Zaltzman B., Rubinstein I., Electroosmotic slip and electroconvective instability // J. Fluid Mech. 2007. V.579, P.173.
4. E. A. Demekhin, E. M. Shapar, and V.V. Lapchenko. Initiation of electroconvection in semipermeable electric membranes // Doklady Physics, 2008. V. 53, P. 450.

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАШЮТА С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ РИФЛЕНИЯ

Джалалова М.В., Зубков А.Ф.
Институт механики МГУ

Экспериментальные исследования модели круглого парашюта проводились в аэродинамической трубе А-6 Института механики МГУ. Модель парашюта имела в плоскости раскроя форму круга из 24-х секторов, с параметром воздухопроницаемости ткани $W = 780 \text{ л/м}^2\text{с}$, полюсным отверстием и нашитой в той же плоскости на стропы стабилизирующей ленты на небольшом расстоянии от кромки. Для каждого варианта рифления парашюта измерялись нагрузки на модель в коуше при скоростях набегающего потока $V = 10, 15, 20, 25, 30, 35 \text{ м/с}$ (продольная составляющая интенсивности начальной турбулентности в трубе – 0.2%). Купол парашюта принимал разные формы в зависимости от величин рифления.

Особо следует отметить устойчивое равновесие парашюта в потоке: не было обнаружено угловых колебаний, превышающих обычный пульсационный фон. При всех скоростях потока и величин рифления наблюдалась небольшая вибрация строп и кромки купола, но сам парашют сохранял устойчивое положение (ось парашюта полюс-коуш была параллельна вектору набегающего потока).

Также было выполнено численное исследование влияния рифления на форму купола, его аэродинамическое сопротивление C_p и натяжение радиальных лент. Для решения поставленной задачи использовалась система дифференциальных уравнений применительно к рассмотренной модели парашюта, описывающей равновесие элемента радиальной ленты купола круглого парашюта и координаты точек на меридиональном сечении раскрытого купола. Задача решалась в предположении постоянства перепада давления по всему куполу парашюта. Значение $\Delta \bar{p}$ для рассмотренной модели парашюта с известной воздухопроницаемостью ткани задавалось постоянной величиной вдоль меридионального сечения $\Delta \bar{p} = 1.2$. Сформулированная однопараметрическая краевая задача решалась методом Ньютона: в полюсе задавалось такое значение натяжения $T(0)$, при котором получалась бы заданная длина стропы на кромке (касательная на кромке совпадает со стропой). Для численного интегри-

рования дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

В результате решения уравнений с учетом построенного соотношения между значениями рифления и "мнимыми" величинами длин строп были получены коэффициенты сопротивления C_p для всех степеней рифления (это соотношение помещалось в граничное условие, и затем задача решалась как для обычного круглого парашюта).

Результаты расчетов, выполненных по разработанной программе для определения значений коэффициента сопротивления, натяжения радиальных лент купола и формы меридиональных сечений, хорошо согласуются при всех величинах рифлений с экспериментальными данными как по C_p (разброс в пределах 3% - 8%), так и по параметрам формы купола (отличие не превосходит 5%).

ЛИТЕРАТУРА

1. Рахматулин Х.А. Теория осесимметричного парашюта. Сборник научных трудов Института механики МГУ, №35, изд. МГУ, М., 1975, С. 3-35.
2. Dzhahalova M.V. Methods of Parachute Stability Improvement. PIA International Symposium. USA, Houston, Febr., 1997, p.1-7.
3. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. — М., Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1969.
4. Бахвалов Н.С. Численные методы. — М.: Наука, 1973.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL PARACHUTE INVESTIGATIONS WITH DIFFERENT VALUES OF REEFING

Dzhahalova M.V., Zubkov A.F.
Institute of Mechanics, Moscow State University

Experimental investigations of a round parachute model have been carried out in the Grand Aerodynamic Wind Tunnel A-6 at the Institute of Mechanics of the Moscow State University. This parachute model was designed with 24-triangular gores manufactured of sections cut from woven parachute cloth of air-permeability parameter $W = 780 \text{ l/m}^2\text{s}$ with a vent and sewed stripe for stabilization on the suspension lines (in the same plane of cutting out), on a short distance from a canopy edge. All loads for each reefed parachute variant were being measured at the confluence point at air flow velocities $V = 10, 15, 20, 25, 30, 35 \text{ m/s}$ (longitudinal intensity component of the ini-

tial turbulence was 0.2%). The parachute canopy attained different shapes from each other depending on the value of reefing.

Stable balance of the parachute in the flow should be specially noted: angle oscillations exceeding a common pulsations were not discovered. Little vibrations of suspension lines and the canopy edge were observed at all values of upstream flow velocities and reefing, but the parachute itself kept a stable position (parachute axis pole-confluence point was parallel to the vector of the airflow).

Numerical investigations of the reefing influence on the canopy shape, its aerodynamic drag C_p and the tension T of the radial ribbons were considered. The system of differential equations for the solution of this problem conformably to the considered parachute model was used. This system describes the equilibrium of any radial ribbon element of a round parachute canopy and the point's coordinates on the meridional section of inflated canopy. This problem was solved assuming $\Delta \bar{p} = \text{const}$ over the total canopy of parachute. The value of $\Delta \bar{p}$ for the considered parachute model with the known value of air-permeability was assigned by the constant value along the meridional section $\Delta \bar{p} = 1.2$. The formulated one-parameter boundary value problem has been solved by Newton's method: the tension value $T(0)$ is selected on the pole so that a given value of the line length would be obtained on the canopy edge (the tangent coincides with suspension line on the canopy edge). Runge-Kutta's method of the fourth order precision has been used for a numerical integration of differential equations.

The values of the drag coefficient C_p have been obtained at all values of the reefing as a result of the numerical solution of equations taking into account the deduced relation between the values of the reefing and the "imaginary" suspension lines (this relation was being put into boundary conditions, and then the problem was being solved as if for an usual round parachute).

Program for computation of drag coefficient, tension of the radial ribbon and profiles of the tested parachute model has been developed. The results of computation, brought out due to this program for all values of reefing, are confirmed by experimental data both for C_p (a scattering is within by 3% - 8%) and for parameters of the canopy shape (a difference does not exceed 5%).

REFERENCES

1. Rakhmatulin Kh.A. Theory of Axisymmetric Parachute. Proceedings #35, Moscow State University, Moscow, 1975, C. 3-35.

2. Dzhahalova M.V. Methods of Parachute Stability Improvement. PIA International Symposium. USA, Houston, Febr., 1997, p.1-7.
3. Demidovich B.P., Maron I.A. Foundation of Computational Mathematics. Moscow, 1960.
4. Bakhvalov N.S. Numerical Methods. Moscow, 1973.

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ВИХРЕЙ И ВИХРЕВЫХ НИТЕЙ С ПОМОЩЬЮ КАНОНИЧЕСКОГО ОПЕРАТОРА

Доброхотов С.Ю., Маслов В.П., Шафаревич А.И.

Мы рассматриваем задачу Коши с локализованными начальными данными для линейной гиперболической системы с переменными коэффициентами, описывающую распространение локализованных возмущений в жидкости. Мы предлагаем новое асимптотическое представление для решения, представляющее собой обобщение канонического оператора. Оно основано на простой связи между локализованными и быстро осциллирующими решениями, а также на идеях теории пограничного слоя. Наш результат – явная формула, описывающая связь между начальным возмущением и профилем волны вблизи фронта, включая фокальные точки (точки поворота) и самопересечения. Мы также показываем, что уединенные вихри соответствуют движению фокальных точек в фазовом пространстве. Волновые профили и структура вихрей определяется начальным возмущением, а также лагранжевыми многообразиями, образованными лучами, и волновыми фронтами в фазовом пространстве. В частности, мы обсуждаем связь влияния топологических характеристик (таких, как индексы Морса и Маслова) на метаморфозу профиля после перехода через фокальную точку.

Мы также рассматриваем асимптотические решения уравнений Навье – Стокса, локализованные в малой окрестности кривой и описывающие движущиеся вихревые нити. Мы показываем, что такие решения связаны с топологическими инвариантами двумерных бездивергентных векторных полей. В частности, уравнения, определяющие движение вихря, заданы на геометрическом графе – множестве траекторий такого поля.

ASYMPTOTIC DESCRIPTION OF THE DYNAMICS OF LOCALIZED VORTICES AND VORTEX FILAMENTS VIA CANONIC OPERATOR.

Dobrokhotov S.Yu., Maslov V.P., Shafarevich. A.I.

We consider the Cauchy problem with localized initial data for the multidimensional linear hyperbolic systems with variable coefficients, describing propagation of localized perturbation in fluid. We suggest a new asymptotic representation for solutions of these problems which is the generalization of the canonical operator. It is based also on a simple relationship between fast decaying and fast oscillating solutions and on boundary layer ideas. Our result is the explicit formula which establishes the connection between initial localized perturbations and wave profiles near the wave fronts including the neighborhood of backtracking (focal or turning) and self intersection points. Also we show that the solitary vortices correspond to the focal points propagated in the phase space. The wave profiles and the structure of vortices are related with a form of initial sources and also with the Lagrangian manifolds organized by the rays and wave fronts in the phase space. In particular we discuss the influence of such topological characteristics like the Maslov and Morse indices to metamorphosis of the profiles after passing the focal points.

We consider also asymptotic solutions for nonlinear Navier-Stokes equations, localized in a small vicinity of a curve and representing a propagating vortex filament. We show, that such solution are connected with topological invariants of two-dimensional divergence-free vector fields. In particular, equations, governing the propagation of the vortex, are defined on a geometric graph – set of the trajectories of such a field.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Досаев М.З., Самсонов В.А., Селюцкий Ю.Д.
НИИ механики МГУ, Москва

Построена механико-математическая модель ветротурбины с горизонтальной осью, соединенной с электрогенератором постоянного тока с независимым возбуждением [1-2]. Аэродинамическое воздействие на лопасти турбины описывается с помощью квазистатического подхода.

Показано, что рассматриваемая электро-механической система всегда имеет, по крайней мере, одно стационарное решение. Однако в определенном диапазоне величин внешней нагрузки (внешнего электрического сопротивления) существует несколько стационарных режимов.

Исследованы вопросы устойчивости установившихся режимов и их эволюции при изменении параметров системы (индуктивности, внешнего сопротивления, скорости ветра) и описаны их области притяжения. Показано существование различных типов бифуркаций этих режимов, приводящих, в частности, к рождению циклов, в том числе, притягивающих.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 09-01-00340, 08-08-00390).

ЛИТЕРАТУРА

1. Досаев М.З., Кобрин А.И., Селюцкий Ю.Д., Wen-Lung Lu, Ching-Huei Lin. Об одной особенности функционирования мини-ветроэлектростанций. // Вестник МЭИ. 2007 г. №1, с.147-151.

2. M. Z. Dosaev, V. A. Samsonov, Yu. D. Selyutskii, Wen-Lung Lu, Ching-Huei Lin. Bifurcation of operation modes of small wind power stations and optimization of their characteristics. // Mechanics of Solids, Allerton Press, Inc., 2009, vol. 44, no. 2, pp. 214-221.

ГЕНЕРАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ФОНТАНОМ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Дружинин О.А., Троицкая Ю.И.
Н.Новгород, ИПФ РАН

Цель работы - прямое численное и теоретическое моделирование динамики фонтана в жидкости со стратификацией плотности в виде пикноклина. Фонтан формируется при проникновении вертикальной струи сквозь пикноклин. В численном моделировании струйное течение инициируется с помощью постановки граничного условия в виде направленного вертикально вверх ламинарного потока жидкости нейтральной плавучести с осесимметричным гауссовым профилем скорости.

Расчеты показывают, что при числе Фруда Fr , превышающем некоторое критическое значение, течение становится неустойчивым, и фонтан совершает автоколебания, сопровождающиеся генерацией внутренних волн в пикноклине. В зависимости от Fr можно различать две моды автоколебаний. При достаточно малых Fr фонтан совершает круговые

движения в горизонтальной плоскости в окрестности центра струи, сохраняя почти неизменную форму. При этом излучаются внутренние волны, имеющие вид раскручивающихся спиралей. При достаточно больших Fr доминирует другая мода, когда верхушка фонтана хаотически «блуждает» в окрестности центра струи и периодически обрушается, генерируя пакеты внутренних волн, распространяющихся к периферии области счета. В обоих случаях основной пик в частотном спектре внутренних волн совпадает с частотой колебаний верхушки фонтана, которая монотонно уменьшается с ростом Fr . Зависимость амплитуды колебаний верхушки фонтана от Fr в численном моделировании хорошо согласуется с предсказанием теоретической модели конкуренции взаимодействующих мод в режиме мягкого самовозбуждения.

INTERNAL WAVES GENERATION BY A FOUNTAIN IN A STRATIFIED FLUID

Druzhinin O.A. and Troitskaya Yu.I.

Institute of Applied Physics RAS, N. Novgorod, 603950, Russia

The objective of the present paper is to study by direct numerical simulation (DNS) and theoretical analysis the dynamics of a fountain created by a vertical jet flow penetrating a pycnocline in a density-stratified fluid. A vertical circular, laminar jet flow of neutral buoyancy is considered which propagates vertically upwards towards the pycnocline level and penetrates a distance into the layer of lighter fluid. At a certain height the jet fluid stagnates and flows down under gravity around the up-flowing core thus creating a fountain. The DNS results show that if the Froude number $Fr = \frac{U_0}{N_0 D_0}$ (de-

fined by U_0 and D_0 , the jet flow velocity and diameter at injection, and N_0 , the buoyancy frequency in the pycnocline) is small enough ($Fr < 2.5$) the fountain top, after a transient, remains axisymmetric and steady. However, if Fr is increased ($3 < Fr < 5$) the fountain top becomes unsteady and oscillates in a circular flapping (CF) mode whereby it retains its shape and moves around the jet central axis. If Fr is increased further (for $Fr > 6$), the fountain top periodically rises and collapses in a bobbing oscillation mode (or B-mode). The development of these two modes is accompanied by the generation of different patterns of internal waves (IW) in the pycnocline. The CF-mode generates spiral internal waves, whereas the B-mode generates IW

packets with a complex spatial distribution. In both cases, the IW frequency spectrum is characterized by a maximum-amplitude peak whose frequency coincides with the frequency of the fountain-top oscillations and decreases monotonically with increasing Fr. The dependence of the amplitude of the fountain-top oscillations on Fr is well described by a theoretical solution of the Landau-type two-mode-competition model under an assumption of small super-criticality.

ТРЕХМЕРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Ермаков М.К.

Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва

Моделирование и исследование линейной устойчивости осесимметричных конвективных течений в ограниченных областях осуществляется на основе матричного подхода. Стационарное основное течение определяется применением метода Ньютона в матричной форме для невязок конечно-разностных аппроксимаций. Исследование устойчивости возмущений в виде нормальных мод в азимутальном направлении сводится к решению обобщенной задачи на собственные значения. Для нахождения собственных значений и собственных векторов используется метод обратных итераций со сдвигами. Решение возникающих систем линейных уравнений (на поле действительных чисел для нахождения основного течения и над полем комплексных чисел для решения задачи на собственные значения) реализуется методом сопряженных градиентов с переобуславливанием.

Исследуется устойчивость термокапиллярной конвекции в жидких мостах при больших числах Прандтля, в частности, для условий космического эксперимента MEIS-2 (Япония, 2009). Исследованы зависимости критического термокапиллярного числа Рейнольдса от числа Прандтля жидкости и отношения высоты жидкого моста к диаметру. Приводятся результаты сравнения параметров течения и критических значений для бенчмарка по методу Чохральского [1]. Исследуется влияние глубины кругового бассейна и вращения бассейна вокруг своей оси на критические параметры термокапиллярного течения при горизонтальном направлении температурного градиента. Результаты, полученные численным путем, сравниваются с результатами эксперимента MAGIA в условиях невесомости и нормальной силы тяжести [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Crnogorac N., Wilke H., Cliffe K.A., Gelfgat A. Yu., and Kit E. Numerical modeling of instability and supercritical oscillatory states in a Czochralski model system of oxide melts. *Crystal Research and Technology*, 43 (2008) 606-615.
2. Schwabe D., Zebib A., Sim B-C. Oscillatory thermocapillary convection in open cylindrical annuli. Part 1. Experiments under microgravity. *J. Fluid Mech.*, 491 (2003) 491.
3. Schwabe D., Benz S. Thermocapillary flow instabilities in an annulus under microgravity results of experiment Magia. *Adv. Space Res.*, 29 (2002) 629.

THREE-DIMENSIONAL STABILITY OF AXISYMMETRIC FLOWS

Ermakov M.K.

A.Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow

Modeling and linear stability analysis of axisymmetrical convective confined flows are full-filled on a base of matrix approach. A steady basic flow is calculated by Newton-Raphson method in matrix form for residuals of finite-difference approximations. Study of stability of disturbances in form of normal modes in azimuthal directions is reduced to solution of generalized eigen-value problem. Inverse iteration method with shifts is applied for finding of eigen values and eigen vectors. Solution of arising linear equations systems (for real numbers for calculation of basic state flow and for complex numbers for eigen-value problem solution) is full-filled by conjugate gradient method with preconditioning.

Stability of thermocapillary convection in liquid bridges for high-Prandtl flows is studied, in particularly, for the conditions of the spatial experiment MEIS-2 (Japan, 2009). The dependencies of critical thermocapillary Reynolds numbers upon Prandtl number of liquid and liquid-bridge aspect ratio are calculated. The results of comparison of fluid flow parameters and critical limits for the benchmark on the Czochralski method [1]. The influence of the depth of annular pool and the pool rotation rate around own axes on the critical limits of thermocapillary flow under horizontal thermal gradient. The numerically calculated results on critical limits are compared with results of the MAGIA experiment in microgravity and normal gravity conditions [2, 3].

REFERENCES

1. Crnogorac N., Wilke H., Cliffe K.A., Gelfgat A. Yu., and Kit E. Numerical modeling of instability and supercritical oscillatory states in a Czochralski model system of oxide melts. *Crystal Research and Technology*, 43 (2008) 606-615.
2. Schwabe D., Zebib A., Sim B-C. Oscillatory thermocapillary convection in open cylindrical annuli. Part 1. Experiments under microgravity. *J. Fluid Mech.*, 491 (2003) 491.
3. Schwabe D., Benz S. Thermocapillary flow instabilities in an annulus under microgravity results of experiment Magia. *Adv. Space Res.*, 29 (2002) 629.

ОЦЕНКИ НОРМ ЖЕВРЭ-СОБОЛЕВА РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТИПА

Желиговский В.А.

Международный институт теории прогноза землетрясений и
математической геофизики РАН, Москва

Предложен новый способ вывода оценок норм Жеврэ-Соболева для решений уравнений гидродинамического типа, для чего выполняется преобразование уравнения в пространстве коэффициентов Фурье и вводится обратная связь между нормой и ее индексом. В качестве примеров выведены оценки норм Жеврэ-Соболева на интервалах времени конечной длины для решений уравнений Эйлера и невязкого уравнения Бюргерса, и глобальные по времени оценки для решений уравнений Эйлера с регуляризацией Фогта, а также уравнений Навье-Стокса, регуляризованных посредством введения гипервязкости.

BOUNDS OF GEVREY-SOBOLEV NORMS FOR SOLUTIONS OF EQUATIONS OF THE HYDRODYNAMIC TYPE

V.A. Zheligovsky

International institute of earthquake prediction theory and mathematical geophysics, Russ. Ac. Sci., Moscow

We suggest a new method for construction of bounds of Gevrey-Sobolev norms for solutions of equations of the hydrodynamic type by transforming the equation in the Fourier space and introducing the feedback be-

tween the norm and its index. As examples, we derive finite-time bounds of Gevrey-Sobolev norms of solutions to the Euler and Burgers equations, and global in time bounds for solutions to the Vogt-regularised Euler equation and the hyperviscosity-regularised Navier-Stokes equation.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ – ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ

Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э.

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Представлены результаты экспериментального и численного исследования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости, формирующихся в условиях встречного вращения сферических границ. В стационарном течении до потери устойчивости существует циркуляция в меридиональной плоскости. Структура и интенсивность меридиональной циркуляции определяют вид вторичных течений и положение границы устойчивости [1], от которой зависит и граница формирования хаоса [2]. Осредненная меридиональная циркуляция турбулентных режимов течения определялась прямым расчетом, по распределению осредненных величин азимутальной завихренности в меридиональной плоскости и радиальной компоненты скорости в экваториальной плоскости. Использовался алгоритм решения УНС в произвольной ортогональной системе координат [3], для дискретизации по пространству использовалась расчетная сетка, неравномерная в радиальном и в меридиональном направлениях [4]. Показано, что структура осредненной циркуляции турбулентного течения качественно подобна структуре циркуляции течения до потери устойчивости с тем же соотношением чисел Рейнольдса Re_1 / Re_2 , что и в турбулентном течении, а максимумы профилей турбулентных пульсаций всех компонент скорости расположены вблизи линии раздела меридиональных циркуляций [5]. Для выяснения влияния положения линии раздела на свойства турбулентных течений проведены эксперименты для двух случаев: линия раздела удалена от границ, и линия раздела приближена к внешней границе [6]. Установлено, что хаотические режимы для рассматриваемых случаев различны по своей структуре, составу спектров пульсаций скорости, по величине и характеру изменения корреляционной размерности; показана возможность снижения уровня стохастичности с увеличением регулярности структуры меридионального течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев Ю.Н. Гидродинамическая неустойчивость и турбулентность в сферическом течении Куэтта. М.: Изд. МГУ. 1997. 348 с.
2. Герценштейн С.Я., Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. Экспериментальное исследование режимов перемежаемости в сферическом течении Куэтта. Докл. РАН, 2000. т. 375. № 6. С. 770-773.
3. Nikitin N. Finite-difference method for solving the Navier-Stokes equations for incompressible fluid in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates. J. Comp. Phys., 2006, 217(2), pp.759-781.
4. Кривоносова О.Э. Переход к стохастичности в широком сферическом слое при встречном вращении границ: прямой расчет и эксперимент. Дис. ...канд.физ.-мат. наук. М. МГУ. 2007. 128с.
5. Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. Возникновение и эволюция турбулентных течений во вращающемся сферическом слое. ЖТФ. 2010.т.80, вып. 4, С.16-23.
6. Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. Формирование стохастичности в широком сферическом слое при различных способах изменения граничных условий. Изв. РАН. МЖГ.2008.№5.С.30-38.

ВЕТРОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТУРБУЛЕНТНОГО СЛОЯ

Зайцева А. В., Демехин Е. А.

Кубанский государственный университет, Краснодар

Рассматривается задача движения и устойчивости турбулентного горизонтального слоя, увлекаемого турбулентным потоком газа. Такие задачи возникают при совместном движении газа и конденсата в газопроводах, где неустойчивость определяет начало пробкового режима. Для описания тензора турбулентных напряжений применялась гипотеза Буссинеска в комбинации с соотношением Ван-Дриста для длины смешения. Найдено решение для безволнового плоскопараллельного течения. Исследуется устойчивость этого течения к малым синусоидальным возмущениям. Применяется метод Галеркина; собственные функции задачи раскладываются по полной системе базисных полиномов, как в газовой фазе, так и в жидкой; к полученным соотношениям проекций добавляются дополнительные соотношения на границе раздела фаз и жесткой границе. Полученная в итоге алгебраическая задача на собственные значения решается с помощью QR-алгоритма. Резкое изменение профиля скоростей в окрестностях жесткой границы и границы раз-

дела фаз приводят к необходимости применения большого числа базисных функций ($N=500-700$). Впервые получено согласование теоретических и экспериментальных [1, 2] параметров потери устойчивости в такого рода задачах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rossum J.J. Experimental investigation of horizontal liquid films, // Chemical Engineering Science. 1959. V.11, pp. 35-52.
2. Andreussi P., Asali J.C. Hanratty T.J. Initiation of roll waves in gas-liquid flows. //Chemical Engineering Journal. 1985. V. 31, N1, pp 119-126.

WIND GENERATED INSTABILITY IN TURBULENT LAYER

Zaitseva A.V., Demekhin E. A.
Kuban State University, Krasnodar

Turbulent horizontal liquid layer, involved in movement by a turbulent gas flow, and its stability is considered. Such problems have practical application for description of two-phase flows in gas pipelines, where instability determines beginning of slug regime. Bussinesque hypothesis for turbulent stresses in combination with Van-Driest relation for mixing length are used. Trivial solution for the waveless flow is found. Stability of this solution to infinitesimal sinusoidal perturbations is investigated. Galerkin method is applied in liquid and gas phases: the eigen-functions are expanded in complete system of basic polynomials; additional relations for Galerkin coefficients from BC's at the interface and rigid boundary are added to complete the system. The obtained algebraic eigen-value problem is solved with QR-algorithm. Rapid changing of the velocity profile near the rigid boundary and the interface lead to a large number of basic functions ($N=500-700$) to solve the problem. For the first time a good agreement of theoretical and experimental [1,2] data of critical parameters is obtained.

LITERATURE

1. Rossum J.J. Experimental investigation of horizontal liquid films, // Chemical Engineering Science. 1959. V.11, pp. 35-52.
2. Andreussi P., Asali J.C. Hanratty T.J. Initiation of roll waves in gas-liquid flows. //Chemical Engineering Journal. 1985. V. 31, N1, pp 119-126.

УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ЗАВИХРЕННОСТИ

Захаренков М.Н.

Брянский государственный университет имени И.Г.Петровского

Условие реализации строго симметричного тензора напряжений во втором приближении можно записать в виде

$$\Omega + \frac{1}{2} \frac{\partial \Omega}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial \Omega}{\partial y} dy = 0 \quad (1)$$

где Ω - завихренность. В данном случае dx, dy не совпадают с элементарными перемещениями частиц жидкости, происходящими за бесконечно малый промежуток времени [1, стр.53].

Следствие 1. Из условия реализации строго симметричного тензора напряжений следует, что возмущения скорости воздействуют в сторону более выраженной конвективной неустойчивости течения/завихренности.

Потребуем выполнения (1) в два последовательных момента времени

$$\Omega + \frac{1}{2} \frac{\partial \Omega}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial \Omega}{\partial y} dy = 0;$$

$$\Omega(t + \Delta t) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial x} dx \right) \Big|_{t+\Delta t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial y} dy \right) \Big|_{t+\Delta t} = 0$$

Вычитая первое уравнение из второго, поделив на шаг по времени Δt и переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получим

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + u' \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v' \frac{\partial \Omega}{\partial y} + \frac{dx}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right) + \frac{dy}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right) = 0 \quad (2)$$

где u' и v' рассматриваем как возмущения скорости. Учитывая, что в (2)

$dx, dy \rightarrow 0$, а $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right)$ и $\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right)$ конечны, получаем

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + u' \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v' \frac{\partial \Omega}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Это верно всегда кроме вихревого коллапса, когда $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right)$ и $\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} \right)$

могут быть бесконечно большими.

Таким образом возмущения скорости воздействуют в сторону более выраженной конвективной неустойчивости течения/завихренности. Этот тип неустойчивости встречается во многих численных экспериментах.

Следствие 2. Из условия реализации строго симметричного тензора напряжений следует, что вихревые возмущения распространяются против скорости осредненного движения, а энергия возмущений завихренности куммулируется осредненной завихренностью.

Запишем уравнение переноса завихренности

$$\frac{\partial(\bar{\Omega} + \Omega')}{dt} + (\bar{u} + u') \frac{\partial(\bar{\Omega} + \Omega')}{dx} + (\bar{v} + v') \frac{\partial(\bar{\Omega} + \Omega')}{dy} = \nu \Delta(\bar{\Omega} + \Omega') \quad (4)$$

где $\bar{\Omega}$ - осредненная завихренность, Ω' - возмущения завихренности. и для осредненных величин

$$\frac{\partial \bar{\Omega}}{dt} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\Omega}}{dx} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\Omega}}{dy} = \nu \Delta \bar{\Omega} \quad (5)$$

Вычитая из (4) уравнение (5) получим

$$\frac{\partial \Omega'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \Omega'}{\partial x} + u' \frac{\partial \Omega'}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \Omega'}{\partial y} + v' \frac{\partial \Omega'}{\partial y} = \nu \Delta \Omega' \quad (6)$$

Наконец, вычитая из (3) уравнение (6) получим

$$\frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial t} - \bar{u} \frac{\partial \Omega'}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \Omega'}{\partial y} = -\Delta \Omega' \quad (7)$$

Из (7) следует, утверждение следствия 2. Выполнение (7) подтверждается результатами расчета обтекания кругового цилиндра при $Re_D=40$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л.Г.. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1973, 847 с.

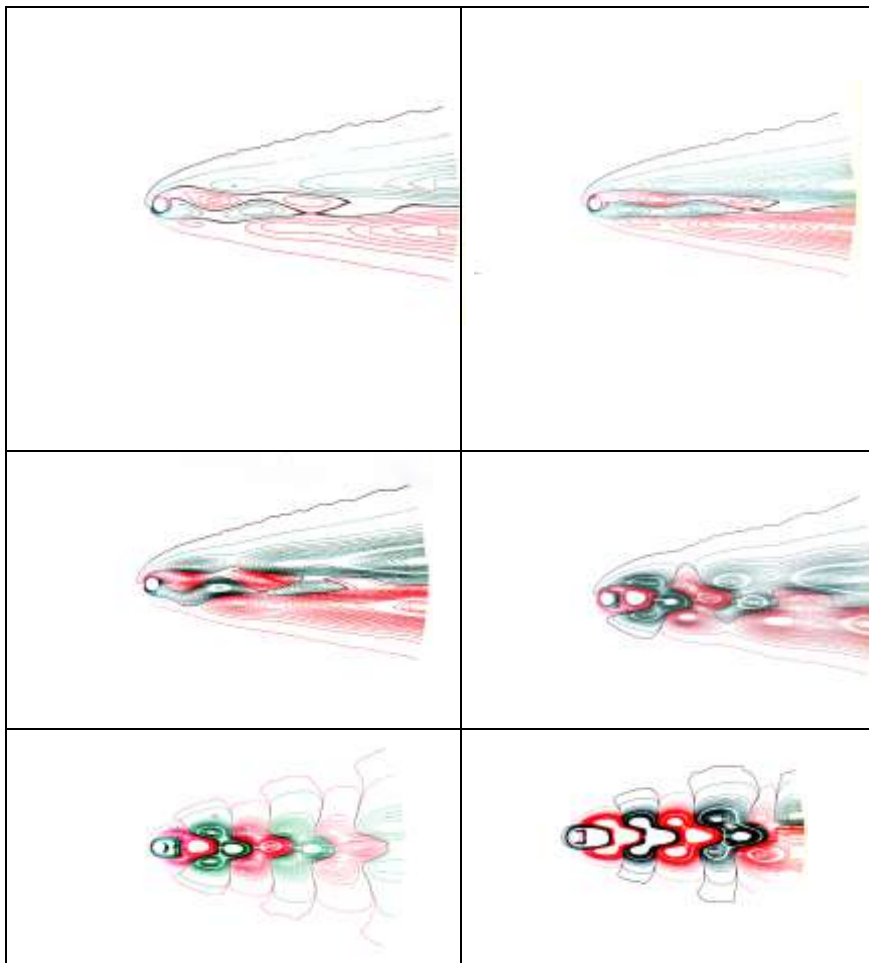
ВОЛНЫ ЗАВИХРЕННОСТИ В ЗАДАЧАХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Захаренков М.Н.

Брянский государственный университет имени И.Г. Петровского

В [1] проведен анализ решения задачи обтекания кругового цилиндра потоком вязкой несжимаемой жидкости с учетом зависимости вязкости от температуры при числе Рейнольдса по диаметру равном 40. Известная задача перехода течения около кругового цилиндра при $Re = 40$ от симметричной формы к вихревой дорожке Кармана может быть рассмотрена как задача развития и усиления вихревых волн. В следе за цилиндром наблюдается развитие трех пучков вихревых волн малой интенсивности, которые хорошо визуализируются как структуры относительной завихренности $\Omega' = \Omega(t_1) - \Omega(t_0)$ – разности завихренности

сти Ω в два различных момента времени. При этом t_0 – фиксировано. В поле Ω' чередующаяся структура квадруполей (Рис.1) характеризуется линейным параметром $l = h/d$ отношением ширины центрального пучка вихревых волн к расстоянию между центрами квадруполей “одного знака”.



При достижении значения $l = 0,281$, которое совпадает со значением аналогичного параметра устойчивой вихревой дорожки Кармана, происходит переход от симметричного обтекания вязкой несжимаемой жидкостью к вихревой до-

рожке. Замкнутым структурам в пространстве Ω' соответствуют волны в пространстве Ω . В [1] показано, что развитие и усиление поверхностных вихревых волн и пакета пристеночных вихревых волн является внутренним физическим механизмом, который можно противопоставить влиянию численных факторов на развитие неустойчивости симметричного обтекания цилиндра.

В [1] решались уравнения Навье-Стокса при условии строго симметричного тензора напряжений. В этом случае, как показано в другом докладе, представленном автором на настоящую конференцию, возникают два дифференциальных уравнения, необходимость выполнения которых следует из условия строгой симметрии тензора напряжений

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + u' \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v' \frac{\partial \Omega}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial t} - \bar{u} \frac{\partial \Omega'}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \Omega'}{\partial y} = -\Delta \Omega' \quad (2)$$

где u' и v' рассматриваем как возмущения скорости специального вида: эти возмущения порождаются выполнением условия строгой симметрии тензора напряжений. В тоже время возмущения завихренности в (2) – возмущения общего вида. Средние завихренность и компоненты скорости выделены верхним надчеркиванием. Таким образом естественно возникающие вихревые волны, рассматриваемые как возмущения завихренности, вследствие (2) в течении времени должны усиливаться, их усиление происходит во всей области следа и особенно непосредственно за цилиндром. Этот процесс подтверждается результатами [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Н. Захаренков. Волны завихренности в задачах гидродинамической устойчивости.// Теплофизика и аэромеханика, 2009, т.16, №3.
2. M.N. Zakharenkov. Thermophysics and Aeromechanics, Vorticity waves in problems of hydrodynamic stability, 2009, DOI 10.1134/S0869864309030081.

ТУРБУЛИЗАЦИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ, ДВИЖУЩЕЙСЯ ПО ОБЛАСТИ ИМПУЛЬСНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА.

Знаменская И.А., Орлов Д.М., Иванов И.Э., Коротеева Е.Ю.
МГУ, физический факультет, кафедра молекулярной физики.

Исследовалось экспериментально и моделировалось численно газодинамическое течение, возникающее при распространении плоской ударной волны в канале, на одной из стенок которого инициировался импульсный сильноточный поверхностный распределенный скользящий разряд (плазменный лист). Мгновенное с точки зрения характерных газодинамических времен вложение энергии в тонком слое воздуха у стенки канала приводило к значительному росту давления и температуры в области разряда (площадью $100 \times 30 \text{ мм}^2$, толщиной 0,5 мм). По разрядной камере из зоны разряда начинали распространяться ударные волны и возмущения. Через 30–40 мкс возмущения затухали; в разрядной области в тонком слое нагретого газа шли релаксационные процессы.

Теневым методом исследовалось взаимодействие ударной волны с квазидвумерной пристеночной областью релаксирующей плазмы распределенного поверхностного разряда. Эволюция течения при движении ударной волны по возбужденному разрядом слою газа рассматривалась на разных временных стадиях после инициирования разряда ($t=40\text{--}500 \text{ мкс}$) и для разных чисел Маха ($M=1,5\text{--}3$). В этих условиях течение нестационарно, так как идет релаксация, расширение нагретой импульсным разрядом области. Исследована динамика предвестника - крупномасштабного возмущения, опережающего фронт плоской волны.

Зарегистрировано возникновение крупных вихрей и турбулизация течения за фронтом при движении плоской ударной волны по неравновесной области газа, сформированной квазинепрерывной системой параллельных скользящих по поверхности разрядов. Неоднородность зоны разряда перед волной практически не визуализировалась, в то время как за волной размер области турбулентности быстро увеличивался (см. Рис.1).

Поскольку геометрия эксперимента позволила считать течение квазидвумерным, теневые снимки сравнивались с результатами численного 2D моделирования. Расчет проводился по методу Годунова повышенного порядка, основанного на решении задачи Римана о распаде произвольного разрыва, в рамках полной системы нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Для описания турбулентно-

сти использовалась к-ε модель [1]. Вложение энергии моделировалось как мгновенное изменение начальных данных (внутренней энергии) в области, где сосредоточен поверхностный разряд (протяженностью 10 см, толщиной 0.7 мм). В качестве рабочего газа был взят воздух ($\gamma=1.4$), невозмущенные параметры течения ($P_0 = 25, 75$ Торр; $T = 300$ К) и граничные условия соответствовали условиям эксперимента. Визуализация численного расчета дает картину течения, аналогичную наблюдаемой на теневых снимках.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-08-00903-а

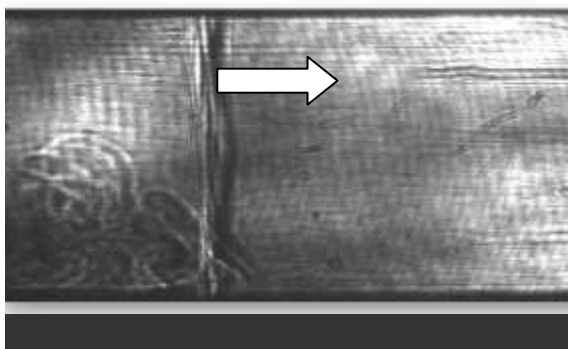


Рис. 1 Теневые изображения фронта в случае, когда перед запуском УВ на нижней стенке канала инициировался поверхностный разряд
ЛИТЕРАТУРА.

1. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Особенности расчета турбулентных сверхзвуковых течений / Препринт № 882 Институт проблем механики РАН, М. 2008, 38 с.

TURBULIZATION OF BOUNDARY LAYER BEHIND SHOCK WAVE MOVING ALONG PULSE IONIZED SURFACE AREA

Znamenskaya I.A., Orlov D.M., Ivanov I.E., Koroteeva E. Yu.
Moscow State University, Faculty of Physycs.

Experimental investigation and numerical simulation of the gas-dynamic flow occurring when the plain shock wave propagates in the channel with the nanosecond surface distributed high-current discharge (“plasma sheet”) initi-

ated on one of its walls are conducted. The instantaneous (compared to gas-dynamic times) energy input in the thin layer of air at the channel wall leads to the considerable growth of pressure and temperature near the area of the discharge (with 100mm x 30mm size and 0.5mm width). Shock waves and disturbances arise as a consequence. After 30-40 μ s all the disturbances weaken; relaxation processes in the discharge area continue, and a thin layer of a warm rarefied gas is formed near the surface.

The interaction of the shock wave with quasi-2D area of relaxing plasma of the distributed surface discharge is investigated by means of the shadow-graph technique. The shock wave evolution is studied at different moments of time after discharge ($t=40-500 \mu$ s) and for different Mach numbers ($M=1.5 - 3.0$). Under these conditions the flow is unstable due to relaxation processes and expansion of the warm air layer. The dynamics of a large-scale disturbance moving faster than the plain shock front – the so-called precursor – is thoroughly explored.

The appearance of high vorticity and turbulence is registered in the flow behind the shock, when it is propagating along the non-equilibrium gas region created by the quasi-continuous system of parallel transversal surface discharges. The non-uniformity of the upstream flow is scarcely visualized whereas the turbulent region behind the shock front exhibits a rapid growth (Fig.1).

As far as the geometry of the problem allows us to consider two-dimensional flow, the shadow images are compared with the results of numerical 2D simulation. Calculations are based on the time-dependent Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations and the high-order Godunov's scheme for solving the Riemann problem. The effects of turbulence are described by the κ - ε – model. The energy deposition is modeled as an instantaneous change in the initial conditions (internal energy) in the area where the surface discharge is initiated (10cm x 0.7 mm). The air ($\gamma=1.4$) is chosen as a working medium with the initial unperturbed parameters ($P_0 = 25, 75$ Torr, $T = 300$ K) and boundary conditions coinciding with the experimental data.

This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (Grant № 08-08-00903-a).

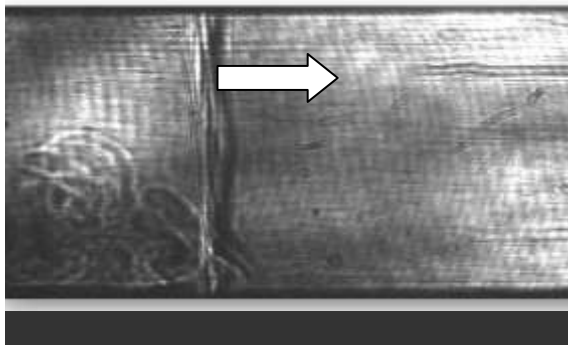


Fig. 1 Shadow image of the shock wave front in case when the plasma sheet was initiated on the bottom surface of the channel in front of the shock.

REFERENCES

2. Glushko G.S., Ivanov I.E., Kryukov I.A. Computation of turbulent supersonic flows / Preprint № 882 Institute for Problems in Mechanics RAS, 2008, 38 p.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ В ВЫСОКОТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

Зубарев В.М.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Влияние турбулентности набегающего потока на ламинарно-турбулентный переход связано с уровнем интенсивности турбулентности Tu_∞ и величиной её масштаба L_∞ [1]. Основное внимание сконцентрировано на проблеме замыкания осредненных уравнений пограничного слоя с помощью моделей турбулентности для расчета областей с низкими локальными числами Рейнольдса, анализе влияния параметров с высокой интенсивностью турбулентности в набегающем внешнем потоке на развитие характеристик течения. Для исследования пристенных пограничных слоев рассмотрены различные варианты классических дифференциальных моделей турбулентности, позволяющие рассчитывать непрерывным образом области с ламинарными, переходными и турбулентными режимами течения, при большой интенсивности турбулентности набегающего потока. Предложен подход для улучшенного описания

существующих экспериментальных и теоретических данных по структуре перехода в пограничном слое в диапазоне от малых до больших значений локальных чисел Рейнольдса [2-4]. Детально изучено численными методами влияние масштаба и степени турбулентности набегающего потока на турбулентные характеристики перехода. При обтекании плоской пластинки потоком несжимаемой жидкости с большой степенью турбулентности расчетные результаты по $k-\varepsilon$ модели [5-6], записанной для полной скорости диссипации ε , сопоставлены с тестовыми экспериментальными данными [7] по профилям скорости и интенсивности турбулентности.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы РФФИ (грант №09-08-00307).

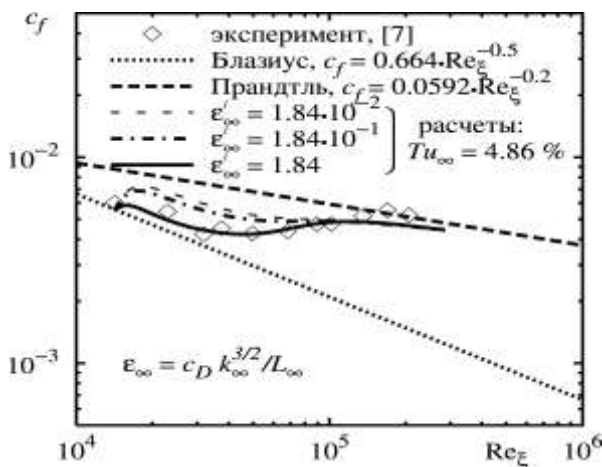


Рис. 1.

Сравнение расчетов локального коэффициента продольного трения $c_f(Re_k)$ на пластине с известными теоретическими формулами и данными эксперимента [7]

ЛИТЕРАТУРА

1. Драйден Х.Л. Переход ламинарного течения в турбулентное // Турбул. течения и теплопередача. Аэродин. больших скоростей и реакт. техника. - М.: ИЛ, 1963, с.9-82.

2. Zubarev V.M. Comparative analysis of various k- ε turbulence models for laminar-turbulent transition // ИПМех РАН, Препринт №601, Москва, 1997. 52с.

3. Алексин В.А., Зубарев В.М. Моделирование влияния параметров турбулентности набегающего потока на пристеночные переходные течения в пограничном слое // Мат. модел. РАН, 2008, т.20, №8, с.87-106.

4. Зубарев В.М. Численное моделирование влияния параметров турбулентности набегающего потока на пристеночные переходные течения в пограничном слое. с.279 // В сб. Современные проблемы математики, механики и их приложений. Материалы межд. конф., посвящ. 70-летию ректора МГУ акад. В.А. Садовниченко. - М.: Изд. Университетская книга, 2009. - 416с.

5. Myong H.K., Kasagi N. A new proposal for a $k-\varepsilon$ turbulence model and its evaluation. 1st report, development of the model // Trans. Japan Soc. Mech. Eng., B, 1988, v.54, N 507, p.3003-3009.

6. Myong H.K., Kasagi N. A new proposal for a $k-\varepsilon$ turbulence model and its evaluation. 2nd report, evaluation of the model // Trans. Japan Soc. Mech. Eng., B, 1988, v.54, N 508, p.3512-3520.

7. Epik E.Ya. Heat transfer effects in transitions // Engin. Found. Conf., March 10-15, 1996, New York - San Diego, California, 1996, p.1-47.

BOUNDARY LAYER IN HIGH-SPEED TURBULENT INTENSITY FLUID FLOW

Zubarev V.M.

A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow

Influence of free stream turbulence on laminar-turbulent transition is concatenated with turbulence intensity level Tu_{∞} and value of its scale L_{∞} [1]. The basic attention is concentrated on a closing problem the averaged boundary layer equations by means of turbulence models for calculation of regions with Reynolds's low local numbers, the analysis of influence of parameters with high turbulence intensity in a free stream on development of characteristics of a flow. For research the wall boundary layers various variants of classical differential turbulence models are considered, allowing to calculate in the continuous manner of areas with laminar, transitive and turbulent modes of a flow, at the high free stream turbulence intensity. The approach for the improved description of the existing experimental and theoretical data on transition structure in boundary layer in a range from small to high values of local Reynolds numbers [2-4] is offered. Influence of scale and degree of free stream turbulence on turbulent characteristics of transition is in details studied by numerical methods. At a flow of a flat plate an incompressible liquid with the high turbulence degree numerical results on $k-\varepsilon$ model [5-6] which have

been written down for total kinetic energy dissipation rate ε , are compared with test experimental data [7] on profiles of speed and intensity of turbulence.

Work is executed with financial support of the program of the Russian Federal Property Fund (the grant 09-08-00307).

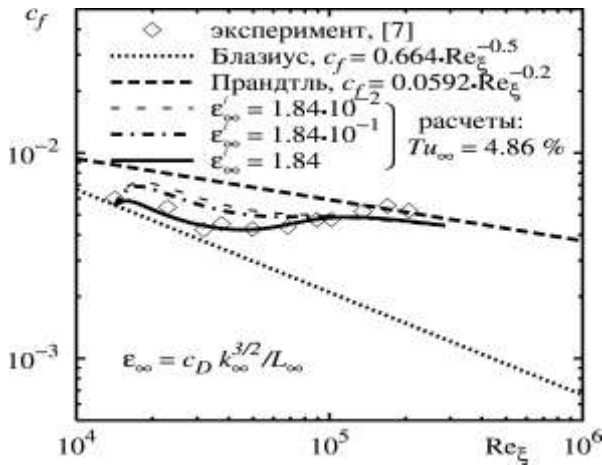


Fig. 1. Comparison of calculations of local longitudinal friction coefficient $c_f(\text{Re}_\xi)$ on plate with known theoretical formulas and the data of experiment [7].

LITERATURE

1. Dryden H.L. Transition from laminar to turbulent flow // Turbul. Flow and Heat Transfer. N.-Y.: Princeton Univ. Press, 1959, p.3-74.
2. Zubarev V.M. Comparative analysis of various k- ε turbulence models for laminar-turbulent transition // Inst. Probl. Mech. RAS, Preprint N 601. Moscow, 1997, 52p.
3. Алексин В.А., Зубарев В.М. Моделирование влияния параметров турбулентности набегающего потока на пристеночные переходные течения в пограничном слое // Мат. модел. РАН, 2008, т.20, №8, с.87-106.
4. Зубарев В.М. Численное моделирование влияния параметров турбулентности набегающего потока на пристеночные переходные течения в пограничном слое. с.279 // В сб. Современные проблемы математики, механики и их приложений. Материалы межд. конф., посвящ. 70-

летию ректора МГУ акад. В.А. Садовниченко. - М.: Изд. Университетская книга, 2009. - 416с.

5. Myong H.K., Kasagi N. A new proposal for a $k-\varepsilon$ turbulence model and its evaluation. 1st report, development of the model // Trans. Japan Soc. Mech. Eng., B, 1988, v.54, N 507, p.3003-3009.

6. Myong H.K., Kasagi N. A new proposal for a $k-\varepsilon$ turbulence model and its evaluation. 2nd report, evaluation of the model // Trans. Japan Soc. Mech. Eng., B, 1988, v.54, N 508, p.3512-3520.

7. Epik E.Ya. Heat transfer effects in transitions // Engin. Found. Conf., March 10-15, 1996, New York - San Diego, California, 1996, p.1-47.

МЕХАНИЗМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ МОД НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ

Иванов А.В.

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

Механизмы преобразования внешних по отношению к пограничному слою возмущений в его собственные колебания обычно называют механизмами *восприимчивости*. Количественное решение задачи восприимчивости подразумевает нахождение *коэффициентов восприимчивости*, т.е. коэффициентов характеризующих эффективность порождения мод неустойчивости и представляющих собой отношение интенсивности возбужденного в пограничном слое возмущения к интенсивностям факторов его породивших. В настоящем докладе проводится обзор результатов систематических экспериментальных исследований локализованной восприимчивости, проведенных в последние годы, а также использования этих результатов для верификации теорий восприимчивости.

Объектами исследований являлись различные *дозвуковые* течения, такие как канонический пограничный слой Блазиуса, автомодельные двумерные пограничные слои с положительным и отрицательным градиентами давления, а также неавтомодельный двумерный пограничный слой реального крыла. Анализируются задачи восприимчивости для трехмерных пограничных слоёв скользящих крыльев. Приводятся новые результаты исследования восприимчивости пограничного слоя на вогнутой стенке. Для каждого из названных типов течения анализируется эффективность порождения мод неустойчивости, характерных для данного течения. Так для двумерных пограничных слоев исследуется порожде-

ние двумерных и трехмерных волн Толлмина-Шлихтинга, для трехмерного пограничного слоя – вихрей и волн неустойчивости поперечного течения, для погранслоя на вогнутой стенке – стационарных и нестационарных вихрей Гёртлера.

Полученные в рамках обсуждаемого цикла исследований знания о восприимчивости погранслоевых течений обсуждаются, анализируются и соотносятся друг с другом и с теоретическими результатами. Анализируется относительная эффективность исследованных механизмов восприимчивости и степень их влияния на положение ламинарно-турбулентного перехода в изученных течениях.

Работа поддержана грантом РФФИ № 10-01-00109.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕЙ ГЁРТЛЕРА НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ОБТЕКАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.
ИТПМ СО РАН, Новосибирск

Несмотря на большую практическую значимость, задача линейной нестационарной гёртлеровской неустойчивости пограничных слоёв на вогнутых стенках была основательно изучена лишь недавно в экспериментально-теоретической работе [1]. Благодаря применению нового подхода в этой работе впервые удалось подтвердить корректность применимости линейной теории к описанию неустойчивости. Эти результаты создали основу для систематического изучения механизмов возбуждения нестационарных (в общем случае) вихрей Гёртлера различными внешними (по отношению к пограничному слою) возмущениями. Среди наиболее вероятных источников порождения вихрей Гёртлера на практике можно выделить: неоднородности и турбулентность набегающего потока и неоднородности обтекаемой поверхности (вибрации, неровности). Изучению последнего из указанных механизмов и посвящена настоящая экспериментальная работа.

Эксперименты были проведены в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН при скорости среднего потока 9.18 м/с. Измерения выполнены термоанемометром, в условиях контролируемого порождения в пограничном слое, нестационарных вихрей Гёртлера с помощью, специального источника способного моделировать вибрации и неоднородности обтекаемой поверхности.

В условиях эксперимента, пограничный слой развивался на высокоточной экспериментальной модели, которая представляет собой вогнутую цилиндрическую поверхность (радиус закругления 8.37 м) протяженностью 2380 мм в продольном направлении и 1000 мм в направлении размаха. Практически нулевой продольный градиент давления над рабочей поверхностью модели обеспечивался установленной над ней регулируемой адаптивной ложной стенкой. Строго фиксированную кривизну рабочей поверхности данной модели задает жесткий каркас из собранного в блок набора дюралюминиевых дугообразных нервюр. К этому каркасу притянут лист оргстекла, который и формирует рабочую поверхность модели. Такая конструкция обеспечивает высокую степень постоянства кривизны поверхности и в тоже время позволяет минимизировать неконтролируемые неоднородности поверхности в поперечном направлении.

Источник возмущений (неоднородностей поверхности) был установлен заподлицо с поверхностью на расстоянии 291 мм от передней кромки модели. Он представляет собой ряд локализованных вибраторов в виде набора одинаковых эластичных круглых мембран, расположенных с фиксированным шагом вдоль размаха модели. Мембраны были выполнены из латексной пленки толщиной около 80 мкм и возбуждались с помощью блока из 8 заглушенных динамиков, расположенного вне рабочей части трубы. Динамики были соединены с полостями под мембранами гибкими пневмотрассами и создавали пульсации давления, приводящие мембраны источника в колебательное движение с амплитудами в несколько десятков микрон.

Эксперименты проведены для поперечной длины волны возбуждаемых гёртлеровских вихрей 8 и 12 мм и частот возмущений в диапазоне от 2 до 14 Гц. В условиях измерений эти параметры примерно соответствуют наиболее опасным модам неустойчивости. Область основных измерений по продольной координате $x = 400 \div 1200$ мм соответствует диапазону локальных чисел Гёртлера (по толщине вытеснения пограничного слоя) от 10 до 21.

Основная серия измерений в каждом из исследованных режимов включала в себя набор распределений амплитуд и фаз возмущений по размаху модели (координата z), выполненных в различных сечениях по продольной координате x (с шагом 100 мм), а также распределение по x в максимуме амплитуд возмущений по z -координате. Измерения были выполнены на расстоянии от стенки соответствующем безразмерной средней скорости потока $U/U_e = 0.6$, что примерно соответствует максимуму амплитуд возмущений в профиле по нормали к стенке (U_e –

средняя скорость потока на границе пограничного слоя). Кроме того, были измерены профили возмущений скорости (амплитуды и фазы) по нормали к стенке в конце области измерений, а также непосредственно над источником возмущений (над центром одной из его мембран). Линейность исследуемых механизмов устойчивости и восприимчивости течения была проверена повторением серии специальных измерений с варьированием амплитуд вибраций источника. Форма колебаний мембран источника была тщательно промерена лазерным измерителем смещений в каждом из режимов генерации возмущений с целью представления моделируемых неоднородностей поверхности в Фурье-пространстве, что необходимо для корректного решения линейной задачи восприимчивости.

Выполненные измерения показали, что вибрации поверхности приводят к эффективному возбуждению в пограничном слое нестационарных вихрей Гёртлера. Полученные данные позволяют впервые экспериментально определить величины коэффициентов восприимчивости течения к неоднородностям поверхности.

Работа поддержана РФФИ (грант № 10-01-00109).

1. A.V. Boiko et al., Steady and unsteady Goertler boundary-layer instability on concave wall, *European Journal of Mechanics B/Fluids* (2009), doi:10.1016/j.euromechflu.2009.11.001

EXPERIMENTAL STUDY OF EXCITATION OF UNSTEADY GÖRTLER VORTICES BY SURFACE NON-UNIFORMITIES

Ivanov A.V., Kachanov Y.S., Mischenko D.A
ITAM SB RAS, Novosibirsk

In spite of its great practical importance, the problem of linear non-stationary Görtler instability of boundary layers on concave walls has been studied thoroughly only recently in theoretical-experimental work [1]. Due to application of new approaches in this work the applicability of linear stability theory to description of Görtler instability was proved. This provides basis for further systematic investigation of excitation of non-stationary Görtler vortices by different external (with respect to the boundary layer) perturbations. Among the most probable practical sources for Görtler-vortices, onset one may mention freestream non-uniformities and turbulence and non-uniformities of aerodynamical surface (vibrations, roughness). The present experimental study is devoted to investigation of the later receptivity mechanism.

The experiments were carried out in the low-turbulence wind tunnel T-324 of ITAM SB RAS. The measurements were performed based on the hot-wire technique at controlled excitation of unsteady Görtler vortices by means of a special disturbance source, which simulated surface non-uniformities (vibrations).

At the experimental conditions the boundary layer under study was developed over a high-precision experimental model which represented a concave surface with radius of curvature of 8.37 m, streamwise length of 2380 mm and 1000 mm in span. Practically zero streamwise pressure gradient was provided along the model by means of an adjustable wall bump mounted above the model. The desired curvature of the model was provided by set of longitudinal ribs made of duralumin and assembled in a rigid frame. Plexiglas sheet attached to the frame formed the test surface of the model. The described design provided very high accuracy required for the model-surface curvature, at the same time this design allowed to minimize spanwise waviness of the surface.

The disturbance source was installed into the model flash with the surface at a distance of 291 mm from the model leading edge. The source represented a set of localized surface vibrators placed in a spanwise row with a fixed step. The membranes of the vibrators (made of latex rubber of about 0.8 mm thick) were driven pneumatically with the help of a special block based on 8 powerful loudspeakers. The block was placed outside of the test section but was connected with the surface vibrators by means of flexible pipes. The loudspeakers were controlled electronically and produce air pressure fluctuations which forced membrane oscillations with amplitudes of several dozen microns.

The experiments are performed at excitation of unsteady Görtler vortices with spanwise period of 8 and 12 mm and frequency from 2 to 14 Hz. At experimental conditions these parameters correspond approximately to most amplified Görtler modes. In the streamwise direction the main measurements were performed in range $x = 400 \div 1200$ mm that corresponds to Görtler numbers (based on the boundary layer displacement thickness) from 10 to 21.

Main set of measurements in each studied regime consisted of a set of hotwire spanwise scans performed at several streamwise locations downstream the disturbance source. During these measurements the hot-wire probe was positioned at a distance from the wall which corresponded to the disturbance amplitude maxima in wall-normal profiles. In addition, normal-to-wall profiles of disturbance amplitudes and phases were taken in the end of the measurement region and also just above the disturbance source (over the membrane center). The linearity of both the receptivity and the stability

mechanism under study was checked by repeating some measurements at different amplitudes of the surface vibrations. The shape of the vibrator-membrane oscillations was measured thoroughly (with the help of a high-accuracy laser displacement-measurement device) in order to represent the modeled surface non-uniformities in Fourier space required for correct analysis of the receptivity problem under study.

The performed measurements have shown that surface vibrations do excite in the boundary layer unsteady Görtler vortices. The data obtained allow as to determine experimentally the receptivity coefficients for excitation of Görtler modes by aerodynamical surface non-uniformities.

The work is supported by RFBR (grant № 10-01-00109).

2. A.V. Boiko et al., Steady and unsteady Goertler boundary-layer instability on concave wall, *European Journal of Mechanics B/Fluids* (2009), doi:10.1016/j.euromechflu.2009.11.001

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО СЛОЯ СМЕШЕНИЯ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ

Калугин В.Т., Стрижак С.В.
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва

В работе рассматривается задача о моделировании течения для случая обтекания обратного уступа дозвуковым потоком несжимаемого газа. Подобное течение возникает в различных устройствах, в том числе в камерах сгорания двигателей. Особенностью течения является образование крупномасштабных структур в слое смешения за уступом, который используется в качестве стабилизатора пламени. Расширение слоя смешения определяется динамикой развития крупных вихрей, которые образуются выше по течению и увеличиваются в результате слияния соседних вихрей и вовлечения в слой смешения вязкого газа из основного потока. Внутри крупномасштабных структур процесс смешения определяется мелкомасштабной турбулентностью.

Данная задача является хорошим тестовым примером и позволяет провести апробацию математической модели. Существуют экспериментальные данные для модели двумерной камеры сгорания для случая инертного и реагирующего потока. Данные получены с помощью лазерного доплеровского анемометра, а также шлирен-фотографий [1].

Решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замкнутых при помощи полуэмпирической модели турбулентности, оказывается неэффективным при моделировании течений с нестационарными

ми крупномасштабными вихревыми структурами. Для моделирования течения целесообразно использовать модель крупных вихрей. Крупномасштабные вихревые структуры рассчитываются при помощи интегрирования фильтрованных уравнений Навье-Стокса [2]. Для получения фильтрованных уравнений используется коробочный фильтр. Мелкие вихри, размер которых не превышает шага расчетной сетки, моделируются с помощью модели Смагоринского и модели на базе дифференциального уравнения для подсеточной кинетической энергии (1). Для дискретизации уравнений используется метод конечных объемов. Полученные уравнения для связи скорости и давления решаются итерационным алгоритмом PISO [3].

Рассматривается двумерная и трехмерная постановка. Расчеты выполнены для числа Рейнольдса $Re=22000$. Скорость потока на входе равна $U=13.3$ м/с. На входе расчетной области на средние значения накладываются случайные возмущения в виде белого шума. На стенке задаются условия непротекания и прилипания. На выходе задаются условия продолжения потока или неотражающие граничные условия. Расчетная схема имеет второй порядок точности. Сетка построена на базе шестигранников. В случае двумерного расчета сетка содержит 12225 ячеек, для трехмерного случая, соответственно, 244500 ячеек. Проводится анализ значения y^+ . Для решения полученных СЛАУ используется метод сопряженных градиентов. Расчетный шаг по времени равен $1.e-05$.

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \nabla \cdot (K \bar{U}) = \nabla \cdot \left[(\nu + \nu_{SGS}) \cdot \nabla K \right] - \varepsilon - \tau \cdot \bar{S} \quad (1)$$

В результате расчета получены значения компонент скорости, давления, подсеточной кинетической энергии, пульсационные составляющие, спектральные характеристики пульсации давления. Полученные данные по распределению поперечной и продольной компоненты скорости, профили интенсивности турбулентности для продольной компоненты скорости сравниваются с экспериментальными результатами. Расчет проводится с помощью программного кода OpenFOAM, который является средой программирования для задач механики сплошной среды [4].

Анимационная картина обтекания уступа имеет ярко выраженный характер нестационарного течения. Происходит периодический срыв крупномасштабных вихрей. Данная математическая модель может быть использована для моделирования пространственного обтекания тел с более сложной геометрией.

ЛИТЕРАТУРА.

- 1) Р.В. Питц, Дж.У. Дейли. Горение в турбулентном слое смешения за уступом. Аэрокосмическая техника. 1984. N7. с.74-82
- 2) Волков К.Н., Емельянов В.Н.. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: Физматлит. 2008. – 368 с.
- 3) Ferziger J.H., Peric M., Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, Berlin et al.: Springer, 2002. – 423p.
- 4) Weller H.G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. “A tensorial approach to computational continuum mechanics using object oriented techniques”, Computers in Physics, 1998. v.12, № 6. p. 620-631

MODELING OF A TURBULENT MIXING LAYER FORMED AT A REWARD-FACING STEP

Kalugin V.T., Strijhak S.V.
BMSTU, Moscow

This paper describes the development and validation steps of computational model for a turbulent flow formed at a reward-facing step. A subsonic incompressible gas is considered in the given example. The similar flow arises in various devices, including chambers of combustion engines. The main feature of a flow is a formation of large-scale structures in a mixture layer behind reward-facing step which is used as a flame stabilizer. The expansion of a layer of mixture is defined by dynamics of development of large structures which are formed above on a flow. These large structures increase as a result of merge of the neighbor vortices and involving in a layer of mixture of viscous gas from the basic stream. The mixture process in large-scale structures is defined by a small-scale turbulence.

The given problem is a good test example, as it allows to spend approbation of mathematical model. There are experimental data for a model of the two-dimensional chamber of combustion for a case of an inert and reacting flow. The data are received by means of LDA measurements and shliren-photos [1].

The decision of RANS equations, closed by means of semiempirical model of turbulence, appears inefficient at modeling of flows with non-stationary large-scale vortical structures. It is expedient to use Large Eddy Simulation for the current modeling. The large-scale structures pay off by means of integration of the filtered Navier-Stokes equations [2]. The box filter is used for the reception of the filtered equations. The small vortices, which size does not exceed a step of a settlement grid, are simulated by means of

Smagorinsky's model and model of one-equation eddy viscosity (1). The final volume method is used for discretisation of the transport equations. The received equations for velocity and pressure are solved by means of iterative PISO algorithm [3].

The two-dimensional and three-dimensional statements are considered. The calculations are executed for Reynolds number $Re=22000$. The inlet velocity of a flow is equal $U=13.3$ m/s. On an inlet of settlement area on average values casual indignations in the form of random noise are imposed. For the wall, conditions of no-slip impermeable wall are set. On the outlet, the conditions of continuation of flow or nonreflecting boundary conditions are set. The numerical scheme has the second-order of accuracy. The grid is constructed on base of hexahedrons. In case of two-dimensional calculation the grid contains 12225 cells, for three-dimensional accordingly 244500 cells. The value analysis of y^+ is carried out. The method of preconditioned conjugate gradients is used for the decision of received linear systems. The settlement step on time is equal $1.e-05$.

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \nabla \cdot (K \bar{U}) = \nabla \cdot [(\nu + \nu_{SGS}) \cdot \nabla K] - \varepsilon - \tau \cdot \bar{S} \quad (1)$$

As a result of calculation values a component of velocity, pressure, sub-grid kinetic energy, pulsation components, spectral characteristics of a pulsation of pressure are received. The obtained data on distribution cross-section and longitudinal components of velocity, profiles of intensity of turbulence for longitudinal components of velocity are compared to experimental results. The CFD code is based on OpenFOAM which is the programming tool for problems of continuum mechanics [4].

The animation picture of simulation has strongly pronounced character of a non-steady flow. There is a periodic failure of large-scale vortexes. The given mathematical model can be used for modeling of a spatial flow of bodies with more difficult geometry.

LITERATURE.

- 1) R.W. Pitz, J.W. Daily. Combustion in a turbulent mixing layer formed at a reward-facing step.
AIAA Journal 21-11,1983 p. 1565-1570
- 2) Volkov K.N. , Emeljanov V.N. Large Eddy Simulation in calculations of turbulent flows. – M: Fizmatlit. 2008. – 368 p.

3) Ferziger J.H., Peric M., Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, Berlin et al.: Springer, 2002. – 423p.

4) Weller H.G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. “A tensorial approach to computational continuum mechanics using object oriented techniques”, Computers in Physics, 1998. v.12, № 6. p. 620-631

РЕДУКЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО СЛЕДА К ОДНОМЕРНОЙ ЗАДАЧЕ

Капцов О.В., Шмидт А. В.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Рассмотрена трехмерная стационарная k -epsilon модель в приближении дальнего турбулентного следа в пассивно стратифицированной среде. Искомые величинами в данной модели являются кинетическая энергия турбулентности, скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, осредненный дефект плотности, дисперсия флуктуаций плотности. С помощью теоретико-группового подхода и метода линейных определяющих уравнений найдено представление для решений, позволяющее свести исходную модель к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Получены решения, удовлетворяющие всем краевым условиям. Важно отметить, что данные решения не являются автомодельными, но удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и имеющимися расчетами по полной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капцов О.В., Ефремов И.А., Шмидт А.В. Автомодельные решения модели второго порядка дальнего турбулентного следа// ПМТФ Т.49, №2, 2008, с.74-78.

2. Kaptsov O.V., Schmidt A.V., Non-invariant solutions of the three-dimensional semi-empirical model of the far turbulent wake//arXiv:0912.2890v2 [physics.flu-dyn], 11 p.

3. Ефремов И.А., Капцов О.В., Черных Г.Г. Автомодельные решения двух задач свободной турбулентности// Математическое моделирование т.21, № 12, 2009, с. 137-144.

REDUCTION OF THREE-DIMENSIONAL MODEL IN THE APPROXIMATION OF THE FAR TURBULENT WAKE TO ONE-DIMENSIONAL PROBLEM

Kaptsov O.V., Schmidt A.V.
Institute of Computational Modeling SB RAS

The three-dimensional standard k-epsilon model of turbulence in the approximation of the far turbulent wake behind a body of revolution in a passive stratified medium is considered. The sought quantities are the kinetic turbulent energy, kinetic energy dissipation rate, averaged density defect and density fluctuation variance. The full group of transformations admitted by this model is found. The model is reduced to the system of the ordinary differential equations due to similarity presentations obtained and B-determining equations method. System of ordinary differential equations satisfying natural boundary conditions was solved numerically. The solutions obtained agree with experimental data.

BIBLIOGRAPHY

1. Kaptsov O.V., Efremov I. A., Schmidt A.V., [Self-similar solutions of the second-order model of the far turbulent wake](#)// [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics](#), V.49, N2, 2008, p.74-78
2. Kaptsov O.V., Schmidt A.V., Non-invariant solutions of the three-dimensional semi-empirical model of the far turbulent wake//arXiv:0912.2890v2 [physics.flu-dyn], 11 p.
3. Efremov I. A., Kaptsov O.V., Chernihk G.G., Semi-similar solutions of two problems of free shear turbulent flows// [Mathematical modeling](#), V.21, N 12, 2009, c. 137-144.

ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТОЙЧИВОСТИ УСКОРЯЮЩЕЙСЯ СТРУИ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛ ПЛАВУЧЕСТИ

Карасева Л.А.
Институт Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

1. Постановка задачи и математическая модель.

В работе исследуется плоская вертикальная теплая струя над источником тепла, находящаяся в поле силы тяжести. Струя формируется следующим образом: в начальный момент движения нет,

включается нагревательный элемент, воздух прогревается и поднимается вверх под действием силы тяжести, со временем над источником тепла образуется струя нагретого воздуха.

Цели работы:

- определение основных характеристик струи (скорости, температуры, ширины струи) и сравнение полученных результатов для установившейся струи с решением для стационарной задачи;
- определение характеристик устойчивости ускоряющейся струи.

Задача решается численно в рамках нестационарных уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска. Определяющим параметром является число Грасгофа (Gr), характеризующее перепад температур (разность между температурой нагревательного элемента (источника тепла) и температурой окружающей среды). Число Прандтля, характеризующее свойства среды, а не течения, берется постоянным: $Pr=0,7$ (рассматривается воздушная струя). Использован конечно-разностный метод второго порядка точности при аппроксимации по пространству и полуневная схема Рунге-Кутты третьего порядка точности для интегрирования по времени.

При исследовании устойчивости внешние возмущения налагаются таким образом, чтобы получить симметричную моду для компоненты скорости, перпендикулярной оси струи (исследуются максимально неустойчивые моды).

2. Результаты. Основное течение.

Обнаружено, что после начального периода развития, наблюдается автомодельное поведение основных характеристик струи (компоненты скорости, направленной вдоль струи, ширины струи и температуры). Область автомодельного решения с течением времени расширяется. Выявлена зависимость скорости на оси струи, ширины струи и температуры на оси струи, от расстояния до источника тепла: эти характеристики течения пропорциональны расстоянию до источника тепла в степени $1/5$, $2/5$ и $3/5$, соответственно, независимо от числа Грасгофа (коэффициенты пропорциональности же зависят от числа Грасгофа). Найдены зависимости компоненты скорости, направленной вдоль оси струи и температуры струи от автомодельных переменных с точностью до коэффициентов, зависящих от числа Грасгофа.

Сравнение данного решения с решением задачи, полученным в рамках уравнений пограничного слоя, выявлена хорошая согласованность двух решений (совпадение функциональной зависимости основных характеристик от автомодельных переменных с точностью до коэффициентов, зависящих от числа Грасгофа).

3. Результаты. Характеристики устойчивости.

Изучены характеристики устойчивости свободной конвективной струи. Построена нейтральная кривая в плоскости частота внешних возмущений -число Грасгофа. Определены частоты наиболее неустойчивых мод. Показано, что длина волны и фазовая скорость увеличиваются с удалением от источника возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Предельные законы свободно-восходящих конвективных потоков, ЖЭТФ, 1937, т. 7, №12, с. 1463-1465;
2. Crane L. J., Thermal convection from a horizontal wire, ZAMP, 1959, vol.10, №5, pp 453-460;
3. Fujii T., Theory of the steady laminar natural convection above a horizontal line heat source, Int. J. Heat Mass Transfer, 1963, vol.6, №7, pp 597-606;
4. Мартыненко О.Г., Коровкин В.Н., Соковишин Ю.А. Теория плавучих струй и следов, Минск, Навука і тэхніка, 1991;
5. Шкадов В.Я., Некоторые методы и задачи теории гидродинамической устойчивости, Институт Механики МГУ, Научные труды, №25, 1973;
6. Шкадов В.Я., Запрянов З.Д., Течения вязкой жидкости, М., Изд-во Московского ун-та, 1984;
7. Nikitin N.V., Finite-difference method for incompressible Navier–Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates // Journal of computational physics, 2006, vol 217, pp 759-781;
8. Nikitin N.V., Third-order-accurate semi-implicit Runge–Kutta scheme for incompressible Navier–Stokes equations // International journal for numerical methods in fluids, 2006, vol 51, pp 221-233.
9. Дразин Ф., Введение в теорию гидродинамической устойчивости, М., Физматлит, 2005

РЕЗОНАНСНАЯ ПРИРОДА СЛАБОНЕЛИНЕЙНЫХ СТАДИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Качанов Ю.С.

ИТПМ СО РАН, Новосибирск

На линейных стадиях возникновения турбулентности в пристенных сдвиговых течениях начальный частотно-волновой спектр мод неустойчивости имеет второстепенное значение, ввиду выполнения принципа

суперпозиции и возможности практически полного описания процесса развития возмущений через эволюцию их фурье-компонент – так называемых нормальных мод неустойчивости. На нелинейных же стадиях развития использование спектрального подхода усложняется, и характер эволюции волн неустойчивости существенно зависит, в общем случае, от их начального спектра.

Слабонелинейная стадия эволюции возмущений характеризуется тем, что волны неустойчивости по-прежнему существуют в потоке и даже имеют профили амплитуд и фаз по нормали к стенке очень близкие к собственным функциям задачи линейной устойчивости. В то же время, скорости нарастания амплитуд этих волн начинают радикально отклоняться от линейных вследствие взаимодействия мод частотно-волнового спектра (включая самовоздействие) и начала искажения среднего потока. Характер межмодовых взаимодействий зависит от спектрального состава возмущений, что сильно усложняет задачу описания нелинейных стадий возникновения турбулентности.

Однако, несмотря на указанные трудности в последние годы был достигнут существенный прогресс в исследовании физической природы слабонелинейных стадий возникновения турбулентности в пристенных сдвиговых течениях; прежде всего в пограничных слоях, наиболее важных в аэродинамических приложениях. Оказалось, что существует очень сильный механизм слабонелинейных стадий перехода, который настолько преобладает над всеми остальными, что он доминирует при самых различных спектрах начальных возмущений и играет основную роль даже при широкополосных (сплошных) частотно-волновых спектрах. Это механизм волновых резонансов субгармонического типа, эффективно работающий в широчайшем диапазоне параметров основного потока и возмущений. Описанию удивительных свойств таких взаимодействий и их роли в порождении турбулентности и в оценке положения ламинарно-турбулентного перехода и посвящён данный доклад.

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-01-91951.

RESONANT NATURE OF WEAKLY-NONLINEAR STAGES OF TURBULENCE ORIGIN

Kachanov Y.S.
ITAM, Novosibirsk, Russia

At linear stages of turbulence origin in wall-bounded shear layers the initial frequency-wavenumber spectrum of instability modes is of secondary

significance because of satisfaction of the superposition principle and the possibility of almost complete description of the disturbance development process through evolution of their Fourier components – the so-called normal instability modes. In contrast, at nonlinear stages of development the use of the Fourier analysis gets more complicated and the character of the instability-wave evolution depends essentially, in general, on their initial spectrum.

The weakly-nonlinear stage of the disturbance evolutions is characterized by the following. The instability waves still exist in the flow and even have wall-normal amplitude and phase profiles, which are very close to eigenfunctions of the linear-stability problem. At the same time, the amplitude growth rates of these perturbations start to deviate radically from linear ones due to interactions of modes of the frequency-wavenumber spectrum (including self-interaction) and beginning of some base-flow distortions. The character of the intermodal interactions depends on spectral content of perturbations. This circumstance makes the problem of description of nonlinear stages of turbulence origin much more complicated.

However, in spite of the difficulties indicated above, a significant progress has been achieved during past years in investigations of physical nature of weakly-nonlinear stages of the turbulence origin occurred in wall shear layers, first of all in boundary layers which are of the most importance for aerodynamical applications. It turned out that there is a very strong mechanism of weakly-nonlinear stages of transition, which dominates over other mechanisms so significantly that it becomes predominant at various very different spectra of initial disturbances and plays prime role even in cases of broadband (continuous) frequency-wavenumber spectra. This is the mechanism of subharmonic-type resonances, which can be efficient in a very wide range of the base-flow and disturbance parameters. The present paper is devoted to description of properties of these interactions and of their role in the turbulence production and in estimation of the laminar-turbulent transition location.

This work is supported by RFBR. Grant No 08-01-91951.

УСТОЙЧИВОСТЬ И УПРАВЛЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯМИ ГИПЕРЗВУКОВОГО УДАРНОГО СЛОЯ

Кириловский С.В., Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С.
Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН
Новосибирский государственный университет

При движении летательного аппарата с высокой скоростью в верхних слоях атмосферы течение в области его передних кромок реализуется в виде вязкого ударного слоя (ВУС). Исследование развития возмущений и понимание механизмов неустойчивости ВУС является необходимым условием разработки эффективных методов управления ламинарно-турбулентным переходом при гиперзвуковом обтекании летательных аппаратов.

В работе выполнено комплексное расчетно-экспериментальное исследование характеристик возмущений, генерируемых в гиперзвуковом ударном слое на пластине под воздействием акустических возмущений внешнего потока и возмущений, вводимых в ВУС с поверхности модели. Предложена методика активного (интерференционного) управления интенсивностью пульсаций плотности в ударном слое на пластине, которая подтверждена расчетами и реализована экспериментально.

Расчетное исследование выполнено методом прямого численного моделирования (ПЧМ) на основе полных двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса с использованием схем сквозного счета высокого порядка точности [1]. При численном моделировании задачи о взаимодействии ВУС с внешними акустическими возмущениями к основному течению на входной границе добавлялась одна или несколько плоских монохроматических звуковых волн с амплитудой A , частотой f и углом распространения θ . Возмущения типа периодического вдува-отсоса, генерируемые на поверхности тела вблизи передней кромки, моделировались заданием граничного условия для поперечного массового расхода на некотором участке поверхности пластины

ПЧМ выполнено в широком диапазоне параметров потока и параметров взаимодействия возмущений с ударным слоем. В частности, изучена восприимчивость ударного слоя к акустическим возмущениям медленной и быстрой моды во внешнем потоке для числа Маха 12, 16 и 21, числа Рейнольдса $Re_L = 1.44 \cdot 10^5$, $2.88 \cdot 10^5$ и $4.32 \cdot 10^5$ в диапазоне температурного фактора поверхности от 0.08 до 0.5, углов распространения акустических волн $\theta = -10^\circ - 80^\circ$, частот внешних возмущений $f = 10 - 80$ кГц.

Также исследованы особенности взаимодействия возмущений, создаваемых источником типа «вдув-отсос», с ВУС для широкого диапазона определяющих параметров, включающих вариации амплитуд пульсаций вдува-отсоса и положение источника на пластине.

Несмотря на существенно различный характер возбуждения – акустическая волна воздействует на ВУС по всей его длине, тогда как при вдуве-отсосе источник возмущений локализован вблизи передней кромки пластины – возникающие в ВУС возмущения пространственно подобны. Это позволяет при условии подбора соответствующей фазы и амплитуды вдува-отсоса реализовать интерференционную схему управления интенсивностью пульсаций в ВУС.

Данные численного моделирования для некоторых условий обтекания были сопоставлены с результатами измерений в ударном слое на пластине под нулевым углом атаки, выполненных в гиперзвуковой азотной аэродинамической трубе Т-327А ИТПМ СО РАН при числе Маха 21 и числе Рейнольдса $Re_L = 1.44 \cdot 10^5$. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность подавления (усиления) возмущений, генерируемых в гиперзвуковом ударном слое пластины внешними акустическими волнами быстрой моды, возмущениями, вводимыми в ударный слой с поверхности модели. Для введения в ударный слой контролируемых периодических возмущений использован цилиндрический ко-сосрезный свисток. Акустические возмущения в свободном гиперзвуковом потоке аэродинамической трубы создавались мощным электрическим разрядом в форкамере, момент начала которого определялся импульсом, синхронизованным с пульсациями давления в резонаторе свистка. Этим осуществлялась привязка друг к другу фазы внешних и внутренних контролируемых периодических возмущений. Разница фаз между ними могла меняться путем задержки времени формирования запускающих разряд импульсов относительно сигнала с делителя частоты. Измерения в ударном слое были выполнены невозмущающим поток методом электронно-пучковой флюоресценции азота.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №09-08-00557), АЦВП (проекта №2.1.1/3963) и программы фундаментальных исследований Президиума РАН №11 (проект №9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев А.Н., Поплавская Т.В., Хотяновский Д.В. Применение схем высокого порядка точности при моделировании нестационарных сверхзвуковых течений. Математическое моделирование. 2007. Т. 19. N 7. С. 39-55.

STABILITY AND CONTROL OF DISTURBANCES IN A HYPERSONIC SHOCK LAYER

Kirilovskii S.V., Mironov S.G., Poplavskaya T.V, and. Tsyryulnikov I.S
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk State University

The flow near the leading edges of a flying vehicle moving with a high velocity in the upper atmospheric layers has the type of a viscous shock layer (VSL). Studying the evolution of disturbances and understanding the mechanisms of VSL instability are necessary conditions for the development of effective methods for controlling the laminar-turbulent transition in the hypersonic flow around various vehicles.

The paper describes a comprehensive numerical and experimental study of the characteristics of disturbances generated in a hypersonic shock layer on a flat plate by acoustic free-stream perturbations and of disturbances introduced into the VSL from the model surface. A method of active (interference) control of intensity of density fluctuations in the shock layer on a flat plate was proposed, verified by computations, and implemented experimentally.

The numerical study is performed by the method of direct numerical simulation (DNS) on the basis of full two-dimensional unsteady Navier-Stokes equations with the use of high-order shock-capturing schemes [1]. In numerical simulations of the problem of VSL interaction with external acoustic perturbations, the input conditions of the main flow are supplemented with one or several plane monochromatic acoustic waves with an amplitude A , frequency f , and propagation angle θ . Perturbations (periodic blowing/suction) generated on the body surface near the leading edge are modeled by imposing a boundary condition for the transverse mass flow on a certain area of the plate surface.

Direct numerical simulations are performed in wide ranges of flow parameters and parameters of interaction of disturbances with the shock layer. In particular, the receptivity of the shock layer to slow-mode and fast-mode acoustic free-stream perturbations is studied at Mach numbers 12, 16, and 21, Reynolds numbers $Re_L = 1.44 \cdot 10^5$, $2.88 \cdot 10^5$, and $4.32 \cdot 10^5$ with the temperature factor of the surface varied from 0.08 to 0.5, angles of propagation of acoustic waves $\theta = -10^\circ$ - 80° , and frequencies of external perturbations $f=10$ - 80 kHz. The specific features of interaction of disturbances generated by a blowing/suction source with the VSL are also considered in a wide range of

the governing parameters, including variations of the amplitudes of the blowing/suction perturbations and the source location on the plate.

Despite a significantly different character of excitation (the acoustic wave affects the entire VSL length, whereas the blowing/suction source is localized near the leading edge of the flat plate), the disturbances arising in the VSL are spatially similar. For this reason, the interference scheme of controlling the intensity of oscillations in the VSL can be realized with an appropriate choice of the blowing/suction phase and amplitude.

The DNS results for some flow conditions are compared with the data measured in the shock layer on a flat plate at a zero angle of attack in a T-327A hypersonic nitrogen wind tunnel based at ITAM SB RAS at the Mach number of 21 and Reynolds number $Re_L = 1.44 \cdot 10^5$. The possibility of suppression (amplification) of disturbances generated in the hypersonic shock layer on the plate by fast-mode external acoustic waves and by perturbations introduced into the shock layer from the model surface is experimentally demonstrated for the first time. An obliquely cut cylindrical whistle is used to introduce controlled periodic perturbations into the shock layer. The acoustic perturbations in the hypersonic free stream of the wind tunnel are generated by a powerful electric discharge in the settling chamber; the instant of this discharge is determined by a pulse synchronized with pressure fluctuations in the whistle cavity. In this manner, the phases of external and internal controlled periodic perturbations are coupled. The phase difference can be changed by delaying the formation of pulses initiating the discharge with respect to the signal from the frequency divider. The measurements in the shock layer are performed by the method of electron-beam fluorescence of nitrogen, which does not disturb the flow.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 09-08-00557), by the Analytical Development Targeted Program (Project No. 2.1.1/3963), and by the Presidium of the Russian Academy of Sciences (Program for Basic Research No. 11/9).

REFERENCES

1. *Kudryavtsev, A.N., Poplavskaya, T.V., Khotyanovsky, D.V.* Application of high-order schemes in modeling unsteady supersonic flows. *Mat. Model.* 2007, V. 19, No. 7, pp. 39-55.

НЕЯВНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЯЗКИХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Денисова О.В., Зеленский Д.К.
Российский Федеральный Ядерный Центр
Всероссийский Научно-Исследовательский Институт
Экспериментальной Физики
Институт Теоретической и Математической Физики, г. Саров

Работа посвящена разработке неявной методики расчета двумерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа. Методика интегрирования двумерных уравнений Навье-Стокса основана на трехслойной разностной схеме второго порядка точности и методе Годунова. Схема записывается в дельта-форме. Неявный оператор факторизуется по координатным направлениям. Для аппроксимации производных, описывающих конвективный перенос, в неявном операторе используются односторонние разности в зависимости от собственных значений матрицы Якоби. Слагаемые, описывающие вязкие эффекты, аппроксимируются центральными разностями. С целью повышения точности аппроксимации пространственных производных в явном операторе используется ряд реконструкций, основанных на линейном и кусочно-параболическом распределении параметров по ячейкам разностной сетки, удовлетворяющих условию монотонности. Потоки на гранях ячеек находятся с использованием решения задачи Римана. Для численного решения разностных уравнений используются матричные либо скалярные прогонки. Возможности методики демонстрируются на задачах расчета обтекания лопаток турбин. Для численного моделирования с учетом пограничного слоя в расчетной области на основе блочного подхода строится О-Н сетка с использованием геометрического метода и метода конформного отображения. Приводится сравнение результатов расчетов от параметров разностной схемы и алгоритмов реконструкции решения. Проводится сравнение результатов расчетов турбулентных течений по различным моделям турбулентности с данными эксперимента. Приведено обобщение методики на трехмерный случай, результаты расчета трехмерных турбулентных течений, а также способ распараллеливания вычислений. Представлены результаты трехмерных параллельных расчетов в межлопаточном канале.

IMPLICIT COMPUTATIONAL TECHNIQUE OF VISCOUS TURBULENT FLOWS

Kozelkov A.S., Deryugin Yu.N., Denisova O.V., Zelenski D.K.
Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute
of Experimental Physics
Institute of Theoretical and Mathematical Physics, Sarov

The paper dwells on the implicit computational technique of 2D turbulent flows of viscous compressible gas. The 2D Navier-Stokes equation integration technique is based on three-level difference scheme of the second order of accuracy and Godunov method. The scheme is written in delta form. The implicit operator is factorized in coordinates. One-sided differences are used for derivative approximation describing convective transport with implicit operator according to the eigenvalue of Jacobian matrix. The centered difference approximates the terms describing viscous effects. The number of reconstructions based on linear and parabolic piecewise computational grid cell distributions of parameters satisfying monotony condition is used to increase the accuracy of an approximation of space derivatives in explicit operator. Cell edge flows are found with Riemann problem. The difference equations are solved either with matrix or with scalar runs. The technique capabilities are shown with flow through the blades problems. O-H grid is plotted in terms of block approach with geometrical method and conformal mapping for numerical simulation. The comparison of computational results is given for difference scheme parameters and solution reconstruction algorithms. Given here is comparison of computational results of turbulent flows using different turbulent models and experimental data. The extension of the technique is given for 3D case, as well as computational results of 3D turbulent flows and parallelization method of computations. Given here are the results of 3D parallel computations in blade channel.

ПРОБЛЕМА КУЭТТА-ТЕЙЛОРА ДЛЯ ПРОНИЦАЕМЫХ ЦИЛИНДРОВ

Колесов В. В., Романов М. Н.
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Исследуются течения вязкой жидкости между двумя проницаемыми вращающимися бесконечными концентрическими цилиндрами при наличии радиального потока, направленного от одного цилиндра к другому. Основной режим в данной задаче представляет собой круговое течение Куэтта с ненулевой радиальной компонентой поля скорости.

Рассчитаны точки пересечения нейтральных кривых, разделяющих области устойчивости и неустойчивости основного режима. Методами теории бифуркаций в сочетании с компьютерными вычислениями найдены разнообразные вторичные режимы, возникающие вблизи пересечения бифуркаций рождения вихрей Тейлора и азимутальных волн.

THE COUETTE-TAYLOR PROBLEM FOR PERMEABLE CYLINDERS

Kolesov V. V., Romanov M. N..
Southern Federal University, Rostov-on Don.

The flows of a viscous fluid contained between two permeable rotating infinite concentric cylinders with a radial through-flow are investigated. The main regime in this problem is the circular Couette flow with nonzero radial velocity field component. It is calculated neutral curves, separating area of stability of the main regime from area of its instability. The methods of the theory of bifurcations and numerical analysis have allowed finding the secondary regimes in a vicinity of the intersection point of the bifurcations producing Taylor vortices and azimuthal waves.

ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА КОЛЕБАНИЯМИ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА, ДВИЖУЩЕГОСЯ В ДОЗВУКОВОЙ СТРУЕ

Копьев В.Ф., Фараносов. Г.А.
ФГУП ЦАГИ, Акустическое отделение

Проблема излучения звука турбулентными струями остается одной из наиболее актуальных в аэроакустике. Основные достижения на этом направлении связаны с применением аналогии Лайтхилла [1] и ее последующих модификаций, в которых устанавливается соответствие между реальной ситуацией (излучение звука турбулентным потоком) и некоей модельной системой, где турбулентный поток заменяется определенным распределением источников, наложенным на базовое течение. Преимущество аналогий заключается в том, что к ним применимы методы классической акустики. К настоящему моменту, наряду с тем фактом, что значительный вклад в тензор напряжений Лайтхилла вносит мелкомасштабная турбулентность, известно, что в турбулентной струе имеются крупномасштабные когерентные образования, которые, в зависимости от скорости истечения струи и числа Рейнольдса, могут иметь вид отдель-

ных вихревых колец (низкоскоростные струи) [2] или пакетов волн неустойчивости (высокоскоростные струи) [3]. Квазидетерминированный характер таких структур позволяет построить аналитические теории излучения ими шума.

В частности, для случая невысоких дозвуковых скоростей истечения струи, когда крупномасштабные структуры выглядят как вихревые кольца, в [2] была проведена оценка вклада их излучения в общий шум струи. Оказалось, что мощность шума вихревых колец в некоторых полосах частот может составлять до 40% от общей акустической мощности струи. Оценка была сделана на основе теории излучения шума собственными колебаниями вихревого кольца, помещенного в неподвижную среду [4]. Тот факт, что кольцо находилось в струе, был учтен с помощью введения конвективного множителя, корректирующего соответствующим образом диаграмму направленности излучения одиночного кольца в неподвижной на бесконечности жидкости.

В данной работе задача об излучении звука вихревым кольцом, находящемся в дозвуковой струе, решается в более точной постановке, а именно учитывается не только эффект движения кольца (конвекция), но и эффект взаимодействия излучаемого им шума со средним течением струи (рефракция), а также эффект конечности времени жизни кольца.

В модельной задаче реальная струя, истекающая из сопла, заменяется бесконечной цилиндрической струей с тангенциальным разрывом скорости вместо слоя смешения. Для построения решения оказывается удобным, с точки зрения акустики, заменить такую струю с вихревым кольцом на дискретный набор одинаковых вихревых колец, которые создают среднее течение, близкое к течению цилиндрической струи.

Показано, что в рамках той точности, с которой построена теория излучения звука собственными колебаниями уединенного кольца, кольцо в низкоскоростной струе может считаться таким же источником звука, но помещенным не в покоящуюся жидкость, а в некое среднее течение. Таким образом, задача сводится к учету эффектов рефракции и конечности времени жизни для известного акустического компактного источника. Данная модельная задача эффективно решается стандартными методами и позволяет получить в явном виде диаграммы направленности излучения различных азимутальных мод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lighthill, M.J., "On Sound Generated Aerodynamically: I. General Theory". Proc. Royal Soc. London, ser. A, Vol. 211, No. 1107, 20 Mar. 1952, pp. 564-587.
2. Kopiev, V.F., Zaitsev, M.Yu., Chernyshev, S.A., Ostrikov, N.N., "Vortex ring input in subsonic jet noise", Int. J. of Aeroacoustics, Vol. 6, No. 4, 2007, pp. 375-405.
3. Tam C.K.W., Burton D.E., "Sound Generated by Instability Waves of Supersonic Flows," J. Fluid Mech, Vol. 138, 1984, pp. 249-271.
4. Kopiev, V. F., Chernyshev, S. A., "Vortex ring eigen-oscillation as a source of sound", J. Fluid Mech., Vol. 341, 1997, pp. 19-57.

ОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБТЕКАНИИ КУБИЧЕСКИХ КАВЕРН ЛАМИНАРНЫМ ПОТОКОМ

Краснопольский Б.И.

Институт Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Задача обтекания каверн представляет практический интерес для широкого круга приложений в науке и технике. Одним из актуальных направлений исследований является исследование интенсификации теплообмена с каверной. Это направление имеет обширный диапазон применений в областях строительной аэродинамики и технической физики.

В представленной работе приведены результаты численного исследования теплообмена при обтекании кубических каверн. Рассмотрено течение вязкой несжимаемой теплопроводной жидкости (пассивный перенос тепла) в области, содержащей фрагмент канала с кубической каверной на одной из его граней. Для такой конфигурации расчетной области исследовано влияние различных параметров ламинарного натекающего потока на интенсификацию теплообмена с дном каверны.

Для ламинарного профиля скорости Блазиуса пограничного слоя с периодическими возмущениями по толщине пограничного слоя на входе исследовано влияние на устойчивость течения таких параметров потока, как частота возмущений и толщина пограничного слоя натекающего потока. Проведенные расчеты выявили существенную зависимость интегральных потоков тепла на дне каверны от частот возмущений в натекающем потоке. Определен диапазон частот возмущений, приводящий к такой интенсификации. Исследование устойчивости слоя смешения между каверной и основным потоком показало, что частоты, приводя-

щие к интенсификации теплообмена, по крайней мере для толстых слоев смешения, определяются устойчивостью формирующегося слоя смешения [1]. Изучаются механизмы, приводящие к такой интенсификации.

Для невозмущенного профиля скорости Блазиуса на входе исследована зависимость интегральных характеристик теплообмена с каверной от скорости основного потока (числа Рейнольдса). Проведенное сопоставление показало хорошее согласование экспериментальной [2] и расчетной зависимостей числа Нуссельта от числа Рейнольдса.

Работа была поддержана грантом РФФИ №09-08-00390-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.Я. Герценштейн, Б.И. Краснопольский. О влиянии частоты возмущений и толщины пограничного слоя на теплообмен при обтекании кубической каверны // Известия Российской Академии Наук, Механика жидкости и газа, 2010, №1 (в печати).

2. H. Yamamoto, N. Seki, S. Fukusako. Forced convection heat transfer on a heated bottom surface of cavity with different wall-height // Heat and Mass Transfer. 1983. V. 17. P. 73-83.

THE HEAT TRANSFER INTENSIFICATION IN THE CUBIC CAVITIES WITH LAMINAR INCOMING FLOW

Krasnopolsky B.I.

Institute of mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow

The problem of the flow over the cavities is of interest for a wide range of scientific and engineering applications. The one of the areas of research, that can be applicable in building aerodynamics and technical physics, is the investigation of heat transfer intensification from the bottom of the cavities.

In the present work the results of the numerical heat transfer modeling in the cubic cavities are presented. The viscous heat-conducting incompressible flow (passive heat transfer) was investigated in the domain of the fragment of the channel with the cavity at the one of the walls. The influence of the different parameters of the laminar incoming flux on heat transfer intensification from the bottom of the cavity is discussed.

The influence of the incoming flow parameters (the frequency of the perturbations, boundary layer thickness) on the flow stability was investigated for laminar boundary layer Blasius velocity profile with periodic perturbations in the boundary layer thickness at the inlet. The calculations showed that the integral heat flux at the bottom of the cavity depend on the frequency of the

incoming boundary layer perturbations. The range of the frequencies, that lead to the heat transfer intensification was determined. The further analysis demonstrated, that the frequencies that correspond to these effects, are determined by the stability of the shear layer between the cavity and the main channel [1]. The mechanisms that lead to the observed intensification, are of interest.

The dependency of the integral heat transfer characteristics at the bottom of the cavity on the velocity of the main channel flow (Reynolds number) was investigated for unperturbed Blasius velocity profile at the inlet. The numerical dependency of the averaged Nusselt number on the Reynolds number is in a good agreement with the experimental one [2].

The work was supported by Russian Foundation for Basic Research under the Grant No. 09-08-00390-a.

REFERENCES

1. S.Ya. Gertsenstein, B.I. Krasnopolsky. Influence of the perturbation frequency and boundary layer thickness on heat transfer in flow over the cubic cavity // Fluid Dynamics, 2010 (in press).

2. H. Yamamoto, N. Seki, S. Fukusako. Forced convection heat transfer on a heated bottom surface of cavity with different wall-height // Heat and Mass Transfer. 1983. V. 17. P. 73-83.

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ДВУХДИФУЗИОННОЙ КОНВЕКЦИИ

Кузнецова Д.В., Сибгатуллин И.Н.

Механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Рассматриваются течения в слое жидкости с постоянными значениями температуры и концентрации примеси на границах.

Показаны особенности переходных режимов в случае, когда коэффициент теплового расширения зависит от температуры и меняет знак. Такие режимы течений часто встречаются в природных водоёмах и могут сильно отличаться от обычной конвекции.

Анализируются устойчивость периодических течений и переход к стохастическим течениям в плоском случае. Рассматривается устойчивость трехмерных пространственных структур.

Обсуждается применимость методов осреднения.

Работа поддержана грантом РФФИ 09-08-00390-a.

TRANSITIONAL MODES OF DOUBLE-DIFFUSIVE CONVECTION

Kuznetsova D.V., Sibgatullin I.N.

Faculty of Mechanics and Mathematics of Moscow State University
Institute of Mechanics of Moscow State University

Flows of fluid with constant temperature and concentration of admixture on boundaries are considered.

Peculiarities of transitional modes are shown in the case when thermal expansion coefficient depends on temperature and changes sign. These types of motions can be seen in natural reservoirs and can be very different from ordinary convection.

Stability of periodical solutions and transition to stochastic flows are analyzed in plane case. Stability of three-dimensional structures is studied.

Applicability of different methods of averaging is discussed.

The work was partially supported by RFFI Grant 09-08-00390-a.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В СЛОЕ НЕЛИНЕЙНО УПРУГОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ, БЛИЗКИХ К РЕЗОНАНСУ

Куликовский А.Г.

Рассматриваются плоские одномерные волны малой амплитуды, распространяющиеся поперек слоя несжимаемой слабоанизотропной упругой среды, отражаясь поочередно от его границ. Колебания вызваны малым периодическим (или близким к периодическому) внешним воздействием на одну из границ слоя, когда период внешнего воздействия близок к периоду собственных колебаний слоя. Одна из границ упругого слоя неподвижна, а другая совершает малое заданное двумерное движение в своей плоскости. В такой околорезонансной ситуации проявляются нелинейные эффекты, которые могут накапливаться с течением времени.

Все величины представляются зависящими как от текущего времени, изменение которого при рассматриваемом подходе ограничивается одним периодом, так и от "медленного" времени, для которого малой величиной служит один период текущего времени. Эволюция решения, описывающего один период колебаний, происходит при изменении медленного времени, а роль текущего времени аналогична роли пространственной переменной. Получена система уравнений, описывающая мед-

ленное изменение функций, которые характеризуют колебания среды, на каждом периоде внешнего воздействия.

Эта система уравнений получена методом осреднения за период нелинейных членов и учитывает влияние граничных условий. Она содержит частные производные по текущему и медленному времени, а ее коэффициенты зависят от осредненных по периоду текущего времени значений функций, характеризующих решение. Уравнения имеют гиперболический тип и их решения могут быть как непрерывными, так и содержать слабые и сильные разрывы.

Получены соотношения на разрывах и сформулировано условие эволюционности. Установлена аналогия с разрывами, распространяющимися в безграничной среде.

Рассмотрены две возможные постановки задач. В первой постановке определяется, каким должно быть внешнее воздействие, чтобы нелинейная эволюция колебаний или периодические колебания происходили по желаемому (заранее заданному) закону. Во второй постановке считается заданным периодическое движение одной из границ. Показано, что внутри слоя может сформироваться стационарное, не меняющееся от периода к периоду решение как непрерывное, так и содержащее разрывы компонент деформации и скорости.

Качественно описаны периодические решения, а также механизм образования разрывов.

Указаны условия существования незатухающих колебаний при отсутствии внешних воздействий.

Установлена аналогия между решениями полученных уравнений и нелинейными волнами, распространяющимися по безграничной одномерной упругой среде.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Ланда П.С.

Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова

При решении задачи о нарастании случайных возмущений в затопленных струях мы обнаружили неожиданное явление. Наши численные исследования линеаризованного уравнения Навье-Стокса для отклонений от стационарного решения показали, что при фиксированном значении частоты возбуждения пространственная неустойчивость возникает для непрерывного ряда волновых чисел, заключенных в конечном диа-

пазоне. Каждому из этих волновых чисел соответствует свой коэффициент пространственного усиления. Отсюда можно сделать вывод, что широко распространенное представление о возникновении турбулентности как о постепенном увеличении числа возбуждаемых и усиливаемых дискретных мод, неверно. Согласно нашим расчетам после перехода через пороговое значение скорости потока сразу возникает непрерывный пространственный спектр турбулентности даже при одночастотном временном возбуждении, причем форма этого спектра изменяется по мере распространения.

РАЗВИТИЕ НОВОГО КОМПЛЕКСНОГО ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ВЯЗКОЙ НЕСУЩЕЙ ФАЗОЙ

Лебедева Н.А.

Институт механики МГУ, Москва

Работа посвящена развитию нового комплексного полностью лагранжева подхода, позволяющего с контролируемой точностью находить все параметры плоских нестационарных дисперсных течений с вязкой несущей фазой. Предлагаемый подход является комбинацией полного лагранжева метода для параметров дисперсной среды и бессеточного вихревого метода для уравнений Навье-Стокса. Полный лагранжев подход [1-2] основан на решении уравнения неразрывности дисперсной фазы в лагранжевых координатах и на привлечении дополнительных уравнений для компонент якобиана перехода от эйлеровых к лагранжевым переменным. Такой метод позволяет свести задачу вычисления всех параметров дисперсной фазы (включая концентрацию) к решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений на выбранных (рассчитываемых одновременно) траекториях частиц. Бессеточные методы вязких дискретных вихрей [3] обычно применяется для расчета двумерных нестационарных вязких течений чистой жидкости и заключается в решении уравнений переноса и диффузии завихренности в лагранжевых координатах и восстановлении поля скорости несущей фазы с помощью интегральной формулы Био-Савара. При сочетании этих двух методов задача о нахождении параметров несущей и дисперсной фаз сводится в основном к решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка. Комбинируя на каждом временном шаге процедуру вычисления поля скоростей несущей фазы по методу

вязких вихрей и процедуру полного лагранжева метода для нахождения полей скоростей и концентрации дисперсной фазы вдоль траекторий движения частиц, вычисляются все параметры исследуемого течения на лагранжевой сетке.

Предлагаемый метод реализует одновременное моделирование движения несущей и дисперсной фаз и позволяет с контролируемой точностью проводить численные расчеты нестационарных вязких дисперсных течений с множественными пересечениями траекторий частиц и мезомасштабными зонами аккумуляции примеси. Кроме того, данный метод делает возможным детальное изучение структуры локальных областей аккумуляции и особенностей поля числовой концентрации частиц. Новый подход учитывает различные схемы межфазного взаимодействия, что позволяет проводить исследования дисперсных течений в широком диапазоне определяющих параметров, при различных соотношениях плотностей фаз. Апробация метода проведена на примере вязкого дисперсного течения, индуцированного в начальный момент прямой вихревой нитью так, что течение несущей фазы представляет собой дискретный аналог вихря Ламба-Озеена. Для различных значений определяющих параметров изучены эволюция начального однородного распределения частиц и области предпочтительной аккумуляции дисперсной примеси.

Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы” (проект 2.1.1/1399), гранта президента РФ для поддержки молодых ученых – кандидатов наук (№ МК-622.2009.1) и гранта РФФИ (проект 08-01-00195).

ЛИТЕРАТУРА

1. Osipov A.N. Lagrangian modeling of dust admixture in gas flows// *Astrophysics and Space Science*. 2000. V. 274. PP. 377–386.
2. Осипов А.Н. Развитие лагранжева подхода для моделирования течений дисперсных сред // В сб.: Проблемы современной механики. К 85-летию со дня рождения академика Г.Г. Черного. М.: Изд. МГУ, 2008. С. 390–407.
3. Cottet G., Koumoutsakos P. *Vortex Method: Theory and Practice*. Cambridge. University Press. 2000. 320 p.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОНОВ ВО ВНУТРИТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЕ КОНВЕРГЕНЦИИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Мингалев И.В.⁽¹⁾, Астафьева Н.М.⁽²⁾, Орлов К.Г.⁽¹⁾, Мингалев В.С.⁽¹⁾,
Мингалев О.В.⁽¹⁾

(1) Полярный геофизический институт Кольского
научного центра РАН.

(2) Институт космических исследований РАН.

Механизмы формирования циклонических вихрей в тропической атмосфере Земли — во внутритропической зоне конвергенции, ВЗК — исследуются при помощи численного моделирования в рамках полной системы уравнений газовой динамики с учетом переноса инфракрасного излучения, фазовых переходов водяного пара в микрокапли воды и частицы льда и с учетом оседания этих капель и частиц льда в поле силы тяжести. Для моделирования использовалась созданная авторами 3-мерная модель циркуляции атмосферы в области, являющейся частью шарового слоя над ограниченным участком земной поверхности. В настоящей работе представлены результаты, полученные в области с размерами: по высоте — от поверхности Земли до высоты 15 км, по долготе — 32 градуса, а по широте — 25 градусов (такая область, например, полностью охватывает тропическую часть тропосферы над Атлантикой); использовалось разрешение 200 м по высоте и 0.04 градуса по долготе и широте (около 40 м). В созданной модели учитываются процессы нагрева-охлаждения воздуха за счет поглощения-испускания инфракрасного излучения, а также за счет фазовых переходов водяного пара, которые играют важную роль; учитывается также оседание в поле силы тяжести микрокапель воды и частиц льда, образовавшихся в результате фазовых переходов пара. Результаты численного моделирования показали, что циклонические возмущения возникают при достаточно сильных изгибах внутритропической зоны конвергенции и только при учете как вертикального, так и меридионального переноса воздушных масс в начальных и граничных условиях. В качестве примера в докладе приводятся картины развития циклонических возмущений с интервалом в три часа, полученные с помощью моделирования. Проводится сравнение полученных результатов с данными микроволнового спутникового мониторинга — глобальными радиотепловыми полями Земли из электронной коллекции GLOBAL-Field (<http://www.iki.rssi.ru>), позволяющими изучать структуру атмосферных движений в широком диапазоне пространственно-временных масштабов (от синоптических до междугодовых и от сотен

километров до планетарных). Исследование физических механизмов образования циклонических возмущений важно как для теоретических, так и для практических целей, поскольку позволяет создать эффективную методику раннего предсказания формирования катастрофических ураганов над тропическими районами океанов, основанную на анализе данных микроволнового спутникового мониторинга. Работа выполнена при поддержке Программы №16 Президиума РАН.

**ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛИРОВАНИЯ УДЕРЖИВАЮЩИХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ И НЕНЬЮТОНОВСКИХ СВОЙСТВ
ЖИДКОСТИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ
УСТОЙЧИВОСТЬ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ
В КАПИЛЛЯРНЫХ ПЛЕНКАХ, ДВИЖУЩИХСЯ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ СИЛ**

Могилевский Е.И., Шкадов В.Я.
Механико-математический факультет
МГУ имени М.В. Ломоносова

В работе рассматриваются некоторые обобщения классической задачи о стекании пленки вязкой жидкости по вертикальной плоскости под действием силы тяжести [1]. Изучаются следующие задачи: влияние неоднородности поля массовых сил, ускоряющих пленку, на примере растекания по криволинейному вращающемуся диску; изменение параметров течения при наличии малых неровностей (точечных или периодических) на твердой поверхности; влияние неньютоновских свойств среды на характеристики течений по гладким поверхностям и поверхностям с неровностями.

Для математического описания стационарного течения и нелинейных волновых режимов используются обобщения системы эволюционных уравнений для интегральных характеристик пленки, предложенной в [2] для описания длинных волн в слоях малой толщины. Для неньютоновской жидкости эта система уравнений имеет вид:

$$h_t + q_x = 0 \quad (1)$$

$$q_t + \frac{6}{5} \left(\frac{q^2}{h} \right)_x = \frac{1}{5\delta} \left(hh_{xxx} + h - \frac{q}{h^2} \frac{\eta \left(\frac{q^2}{h^4} I_{20} \right)}{\eta(I_{20})} \right) 0 \quad (2)$$

где h , q – локальная толщина и расход жидкости, t , x – время и продольная координата, δ – параметр подобия, $\eta(I_2)$ – безразмерный коэффициент вязкости, I_{20} – значение второго инварианта тензора скоростей деформаций на твердой поверхности при стационарном безволновом решении. При исследовании линейной устойчивости также используется обобщенное уравнение Орра-Зоммерфельда.

При описании течения по вращающемуся криволинейному диску уравнения (1) – (2) могут быть использованы для описания развития осесимметричных возмущений, с учетом того, что параметр подобия δ зависит от расстояния от точки наблюдения до оси вращения, а рост возмущений за счет неустойчивости конкурирует с уменьшением толщины за счет растекания. Определены значения параметров, при которых профилирование диска приводит к стабилизации течения [3].

Для описания течения по плоскости с неровностями, размеры которых сравнимы с толщиной пленки, а продольный размер много больше поперечного, в правую часть (2) добавляется член, пропорциональный толщине пленки и зависящий от производных формы твердой поверхности. Изучено стационарное течение пленки и нелинейные волновые режимы стекания [4].

Учет неньютоновских свойств среды приводит к изменению вида диссипативного (последнего) члена в (2), который зависит от реологического закона. Рассматривается степенной закон вязкости и модель Эйринга. Сравниваются результаты решения спектральной задачи неустойчивости для обобщенного уравнения Орра-Зоммерфельда и обобщенной системы уравнений (1) – (2). Изучена линейная устойчивость стационарного течения с гладкой свободной поверхностью, а также уединенные и периодические нелинейные волны [5,6].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09 - 01 -00595).

ЛИТЕРАТУРА

1. Капица П.Л., Капица С.П. Волновые течения тонких слоев вязкой жидкости //Журнал эксперим. и теор. физики. 1949 . Т. 19. №2, С. 105 – 120

2. Шкадов В.Я. Волновые режимы течения тонкого слоя жидкости под действием силы тяжести // Изв. РАН. МЖГ. 1967. №1. С. 43 – 51.
3. Могилевский Е.И., Шкадов В.Я. Течения тонких пленок вязкой жидкости по криволинейным вращающимся поверхностям// Изв. РАН. МЖГ. 2009. №2. С. 18 – 32.
4. Могилевский Е.И., Шкадов В.Я. Влияние рельефа подложки на течение неньютоновской жидкости по наклонной плоскости// Вест. МГУ. Сер. 1. Матем. Механ. 2007. №3. С. 49 – 56.
5. Шкадов В.Я., Могилевский Е.И. Устойчивость течения пленок неньютоновской жидкости по вертикальной плоскости // Сб. статей «Современные проблемы математики и механики» Т.2, вып. 1. М.: Изд-во Московского университета, С. 24 – 32.
6. Могилевский Е.И., Шкадов В.Я. Неустойчивость и волны при течении пленки обобщенно-ньютоновской жидкости по вертикальной стенке//Изв. РАН. МЖГ. 2009 (принято к печати).

INFLUENCE OF RIGID SURFACE SHAPING AND NON-NEWTONIAN PROPERTIES OF FLUID ON HYDRODYNAMICAL STABILITY AND NONLINEAR WAVES IN CAPILLARY FILMS DRIVEN BY EXTERNAL FORCES

Mogilevskiy E.I., Shkadov V. Ya.

Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow
State University

In the work some generalizations of classical problem on viscous film flowing down due to gravity [1] are considered. The following problems are studied: influence of non-uniform external force field acting on the film (flow on curvilinear rotating disk is considered); changes of flow parameter in presence of small corrugations on the rigid surface (local of periodic); influence of non-Newtonian fluid properties on characteristics of the flow over plane or corrugated surfaces.

Equations derived in [2] describing evolution of film integral characteristics and their generalizations were used as governing equations. For non-Newtonian fluid they have the following form:

$$h_t + q_x = 0 \tag{1}$$

$$q_t + \frac{6}{5} \left(\frac{q^2}{h} \right)_x = \frac{1}{5\delta} \left(hh_{xxx} + h - \frac{q}{h^2} \frac{\eta \left(\frac{q^2}{h^4} I_{20} \right)}{\eta(I_{20})} \right) 0 \quad (2)$$

here h , q – local thickness and flow rate of the film, t , x – time and coordinate along the film, δ – similarity parameter, $\eta(I_2)$ – non-dimensional viscosity coefficient, I_{20} – value of the second invariant of strain tensor calculated on the rigid surface for non-wavy flow. Generalized Orr-Sommerfeld equation was used for linear stability analysis.

Equations (1) – (2) can be used for the problem of film flow over rotating curvilinear disk with axisymmetric disturbances. One should take into account that similarity parameter δ depends on distance between point of observation and axis of rotation and disturbances grow due to instability competes with thickness decreasing due to spreading. Values of parameter for flow stabilization are determined.

These equation were used to describe flow over plane with corrugation with size compared with film thickness and **longitudinal** size much greater than transversal. In this case a term depended on rigid surface shape derivatives and proportional to film thickness is added to right-hand part of (2). Stationary and nonlinear wave regimes of flow down are investigated.

If non-Newtonian fluid properties are taken into account view of dissipative term (the last one) in (2) depends on rheology. In the work power-law and Eyring models are considered. Results obtained for spectral problem of instability for generalized Orr-Sommerfeld equation and generalized equations (1) – (2) are compared. Linear stability of stationary flow with plane free surface and solitary and periodical nonlinear waves are studied.

The work is supported be RFBR (project № 09 -01 -00595).

REFERENCES

1. Kapica P.L., Kapica S.P. Wave flow of thin layers of viscous fluid. // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1949. V. 19. P.105 – 120
2. Shkadov V. Ya. Wave flow regimes of a thin layer of viscous fluid subject to gravity// Fluid Dynamics. V. 2. № 1. P. 29 – 34
3. Mogilevskiy E.I., Shkadov V.Ya. Flow of thin film of viscous liquid over rotating curvilinear surfaces // Fluid Dynamics. V. 44. 2009. №2. P. 189-201

4. Mogilevskii E.I., Shkadov V.Ya. Effect of bottom topography on the flow of a non-Newtonian liquid film down an inclined plane// [Moscow University Mechanics Bulletin V. 62, №3](#) 2007. P. 76 – 83.

5. Shkadov V.Ya., Mogilevskiy E.I. Stability of non-Newtonian fluid film flow on vertical plane// “Contemporary problems of mechanics and mathematics”. V. 2 № 1. P. 18 - 32

6. Mogilevskiy E.I., Shkadov V.Ya. Instability and waves on generalized Newtonian fluid flow on vertical wall// Fluid dynamics. 2009. In press.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ РАЗДЕЛЕНИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ ГАЗОВ

Моденова В.В.

Факультет Вычислительной математики и кибернетики МГУ
им. М.В. Ломоносова

Работа посвящена постановке и решению начально-краевой задачи, моделирующей процессы, протекающих в установках для разделения бинарной смеси газов. Обсуждается математическая модель, учитывающая явления диффузии, конвекции а, также, зависимость скорости движения смеси от градиентов давления и температуры. Рассматривается нелинейный закон зависимости коэффициента диффузии от скорости газа, поэтому система уравнений, описывающая данный процесс, становится существенно нелинейной. Рассматривается модель, в которой учитывается диффузионный перенос как в аппарате, работающем в режиме адсорбции, так и в аппарате, работающем в стадии регенерации. Проведены численные расчеты и сравнения с экспериментальными данными. Построены предельные модели.

Основываясь на экспериментальных данных, обоснованным является использование квазиравновесной модели. Рассматривается и модель, в которой учитывается диффузионный перенос в аппарате, работающем в режиме адсорбции, и пренебрегается им в аппарате, работающем в стадии регенерации.

Предложен эффективный численно-аналитический алгоритм решения начально-краевой задачи для системы существенно нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа ,основанный на регуляризации начального периода работы системы.

Выполнено численное исследование нестационарного процесса в рассматриваемых аппаратах. Проведен численный эксперимент, позволивший установить границы применимости моделей.

Актуальность рассматриваемых задач обуславливается целым рядом практических применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков В.И., Сафонов М.С., Воскресенский Н.М. Ионный обмен в противоточных колоннах.-М.:Наука,1981,-224с.

КАВИТАЦИЯ И СВЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КАВЕРНЕ

Монахов А.А., Ромашова Н.Б.
Институт механики МГУ

Представлены результаты экспериментального исследования течения слабопроводящей жидкости в тонком канале с диэлектрическими кавернами. Эта работа является продолжением исследования влияния электризации на кавитацию, где было обнаружено свечение жидкости [1,2] и высокая степень электризации в кавитационных областях [3]. В настоящей работе показано, что свечение жидкости возникает при несколько больших скоростях, чем образование кавитационных пузырьков. Числа Re при этом не превышают 50. Свечение является дискретным в виде частых электрических пробоев и сопровождается электромагнитной помехой в радиодиапазоне с хорошей корреляцией. Это является важным аргументом, подтверждающим электрическую теорию свечения кавитационных пузырьков [4]. Установлено, что кавитационные области являются источником высокого напряжения с потенциалом более 100 кВ. С помощью зонда проведен анализ степени электризации потока в зависимости от его скорости. Установлено, что при небольших скоростях потока в жидкости присутствует только положительная компонента электризации. При кавитации в потоке обнаруживаются обе составляющие. Проведенные исследования также показали, что электризация стенки канала и жидкости влияет на развитие кавитации.

Работа выполнена при поддержке гранта №07-08-00255-а.

ЛИТЕРАТУРА.

1. ДАН, 2006, Т406, №6, С 749-752
2. Герценштейн. С.Я, Монахов А.А. Свечение жидкости в тонких диэлектрических каналах. Chemphys.edu.ru Pdf/2007-03-05-001.pdf
3. Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками. МЖТ, № 3, 2009.С114-119
4. Маргулис М.А., Маргулис И.М. Современное состояние теории локальной электризации кавитационного пузырька. //Ж.физ.химия. 2007.Т.81.№1. С.136-147

CAVITATION FLOW AND GLOW IN THE DIELECTRIC CAVERN

Monakhov A.A., Romashova N.B.

Institute of Mechanics, Moscow State University.

Experimental results on the flow of weakly conducting liquid in a thin channel with insulating cavities. This work is a continuation of study of the effect of the electrification of cavitation, where it was discovered the glow of the liquid [1,2] and a high degree of electrification in the areas of cavitation [3]. In this paper we show that the luminescence of the liquid occurs when multiple high speeds than the formation of cavitation bubbles. Numbers Re did not exceed 50. Glow is discrete in the form of frequent electricity breakdowns and is accompanied by electromagnetic interference in the radio with good correlation. This is an important argument confirming the theory of electric glow of cavitation bubbles [4]. Found that the cavitation region are a source of high voltage with a potential of more than 100 kV. With the probe analysis of degree of electrification flow depending on its speed. Found that at low flow velocities in the fluid is present only positive component of electrification. When cavitation in the flow of both components are detected. Studies have also shown that the electrification of the tunnel wall and the fluid influences the development of cavitation.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА.

Мурашкина К.Б., Пасконов В.М.
Факультет Вычислительной математики и кибернетики
МГУ им. Ломоносова, Москва

В работе предлагается методика исследования течения при инъекции вязкой несжимаемой жидкости в канал между двумя пластинами на параллельном компьютере с общей памятью (IBM Regatta). Для расчетов применяется система модифицированных уравнений Навье-Стокса третьего порядка для вязкого, сжимаемого, теплопроводного газа, записанная в безразмерных величинах. При численном решении используется вычислительный метод покоординатного расщепления с применением аппроксимаций повышенного порядка точности для пространственных производных. Решение разностных уравнений третьего порядка разделено на несколько этапов, для каждого из которых описаны варианты реализации «внутренних» и «глобального» итерационных процессов. Анализ результатов расчетов проводится при помощи динамической системы визуализации для многопроцессорных компьютеров. Работа проводится при финансовой поддержке РФФИ, проект 09-07-00424-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пасконов В.М. Модификация уравнений Навье- Стокса для расчета вязких течений разностными методами. // Обратные задачи естествознания. М.: Изд-во МГУ, 1997, с.189-197
2. Березин С.Б., Пасконов В.М. Неклассические решения классической задачи о течении вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале. // Прикладная математика и информатика. №17.М.: МАКС Пресс, с.13-30, 2004.
3. Пасконов В.М. Березин С.Б.,Корухова Е.С. Динамическая система визуализации для многопроцессорных компьютеров с общей памятью и ее применение для численного моделирования турбулентных течений вязких жидкостей. Вестник Московского Университета, сер.15, М.,Изд-во Московского университета, №4, с.7-16, 2007.
4. Березин С.Б., Комарова Е.С., Пасконов В.М.. Суперкомпьютерное исследование нестационарных трехмерных турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости в каналах прямоугольного сечения на

основе модели Навье-Стокса. Вычислительные методы и программирование. М.:Изд-во Московского университета, т.9, №2, с.395-400, 2008

ДВИЖЕНИЕ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКЕ В ПЕРЕМЕННОМ ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Налетова В.А., Турков В.А., Пелевина Д.А.
НИИ Механики МГУ

Рассматривается поведение капли магнитной жидкости, лежащей на горизонтальной твердой подложке, в однородном приложенном магнитном поле. Капля магнитной жидкости находится в тонкой упругой оболочке. Оболочка капли не проскальзывает по подложке. Магнитное поле меняется следующим образом: сначала включается вертикальное поле, после чего оно поворачивается по часовой стрелке до заданного угла α , а затем выключается. Далее процесс повторяется циклически. При включении вертикального магнитного поля капля вытягивается вдоль вертикальной оси. При этом центр тяжести поднимается, а затем при повороте поля центр тяжести сдвигается вдоль горизонтали. При выключении магнитного поля центр тяжести капли опускается.

В данной работе вычислялось перемещение центра тяжести капли за один цикл. Предполагалось, что капля в магнитном поле имеет форму эллипсоида вращения. Исследована зависимость перемещения от величины угла α наклона магнитного поля. Показано, что эта зависимость имеет единственный максимум при некотором угле наклона к горизонтальной плоскости α меньше 45° . Рассмотрены случаи с различными разностями плотностей магнитной жидкости и окружающей среды. Полученные результаты качественно совпадают с экспериментами [1] с каплями магнитной жидкости, имеющими малую поверхность контакта с подложкой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-01-90001 и гранта Президента РФ НШ-3323.2010.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закинян А.Р., Нечаева О.А. Поведение капель магнитной жидкости во вращающемся магнитном поле вблизи горизонтальной поверхности // В сб.: II Всероссийская конференция «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем». Сборник научных тру-

дов. Ставрополь, Ставропольский государственный университет, 2009, с.179-183.

MOVEMENT OF A DROP OF A MAGNETIC FLUID ON A HORIZONTAL SUBSTRATE IN THE VARIABLE HOMOGENEOUS MAGNETIC FIELD

Naletova V.A., Turkov V.A., Pelevina D.A.

Scientific research institute of Mechanics of the MSU

Let's consider a behavior of a drop of the magnetic fluid lying on a horizontal hard substrate, in the homogeneous applied magnetic field. The drop of a magnetic fluid is in the thin elastic capsule. The capsule does not slip on the horizontal substrate. The magnetic field changes in the following way: at first vertical field is turned on then the magnetic field turns clockwise until the angle between the field direction and a horizontal plane reaches a given value α , and then the field is switched off. Further process repeats cyclically.

When the vertical magnetic field is switched on the drop becomes elongated along a vertical axis. Thus the center of gravity rises, and then, when the applied field turns, its center of gravity moves along horizontal direction. When the magnetic field is switched off the center of gravity of the drop sinks under the action of gravity.

In this work a displacement of the center of gravity of a drop for one was calculated. It was supposed that the drop in the magnetic field has the form of the ellipsoid. Dependence of the displacement from an angle α is investigated. It is shown this dependence has a unique maximum at some angle α smaller than 45° . Cases with various differences of density of a magnetic fluid and surrounding liquid are considered.

The obtained results qualitatively agree with the experiments on drop with small surface contact area with substrate described in [1].

This study is supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 10-01-90001) and the State support of leading scientific schools (project 3323.2010.1).

REFERENCES

1. Закинян А.Р., Нечаева О.А. Поведение капель магнитной жидкости во вращающемся магнитном поле вблизи горизонтальной поверхности. В сб.: II Всероссийская конференция «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем». Сборник науч-

ных трудов. Ставрополь, Ставропольский государственный университет, 2009, с.179-183.

МОДЕЛЬ ТОНКОГО ТЕЛА ИЗ ВЯЗКОУПРУГОГО НАМАГНИЧИВАЮЩЕГОСЯ ПОЛИМЕРА

Налетова В.А., Турков В.А., Калмыков С.А.
НИИ Механики МГУ

Рассматривается движение и деформация тонкого удлиненного цилиндрического тела из намагничивающегося полимера. В работе [1] была получена математическая модель, описывающая динамику такого тела без учета вязкости полимера. Но вязкость довольно существенна в таких материалах, поэтому в данной работе строится модель динамики тонкого стержня из вязкоупругого полимера (полимер описывается моделью Фойхта). На основе полученной модели динамики решены задачи о собственных продольных и поперечных колебаниях стержня с некоторыми граничными условиями на концах стержня. На основе аналитических решений этих задач показано, что колебания с высокими частотами отсутствуют, при этом существует решение релаксационного типа, так же, как это наблюдается при распространении малых возмущений в вязкой жидкости. С помощью полученной модели динамики решается плоская задача о движении тонкого цилиндрического стержня из вязкоупругого намагничивающегося полимера в цилиндрическом канале под действием переменного магнитного поля. Магнитное поле создается системой расположенных по бокам канала катушек, переключающихся с некоторой частотой. При решении учтена нелинейность зависимости намагниченности от магнитного поля и трение о стенку канала. Написана программа численного расчета, которая протестирована на задачах о собственных колебаниях. Проведены расчеты движения тела при различных частотах переключения поля.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ-3323.2010.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vera A. Naletova, Klaus Zimmermann, Igor Zeidis, Vladimir A. Turkov, Sergej A. Kalmykov, Dynamics of a prolate magnetizable elastic body in a cylindrical channel. In: *7th EUROMECH Solid Mechanics Conference (ESMC2009)*, September 7-11, 2009, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, p. 124.

MODEL OF A PROLATE BODY WITH VISCOELASTIC MAGNETIZABLE POLYMER

Naletova V.A., Turkov V.A., Kalmykov S.A.
Scientific research institute of Mechanics of the MSU

A motion and deformation of a thin prolate cylindrical body with magnetizable polymer are considered. Mathematical model of such bodies dynamics which doesn't take into account viscosity has been obtained in [1]. Here the model of a thin magnetizable rod with viscoelastic material (used Feucht's model) is obtained. Problems of free longitudinal and free transversal oscillations were solved based on this model using some border conditions. Using analytical solutions of these problems the high-frequency small oscillations missing was shown as it can be shown in viscose liquid.

Based on the obtained model the plain problem of the motion of the thin cylindrical rod in cylindrical channel under the action of non-uniform magnetic field is solved. Magnetic field is created by the system of electromagnetic coils, situated on sides of the channel, which switch on and off with some frequency. Non-linear dependence of magnetization on the magnetic field and friction on the channel sides are taken into account. The calculation program was written and tested using problems of free oscillations. Calculations of body motion were preformed for different field frequencies.

This study is supported by the State support of leading scientific schools (project 3323.2010.1).

REFERENCES

1. Vera A. Naletova, Klaus Zimmermann, Igor Zeidis, Vladimir A. Turkov, Sergej A. Kalmykov, Dynamics of a prolate magnetizable elastic body in a cylindrical channel. In: *7th EUROMECH Solid Mechanics Conference (ESMC2009)*, September 7-11, 2009, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, p. 124.

ГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ СУСПЕНЗИЙ В ДВУМЕРНЫХ ОБЛАСТЯХ С НАКЛОННЫМИ СТЕНКАМИ

Невский Ю.А.
Институт механики МГУ, Москва

Гравитационная конвекция, вызванная осаждением инородных включений – явление, часто встречающееся в природе (конвекция в

дождевых облаках, в вулканических очагах магмы и др.) и технологических процессах (например, гидроразрывные технологии улучшения нефтеотдачи, очистка промышленных отходов, фракционирование частиц и т.д.).

Целью данной работы является построение гидродинамической модели гравитационной конвекции суспензий с конечной объемной долей примеси, являющейся обобщением модели, представленной в работе [1], и учитывающей:

- а) сжимаемость смеси за счет перераспределения концентрации примеси;
- б) конечность объемной доли примеси;
- в) нестационарность сил, участвующих в межфазном обмене импульсом.

Построенная двухконтинуальная модель гравитационной конвекции суспензии, состоящей из вязкой несжимаемой жидкости и твердых сферических частиц одинакового радиуса, содержит четыре параметра подобия: параметр инерционности частиц, отношение плотностей вещества фаз, число Рейнольдса и объемную концентрацию, соответствующую плотной упаковке частиц. На основе упрощенных моделей, соответствующих случаю малоинерционных частиц, проводится численное моделирование процесса гравитационной конвекции суспензий в замкнутых двумерных объемах с целью получения количественных оценок эффекта Бойкотта (А.Boycott) – ускорения осаждения примеси в наклонном сосуде, а также с целью исследования эффекта горизонтального расслоения в дисперсной фазе, описанного в работе [2]. Помимо численного моделирования экспериментально полученных эффектов уменьшения времени осаждения и расслоения примеси в наклонных сосудах, исследовалось влияние учета конечности объемного содержания частиц, приводящего к эффективной сжимаемости суспензии.

Эффект Бойкотта исследовался на примере численного решения задачи о медленной ($Re \ll 1$) гравитационной конвекции суспензии с малоинерционными частицами в замкнутом двумерном сосуде. Получено, что наклон сосуда может привести к уменьшению времени осаждения до 50 %. Показана возможность описания расслоения в среде частиц с помощью построенной модели. Показано, что ускорение осаждения и расслоение дисперсной фазы являются следствиями возникновения крупномасштабных вихревых структур в процессе гравитационного осаждения суспензии.

Сравнение моделей с нулевой и конечной объемной долей частиц проводилось на примере решения задачи об осаждении конечного объе-

ма (горизонтальной полосы) дисперсной фазы в вертикальном двумерном сосуде. Интегральный параметр, характеризующий скорость осаждения, – положение центра масс полосы. Сравнение изменения его положения в обоих случаях проводилось вплоть до достижения придонных областей сосуда. Различие в скорости осаждения объясняется двумя основными факторами: локальным увеличением вязкости и замедлением скорости осаждения в областях с повышенной концентрацией примеси. Получено, что при начальной объемной доле частиц порядка 5% различие во времени достижения центром масс полосы придонных областей в случаях конечной и нулевой объемных долей примеси может достигать 10-60% в зависимости от начального распределения концентрации примеси в полоске.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 08-01-00195).

ЛИТЕРАТУРА

1. Невский Ю.А., Осипцов А.Н., Моделирование гравитационной конвекции суспензий // Письма в ЖТФ, Т. 35, № 7, 2009, С. 98—106.
2. Blanchette F.A. Sedimentation in a Stratified Ambient.// Massachusetts Inst. of Technology, 2003. Ph.D. Diss. 156 p.

ЧЕТЫРЕХМЕРНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Никитин Н.В.

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

В настоящей работе впервые поставлен вопрос об устойчивости трехмерных «турбулентных» решений уравнений Навье-Стокса по отношению к четырехмерным возмущениям. Рассматривается течение в плоском канале. Четвертая координата s ортогональна первым трем и является однородной, как и боковая координата z . Целью работы являлись расчет и изучение свойств возможной четырехмерной турбулентности. Следуя тенденции изменения свойств решений при увеличении размерности задачи от 1 до 3 можно было предполагать, что четырехмерные решения окажутся еще «более турбулентными», чем трехмерные, обладающими, в частности, более высоким сопротивлением.

Нелинейные четырехмерные уравнения Навье-Стокса решались численно с начальными условиями в виде некоторого мгновенного распределения скорости в трехмерном турбулентном течении при числе Рейнольдса 4000 плюс малое четырехмерное возмущение. Как и ожидалось, трехмерное турбулентное течение оказывается неустойчивым. Ам-

плитуда четырехмерного возмущения нарастает со временем. Однако, вопреки ожиданиям возникновения некоего четырехмерного турбулентного течения, дальнейшая эволюция решения ведет к полному затуханию колебаний и его возвращению к одномерному течению Пуазеля.

Полученный результат может свидетельствовать о том, что хаотический аттрактор, соответствующий трехмерной турбулентности в плоском канале при низких числах Рейнольдса, оказывается седловой точкой в четырехмерном пространстве с отталкивающим многообразием, лежащим в четвертом измерении. Наиболее интересным является факт, что эволюция четырехмерного решения не приводит на некий новый аттрактор, а возвращает решение к исходному одномерному течению Пуазеля. Таким образом, течение Пуазеля в четырехмерном пространстве оказывается глобально более устойчивым, чем в трехмерном.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 08-01-00489.

РАЗВИТИЕ ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДА В МЕХАНИКЕ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД

Осипцов А.Н.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

При двухконтинуальном моделировании течений аэрозолей, суспензий, разреженных пузырьковых жидкостей флуктуационные скорости включений обычно считаются малыми и дисперсная фаза моделируется континуумом, лишенным собственных напряжений. В таком континууме возможно возникновение зон пересекающихся траекторий включений, что приводит к образованию сильных разрывов, «сборок» и «складок», на границах которых плотность числа частиц неограниченно (но, как правило, интегрируемым образом) возрастает. Микроструктурный анализ показывает, что для малых объемных концентраций включений решения с сингулярным поведением плотности среды имеют физический смысл, поскольку, несмотря на неограниченный рост числовой плотности, среднее расстояние между частицами остается конечным. В докладе представлен лагранжев метод исследования полей скорости и плотности дисперсной фазы в течениях разреженных дисперсных сред. Метод основан на использовании лагранжевой формы уравнения неразрывности дисперсной фазы и привлечении дополнительных уравнений для компонент якобиана преобразования от эйлеровых к лагранжевым переменным. Развиваемый подход позволяет вычислять плотность

дисперсной фазы вдоль выбранных (рассчитываемых одновременно) траекторий частиц из решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, что делает возможным исследование течений с множественными пересечениями траекторий частиц и локальными зонами накопления дисперсной фазы. Даны примеры применения метода к задачам двухфазной аэродинамики, в которых возникают локализованные области накопления дисперсной фазы. Рассмотрены примеры аэродинамической фокусировки частиц в газовых потоках при столкновении ударных волн, за движущимися ударными волнами в узких каналах и др. Представлены расчеты формирования зон накопления частиц в вихревых течениях типа торнадо и течения Кельвина типа «кошачий глаз». Обсуждается возможность использования метода для моделирования других механических объектов, описываемых уравнениями «холодного» континуума. Предложено развитие метода на случай кинетического описания бесстолкновительного движения среды невзаимодействующих частиц.

Предложенный лагранжев метод является удобным инструментом для численного исследования течений дисперсных сред с множественными пересечениями траекторий частиц и локальными зонами повышенной концентрации дисперсной фазы. Он позволяет рассчитывать как стационарные, так и нестационарные течения без изменения алгоритма. Главные достоинства метода – его простота и экономичность, обусловленная возможностью построения полей концентрации частиц в сложных неоднородных и нестационарных потоках на основе расчета небольшого числа траекторий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№08-01-00195) и Аналитической ведомственной программы «Развитие научного потенциала Высшей школы» (проект 2.1.1/1399).

ВОЗДЕЙСТВИЕ СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ КРОВОТОКА КРОЛИКА

Панин Д.Н.

НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Данная работа направлена на изучение воздействия статических электрических полей различной напряженности на живые объекты, в частности на лабораторных кроликов. Известно, что воздействие электромагнитных полей на живые организмы может вызывать различные эффекты в их биологических системах. Однако, механизмы такого воз-

действия до сих пор не выяснены. Так же известно, что воздействие электрических полей может оказывать как положительное, так и отрицательное действие на биологические системы и организм в целом. В связи с этим представляется чрезвычайно актуальной проблема изучения воздействия статических электрических полей на различные системы живых объектов, в частности на кровеносную систему. В работе изучалось воздействие статических электрических полей различной напряженности на параметры кровотока лабораторных кроликов. В ходе проведения работы было обнаружено существенное влияние статических электрических полей напряженностью от 20 до 250 В/м на лабораторных кроликов. Обнаруженное влияние выражалось со стороны кровеносной системы в виде вазомоторных реакций, которые сопровождались расширением мелких кровеносных сосудов, что наблюдалось нами на просвете ушей кролика. Также были получены количественные оценки наблюдаемых изменений, в частности, были получены зависимости наполняемости мелких кровеносных сосудов, а также времени их наполняемости от напряженности электрического поля, его ориентации и длительности воздействия на организм. Полученные результаты позволяют разработать эффективные методы и средства защиты от негативного влияния внешних электрических полей высокой напряженности, а понимание процессов, проходящих в организме под действием различных электрических полей дает возможность с большей эффективностью использовать физиотерапевтические свойства этих полей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №05-08-18244а).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Панин Д.Н., Герценштейн С.Я., Писаренко О.Н. О влиянии внешних статических электрических полей на кровоток в мелких сосудах // ДАН, 2009, Т. 426, № 2, С. 179-182.
2. Панин Д.Н., Герценштейн С.Я. Устройство для защиты объектов от изменений внешнего электрического поля. Патент РФ № 2337724, 2008.

РАЗВИТИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЗАВИХРЕННОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Петрова Л.И.

Московский Государственный Университет

Из уравнений, моделирующих законы сохранения энергии и количества движения, получается эволюционное соотношение. Это соотношение связывает дифференциал от энтропии и кососимметричную форму, коэффициенты которой зависят от характеристик газодинамической системы и внешних воздействий. Это соотношение оказывается нетождественным, что объясняется некоммутативностью законов сохранения.

Свойства такого нетождественного соотношения (самоизменение, вырожденное преобразование) позволяют раскрыть механизм развития газодинамической неустойчивости и возникновения завихренности и турбулентности.

Интенсивность возникающих образований (волн, вихрей, турбулентных пульсаций) определяется коммутатором незамкнутой эволюционной формы, входящей в нетождественное эволюционное соотношение.

УСТОЙЧИВОСТЬ КОНВЕКТИВНЫХ ВАЛОВ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Подвигина О.М.

Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики РАН, Москва

Изучена устойчивость конвективных валов вблизи установления конвекции в горизонтальном слое проводящей жидкости, вращающемся вокруг вертикальной оси, в присутствии внешнего магнитного поля. В зависимости от соотношений между величинами параметров задачи (чисел Тейлора, Чандрасекара, кинематического и магнитного чисел Прандтля) при увеличении числа Рэлея собственное значение критической моды оператора линеаризации может быть нулевым или мнимым, тем самым возможна монотонная или колебательная неустойчивость состояния покоя. При монотонной неустойчивости могут иметь место суперкритическая или субкритическая бифуркация конвективных валов, в последнем случае возникающие конвективные валы являются неустойчивыми относительно возмущений с той же пространственной периодичностью.

Валы, появляющиеся в суперкритической бифуркации, могут быть неустойчивы по отношению к валам, повернутых на некоторый угол вокруг вертикальной оси относительно возмущаемых валов. В отсутствие внешнего магнитного поля, такая неустойчивость называется неустойчивостью Кюппера-Лорца. Исследуется, как тип неустойчивости состояния покоя и устойчивость возникающих валов зависят от параметров задачи.

STABILITY OF ROLLS IN ROTATING MAGNETOCONVECTION

O.M.Podvigina

International institute of earthquake prediction theory and
mathematical geophysics, Russ. Ac. Sci., Moscow

We consider the onset of Boussinesq convection in a horizontal layer of electrically conducting fluid rotating about a vertical axis with an imposed vertical magnetic field and rigid electrically insulating horizontal boundaries. The instability of the trivial steady state on increasing the Rayleigh number can be monotonic or oscillatory, depending on parameter values of the problem (the Chandrasekhar, Taylor, kinematic and magnetic Prandtl numbers). If monotonic instability occurs, the emerging rolls can bifurcate supercritically or subcritically, in the latter case they are unstable to perturbations of the same periodicity. If the rolls bifurcate supercritically; they can be unstable to perturbations in the form of rolls rotated by any angle (without an imposed magnetic field this is called the Küppers-Lortz instability). For each of the three conditions we derive equations for respective boundaries in the parameter space, and investigate how the boundaries are modified as parameters of the problem are varied.

О МОМЕНТЕ И СИЛЕ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВНУТРЕННЮЮ ТРУБУ ПРИ ТЕЧЕНИИ НЬЮТОНОВСКОЙ И НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ЗАЗОРЕ С ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ

Подрябинкин Е.В., Рудяк В.Я.

Бейкер Хьюз Российский Научный Центр (г. Новосибирск)

Рассматривается ламинарное установившееся напорное течение в зазоре между двумя цилиндрами. В общем случае оси цилиндров сдвинуты друг относительно друга, т.е. имеет место эксцентриситет. Внут-

ренный цилиндр может вращаться под действием внешнего крутящего момента. Течения такого рода реализуются при бурении скважин, в теплообменниках, в подшипниках вращения и т.п. При вращении внутреннего цилиндра на него со стороны жидкости действует сила и момент. На практике влияние этих сил может привести к потере устойчивости системы и возникновению прецессионного движения вокруг оси внешнего цилиндра. Цель данной работы и состоит в изучении этих силы и момента и их зависимости от параметров течения и характеристик жидкости. Данные течения моделировались численно помощью алгоритма решения уравнений Навье–Стокса, разработанного на основе метода конечных объемов [1, 2]. Наряду с течением ньютоновской жидкости изучены и течения степенной жидкости, жидкостей Бингама и Хершеля–Балкли.

Показано, что момент, действующий на внутренний цилиндр, монотонно возрастает с ростом эксцентриситета. $e = \Delta / (R_1 - R_2)$, где Δ – расстояние между осями цилиндров, R_1, R_2 – радиусы соответственно внешнего и внутреннего цилиндра. При эксцентриситете близком к единице наблюдается резкое возрастание момента сопротивления, что связано с возникновением возвратного течения. Для ньютоновской жидкости момент сопротивления пропорционален скорости вращения внутреннего цилиндра. Для неньютоновских жидкостей он зависит от расхода жидкости через зазор: с увеличением расхода момент, как правило, уменьшается.

Сила, действующая на внутренний цилиндр складывается из сил давления и сил вязкого трения. Показано, что основной вклад в результирующую силу дают именно силы давления. При малых и средних значениях эксцентриситета сила, действующая на внутреннюю трубу, направлена к периферии канала. При высоком значении эксцентриситета (для ньютоновской жидкости начиная с $e \geq 0.7$) радиальная компонента силы меняет знак, и возникающая сила отталкивает внутреннюю трубу от стенки внешней. Критическое значение, при котором меняется знак радиальной компоненты силы, увеличивается при уменьшении индекса жидкости для степенной реологической модели или с ростом предельного напряжения сдвига для реологических моделей Бингама и Хершеля–Балкли. Окружная компонента силы всегда имеет постоянное направление и индуцирует прецессионное движение внутреннего цилиндра. Зависимость момента и силы сопротивления от эксцентриситета качественно одинакова для всех реологических моделей.

На основе результатов моделирования создана база данных и интерполяционный алгоритм, позволяющий определять момент и силу, действующую на внутреннюю трубу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудяк В.Я., Минаков А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А. Применение нового численного алгоритма решения уравнений Навье–Стокса для моделирования работы вискозиметра типа физического маятника // Теплофизика и Аэромеханика, 2008, т. 15, № 2, с. 353-365.

2. Минаков А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А. Численный алгоритм решения пространственных задач гидродинамики с подвижными твердыми телами и свободной поверхностью // СибЖИМ, 2008, т. 11, № 4(36), с. 94-104.

ON THE MOMENT AND FORCE ACTING ON THE INNER TUBE IN THE FLOW OF NEWTONIAN AND NON-NEWTONIAN FLUIDS IN ECCENTRIC ANNULUS

Podryabinkin E.V., Rudyak V.Ya.

Baker Hughes Russian Science Center (Novosibirsk)

It is considered a laminar fully developed enforced flow in annulus. In a common case axes of cylinders have a displacement, so we deal with eccentric annular channel. Inner cylinder can rotate driven by external torque. Flow of this type can realize in drilling processes, heat exchanger, journal bearings etc. When inner cylinder rotates it is under effect of flow induced force and drag moment. In practice this effects can lead to instability of the system and appearance of the whirl motion of inner cylinder. The purpose of this work is studying of these force and moment and their dependence on flow parameters and fluid characteristics. These flows have been modeled numerically by the means of algorithm for solving Navier-Stokes equations based on finite volume method [1, 2]. Flows of Newtonian fluids, Power Law fluids, Bingham plastic fluids and Herschel-Bulkley fluid have been studied.

It has been shown that moment exerted on inner cylinder grows monotonically with the eccentricity $e = \Delta / (R_1 - R_2)$, when Δ – a distance between axes of cylinders, R_1, R_2 – their radiuses. When eccentricity is close to unity momentum grows sharply. It caused by appearance of inverse eddy flow. For Newtonian fluid flow drag torque is proportional to rotation speed of the inner cylinder. For non-Newtonian fluids it depends on flow rate through the annulus: as rule it decreases with the growth of the flow rate.

The forces exerted on the inner cylinder involve pressure forces and viscous friction forces. It has been shown that the pressure forces give a dominating contribution. When eccentricity does not exceed some critical value the force exerted on inner tube pushes it to the channel's wall. When eccentricity is high enough ($e \geq 0.7$ for Newtonian fluid) radial component of the force reverses the sign and the inner pipe is pushed away from the wall of outer pipe. The critical value of eccentricity which reverses the sign of radial component of the force grows when power index decreases for Power Law fluid or when yield stress increases for Bingham and Herschel-Bulkley fluids. Circumferential component of the force has always the same direction and induce whirl movement of the inner cylinder. Dependence of the force and drag torque on eccentricity has the same shape for all rheological models.

Modeling results have been integrated in database and interpolation algorithm which allows determining the force and moment exerted on the inner tube has been developed.

REFERENCES

3. Rudyak V.Ya., Minakov A.V., Gavrilov A.A., Dekterev A.A. An Application of the new numerical algorithm for solving of the Navier-Stokes equations for physical-pendulum-like viscosimeter modeling // Thermophysics & Aeromechanics, 2008, v. 15(2), p. 353-365.
4. Minakov A. V., Gavrilov A. A., Dekterev A. A. Numerical algorithm for solving spatial problems of hydrodynamics with moving solids and a free surface // Siberian J. Industrial Math., 2008, v. 11, No. 4(36), p.94-104.

О ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЯХ И ФИЗИКЕ СТРУЙНО-ФАКЕЛЬНОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ

Полежаев Ю.В.
(ОИВТ РАН, Москва)

Факел образуется при воспламенении топливной струи в воздушной атмосфере. В отличие от процесса истечения изотермической (классической) струи факел представляет собой весьма удобный объект наблюдения, поскольку он ярко светится и легко фиксируется на обычной фотопленке.

Тем более удивительно, что опубликованных работ по геометрическим, гидродинамическим или физико-химическим параметрам факелов, возникающих при возгорании различных топлив, не так уж много и до

сих пор нет единства у профессионалов по критериальной обработке экспериментальных результатов.

На рис. 1 схематично показано, чем отличаются течения в струе и факеле. Холодное ядро факела как бы заключено в высокотемпературную оболочку из продуктов реакции топлива с кислородом воздуха.

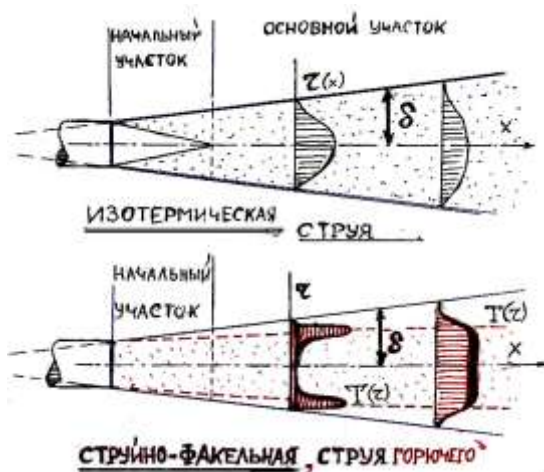


Рис.1.
Схема течения изотермических струй и факелов

По мере удаления от среза форсунки происходит уширение температурного профиля и к моменту полного выгорания топлива там образуется температурное «плато» перпендикулярно оси струи.

На рис.2 для нескольких поперечных сечений дано сравнение результатов измерения профилей скорости в струях с горением и без, а также показана динамика изменения профиля температуры при горении водородной струи. Хорошо видно, что профили скорости подобны в обоих струях, несмотря на то, что при горении температура местами возрастает в несколько раз.

Наличие указанной выше высокотемпературной оболочки из продуктов взаимодействия топлива с кислородом, не только не увеличивает, но даже уменьшает толщину факела δ по сравнению с изотермической струей (рис.3).

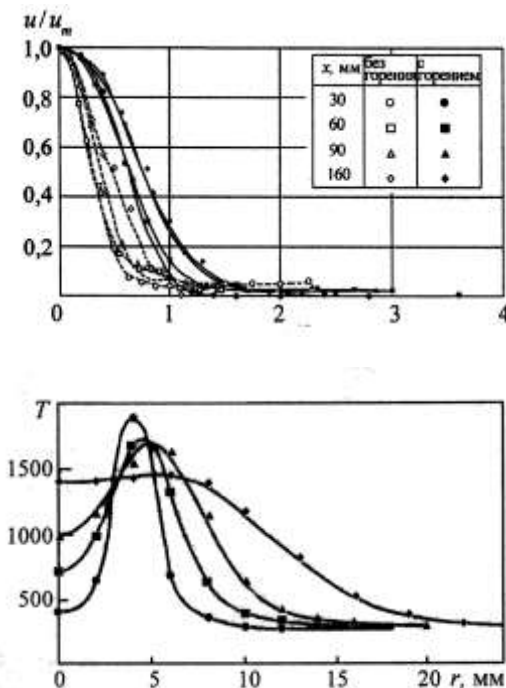


Рис.2.

Профили скорости и температуры в поперечных сечениях пламени

За счет этого скорость на оси факела возрастает, и на его вершине она лишь вдвое меньше, чем на срезе форсунки, тогда как у обычной струи скорость падает обратно пропорционально расстоянию от среза (x/d_0).

Столь серьезные отличия гидродинамических и геометрических характеристик факела от струи неявно ведут к столь же большим расхождениям основных параметров турбулентности в них. Однако результаты обработки наших и зарубежных экспериментальных данных при турбулентном режиме течения затопленных дозвуковых струй дали весьма неожиданные и универсальные результаты.

Горение – в основном процесс неравновесный. Неоднородные поля температуры и концентраций всех участвующих в химической реакции компонент требуют для своего расчета сложных систем уравнений, к

тому же в процессе течения, как правило, происходит генерация турбулентности, интенсифицирующей все процессы переноса массы и энергии.

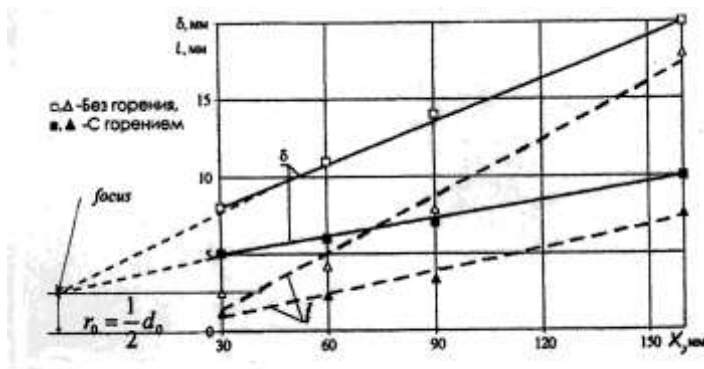


Рис.3.

Изменение вдоль струи измеренной полутолщины δ и рассчитанного масштаба турбулентности l : белые значки – без горения; черные значки – с горением

В основе полумэмпирических теорий турбулентности лежит гипотеза М. Буссинеска, использующая аналогию с ламинарным течением и формулой Ньютона для силы трения в потоке жидкости. Но в отличие от прототипа

$$\tau_T = A \left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|_{r=0}, \quad (1)$$

где коэффициент турбулентной вязкости $A = \eta + \eta_T$, т.е. равен сумме молекулярной (η) и турбулентной или «кажущейся» (η_T) вязкостей. И если первое слагаемое является физическим параметром движущейся жидкости, то второе – зависит также и от гидродинамических особенностей течения.

Турбулентное напряжение трения τ_T появляется в уравнениях Рейнольдса после операции осреднения пульсаций (u', v', w') , трёх компонент скорости потока (u, v, w) :

$$\tau_T = -\rho(u'v') \quad (2)$$

Наиболее простой путь замыкания получившейся системы уравнений Рейнольдса состоит в поиске алгебраической связи коэффициента A из соотношения (1) с теми или другими характеристиками осредненного течения $\left(\bar{u}, \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right)$. Существует множество полуэмпирических теорий, в частности, основанных на теории пути смешения, предложенной Л. Прандтлем в 1925.

Проиллюстрируем модель Прандтля на примере струйных течений. Характерной особенностью истечения турбулентных струй, как показывают численные расчеты и многочисленные опыты, является малость поперечных составляющих скорости в любом сечении струи по сравнению с продольной скоростью. В зависимости от характера падения скорости на оси струи принято делить её на начальный и основной участки. Если обозначить u_0 начальную скорость истечения струи, а L – расстояние от среза сопла, диаметром d_0 , то для осесимметричной вертикальной струи максимальная скорость течения на оси u_m будет определяться уравнением

$$\frac{u_m}{u_0} = 6,2 \sqrt{\left(\frac{L}{d_0}\right)} \quad (3)$$

(в случае горения струи топлива в воздухе соотношения (3) не выполняется и об этом феномене будет сказано далее). Что касается профиля скорости $u(r)$ в поперечных сечениях струи, то результаты экспериментальных исследований указывают на наличие автомодельности по безразмерной координате $\eta = r/\delta$, где δ – полутолщина струи. Для автомодельного профиля скорости (u/u_m) предложено несколько аппроксимирующих функций, из которых наиболее простой вид имеет та, что предложена Шлихтингом:

$$\frac{u}{u_m} = f(\eta) = \left[1 - \eta^{3/2}\right]^2, \quad \eta = r/\delta \quad (4)$$

Как показали наши эксперименты, зависимость (4) может применяться и для струй с горением. Необходимо только учесть, что наличие горения при истечении топливных газов в среду, заполненную воздухом или другим окислителем, сжимает (а не расширяет!) струю, что чётко видно на рис. 3. Именно это обстоятельство позволяет понять почему максимальная скорость на оси u_m оказывается выше в случае струйно-факельного горения по сравнению с классической (изотермической)

струей). По сравнению с первой моделью турбулентностью, предложенной Прандтлем в 1925 году, в которой предполагалось равенство пульсационных «добавок» к обоим составляющим вектора скорости:

$$u' = v' = \ell \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad \text{или} \quad \tau_T = -\rho(u'v') = \rho \ell^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right),$$

в данной статье мы все расчёты будем проводить по другой, или модифицированной модели Прандтля – Колмогорова. Для учёта неізотропной турбулентности вводится новый определяющий параметр – кинетическая энергия турбулентности K :

$$K = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2),$$

которая связана с максимальным градиентом осредненной скорости \bar{u} в данном поперечном сечении струи:

$$\sqrt{K} = -C_\kappa \ell \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right)_{\max} \quad (5)$$

Наряду с турбулентным трением τ_T , где

$$\tau_T = -\rho(u'v') = -\rho C_\mu \ell \sqrt{K} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) \quad (6)$$

кинетическая энергия турбулентности K позволяет рассчитать масштаб турбулентности ℓ (рис.4). Добавим, что константы пропорциональности C_κ и C_μ в уравнениях (5) и (6)

являются инвариантами турбулентных течений:

$$C_\mu = \left[-\frac{(\overline{u'v'})^2}{K} \right]^2 \approx 0,1; \quad C_\kappa = \frac{K}{-(u'v')} \approx 0,32 \quad (7)$$

При использовании для констант C_μ и C_κ правила (7), а для τ_T и K формул (5) и (6) масштаб турбулентности однозначно рассчитывается по экспериментально измеренным величинам τ_T и K в струйных течениях. Более важно, что отношение ℓ к полутолщине струи δ подчиняется универсальной зависимости от безразмерной координаты (L/d_0) , измеренной вдоль оси (рис.5).

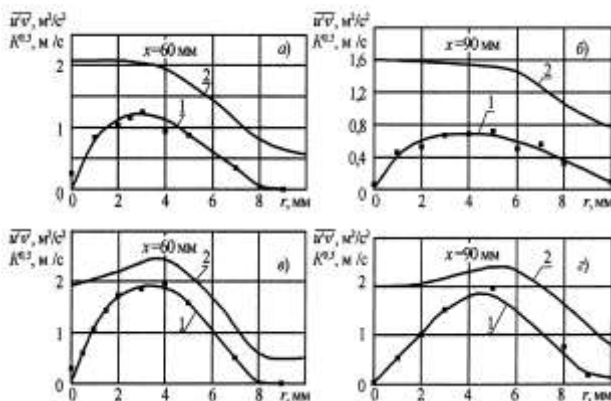


Рис. 4

Распределение турбулентного трения $\tau_T/\rho = [\overline{u'v'}]$ (1) и кинетической энергии турбулентности K (2) в струе: а, б – без горения; в, г – с горением

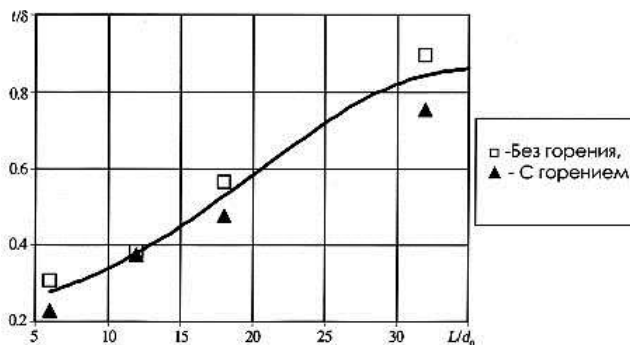


Рис.5.

Зависимость отношения масштаба турбулентности к полутолщине струи от безразмерной продольной координаты: белые значки - без горения, черные значки - с горением

Выводы

1. Доказано, что внутри пламени генерируется турбулентность, масштаб которой тем больше, чем выше отношение диаметра струи к толщине волны горения. Скорость турбулентного горения многократно превышает скорость горения в ламинарном режиме.

2. Установлены законы и критерии подобия, позволяющие сравнивать параметры струйного горения различных топливных смесей и заменять при моделировании одно топливо другим (например, водород метаном).

Литература

1. Полежаев Ю.В., Коршунов А.В., Габбасова Г.В., О турбулентности и турбулентной вязкости в струйных течениях, ТВТ, 2007, том 43, № 3, с. 378-383.
2. Сполдинг Д.В. Горение и массообмен /Пер. с английского п/р Дорошенко В.Е./, М., Машиностроение, 1985, 240с.
3. Абрамович Г.Н. и др., Теория турбулентных струй, М., Наука, 1984, 710с.
4. Хинце И.О., Турбулентность, её механизм и теория, Изд-во физ.-мат.лит. М., 1963г. 680 с.
5. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К., Теплообмен при взаимодействии струй с преградами, М., Машиностроение, 1977 г., 248 с.

КАРТА РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ИНТЕНСИФИКАЦИИ

Полежаев Ю.В.
(ОИВТ РАН, Москва)

1. На процесс зарождения и смены режимов горения влияет более десятка различных физических параметров. Некоторые из них проявляются в чистом виде, другие – опосредственно через те или иные факторы, определяющие термо- и газодинамическое состояние системы. Наиболее запутанное положение сложилось в теории горения с влиянием давления P . Еще в первой половине прошлого века был отмечен странный, на первый взгляд факт [1]: у медленно горящих топливных смесей (нормальная скорость горения которых $S_B^0 > 0,5 \text{ м/с}$) рост давления снижал скорость распространения пламени, а у быстро горящих $S_B^0 > 1 \text{ м/с}$), наоборот увеличивал.

По нашей просьбе в Казанском научном центре РАН группа специалистов во главе с академиком Алемасовым В.Е. провела большой объем термодинамических расчётов 25 топливных смесей и установила закономерности изменения адиабатической температуры пламён T_{ad} от дав-

ления. На рис. 1 представлены результаты этих расчётов. Изменяя давление на порядок от стандартного значения $P = 0,1 \text{ МПа}$, мы сравнили приращение адиабатической температуры ΔT_{ad} с экспериментальными величинами нормальной скорости горения S_B^0 тех же топлив. Но перед этим была установлена универсальная кинетическая зависимость S_B^0 от T_{ad} [6] для выбранных топливных пар:

$$S_B^0 = 9,92 \cdot 10^3 \exp(-23000/T_{ad}) \quad (1)$$

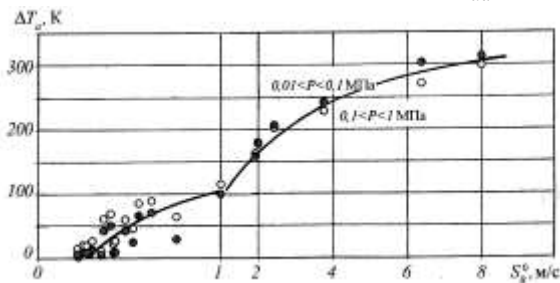


Рис.1.

Отклонение адиабатической температуры пламен ΔT_{ad}
при вариации давления на порядок от начального $P_0 = 1 \text{ атм}$

Поскольку давление варьировалось на порядок, то нормальная скорость горения S_B^0 могла возрасти более, чем в 2,15 раза при $T_{ad} = 3000 \text{ K}$, тогда как при меньшем значении T_{ad} этот эффект оказывается значительно ниже. Можно предположить, что существуют и другие факторы, влияющие на зависимость нормальной скорости горения от давления. Особый интерес в этом плане вызывают эксперименты по увеличению концентрации радикалов (ОН) или добавок в состав топлива воды.

Если воспользоваться «тепловой моделью горения», предложенной Зельдовичем и Франк-Каменецким в 1938 году [5], то можно привести её к следующей закономерности, выделив два важнейших параметра, определяющих термодинамическое состояние любой гомогенной физической системы – давление P и температуру T :

$$S_B^0 = AP^{\frac{n}{2}-1} \exp\left(-\frac{B}{T_m}\right) \quad (2)$$

Здесь n – «назначенный» порядок эффективной реакции, определяющей интенсивность тепловыделения в волне горения, а T_m – максимальная температура в пламени.

При $n = 2$ зависимость S_B^0 от давления эта модель вообще не показывает, а при $n = 1$ она даёт $S_B^0 \sim \frac{1}{\sqrt{P}}$.

В действительности, как следует из книги Щетинкова Е.С., наблюдаются величины показателя степени « m » от $(-0,3)$ до $(+0,25)$ в зависимости $S_B^0(P) \sim P^m$. Столь же сильным по уровню влияния на скорость горения топлива в воздухе (или даже более мощным), оказывается эффект турбулентности.

На основании анализа экспериментальных данных в работе [4] получены аппроксимационные зависимости для высоты факела водорода, горящего в воздухе:

– в ламинарном режиме:

$$\frac{L}{d_0} = 3,95 \cdot \text{Re}_0^{0,5} (d_0/d_*)^{-0,5} \quad (3)$$

– в турбулентном режиме:

$$\frac{L}{d_0} = 34 \cdot \text{Re}_0^{0,2} (d_0/d_*)^{-0,5} \quad (4)$$

Введение в качестве определяющего критерия отношения (d_0/d_*) отражает специфику процесса горения. Сам фронт пламени является генератором пульсаций, способствующих ускорению горения: чем больше диаметр форсунки d_0 , тем больше масштаб турбулентных пульсаций [4]. И, наоборот, с уменьшением d_0 и приближением d_0 к $d_* = 3 \cdot 10^{-3}$ м, (что идентифицируется в работе [4] как толщина волны горения) влияние индуцированной турбулентности постепенно прекращается.

В монографии [4] представленные выше эмпирические зависимости (3) и (4) послужили основанием для фундаментального вывода о том, что массовая скорость горения газообразного топлива при турбулентном режиме – $S_{B,T}$ тем выше аналогичного параметра при ламинарном режиме – $S_{B,L}$, чем больше произведение критерия Рейнольдса $\text{Re}_0(d_*)$ на безразмерный масштаб (d_0/d_*) :

$$\frac{S_{B,T}}{S_{B,L}} = 0,09 \text{Re}_0^{0,3} (d_*) \cdot (d_0/d_*)^{0,3} \quad (5)$$

Следует подчеркнуть, что как соотношения (3) и (4), так и результирующее уравнение (5) справедливы для диффузионного режима горения топливных струй, истекающих в затопленное пространство, заполненное воздухом.

Прямые измерения ламинарной $S_{B,L}$ и, особенно, турбулентной $S_{B,T}$ скоростей горения топлива возможны по методике, разработанной нашим соотечественником В.А. Михельсоном в случае заранее перемешанных топливных смей.

В литературе представлено не так уж много результатов таких комплексных измерений. Тем более важно, что ещё в 1948 году опубликована работа [3], в которой такое сопоставление двух режимов горения проведено и получена критериальная зависимость, весьма близкая к (5):

$$\frac{S_{B,T}}{S_{B,L}} = 0,17 \text{Re}_0^{0,24} d_0^{0,26} \quad (6)$$

Здесь d_0 измерено в «см», а непосредственно результаты испытаний приведены на рис. 2.

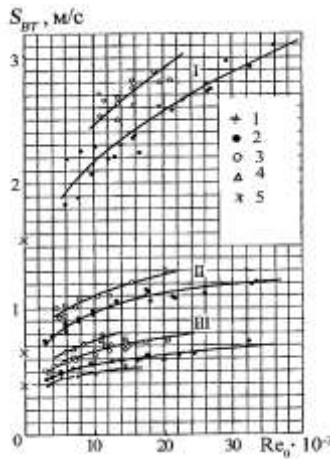


Рис.2.

Результаты экспериментов по влиянию числа Re и диаметра d_0 на скорость турбулентного горения $S_{B,T}$: **I** - C_2H_2 , **II** - C_2H_4 и **III** - C_3H_8

Установив зависимость скорости горения S_B от режима истечения струи топлива в затопленное пространство, заполненное воздухом, можно построить карту режимов горения (рис. 3). В левом углу её, при малых значениях критерия $Re_0 < 10^3$, мы отметили т.н. кинетический режим горения. Только здесь скорость распространения волны горения S_B можно считать нормальной в метрологическом смысле, т.е. она не зависит ни от скорости истечения топлива (топливной смеси), ни от размеров и формы форсунки. Скорость горения часто отождествляется поэтому с физико-химической характеристикой топливной смеси ([1]–[2]).

Реакции, протекающие при горении топливных газов, отличаются от многих других химических реакций высокой энергией активации E . Этот параметр характеризует уровень энергетического барьера, который необходимо преодолеть молекулам реагирующих компонент для начала химического взаимодействия.

По модели, предложенной Аррениусом, энергия активации E входит в показатель экспоненты кинетики реакции $\dot{W}(T)$, под которой понимают вероятность протекания химической реакции при известной

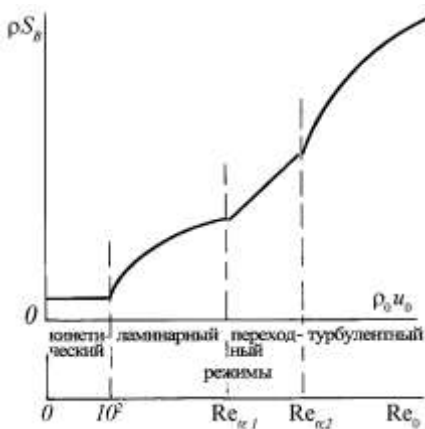


Рис.3.

Карта режимов горения в широком диапазоне чисел Re_0

температуре T . Если учесть, что начальная температура топлива T_2 может превышать стандартное значение $T_0 = 300 K$, то скорость горения

топлива S_B окажется значительно выше S_B^0 , указанного в справочнике (рис.4), что необходимо учитывать при проектировании камер сгорания.

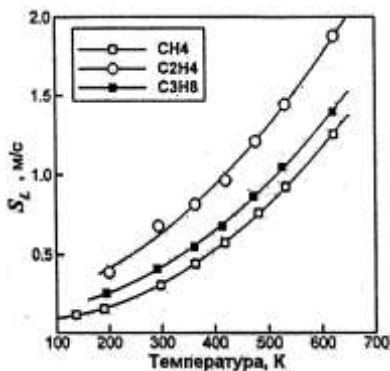


Рис.4.

Зависимость скорости горения S_B^0 от температуры предварительного подогрева топливных газов.

И, наконец, вернемся к проблемам перемешивания топлива и окислителя, а также к эвакуации конечных продуктов реакции из зоны горения. Для струйных форсунок важно установить критические значения скорости истечения u_0 , при котором наступит турбулентный режим и скорость диффузии всех компонент, а следовательно, и скорость горения будут определяться соотношениями (5) или (6).

Этот режим, в отличие от ламинарного, позволяет на порядок поднять скорость горения, что подтверждается экстремально высоким уровнем распространения волны детонации ($1800 \div 2800$ м/с) по сравнению с волной дефлаграции ($0,4 \div 3,0$ м/с).

Список использованной литературы

1. Льюис Б., Эльбе Г., Горение, пламя и взрывы в газах. Пер. с англ./п/р Щелкина К.И. и Борисова А.А. / М.: изд. Мир, 1968, 592 с.
2. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965, 740 с.
3. Bollinger L., M., Williams D.T., NACA, TN, 1707, 1948.
4. Законы горения / п/р Полежаева Ю.В./, Энергомаш, 2006.— 352 с.
5. Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А. // Докл. АН СССР, 1938, № 19, с. 693.

КОНВЕКТИВНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Полежаев В.И.

Учреждение Российской Академии Наук,
Институт Проблем Механики им. А.Ю.Ишлинского, Москва

Различный характер воздействия элементарных механизмов тепловой гравитационной конвекции, обусловленных отсутствием гидростатического равновесия или потерей его устойчивости (первое вызывает температурное расслоение, второе в основном – перемешивание), приводит, при их совместном действии, к новым закономерностям теплообмена и температурного расслоения. Эти явления были предметом первых постановок задач о конвективных взаимодействиях при поддержании тепловых режимов низкокипящих жидкостей в космических системах, решенных в 70х годах, в период становления математического моделирования конвективных процессов на основе уравнений Навье-Стокса [1], а в 80х годах технологических задач получения полупроводниковых структур методом жидкостной эпитаксии [2]. С позиций конвективной устойчивости некоторые из таких задач (конвекция в наклонных слоях, в областях с криволинейной границей) нашли отражение в монографии [3]. Вместе с тем в связи с новыми приложениями конвективного теплообмена, в том числе в ресурсо-энергосберегающих технологиях, а также развитием средств моделирования, в исследовании конвективных взаимодействий, ставятся новые задачи, для решения которых полезен единый подход с учетом накопленного опыта.

В докладе изложены основные понятия и простейшие примеры конвективного взаимодействия, поясняется их роль при многопараметрическом анализе процессов теплообмена. Представлена основанная на опыте технических и технологических приложений современная классификация конвективных взаимодействий. Даны примеры из современной технологической практики выращивания кристаллов вытягиванием из расплава в двух- и трехмерных приближениях, показан ряд мало изученных трехмерных эффектов конвективных взаимодействий. Рассмотрена простейшая по постановке модель конвекции в слоях при разных числах Прандтля, удлинениях и углах наклона, в которой реализуются основные механизмы и режимы конвективных взаимодействий. Делаются попытки ее более полного параметрического исследования для поиска аналогов конвективных взаимодействий в технических и технологических системах (режимы максимальных или минимальных значений теп-

лообмена и температурного расслоения, стабилизация колебаний итд.). Показано, что некоторые эффекты воспроизводятся в случае конвекции в квадратной области при различной ориентации. Рассматриваются границы появления и характеристики гистерезисных эффектов теплообмена при изменении ориентации. Обсуждаются проявления эффектов взаимодействия малых сил разной природы (капиллярных и объемных, гравитационных и вращательных), вызывающих неоднородность расслоения легирующих примесей в экспериментах по космическому материаловедению, также являющихся результатом конвективных взаимодействий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Ведущей научной школы № 2496.2008.8 и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 09-01-00230).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полежаев В.И. Конвективное взаимодействие в цилиндрическом сосуде, частично заполненном жидкостью при подводе тепла к боковой и свободной поверхностям и дну. Изв АН СССР, Механика жидкости и газа, № 4, 1972, 77-88.

2 Полежаев В.И., Белло М.С., Вerezуб Н.А. и др. Конвективные процессы в невесомости. М: Наука, 1991, 240 с.

3. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. лит., 1989, 320с.

УСТОЙЧИВОСТЬ СТРУИ ЭЛЕКТРОЛИТА В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

Полянских С. В., Демехин Е. А.

Кубанский государственный университет, Краснодар

Рассмотрена задача о поведении микроструи жидкости электролита во внешнем тангенциальном электрическом поле, гармонически осциллирующем с некоторой частотой. Жидкость предполагается вязкой ньютоновской. Несмотря на частое использование в экспериментальных и прикладных целях растворов электролитов [1,2], соответствующей теории до сих пор не существует.

Приводятся результаты, касающиеся первичной линейной стадии потери устойчивости. В результате линеаризации системы около тривиального решения возникает задача на собственные значения, имеющая вид краевой задачи для линейного уравнения в частных производных с периодическими по времени коэффициентами. Показано, что среди

счетного множества собственных значений соответствующего оператора монодромии имеется лишь один вещественный неустойчивый мультипликатор.

Для исследования колебаний с высокой частотой применяется более простой в использовании асимптотический метод усреднения [3], который обосновывается результатами, даваемыми теорией Флоке. Метод усреднения дает явное дисперсионное соотношение задачи, пригодное с высокой степенью точности для высоко-частотных колебаний.

Работа финансировалась грантом РФФИ, проект 08-01-00005-а.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Zeleny J. The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces// The Phys. Rev. 1914. V. 3. № 2, P. 69-91.
2. Gonzales A., Ramos A., et. al. Fluid flow induced by nonuniform AC electric fields in electrolytes on microelectrodes. II. A linear double-layer analysis // The Phys. Rev. E. 2003. V. 61. № 4. P. 4019.
3. Polyanskikh S. V., Demekhin E. A. Stability of non-axisymmetric electrolyte jet in high-frequency ac electric field // Microgravity Sci. Technol. 2009. V. 21. P. S325-S329.

STABILITY OF LIQUID ELECTROLYTE JET IN AC ELECTRIC FIELD OF ARBITRARY FREQUENCY

Polyanskikh S. V., Demekhin E. A.
Kuban State University, Krasnodar

The problem of the liquid micro-jet behavior placed in external tangential ac electric field is under consideration. The fluid is supposed to be viscous Newtonian. From the physical point of view liquid is supposed to be ionic conductor, i. e. electrolyte. Electrolytes are the least studied liquids, despite the fact that they were investigated in experiments and often used in practice [1,2]. The corresponding theory still does not exist.

In the present work linear stability analysis is investigated theoretically. The linear stability problem arises in the form of eigenvalue problem for linear partial differential equation with spatial-dependent time-periodic coefficients. It is shown that monodromy operator has the only real unstable multiplier among countable set of other eigenvalues.

One of the most simple and effective asymptotic method – the averaging method – is applied to study vibrations with high frequencies [3]. It is justified

by the results obtained by Floquet theory. Averaging method yields an explicit dispersion relation of the problem suitable for high-frequency oscillations of external electric field with a high degree of accuracy.

The research was partially financed by the Russian Foundation for Basic Research grants № 08-01-00005-a

REFERENCES

1. Zeleny J. The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces// The Phys. Rev. 1914. V. 3. № 2, P. 69-91.

2. Gonzales A., Ramos A., et. al. Fluid flow induced by nonuniform AC electric fields in electrolytes on microelectrodes. II. A linear double-layer analysis // The Phys. Rev. E. 2003. V. 61. № 4. P. 4019.

3. Polyanskikh S. V., Demekhin E. A. Stability of non-axisymmetric electrolyte jet in high-frequency ac electric field // Microgravity Sci. Technol. 2009. V. 21. P. S325-S329.

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИПЕРЗВУКОВОМ УДАРНОМ СЛОЕ

Поплавская Т.В., Цырюльников И.С.
Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН
Новосибирский государственный университет

Традиционно, анализ ламинарно-турбулентного перехода разделяют на три стадии: задача восприимчивости, экспоненциальный рост малых возмущений и нелинейное взаимодействие возмущений и стохастизация, ведущая к турбулентности. Первая и вторая стадии ламинарно-турбулентного перехода успешно исследовались с помощью линейной теории гидродинамической устойчивости. Однако в случае гиперзвукового ударного слоя, когда течение не параллельно, и существуют значительная расхожимость течения и продольный градиент давления, когда головная ударная волна расположена очень близко к пограничному слою, и когда волны неустойчивости могут возбуждаться не только через механизм восприимчивости, но также и путем прямого усиления возмущений при прохождении через ударную волну, перспективным становится использование прямого численного моделирования всех стадий перехода, от восприимчивости до нелинейных взаимодействий.

Методом прямого численного моделирования исследовано нарастание возмущений в гиперзвуковом ($M_\infty=21$) ударном слое на пластине, вызванных внешними акустическими возмущениями. В численном исследовании использовался пакет программ, созданный в ИТПМ СО РАН на основе решения полных двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса с использованием схем сквозного счета высокого порядка точности [1].

Результаты моделирования для внешних акустических волн с малыми начальными амплитудами показали хорошее согласование с расчетами по линейной локально-параллельной теории устойчивости с учетом влияния ударной волны [2], где обычные асимптотические граничные условия для возмущений были заменены условиями на ударной волне, и с данными трубного эксперимента. Вычисления при больших начальных амплитудах показывают, что в ударном слое становятся существенными нелинейные процессы: искажение среднего течения (Рис.1), нелинейное насыщение амплитуды основной гармоники и быстрый рост амплитуды второй гармоники (Рис.2).

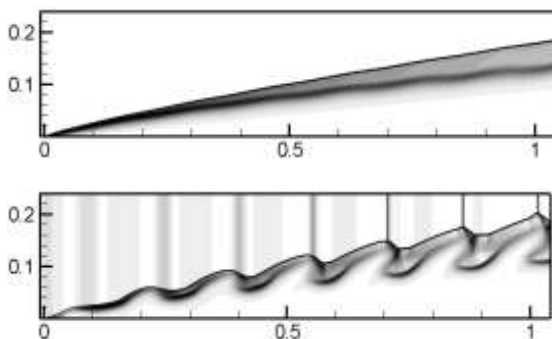


Рис. 1

. Расчетная шпирен-визуализация - изолинии градиента полной плотности: *а* – стационарное течение, *б* - $A=0.03$; *в* - $A=0.6$

В работе также исследовано нелинейное развитие возмущений в гиперзвуковом ударном слое на пластине при воздействии на него акустических возмущений внешнего потока одновременно на нескольких частотах. Показано появление комбинационных частот - суммарных и разностных – и их взаимодействие друг с другом.

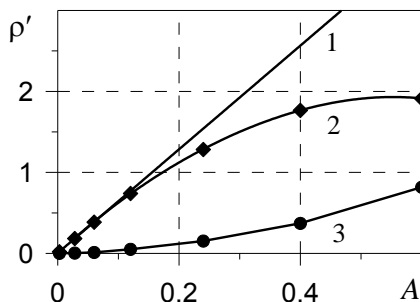


Рис.2.

Амплитуды пульсаций плотности при $x=0.5$: 1 – линейная зависимость, 2 – основная частота, 3 – первая гармоника

Для амплитуд акустических возмущений по пульсациям давления на границе пограничного слоя в построены диаграммы бикогерентности. Биспектральный анализ подтверждает присутствие нелинейных взаимодействий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №09-08-00679), АЦВП (проекта №2.1.1/3963) и программы фундаментальных исследований Президиума РАН №11 (проект №9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев А.Н., Поплавская Т.В., Хотяновский Д.В. Применение схем высокого порядка точности при моделировании нестационарных сверхзвуковых течений. Математическое моделирование. 2007. Т. 19. N 7. С. 39-55.
2. Маслов А. А., Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Смородский Б. В. Устойчивость гиперзвукового ударного слоя на плоской пластине. Изв. РАН, МЖГ. 2004. №2. С. 16-23.

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF NONLINEAR WAVE PROCESSES IN A HYPERSONIC SHOCK LAYER

Poplavskaya T.V. and Tsiryulnikov I.S.

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk State University

The analysis of the laminar-turbulent transition is traditionally divided into three stages: problems of receptivity, exponential growth of small perturbations, and nonlinear interaction of disturbances with stochastization leading

to the transition to turbulence. The first and second stages of the laminar-turbulent transition have been successfully studied by means of the linear theory of hydrodynamic stability. In the case of a hypersonic shock layer, however, where the flow is not parallel, the flow is essentially divergent, there is a streamwise pressure gradient, the bow shock wave is located extremely close to the boundary layer, and instability waves can be excited not only by the receptivity mechanism but also by means of direct amplification of disturbances passing through the shock wave, it seems promising to use direct numerical simulations (DNS) for all stages of the transition, from receptivity to nonlinear interaction.

The growth of disturbances excited by external acoustic disturbances on the plate surface in a hypersonic ($M_\infty=21$) shock layer on a flat plate is studied by the method of direct numerical simulations. The numerical study is performed with the use of codes developed at ITAM SB RAS, based on solving full two-dimensional unsteady Navier-Stokes equations by means of high-order shock-capturing schemes [1].

The DNS results for external acoustic waves with small initial amplitudes are in good agreement with the data calculated by the locally parallel linear stability theory with allowance for the shock wave influence [2], where the usual asymptotic boundary conditions for disturbances are replaced by the conditions on the shock wave, and with the data of wind-tunnel experiments. The calculations at high initial amplitudes show that nonlinear processes become more essential in the shock layer: distortion of the mean flow (Fig. 1), nonlinear saturation of the amplitude of the first harmonic and rapid growth of the amplitude of the second harmonic (Fig. 2).

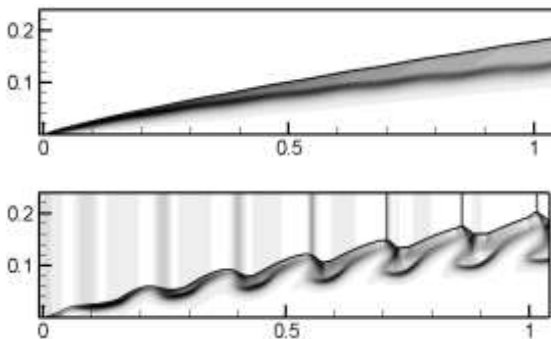


Рис. 1

. Расчетная шпирен-визуализация - изолинии градиента полной плотности: *a* – стационарное течение, *б* - $A=0.03$; *в* - $A=0.6$

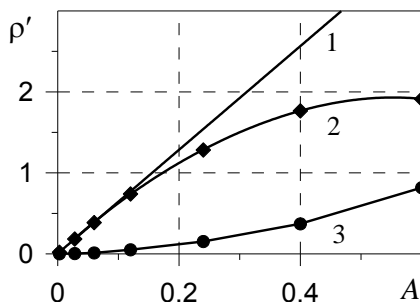


Рис.2.

Амплитуды пульсаций плотности при $x=0.5$: 1 – линейная зависимость, 2 – основная частота, 3 – первая гармоника

The nonlinear evolution of disturbances in a hypersonic shock layer on a flat plate under the action of acoustic free-stream disturbances at several frequencies simultaneously is also studied. It is demonstrated that combination (sum and difference) frequencies appear and interact with each other.

Bicoherence diagrams are constructed for the amplitudes of acoustic disturbances on the basis of pressure fluctuations on the boundary-layer edge. The bispectral analysis confirms the presence of nonlinear interactions.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 09-08-00679), by the Analytical Development Targeted Program (Project No. 2.1.1/3963), and by the Presidium of the Russian Academy of Sciences (Program for Basic Research No. 11/9).

REFERENCES

1. Kudryavtsev, A.N., Poplavskaya, T.V., Khotyanovsky, D.V. Application of high-order schemes in modeling unsteady supersonic flows. *Mat. Model.* 2007, V. 19, No. 7, pp. 39-55.
2. Maslov, A.A., Mironov, S.G., Poplavskaya, T.V., Smorodsky, B.V. Stability of a hypersonic shock layer on a flat plate. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Mekh. Zhidk. Gaza*, 2004, No. 2, pp.16-23.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПОДДУВАХ ГАЗА В КАВЕРНУ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ЧИСЛОМ КАВИТАЦИИ

Прокофьев В.В., Козлов И.И., Очеретяный С.А.
Институт механики МГУ, Москва

Проведенные в последние годы в Институте механики МГУ экспериментальные исследования плоского струйного течения с образованием искусственной вентилируемой каверны с отрицательным числом кавитации показали, что в отличие от обычной каверны унос газа здесь существенно связан с релей-тейлоровской (Р-Т) неустойчивостью границы каверны. Однако эти исследования ограничивались докритическими и околокритическими режимами струйного течения (критический режим соответствует теоретическому предельному течению с присоединением каверны к стенке-экрану или с образованием каверны с хвостовой точкой возврата). При сверхкритических условиях может возникнуть существенно нестационарный автоколебательный режим течения.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований таких автоколебательных режимов для случая плоского течения. Обнаружено, что при неизменных геометрии и системе подвода воды все основные характеристики течения зависят от коэффициента поддува воздуха в каверну и относительного объема каверны. Показано, что с ростом поддува газа в каверну при заданном объеме каверны интенсивность автоколебаний монотонно возрастает, характер осцилляций заметно меняется, а число Струхала при этом меняется незначительно. При неизменном коэффициенте поддува газа амплитуда автоколебаний падает с ростом объема каверны и при некотором пороговом значении автоколебания прекращаются. Это пороговое значение растет с ростом коэффициента поддува.

Приведены результаты исследований течения с помощью скоростной видеокамеры со скоростью съемки 4000 кадр/с. Показан процесс эволюции режимов истечения струи с ростом поддува в каверну от околокритического стационарного, затем начального автоколебательного до развитого прерывистого (помпажного) режима. На основании сравнительного анализа осциллограмм давления и видеоряда представлено подробное описание развитого помпажного режима. Анализируются особенности проявления неустойчивости Релея-Тейлора для различных стадий развития автоколебательных режимов.

О ДВИЖЕНИИ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ ВДОЛЬ СТЕНКИ В ВЯЗКОЙ И ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ

Прокунин А.Н. Водопьянов И.С.
НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

В этой работе начато исследование кавитационного явления в вязкоупругой жидкости. В 2004 году А.Н. Прокунин экспериментально обнаружил явление: "всплытие частицы над стенкой под действием кавитации". В вязкоупругой жидкости это явление может быть искажено сдвиговой упругостью жидкости. В качестве слабо вязкоупругой жидкости (время релаксации ~ 0.3 с) был выбран 0.02% раствор полиакриламида в глицерине. Результаты экспериментов, полученные на растворе полиакриламида, сравнивались результатами, полученными на глицерине. Выяснилось, что в вязкоупругой жидкости возможна кавитация, при этом принципиально изменяется форма каверны: она оказывается суженой перпендикулярно направлению движения по сравнению с каверной в глицерине и заострена вдоль направления движения. Зарегистрированная скорость вращения частицы (металлического шарика) оказалась меньше примерно на треть в сравнении с глицерином.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-08-18244а).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ В СЛАБО РАСШИРЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ

Решмин А.И., Тепловодский С.Х, Трифионов В.В.

Проведены экспериментальные и расчетные исследования параметров турбулентного течения в канале диффузора с углом наклона образующей меньше 0.3 градуса при числах Рейнольдса $Re < 2000$.

Выполненные ранее исследования /1, 2/ показали, что при течении в трубе на значение критического числа Рейнольдса Re^* больше влияет структура начальных возмущений, чем их амплитуда. Наименьшее значение $Re^* \sim 1950$ было получено при постановке на входе в трубу безотрывного диффузора.

Для выяснения структуры течения в безотрывном диффузоре были проведены исследования /3/, которые показали:

1. При подаче на вход диффузора турбулентного потока воздуха, в выходном сечении канала при $Re_{\text{вых}} > \sim 1000$ реализуется установившееся турбулентное течение. При уменьшении $Re_{\text{вых}}$ ниже 1000, течение непрерывным образом переходит в ламинарное. Турбулентные пульсации при $Re_{\text{вых}} < \sim 1000$ исчезают.

2. В процессе исследования были измерены скорость и пульсации скорости в центре выходного сечения канала при $600 < Re_{\text{вых}} < 3000$, а так же профили скорости и пульсаций скорости в выходном сечении канала. При $Re_{\text{вых}} = 2870, 1600, 1300$ измеренные параметры течения хорошо совпадают с расчетом турбулентного течения в диффузоре, полученным с использованием трёхпараметрической модели сдвиговой турбулентности.

1. Павельев А.А., Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Федосеев С.Г. О нижнем критическом числе Рейнольдса для течения в круглой трубе // Изд. РАН. МЖГ. 2003. №4. С. 47-55.

2. Павельев А.А., Решмин А.И., Трифонов В.В. Влияние структуры начальных возмущений на режим установившегося течения в трубе // Изв. РАН. МЖГ. 2006. №6. С. 68-76.

3. Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Трифонов В.В. Экспериментальное определение пульсационных характеристик турбулентного потока при числах Рейнольдса, меньших 2000, в диффузорах и цилиндрических трубах с внутренним источником возмущений // НИИ Механики МГУ. 2009. Отчет № 5024. 40 с.

ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОСНОВНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ДВУМЯ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ПРОНИЦАЕМЫМИ ЦИЛИНДРАМИ

Романов М. Н.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Исследуется устойчивость основного режима движения вязкой жидкости между двумя проницаемыми вращающимися бесконечными концентрическими цилиндрами при наличии радиального потока, направленного от внутреннего цилиндра к внешнему. Основной режим, представляющий собой круговое течение Куэтта с ненулевой радиальной компонентой поля скорости, может потерять устойчивость двумя способами. В результате наложения монотонных вращательно-

симметричных возмущений течение Куэтта сменяется течением типа вихрей Тейлора. Наложение колебательных трехмерных возмущений приводит к возникновению трехмерного течения с бегущими в азимутальном направлении волнами. В работе рассчитаны нейтральные кривые, соответствующие этим двум типам потери устойчивости основного режима.

LINEAR STABILITY ANALYSIS OF THE MAIN REGIME OF FLUID MOTION BETWEEN TWO ROTATING PERMEABLE CYLINDERS

Romanov M. N.

Southern Federal University, Rostov-on-Don

It has been investigated the stability of the main regime of motion of viscous incompressible liquid flows between two infinite permeable rotating concentric cylinders in the presence of radial flow directed from the internal cylinder towards the external one. The main regime representing the circular Couette flow with nonzero radial velocity field component can lose stability in two ways. As a result of the superposition of the monotonous rotation-symmetric disturbances, the Couette flow is replaced by the Taylor-type vortices. The superposition of three-dimensional oscillatory disturbances leads to a three-dimensional flow with azimuthal waves. In the research there have been computed the neutral curves for two types of losing stability of the main regime.

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В НАНОЖИДКОСТЯХ: СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ

Рудяк В.Я.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет

Наножидкостью называют двухфазную систему, состоящую из несущей среды (жидкости или газа) и наночастиц, т.е. частиц с характерными размерами от 1 до 100 нм, они в общем случае могут быть твердыми, жидкими или газообразными. Типичными несущими жидкостями является вода или какие-либо органические жидкости (этиленгликоль, масла, биологические жидкости), полимерные растворы и т.д. Интерес к исследованию процессов переноса наножидкостей связан в первую оче-

редь с их применением в МЭМС- и нанотехнологиях различного назначения. Эта тематика имеет и важную фундаментальную составляющую, поскольку оказывается, что процессы переноса наночастиц в газах и в жидкостях не удается описывать традиционными методами. Для адекватного понимания механизмов процессов переноса наночастиц необходим пересмотр некоторых сложившихся представлений о характере процессов переноса и в обычных молекулярных жидкостях.

В данном докладе дан обзор современного состояния изучения процессов переноса в наножидкостях. Рассматриваются как экспериментальные, так и теоретические данные, в том числе полученные автором и его группой в последние несколько лет. В частности, обсуждаются

- характерные механизмы процессов переноса наночастиц в газах и жидкостях [1–3];
- диффузия наночастиц в газах и жидкостях [3–7];
- эффективная вязкость наногазовзвесей и наносuspезий [8–11];
- теплопроводность наножидкостей [11];
- силы, действующие на наночастицы в газах и жидкостях [10, 12];
- неклассическая диффузия молекул жидкости и плотных газов [13].

Работа выполнена при частичной поддержке Программы Минобрнауки РФ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (проект № П230), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-08-00164) и гранта № НШ-454.2008.1 поддержки ведущих научных школ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудяк В.Я., Белкин А.А. О релаксации скорости наночастицы в конденсированной несущей среде // Письма в ЖТФ, 2003, т.29, вып. 13, с. 71-79.
2. Рудяк В.Я., Белкин А.А. О механизмах коллективного взаимодействия наночастиц с конденсированной несущей средой // Теплофизика и Аэромеханика, 2004, т. 11, №2, с. 247-257.
3. Рудяк В.Я., Белкин А.А. Краснолуцкий С.Л. К статистической теории процессов переноса наночастиц в газах и жидкостях // Теплофизика и аэромеханика, 2005, т. 10, № 6, с. 64-96.
4. Rudyak V.Ya., Belkin A.A., Krasnolutskiy S.L. Diffusion of nanoparticles in gases and fluids // International J. of Nanomanufacturing, 2008, v. 2, No. 3, p. 204-225.
5. Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л., Иващенко Е.Н. (2008) О влиянии физических свойств материала наночастиц на их диффузию в раз-

- реженных газов. Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81, № 3. С. 76–81.
6. Рудяк В.Я. и др. О методах измерения коэффициента диффузии и размеров наночастиц в разреженном газе // Докл. Акад. Наук, 2002, т. 386, № 5, с. 624–628.
 7. Rudyak V.Ya., Dubtsov S.N., Baklanov A.M. Measurements of the temperature dependent diffusion coefficient of nanoparticles in the range of 295–600K at atmospheric pressure // J. Aerosol Sci., 2009, v. 40, No. 10, p. 833–843.
 8. Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л. О вязкости разреженных газозвесей с наночастицами // Докл. Акад. Наук, 2003, Т. 392, № 4. С. 624–627.
 9. Рудяк В.Я., Белкин А.А., Егоров В.В. (2009) Об эффективной вязкости наносuspensions. ЖТФ. Т. 79. С. 18–25.
 10. Rudyak V.Ya. et al. Nanoparticle friction force and effective viscosity of nanofluids // Defect & Diffusion Forum, 2008, v. 273–276, p. 566–571.
 11. Rudyak V.Ya. et al. Viscosity and thermal conductivity of nanofluids // Proc. of 2nd Micro & Nano Flows Conf. West London: Brunel University, 2009, p. MNF32-1-MNF32-8.
 12. Рудяк В.Я., Белкин А.А., Томилина Е.А. Сила, действующая на наночастицу в жидкости // Письма в ЖТФ, 2008, т. 34, вып. 2, с. 69–74.
 13. Рудяк В.Я. и др. О неклассической диффузии молекул жидкостей и плотных газов // Докл. Акад. Наук, 2007, т. 412, № 4, с. 490–493.

TRANSPORT PROCESSES IN NANOFLUIDS: STATE AND PROBLEMS

Rudyak V.Ya.

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering

Nanofluids are two-phase systems consisting of a carrier medium (gas or liquid) and nanoparticles. Nanoparticles are the particles whose typical size is from 1 to 100 nm, they can generally be solid, liquid, or gaseous. Typical carriers are water and organic liquids (ethylene-glycol, oil and other lubricants, bio-fluids), polymer solutions, etc. Typical solid nanoparticles are usually particles of chemically resistant metals or metal oxides. Research on the physics of nanofluids and especially their transport properties has started recently and has been motivated by their various applications in different MEMS- and nanotechnologies. This subject has important fundamental constituent because

the nanoparticles transport processes in fluids are not describe by the traditional methods in general.

In present paper the recent state of studding the nanofluids transport processes is reviewed. The experimental and theoretical data including data obtained by the author and his group are analyzed. In particular, it is consider

- characteristic mechanisms of nanoparticles transport processes in gases and liquids [1–3];
- diffusion of nanoparticles in gases and liquids [3–6];
- effective viscosity of gas nano-suspebsions and nano-suspebsions [7–10];
- thermal conductivity of nanofluids [10];
- the force acting on nanoparticle in fluids [9, 11];
- non-classical diffusion of molecules in dense gases and liquids [12].

This work was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 07-08-00164), the Program “Scientific and scientific-pedagogical personnel of innovative Russia in 2009-2013” of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. P230) and by the grant of the President of the Russian Federation for Support of Leading Scientific Schools (project no. NSh-454.2008.1).

REFERENCES

1. Rudyak V.Ya., Belkin A.A. Nanoparticle velocity relaxation in condensed carrying medium // *Tech. Phys. Letters*, 2003, v. 29, p. 560-562.
2. Rudyak V.Ya., Belkin A.A. Mechanisms of collective nanoparticles interaction with condensed solvent // *Thermophysics & Aeromechanics*, 2004, v. 11, № 2, p. 54-63.
3. Rudyak V.Ya., Belkin A.A., Krasnolutskii S.L. Statistical theory of nanoparticle transport processes in gases and liquids // *Thermophysics & Aeromechanics*, 2005, v. 10, p. 489-507.
4. Rudyak V.Ya., Belkin A.A., Krasnolutskii S.L. Diffusion of nanoparticles in gases and fluids // *International J. of Nanomanufacturing*, 2008, v. 2, No. 3, p. 204-225.
5. Rudyak V.Ya. et al. About measurement methods of nanoparticles sizes and diffusion coefficient // *Doklady Phys.*, 2002, v. 47, p. 758-761.
6. Rudyak V.Ya., Dubtsov S.N., Baklanov A.M. Measurements of the temperature dependent diffusion coefficient of nanoparticles in the range of 295–600K at atmospheric pressure // *J. Aerosol Sci.*, 2009, v. 40, No. 10, p. 833-843.
7. Rudyak V.Ya., Krasnolutskii S.L. About viscosity of rarefied gas suspensions with nanoparticles // *Dokl. Phys.*, 2003, v. 48, p. 583-586.

8. Rudyak V.Ya., Belkin A.A., Egorov V.V. On the effective viscosity of nanosuspensions // Technical Phys., 2009, v. 54, p. 1102-1109.

9. Rudyak V.Ya. et al. Nanoparticle friction force and effective viscosity of nanofluids // Defect & Diffusion Forum, 2008, v. 273-276, p. 566-571.

10. Rudyak V.Ya. et al. Viscosity and thermal conductivity of nanofluids // Proc. of 2nd Micro & Nano Flows Conf. West London: Brunel University, 2009, p. MNF32-1-MNF32-8.

11. Rudyak V.Ya., Belkin A.A., Tomilina E.A. Force acting on nanoparticle in fluid // Tech. Phys. Letters, 2008, v. 34, p. 76-78.

12. Rudyak V.Ya. et al. On the nonclassical diffusion of molecules of liquid and dense gases // Doklady Phys., 2007, v. 52, p. 115-118.

ЗАКОНЫ ПОДОБИЯ ПРИСТЕННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА С ОСАЖДАЮЩИМИСЯ ЧАСТИЦАМИ

Сиковский Д.Ф.

Институт теплофизики СО РАН им. С.С.Кутателадзе,
Новосибирск, Новосибирский государственный университет

С помощью анализа размерностей и подобия в сочетании с методом сращиваемых асимптотических разложений проведён анализ задачи осаждения инерционных частиц малого размера из турбулентного потока на ограничивающие поверхности при больших числах Рейнольдса потока $R_+ = v_\tau R / \nu \gg 1$ и значениях параметра инерционности $\tau_+ \ll R_+$. Для диффузионно-импактного режима и инерционного режима осаждения частиц впервые получены асимптотические выражения для скорости осаждения, хорошо согласующиеся как с имеющимися экспериментальными данными, так и данными DNS- и LES-моделирования. Показано, что в диффузионно-импактном режиме $(0.1 \leq \tau_+ \leq 10)$ существенно влияние броуновской диффузии, которым в ряде работ пренебрегалось. Впервые показано, что в области перекрытия, или в логарифмическом слое профили концентрации и моментов пульсационной скорости частиц являются универсальными функциями координаты $y_p = y_+ / \tau_+ = y / (v_\tau \tau_p)$, причём в интервале расстояний

от стенки $\tau_+ \ll y_+ \ll R_+$ справедлив характерный для безинерционной примеси логарифмический закон распределения концентрации частиц. Получены составные разложения для концентрации частиц и вторых моментов пульсаций скорости частиц в логарифмическом слое равномерно пригодные во всей области изменения параметра τ_+ .

В работе показано, что при больших числах Рейнольдса течения область инерционного осаждения частиц $\tau_+ \geq 10$ подразделяется на две подобласти. При $\tau_+ \geq 0.06R_+$ инерция частиц существенна во всём турбулентном потоке. При $10 \leq \tau_+ \leq 0.06R_+$ пристенная зона состоит из двух областей: области существенного влияния инерции частиц $y_+ \ll \tau_+$ и области безинерционных частиц $\tau_+ \ll y_+ \ll R_+$. Такая структура дисперсного потока при $10 \leq \tau_+ \leq 0.06R_+$ позволяет использовать для моделирования дисперсного потока с относительно большими значениями параметра инерционности $\tau_+ \leq 0.06R_+$ простую диффузионно-инерционную модель для малоинерционных частиц [1] в сочетании с пристеночными функциями, являющимися решением упрощенной одномерной задачи о переносе инерционных частиц в пристенной зоне. Такая задача решена на основе результатов [2] и модели переноса напряжений Рейнольдса дисперсной фазы [3], предложена пристеночная функция для концентрации дисперсной фазы, являющаяся аналитической аппроксимацией численного решения задачи. Пристеночная функция апробирована при численном решении задачи осаждения аэрозольных частиц на стенки трубы с помощью k - ε -модели турбулентности и диффузионно-инерционной модели [4].

ЛИТЕРАТУРА.

1. Zaichik, L.I., Soloviev, S.L., Skibin, A.P. Alipchenkov, V.M. A Diffusion-Inertia Model for Predicting Dispersion of Low-Inertia Particles in Turbulent flow// 5th International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan, Paper No. 220, 2004.

2. Сиковский Д.Ф. Закономерности осаждения частиц из турбулентного газодисперсного потока в каналах// Изв. РАН. МЖГ. 2010. №1. С.84-95.

3. Зайчик Л.И., Алипченков В.М. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. М., Физматлит, 2007. 312 с.

4. Demenkov A.G., Ilyushin B.B., Sikovsky D.Ph., Strizhov V.F., Zaichik L.I. Development of diffusion-inertia model for particle deposition in turbulent flows// Journal of Engineering Thermophysics, 2009, V.18, №1, P.39-48.

SIMILARITY LAWS OF NEAR-WALL TURBULENT DISPERSED FLOW WITH PARTICLE DEPOSITION

D.Ph.Sikovsky,
Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk
Novosibirsk State University

Scaling analysis and method of matched asymptotic expansions is applied for the problem of the deposition of small inertial particles from turbulent dispersed flows at large Reynolds number $R_+ = v_\tau R/\nu \gg 1$ (v_τ – friction velocity, R – outer lengthscale) and the range of the dimensionless particle relaxation time $\tau_+ \ll R_+$. For the diffusion-impaction and inertia-moderated regimes of particle deposition the similarity laws are obtained for the rate of deposition, which are in good agreement with the data of experimental and DNS and LES data. It is shown that in the diffusion-impaction regime ($0.1 \leq \tau_+ \leq 10$) the effect of Brownian diffusion is non-negligible, as it was supposed by some researchers. Within the overlap layer, or log layer the particle concentration and statistical moments of particle velocities are shown to be the universal functions of the coordinate $y_p = y_+/\tau_+ = y/(v_\tau \tau_p)$, the logarithmic law for the concentration being valid in the range of distances to the wall $\tau_+ \ll y_+ \ll R_+$. The composite asymptotic expansions are derived for the particle concentration and the second moments of velocity fluctuations which are uniformly valid for τ_+ .

It is shown that inertia-moderated regime of deposition $\tau_+ \geq 10$ are subdivided into two subregimes at large Reynolds number of flow. When $\tau_+ \geq 0.06R_+$, then the particle inertia is essential everywhere. In the range $10 \leq \tau_+ \leq 0.06R_+$ the log layer are divided into two regions: the region of essential effect of the particle inertia $y_+ \ll \tau_+$, and the region of negligible particle inertia $\tau_+ \ll y_+ \ll R_+$. Such subdivision gives a ground for the usage of the simplified diffusion-inertia model [1] for the numerical modeling of dispersed flow with relatively inertial particles $10 \leq \tau_+ \leq 0.06R_+$ together with the wall functions for the particle concentration being the solution of simplified one-dimensional problem of inertial particle deposition in the near-wall region. Such a problem is solved on the base of results from [2] and differential particles Reynolds stress transport model [3]. The wall functions for the concentration and the second moments of velocity fluctuations are derived. The wall functions are approved in numerical simulation of the particle deposition from the turbulent flow in circular tube using the k - ε -model of turbulence and diffusion-inertia model [4].

ЛИТЕРАТУРА.

1. *Zaichik, L.I., Soloviev, S.L., Skibin, A.P. Alipchenkov, V.M.* A Diffusion-Inertia Model for Predicting Dispersion of Low-Inertia Particles in Turbulent flow// 5th International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan, Paper No. 220, 2004.
2. *Сиковский Д.Ф.* Закономерности осаждения частиц из турбулентного газодисперсного потока в каналах// Изв. РАН. МЖГ. 2010. №1. С.84-95.
3. *Зайчик Л.И., Алипченков В.М.* Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. М., Физматлит, 2007. 312 с.
4. *Demenkov A.G., Ilyushin B.B., Sikovsky D.Ph., Strizhov V.F., Zaichik L.I.* Development of diffusion-inertia model for particle deposition in turbulent flows// Journal of Engineering Thermophysics, 2009, V.18, №1, P.39-48.

ЭВОЛЮЦИЯ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА В ВЯЗКОМ ТЕПЛОПРОВОДНОМ ГАЗЕ

Соленая О.А.

Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова.

Вихревые структуры (цилиндрические и тороидальные вихри) играют важную роль в турбулентных течениях. Движение вихревого кольца в идеальной жидкости впервые исследовал Лэм. Граничным случаем вихревого кольца является сферический вихрь Хилла. В предыдущих работах использовались упрощающие предположения (несжимаемость; малое поперечное сечение ядра вихря; постоянная вязкость). Мы использовали полную систему уравнений Навье-Стокса.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Omega_i}{\partial t} &= \nu \Delta \Omega_i + f_{li} \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= s \\ \frac{\partial s}{\partial t} &= \frac{4}{3} \nu \Delta s + \frac{1+h}{y} \Delta w = \frac{1}{y} \Delta h + f_2, \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{y}{\text{Pr}} \eta \Delta h - (y-1)s + f_3\end{aligned}\tag{1}$$

$$\Omega_1|_{t=0} = 0, \Omega_2|_{t=0} = 0, \Omega_3|_{t=0} = \frac{1}{\sqrt{g}} (\partial_1 \bar{g}_{22} \bar{v}^2 - \partial_2 \bar{g}_{12} \bar{v}^2),$$

$$s|_{t=0} = 0, w|_{t=0} = 0, h|_{t=0} = 0.$$

$$w = -\ln \rho, \vec{\Omega} = \text{rot} \vec{v}, s = \text{div} \vec{v}, h = T - 1, \nu = \frac{\mu}{\rho}, \eta = \frac{\lambda}{\rho}, \frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right), \frac{\lambda}{\lambda_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right).$$

Где ρ , T , μ , λ - плотность, температура, вязкость, теплопроводность, соответственно; Δ - оператор Лапласа; Pr - число Прандтля; γ - показатель адиабаты. f_{li}, f_2, f_3 - нелинейные члены, относительно первых производных. Система параболического типа, записана в безразмерной форме. Характеристическая длина - $l_0 = \nu_0 / c_0$, характеристическое время

- $t_0 = \nu_0 / c_0^2$, c - скорость звука. Индекс "0" обозначает начальное состояние.

Для решения уравнений Навье-Стокса используется метод параметрика. Предложенный метод решения системы состоит в ее сведении к системе интегральных уравнений типа Вольтерра и последующем использовании итерационной процедуры. Решение линейной системы используется в качестве первой итерации.

Вычисления были выполнены для расчета эволюции вихревого кольца. Начальные данные использованы из [1].

На рис. 1-3 показано изменение компоненты завихренности. Ось симметрии кольца совпадает с осью Oz декартовой системы координат. Как видно, компонента Ω_3 завихренности убывает со временем.

Также в работе была вычислена скорость вихревого кольца. Таким образом, задача эволюции вихревого кольца была решена численно, учитывая вязкость, теплопроводность и сжимаемость среды.

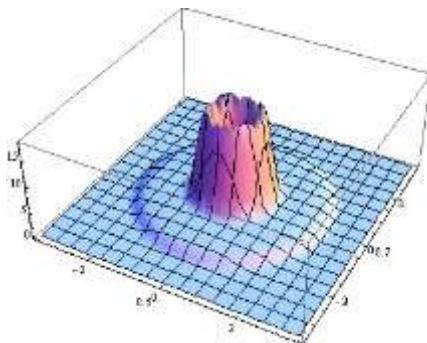


Рис. 1. Зависимость Ω_3 от x и y в момент времени $t=0.001$, в сечении вихревого кольца плоскостью $z=0$.

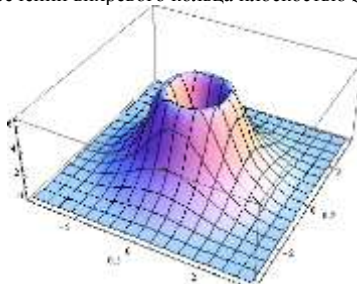


Рис. 2. Зависимость Ω_3 от x и y в момент времени $t=0.1$, в сечении вихревого кольца плоскостью $z=0$.

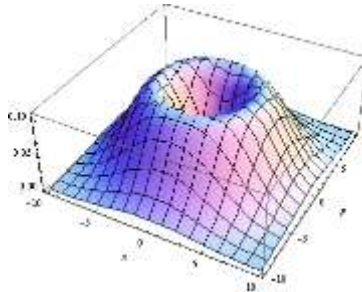


Рис. 3. Зависимость Ω_3 от x и y в момент времени $t=5$, в сечении вихревого кольца плоскостью $z=0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Morton T.S. The velocity field within a vortex ring with a large elliptical cross-section// Journal of Fluid Mechanics. 2004. V. 503. P. 247 – 271.

EVOLUTION OF THE VORTEX RING IN VISCOUS HEAT-CONDUCTING GAS

Solenaya O.A.

Physics Faculty, M.V.Lomonosov Moscow State University

Vortex structures (vortex tubes and rings) play an important role in turbulent flows. The motion of vortex ring in ideal fluid was investigated for the first time by Lamb. The limiting case of the vortex ring is the Hill's spherical vortex. Previous investigations were fulfilled under various simplifying assumptions (incompressibility; small cross-section of the vortex core; constancy of the viscosity).

We used the full system of the Navier-Stokes equations.

$$\frac{\partial \Omega_i}{\partial t} = \nu \Delta \Omega_i + f_{li}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = s$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{4}{3} \nu \Delta s + \frac{1+h}{y} \Delta w = \frac{1}{y} \Delta h + f_2, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{y}{\text{Pr}} \eta \Delta h - (y-1)s + f_3$$

$$\Omega_1|_{t=0} = 0, \Omega_2|_{t=0} = 0, \Omega_3|_{t=0} = \frac{1}{\sqrt{g}} (\partial_1 \bar{g}_{22} \bar{v}^2 - \partial_2 \bar{g}_{12} \bar{v}^2),$$

$$s|_{t=0} = 0, w|_{t=0} = 0, h|_{t=0} = 0.$$

$$w = -\ln \rho, \vec{\Omega} = \text{rot} \vec{v}, s = \text{div} \vec{v}, h = T - 1, \nu = \frac{\mu}{\rho}, \eta = \frac{\lambda}{\rho}, \frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right), \frac{\lambda}{\lambda_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right).$$

Here ρ , T , μ , λ are density, temperature, viscosity, thermal conductivity, respectively, Δ is the Laplace operator, Pr is the Prandtl number, γ is the adiabatic exponent. The symbols f_{1i}, f_2, f_3 denote nonlinear members (with regard to the first derivatives). The system is a parabolic one, it is written in a dimensionless form. The characteristic length is $l_0 = V_0 / c_0$, the characteristic time is $t_0 = V_0 / c_0^2$, c being the sound velocity. The subscript “0” refers to the initial state.

We solved the Navier-Stokes equations with the aid of parametrix method. The proposed method of solution of the system consists in reducing it into the system of integral equations of the Volterra type and in subsequent use of iterative procedure. The solution to the linearized system was taken as the first iteration.

Calculations have been made referring to the evolution of the vortex ring. Initial data for the velocity distribution were taken from the paper of T.S. Morton.

Figs. 1-3 show the variation of the component of the vorticity. The axis of symmetry of the vortex ring is in the coordinate origin. As seen, the vorticity component Ω_3 decays as the value of t increases due to dissipation.

We calculate components of the velocity of the vortex ring, as well. Thus the problem of evolution of a vortex has been solved numerically. We took into account viscosity, thermal conductivity and compressibility.

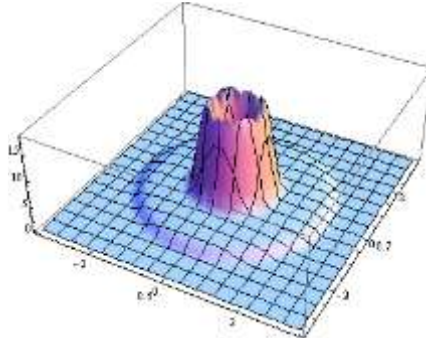


Fig. 1. Ω_3 against x and y at time $t=0.001$, section of the vortex ring by plane $z=0$.

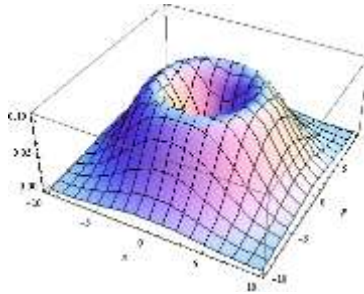


Fig. 2. Ω_3 against x and y at time $t=0.1$, section of the vortex ring by plane $z=0$.

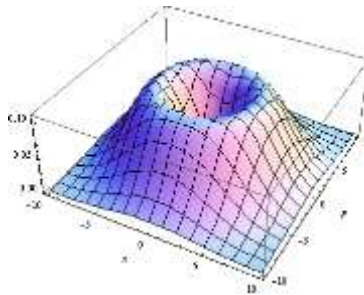


Fig. 3. Ω_3 against x and y at time $t=5$, section of the vortex ring by plane $z=0$.

REFERENCE

1. Morton T.S. The velocity field within a vortex ring with a large elliptical cross-section// Journal of Fluid Mechanics. 2004. V. 503. P. 247 – 271.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОСПРИИМЧИВОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ

Судаков В.Г., Егоров И.В., Федоров А.В.

Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ)

Предсказание ламинарно-турбулентного перехода – важная задача для проектирования и расчета сопротивления высокоскоростных летательных аппаратов. Ранний переход может привести к увеличению вязкого трения (которое может составлять более 30% полного сопротивления), к ухудшению производительности системы управления, к росту тепловых потоков. В данной работе проведено прямое численное моделирование восприимчивости и устойчивости двумерного гиперзвукового пограничного слоя на плоской пластине и конусе с помощью разработанного численного метода [1].

На первом этапе получено стационарное решение уравнений Навье-Стокса, которое удовлетворяет невозмущенным граничным условиям. Для исследования восприимчивости и устойчивости пограничного слоя начальные возмущения вводятся с помощью граничных условий (локальный периодический вдув-отсос на стенке, быстрая и медленная акустические волны, энтропийная волна или волна завихренности).

Сначала было рассмотрено численное моделирование двумерных возмущений, распространяющихся в пограничном слое на плоской пластине с острой передней кромкой при числе Маха 6. Исследована восприимчивость к различным типам возмущений.

Кроме того, исследовано влияние пористого покрытия на распространение возмущений. Граничные условия на пористой поверхности сформулированы на основе теоретической модели [2], которая объединяет возмущения вертикальной компоненты с возмущениями давления. Пористое покрытие эффективно снижает инкременты роста высокочастотных возмущений. В частности, амплитуда возмущений уменьшается в два раза на поверхности, покрытой слоем с 20% пористости.

Аналогичное численное моделирование возмущений было проведено для пограничного слоя на остром конусе с углом полураствора 7°. Параметры потока в расчетах соответствовали параметрам эксперимен-

тов [2], которые были проведены в ИТПМ СО РАН при числе Маха 5.95. Численные исследования показали, что пористый слой уменьшает амплитуду возмущений в пограничном слое до 4 раз, что соответствует экспериментальным данным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-08-00472) и АВЦП РНПВШ 2.1.1/200.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Egorov I.V., Fedorov A.V., Soudakov V.G. Direct numerical simulation of disturbances generated by periodic suction-blowing in a hypersonic boundary layer // Theoret. Comput. Fluid Dynamics, 2006, 20(1), pp. 41-54.

2. Fedorov A.V., Kozlov V.F., Shiplyuk A.N., Maslov A.A., Sidorenko A.A., Burov E.V., Malmuth N.D. Stability of hypersonic boundary layer on porous wall with regular microstructure // AIAA Paper 2003-4147, 2003.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ УПЛОТНЕНИИ НАРАЩИВАЕМОЙ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Суетнова Е.И., Чернявский В.М.

Институт физики Земли РАН, Москва; Институт механики МГУ

Представлены результаты исследования эволюции режимов фильтрации, обусловленных уплотнением наращиваемой слоисто-неоднородной пористой среды. Процессы уплотнения пористой среды осадков и фильтрации насыщающих флюидов, обусловленной уплотнением, являются базовыми механическими и гидродинамическими процессами, формирующими структуру и свойства заполнения осадочных бассейнов и эволюцию и характер развивающихся в них течений в истории осадконакопления. Механика и гидродинамика уплотнения осадков в процессе роста мощности осадочного слоя определяется скоростью осадконакопления и реологией и физическими и гидродинамическими свойствами осадков и насыщающих флюидов (Е.И.Суетнова, Guy Vasseur, 2000). Система уравнений, описывающая взаимосвязанные механические и гидродинамические процессы, протекающие при вязкоупругом уплотнении существенно нелинейна. Математическое моделирование взаимосвязанных процессов вязкоупругого уплотнения накапливающихся слоистых осадков и фильтрации насыщающих

флюидов показало, что в течение накопления пористых слоев осадков с различной проницаемостью происходит эволюция распределения порового давления, приводящая к перестройке процесса уплотнения и возмущениям скорости фильтрации. Показана зависимость развития этих возмущений от скорости осадконакопления.

ЛИТЕРАТУРА

E.I.Suetnova, Guy Vasseur. 1-D Modelling rock compaction in sedimentary basin using visco-elastic rheology // Earth and Planet. Sci. Letters, 2000, V. 178. P. 373-383.

ПАРАДОКСЫ ТЕОРИИ СТОКСА: О СИЛЕ ТРЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ КОНТАКТА СРЕД. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Чернявский В.М., Монахов А.А.

НИИ механики МГУ

Обсуждаются теоретические и экспериментальные вопросы ползущего течения жидкости в узких зазорах между движущимися поверхностями твердых тел и при контакте поверхности раздела двух жидкостей со стенкой.

Одной из нерешенных проблем остается наличие в изолированных точках на границе области особенностей, в которых скорость терпит разрыв и, как следствие, напряжения имеют бесконечные значения [1]. Классическим примером такого рода является задача о скрепере Гудье-ра-Тейлора.

Одной из возможностей разрешения парадокса бесконечного напряжения является отказ от предположения идеального соприкосновения стенок и допущения наличия малого зазора между ними. Однако, течение в узком зазоре между движущимися поверхностями также обладает парадоксальным свойством – наличием большого отрицательного давления в диффузорной области [2]. Примером является задача о движении шипа в подшипнике, решенной в точном конечном виде Чаплыгиным и Жуковским более ста лет назад.

Разрешение этого парадокса найдено в экспериментах Прокунина [2]: обнаружено нарушение сплошности жидкости и образование газовых пузырей.

В [4] обнаружено возникновение кавитационных пузырей, их электризация и свечение в окрестности небольшого ступенчатого расширения канала.

Значительное число исследований посвящено изучению условий на линии контакта двух жидких сред со стенкой. Условие прилипания жидкости к неподвижной стенке и наблюдаемое движение точки контакта приводит к парадоксальной необходимости допущения разрыва скорости и, как в задаче о скрепере, к бесконечной касательной силе. В ряде работ предложены модели с условием проскальзывания жидкости на стенке.

Мы приводим экспериментальное свидетельство (впервые доложенное на семинаре [5]) об образовании цепочки кавитационных пузырей вдоль линии контакта и полагаем, что их присутствие позволит выяснить условия «проскальзывания».

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №08-08-00463.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернявский В. М. Медленное течение жидкости в прямоугольной полости. ДАН, т. 425, №. 3, с. 334–337, 2009.

2. Чернявский В.М. Точное решение о ползущем цилиндрическом течении в подшипнике со свободным шипом. Доклады Академии Наук. 2008. Т. 418. № 1. с. 42–45.

3. Прокунин А.Н. О микрокавитации при медленном движении твердой сферической частицы вдоль стенки в жидкости. Изв. РАН, МЖГ. №5, с. 110, 2004.

4. Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками. Изв. РАН, МЖГ. №3, с. 114–119, 2009.

5. Семинар по механике деформируемого твердого тела. Руководитель: академик РАН И.Г. ГОРЯЧЕВА

29-ое ЗАСЕДАНИЕ 18 января 2010 г

ДЛИННОВОЛНОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СДВИГОВОГО СЛОЯ

Чернявский В.М., Штемлер Ю.М.

НИИ механики МГУ, Москва

Университет Бен-Гуриона в Негеве, Израиль

Предлагается длинноволновая аппроксимация развития сдвигового слоя для модели турбулентного «ветра»- логарифмического профиля скорости. Аналитическое изучение сдвиговой неустойчивости требуется не

только в океанологии (в системе воздух-вода с малым отношением плотностей $\rho \sim 10^{-3}$), но и других задачах гео- и астро-физики при необязательно малом ρ . Исследование [1] при $\rho \ll 1$ показало, что для профиля скорости, имеющего ограниченное значение на бесконечности (типа гиперболического тангенса), длинноволновые возмущения развиваются в согласии с классической потенциальной теорией Кельвина-Гельмгольца, а коротковолновые – описываются моделью критического слоя Майлса. Для логарифмического, неограниченного на бесконечности, профиля скорости ситуация совершенно иная – модель Кельвина-Гельмгольца непригодна в длинноволновом пределе, а модель Майлса дает правильную оценку характеристик устойчивости только в предположении малых ρ . Сравнение настоящей длинноволновой аппроксимации с прямыми вычислениями показывает, что результаты неплохо количественно согласуются даже для не слишком больших длин волн.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №08-08-00463.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yuri M. Shtemler, Michael Mond, Vladimir Cherniavskii, Ephim Golbraikh, and Yaakov Nissime

An asymptotic model for the Kelvin–Helmholtz and Miles mechanisms of water wave generation by wind.

PHYSICS OF FLUIDS 20, 1, 2008.

КОНВЕКТИВНОЕ ДИНАМО ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СЛОЕ

Чертовских Р.А.

Университет Порто, факультет естественных наук,
отделение математики, Порто, Португалия

Международный институт теории прогноза землетрясений и
математической геофизики РАН, Москва

В работе численно исследовано влияние скорости вращения на генерацию магнитного поля конвективными течениями во вращающемся плоском слое проводящей жидкости с квадратными ячейками периодичности. Мы рассматриваем конвекцию Рэлея-Бенара [1] в приближении Буссинеска. Горизонтальные границы свободны, изотермальны и идеально электропроводны. Определены типы гидродинамических (ГД; т.е. при отсутствии магнитного поля) конвективных режимов для чисел Тейлора от нуля (нет вращения) до 2000, при котором движение жидкости

подавляется вращением (остальные параметры системы фиксированы). Обнаружено 5 типов ГД аттракторов: два семейства валов различной ширины, зависящих от двух пространственных координат и ориентированных вдоль одной из сторон ячейки периодичности; валы, параллельные диагонали; бегущие волны и трехмерные "волнистые" валы.

Для этих течений жидкости была решена задача кинематического (линейного) динамо для магнитного числа Прандтля (отношение кинематической вязкости к коэффициенту диффузии магнитного поля), немного превышающего критическое (при котором устанавливается генерация); все типы ГД аттракторов, за исключением одного семейства валов, генерируют магнитное поле в кинематическом режиме. В доминирующих магнитных модах поле концентрируется в форме жгутов вблизи горизонтальных границ.

При тех же величинах параметров в нелинейной магнитогидродинамической (МГД) системе (с учетом воздействия магнитного поля на жидкость посредством силы Лоренца) найден 21 различных нелинейный конвективный МГД аттрактор (13 стационарных состояний и 8 периодических по времени режимов) и идентифицированы бифуркации, в которых они возникают и исчезают при изменении числа Тейлора. Найдено семейство периодических, двухчастотных квазипериодических и хаотических аттракторов, а также неполная последовательность Фейгенбаума бифуркаций удвоения периода тора, завершающаяся хаотическим режимом и тором с одной из базисных частот, равной $1/3$ частоты, последовательно удваиваемой в каскаде. Система обладает большой группой симметрий. Бифуркации систем с симметриями – предмет эквивариантной теории бифуркаций [2]. Найдены две новые бифуркации, аналогичные седловой бифуркации на инвариантном круге (SNIC), возможные только в присутствии симметрий. Обнаружены нелинейные конвективные МГД режимы, обладающие симметрией относительно вертикальной оси, (9 стационарных и один периодический по времени) и центрально-симметричные режимы (одно стационарное состояние и один периодический по времени). Наличие этих симметрий у возмущаемых состояний гарантирует несущественность α -эффекта в главном порядке для эволюции их линейных и слабо нелинейных возмущений (в противном случае, вообще говоря, длинномасштабные возмущения растут сверхэкспоненциально) [3].

Работа выполнена совместно с В.А. Желиговским, О.М. Подвигиной и С. Гама [4]. Автор поддержан "Fundação para a Ciência e a Tecnologia" (Португалия), грант SFRH/BD/23161/2005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея-Бенара: структуры и динамика // УРСС, 1999.
2. Golubitsky M., Schaeffer D.G., Stewart I. Singularities and groups in bifurcation theory, Volume II // Springer, 1988.
3. Zheligovsky V. Amplitude equations for weakly nonlinear two-scale perturbations of free hydromagnetic convective regimes in a rotating layer// *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 2009, v. [103](#), iss. [5](#), p. 397 – 420.
4. Chertovskih R., Gama S., Podvigina O. and Zheligovsky V. Dependence of magnetic field generation by thermal convection on the rotation rate // подано в *Physica D* [<http://arxiv.org/abs/0908.1891>].

CONVECTIVE DYNAMO IN ROTATING LAYER

Chertovskih R.A.

University of Porto, Faculty of Sciences, Department of Mathematics, Porto,
Portugal

International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical
Geophysics, Moscow

In this work the influence of the rate of rotation on magnetic field generation by convective flows in a rotating plane layer is explored numerically. Rayleigh-Bénard convection [1] is considered in the Boussinesq approximation, the horizontal boundaries are stress-free, isothermal and perfectly electrically conducting. We have determined types of the hydrodynamic (HD) convective attractors (in the absence of magnetic field) in a plane layer of rotating fluid with square periodicity cells for the Taylor number varied from zero (no rotation) to 2000, for which the convective fluid motion halts (other parameters of the system are fixed). We have observed 5 types of the HD attractors: two families of rolls of different widths, depending on two spatial variables and aligned with a side of periodicity boxes; rolls, parallel to the diagonal; travelling waves; and fully three-dimensional “wavy” rolls.

For this flows the kinematic (linear) dynamo was solved for magnetic Prandtl number slightly larger its critical value (at which magnetic field generation sets in); all types of the HD attractors, except for a family of rolls, are found to be capable of kinematic magnetic field generation. In dominant magnetic modes the field concentrates near horizontal boundaries in flattened half-rope. For the same parameter values in nonlinear regime (magnetic field affects fluid flow by the Lorentz force), we have found 21 distinct convective

magnetohydrodynamic (MHD) attractors (13 steady states and 8 periodic regimes) and identified bifurcations in which they emerge and disappear.

The nonlinear MHD convective system demonstrates rich dynamics when the Taylor number is varied: we have also observed a family of periodic, two-frequency quasiperiodic and chaotic regimes, as well as an incomplete Feigenbaum period doubling sequence of bifurcations of a torus followed by a chaotic regime and subsequently by a torus with $1/3$ of the cascade frequency. The nonlinear MHD system is highly symmetric. Bifurcations in the presence of symmetries are the subject of the equivariant bifurcation theory [2]. We have found two novel global bifurcations reminiscent of the saddle-node on invariant circle (SNIC) bifurcation, which are only possible in the presence of symmetries. We have also found nonlinear convective MHD regimes possessing the symmetry about a vertical axis (9 steady states and a time-periodic regime) and parity-invariant regimes (a steady and a time-periodic one). These symmetries of perturbed states are essential to guarantee insignificance of the α -effect in the leading order in the evolution of their linear and weakly non-linear perturbations (otherwise generically large-scale perturbations grow superexponentially) [3].

Our results do not challenge the universally accepted paradigm, whereby an increase of the rotation rate below a certain level is beneficial for magnetic field generation, while a further increase inhibits it (and halts the motion of fluid at even higher rates of rotation), but we demonstrate that this picture lacks many significant details.

This work was done in collaboration with V.A. Zel'igovsky, O.M. Podvigina and S. Gama, its results are presented in details in [4]. The author was financially supported by the "Fundação para a Ciência e a Tecnologia" (Portugal), grant SFRH/BD/23161/2005.

REFERENCES

5. Getling A.V. Rayleigh-Bénard convection: structures and dynamics // World Scientific, 1998.
6. Golubitsky M., Schaeffer D.G., Stewart I. Singularities and groups in bifurcation theory, Volume II // Springer, 1988.
7. Zheligovsky V. Amplitude equations for weakly nonlinear two-scale perturbations of free hydromagnetic convective regimes in a rotating layer// [Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics](#), 2009, v. [103](#), iss. [5](#), p. 397 – 420.
8. Chertovskih R., Gama S., Podvigina O. and Zheligovsky V. Dependence of magnetic field generation by thermal convection on the rotation rate // submitted to *Physica D* [<http://arxiv.org/abs/0908.1891>].

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Шелистов В.С., Демёхин Е.А

Кубанский государственный университет, Краснодар

Известно [1], что при числах Рейнольдса $Re = 300\text{--}500$ поверхность стекающей по вертикальной стенке плёнки жидкости оказывается стохастической, покрытой нерегулярной системой взаимодействующих трёхмерных волн. Так как указанные числа Рейнольдса малы для проявления неустойчивости Толлмина-Шлихтинга, то внутреннее течение является слоистым, а неустойчивость, ответственная за проявление хаотических волн, – поверхностной [1]. Такой режим называется «поверхностной турбулентностью».

Для описания указанного режима в настоящей работе использовалась система Капицы-Шкадова – упрощённая система уравнений движения, усреднённых по поперечной координате. Для решения этой системы был адаптирован метод компактных схем [2], применяемый для расчёта обычной турбулентности. Для сокращения времени счёта использовались параллельные вычисления.

Рассматривалась пространственная эволюция случайных возмущений на входе. Вниз по потоку обнаружено несколько волновых переходов, приводящих к: а) квазидвумерным волнам максимального роста; б) квазидвумерным взаимодействующим уединённым волнам-солитонам; в) взаимодействующей системе трёхмерных лямбда-солитонов, случайным образом расположенных в пространстве, которая является конечным итогом эволюции. Начиная с некоторого момента, количество солитонов на единицу площади не меняется вниз по потоку. Результаты расчётов подтверждаются экспериментами, описанными в [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Chang H.-C. and Demekhin E.A. Complex wave dynamics on thin films / Elsevier, 2002, 400 p.
2. Толстых А.И. Компактные разностные схемы и их применение в задачах аэродинамики / М.: Наука, 1990, 230 с.

ДАВЛЕНИЕ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Штеменко Л. С., Докукина О.И., Шугаев Ф.В., Терентьев Е.Н.
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Измерено давление за первоначально плоской ударной волной в турбулентном потоке воздуха. Эти значения превышают значения, измеренные за ударной волной в ламинарном потоке при прочих равных условиях. Предложен механизм этого явления. Эксперименты выполнены в ударной трубе прямоугольного сечения 40×60 мм². Турбулизация потока осуществлялась с помощью сетки, расположенной на расстоянии 700 мм от рабочей секции. Число Маха M падающей ударной волны было равно $M = 2-4$. Падающая волна отражалась от перфорированной стенки в конце рабочей секции и взаимодействовала с турбулентным потоком. Измерялась средняя скорость падающей и отраженной волн на разных базах (от 10 мм до 65 мм) и различных расстояниях от торца ударной трубы. При взаимодействии отраженной волны с пограничным слоем образуется λ -конфигурация, а в ядре потока волна приобретает вогнутую форму [1,2]. О скорости отраженной волны нет единого мнения. Расчеты Марка указывают на замедление волны, в работах [1,2] говорится о ее ускорении. По нашим данным, скорость отраженной волны сначала растет, а затем уменьшается. Т.е. сначала отраженная волна схлопывается на оси трубы, а затем начинает расходиться. Далее процесс может повториться. На расстоянии трех калибров от торца трубы в стенку трубы был вмонтирован пьезодатчик (диаметр -2.5 мм) для регистрации давления. Турбулентные пульсации давления составляли 2% от величины давления за падающей волной. На рис. 1 представлена зависимость от числа M давления P за отраженной волной, отнесенного к давлению за падающей волной. Верхний график (мелкие кружки) соответствует распространению ударной волны в турбулентном газе, нижний (большие кружки) – в отсутствие турбулентности при прочих равных условиях. Видно, что при распространении ударной волны по турбулентной области давление за волной выше в интервале чисел Маха $2 \leq M \leq 3.4$ по сравнению со случаем, когда турбулентность отсутствует. Возможный механизм явления таков. В турбулентном потоке присутствуют акустические волны. За ударной волной эти волны усиливаются, а турбулентные структуры становятся неустойчивыми. При этом возникают дополнительные акустические волны, нагревающие газ. В

результате давление повышается. С возрастанием числа Маха время прохождения ударной волны через турбулентную область уменьшается, что приводит к уменьшению нагрева, а затем и к его отсутствию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т.В. Баженова, Л.Г. Гвоздева. «Нестационарные взаимодействия ударных волн». М., «Наука», 1977.
2. «Физическая газодинамика и свойства газов при высоких температурах». М., «Наука», 1964.

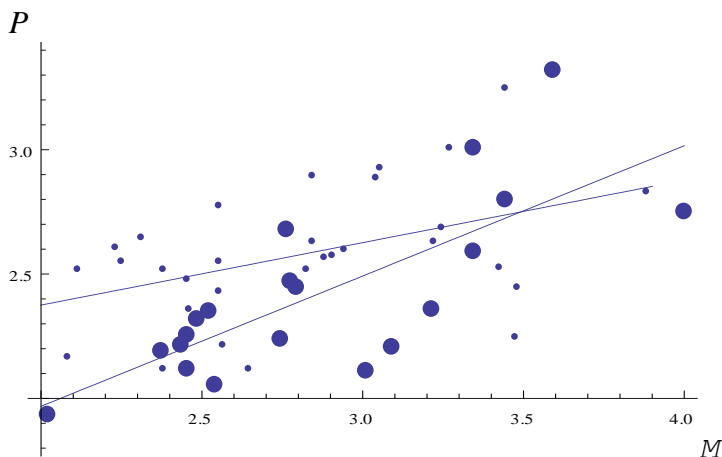


Рис. 1.

VALUE OF PRESSURE BEHIND THE SHOCK PROPAGATING THROUGH A TURBULENT AIR FLOW

Shtemenko L.S., Dokukina O.I., Shugaev F.V., Terentiev E. N.
Physics Faculty of M.V. Lomonosov Moscow State University

The pressure was measured behind a plane shock propagating through a turbulent air flow. The measured values are larger as compared with the data referring to the laminar flow behind the shock wave at the appropriate conditions. The mechanism is set forth which accounts for this phenomenon. The experiments were fulfilled in a shock tube of a rectangular 40x60 mm² cross-

section. We used grid-generated turbulence. The grid was situated at a distance of 700 mm from the test section. The Mach numbers of the incident shocks were $M=2-4$. The incident shock reflects from a perforated plate at the end of the test section and hits the turbulent flow. We measured the mean velocity of the incident shock as well as of the reflected one at a base whose size was equal 10—65 mm at some distance from the end of the shock tube. A λ -configuration appears while the reflected shock interacts with the boundary layer, and the shock becomes concave. The data concerning the velocity of the reflected shock are somewhat contradictory. The calculations by Mark show the decrease of the velocity meanwhile other authors state that it increases [1,2]. Our data show that at first the velocity grows and then decreases. In other words, there is a shock focusing at first and then the shock becomes divergent. Further on the process may be repeated. A pressure transducer of 2.5 mm diameter was installed into the wall of the shock tube at a distance of three bores from the end of the tube. The amplitude of turbulent fluctuations was 2% of the pressure behind the incident shock. Fig.1 shows the dimensionless pressure (the ratio of the value behind the reflected shock and the appropriate value ahead of the shock) against the Mach number of the incident shock. Upper graph (small circles) corresponds to the turbulent flow, lower graph (large circles) corresponds to the case when there is no turbulence. As seen, the pressure is greater within the interval of Mach numbers $2 \leq M \leq 3.4$ in the first case as compared with the second one. The possible mechanism is as follows. There are acoustic waves in the turbulent flow behind the shock wave. Turbulent structures become unstable after the passage of the shock, and new acoustic waves appear. The acoustic waves heat the gas, and the pressure rises as a result. The time of the passage of the shock arises, while the Mach number increasing. The heat flux diminishes and then disappears.

REFERENCES

1. T. V. Bazhenova, L.G. Gvozdeva. Nonstationary interactions of the shock waves. M., "Nauka", 1977 (in Russian).
2. "Physical gasdynamics and gas properties at high temperatures". M., "Nauka", 1964.

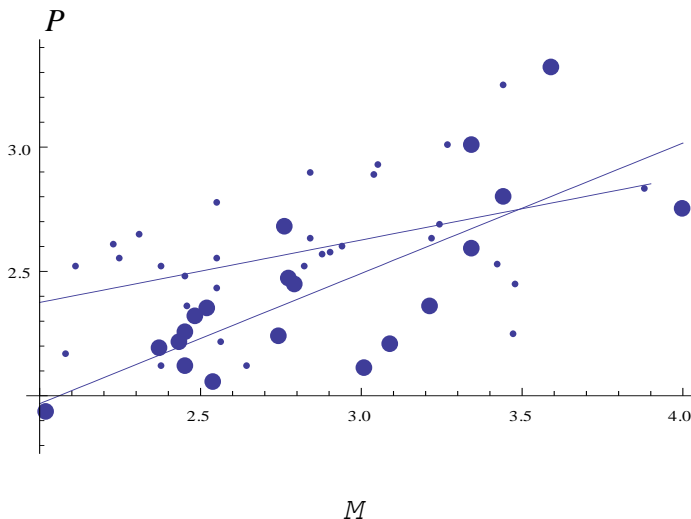


Fig.1.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ ВИХРЕВОЙ ДОРОЖКИ КАРМАНА, СХОДЯЩЕЙ С ЗАДНЕЙ КРОМКИ ПРОФИЛЯ

Щур Н.А.

кафедра гидроаэродинамики СПбГПУ, Санкт-Петербург

В работе изучается влияние характеристик турбулентных пограничных слоёв, развивающихся вдоль двумерного профиля, на возникновение вихревой дорожки Кармана за его прямоугольной задней кромкой. Такого рода вопросы возникают, в частности, в процессе конструирования лопаточных аппаратов гидротурбин с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Вихревые дорожки Кармана, сходящие с задних кромок лопаток направляющего аппарата и лопастей рабочего колеса, создают осциллирующие нагрузки на заднюю кромку лопасти, а также вызывают кавитацию в ядрах сходящих вихрей. Отметим также, что в последние годы большой интерес вызывает изучение нестационарного двумерного следа, который формируется в течении воды за профилем при различной форме его выходной кромки. Широкое исследование это-

го явления проводилось в 2003-2008 гг. в рамках Европейского проекта Hydrodyna (Eureka, no. 3246) консорциумом, включавшем Лабораторию гидромашин Лозаннской Политехнической Школы (Швейцария) и подразделения трех промышленных компаний: GE Hydro Division (Канада), Vatech Hydro A.G. (Швейцария), Voith Siemens Hydro Power Generation GmbH & Co (Германия). Результаты, полученные в рамках проекта Hydrodyna по рассматриваемой проблеме, частично отражены в публикациях [1-3]

При заданной форме задней кромки образование вихревой дорожки определяется числом Рейнольдса $Re=U \cdot h/\nu$ и параметрами сходящих пограничных слоёв, такими как местная толщина вытеснения δ^* и форм-параметр $N=\delta^*/\delta^{**}$ (здесь U - внешняя скорость, h - толщина задней кромки профиля, ν - кинематическая вязкость, δ^{**} - толщина потери импульса). В общем случае, характеристики пограничных слоев, сходящих с разных сторон профиля, различны, что дополнительно расширяет набор параметров задачи.

Численное моделирование периодических вихрей в потоке за выходной кромкой профиля выполнено посредством решения нестационарных уравнений Рейнольдса по методу контрольного объема с дискретизацией задачи, соответствующей второму порядку точности по пространству и по времени. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса SINF [4], развиваемого на кафедре гидроаэродинамики СПбГПУ более 15 лет. Для замыкания уравнений Рейнольдса использовалась модель турбулентности Ментера, которая представляет собой синтез из $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ моделей. Верификация используемой вычислительной модели проводилась путём сопоставления с результатами расчетов и экспериментов, представленными в работе [2].

Варьирование определяющих параметров задачи осуществлялось посредством изменения числа Рейнольдса ($5 \cdot 10^3 < Re < 3 \cdot 10^5$), толщины профиля и его задней кромки, а также за счёт изменения угла атаки однородного потока, натекающего на профиль. Результаты проведённых параметрических исследований позволили выявить ряд важных закономерностей. Во первых, независимо от числа Рейнольдса, при $\delta^*/h > 1$ превышение форм-параметром N «критического» значения, равного примерно 1.8, приводит к исчезновению вихревой дорожки (стационарности следа). При этом, в случае несимметричного обтекания профиля для вырождения вихревой дорожки достаточно, чтобы форм-параметр N хотя бы одного из слоёв превышал указанное критическое значение. Во вторых, для относительно тонких пограничных слоев ($\delta^*/h \sim 0.1$), сход вихрей Кармана наблюдается при любых значениях форм-параметра N .

Полученные данные могут быть, в частности, использованы для выработки практических рекомендаций по предотвращению развития вихревой дорожки. Отметим также, что накопленный опыт расчётов может быть полезен при моделировании нестационарных явлений в трехмерных потоках, характерных для рабочих колес гидротурбин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ausoni P.; Farhat M., Bouziad Y.A., Kueny J.-L., Avellan F. Kármán vortex shedding in the wake of a 2D hydrofoil: measurement and numerical simulation / IAHR Int. Meeting of WG on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Barcelona, 28-30 June 2006.

2. Zobeiri A., Ausoni P.; Avellan F. Vortex shedding from blunt and oblique trailing edge hydrofoils / In: Proceedings of the 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, vol. 1, 2009, p. 245-252, Brno: Brno University of technology, 2009.

3. Keck H., Michler W., Weiss T., Sick M. Recent developments in the dynamic analysis of water turbines / In: Proceedings of the 2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Romania, October 24 - 26, 2007

4. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости № 2 (36). Издательство Политехнического университета. Санкт-Петербург, 2004. С. 70-81.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Программа	5
Абрашкин А.А.	
Четырехмерное течение в плоском канале	14
Антипина Н.А., Тарунин Е.Л.	
Турбулентный режим гидродинамики и теплообмена в вихревой трубке.	16
Арсеньев С.А.	
О мезомасштабной турбулентности в динамике атмосферы и океана	18
Арсеньев С.А.	
К теории шквальных бурь, смерчей и торнадо	20
Астафьева Н.М.	
Циркуляция атмосферы земли (зональные потоки, вихри и волны) и климатические тенденции по данным спутникового мониторинга.	22
Астафьева Н.М., Розанов Н.Н., Федоров С.В., Шацев А.Н.	
«Нестандартные» траектории тропических циклонов и аналогии с движением вихревых лазерных солитонов	24
Афанасьев А.А.	
Фильтрационные течения бинарной смеси водаз-углекислый газ в высокотемпературном геотермальном резервуаре	26
Багиров Л.А.	
Сверхзвуковые сепараторы компонент природного газа	29
Багиров Л.А.	
Кинетико-газодинамическая модель взаимодействия солнечного Ветра с межзвездной средой и возможные физические	

свойства границы солнечной системы как тангенциального разрыва	29
Бельшева И.В., Мурсенкова И.В. Экспериментальное исследование пограничного слоя в сверхзвуковом потоке воздуха при инициировании наносекундного распределенного поверхностного разряда	30
Бессонов О.А., Никитин С.А., Полежаев В.И. Конвективные неустойчивости в расплавах при больших числах Прандтля в модели Чохральского. Результаты международного теста.	32
Божко А.А., Глухов А.Ф., Путин Г.Ф., Суслов С.А., Тыньяла Т. О конвективных течениях в магнитных наносuspensionях	35
Болдырева Л.Б., Сотина Н.Б. Аналогия между уравнениями максвелла и уравнениями движения сплошной среды со свойствами сверхтекучего ^3He	37
Боронин С.А. Устойчивость течения Куэтта суспензий при наличии градиентов в концентрации включений.	38
Бунтин Д.А., Маслов А.А. Нелинейные процессы в гиперзвуковом пограничном слое при переходе к турбулентности	42
Бунтин Д.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С. Биспектральный анализ нелинейных взаимодействий возмущений в гиперзвуковом ударном слое на пластине.	46
Быков Ф.Л., Гордин В.А. Анализ атмосферных фронтов Земли	51
Варгафтик Г.М. Гидродинамика пленочного кипения в окрестности критической точки горения затупленного тела, движущегося в жидкости.	52

Веденеев В.В. Исследование устойчивости упругой пластины в сверхзвуковом потоке газа в случае изменения ее собственных мод под действием потока	54
Виноградова А.С., Налетова В.А., Турков В.А. Магнитожидкостная перемычка между цилиндрами в поле проводника с током	55
Волкова Т.И., Налетова В.А., Турков В.А. Форма объема тяжелой магнитной жидкости в поле катушки с током	57
Гусарчук А.Н., Полянских С.В., Демехин Е.А. Об электроконвективной неустойчивости.	59
Джалалова М.В., Зубков А.Ф. Численное и экспериментальное исследование парашюта с различной степенью рифления	61
Доброхотов С.Ю., Маслов В.П., Шафаревич А.И. Асимптотическое описание динамики локализованных вихрей и вихревых нитей с помощью канонического оператора	64
Досаев М.З., Самсонов В.А., Селюцкий Ю.Д. Об устойчивости стационарных режимов горизонтально-осевой ветроэнергетической установки	65
Дружинин О.А., Троицкая Ю.И. Генерация внутренних волн фонтанов в стратифицированной жидкости.	66
Ермаков М.К. Трехмерная устойчивость осесимметричных течений	68
Желиговский В.А. Оценки норм Жеврэ-Соболева решений уравнений гидродинамического типа.	70
Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. Турбулентные течения во вращающемся сферическом	

слое – пространственные структуры и динамическое поведение	71
Зайцева А.В., Демехин Е.А. Ветровая неустойчивость турбулентного слоя	72
Захаренков М.Н. Уравнение для возмущений завихренности	74
Захаренков М.Н. Волны завихренности в задачах гидродинамической устойчивости	75
Знаменская И.А., Орлов Д.М., Иванов И.Э., Коротева Е.Ю. Турбулизация пограничного слоя за ударной волной, движущейся по области импульсного поверхностного разряда	78
Зубарев В.М. Пограничный слой в высокотурбулентном потоке жидкости	81
Иванов А.В. Механизмы возбуждения мод неустойчивости в пограничных слоях	85
Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А. Экспериментальное исследование возбуждения нестационарных вихрей Гертлера неоднородностями обтекаемой поверхности	86
Калугин В.Т., Стрижак С.В. Моделирование турбулентного слоя смешения за обратным уступом	90
Капцов О.В., Шмидт А.В. Редукция трехмерной полуэмпирической модели дальнего турбулентного следа к одномерной задаче	94
Карасева Л.А. Характеристики устойчивости ускоряющейся струи при наличии сил плавучести	95

Качанов Ю.С. Резонансная природа слабонелинейных стадий возникновения турбулентности	97
Кирилловский С.В., Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С. Устойчивость и управление возмущениями гиперзвукового ударного слоя	100
Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Денисов О.В., Зеленский Д.К. Неявная методика расчета вязких турбулентных течений	104
Колесов В.В., Романов М.Н. Проблема Куэтта-Тейлора для проницаемых цилиндров	105
Копьев В.Ф., Фараносов Г.А. Излучение звука колебаниями вихревого кольца, движущегося в дозвуковой струе	106
Краснопольский Б.И. Об интенсивности теплообмена при обтекании кубических Каверн ламинарным потоком	108
Кузнецова Д.В., Сибгатуллин И.Н. Переходные режимы двухдиффузионной конвекции	110
Куликовский А.Г. Возбуждение поперечных волн в слое нелинейно-упругой среды в условиях, близких к резонансу	111
Ланда П.С. Особенности перехода к турбулентности в гидродинамических системах	112
Лебедева Н.А. Развитие нового комплексного Лагранжева подхода для моделирования плоских нестационарных дисперсных течений с вязкой несущей фазой	113

Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г., Мингалев В.С., Мингалев О.В. Численное моделирование циклонов во внутритропической зоне конвекции и возможности их раннего обнаружения	115
Могилевский Е.И., Шкадов В.Я. Влияние профилирования удерживающих поверхностей и неньютоновских свойств жидкости на гидродинамическую устойчивость и нелинейные волны в капиллярных пленках, движущихся под действием внешних сил	116
Моденова В.В. Моделирование нелинейной задачи разделения бинарной смеси газов	120
Монахов А.А., Ромашова Н.Б. Кавитация и свечение жидкости в диэлектрической каверне	121
Мурашкина К.Б., Пасконов В.М. Применение параллельных вычислений для численного расчета течения в канале на основе модифицированных уравнений Навье-Стокса	123
Налетова В.А., Турков В.А., Пелевина Д.А. Движение капли магнитной жидкости на горизонтальной подложке в переменном однородном магнитном поле	124
Налетова В.А., Турков В.А., Калмыков С.А. Модель тонкого тела из вязкоупругого намагничивающегося полимера	126
Невский Ю.А. Гравитационная конвекция суспензий в двумерных областях с наклонными стенками	127
Никитин Н.В. Четырехмерное течение в плоском канале	129
Осипцов А.Н. Развитие лагранжева подхода в механике многофазных сред	130

Панин Д.Н. Воздействие статических электрических полей на параметры кровотока кролика	131
Петрова Л.И. Развитие газодинамической неустойчивости, возникновение завихренности и турбулентности	133
Подвигина О.М. Устойчивость конвективных валов во внешнем магнитном поле	133
Подрябинкин Е.В., Рудяк В.Я. О моменте и силе, действующих на внутреннюю трубу при течении ньютоновской и неньютоновских жидкостей в цилиндрическом зазоре с эксцентриситетом	134
Полежаев Ю.В. Законы турбулентного горения струй	137
Полежаев Ю.В. Карта режимов горения и возможности его интенсификации . . .	144
Полежаев В.И. Конвективные взаимодействия. Технические и технологические приложения	150
Полянских С.В., Демехин Е.А. Устойчивость струи электролита в переменном электрическом поле произвольной частоты	151
Поплавская Т.В., Цырюльников И.С. Прямое численное моделирование нелинейных волновых процессов в гиперзвуковом ударном слое	153
Прокофьев В.В., Козлов И.И., Очеретяный С.А. Экспериментальные исследования автоколебательных режимов при сверхкритических поддувах газа в камеру с отрицательным числом кавитации	158

Прокунин А.Н., Водопьянов И.С. О движении сферической частицы вдоль стенки в вязкой и вязкоупругой жидкости	159
Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Трифонов В.В. Экспериментальное и расчетное исследование пульсационного Течения в слабо расширяющемся канале	159
Романов М.Н. Линейный анализ устойчивости основного режима движения жидкости между двумя вращающимися проницаемыми цилиндрами	160
Рудяк В.Я. Процессы переноса в наножидкостях: состояние и проблемы	161
Сиковский Д.Ф. Законы подобия пристенного турбулентного газодисперсного потока с осаждающимися частицами	165
Соленая О.А. Эволюция вихревого кольца в вязком теплопроводном газе	169
Судаков В.Г., Егоров И.В., Федоров А.В. Численное моделирование процессов восприимчивости и устойчивости гиперзвуковых пограничных слоев	174
Суетнова Е.И., Чернявский В.М. Некоторые особенности гидродинамического режима фильтрации при уплотнении наращиваемой слоисто-неоднородной пористой среды	175
Чернявский В.М., Монахов А.А. Парадоксы теории Стокса: о силе трения на границе контакта сред. Теория и эксперимент	176
Чернявский В.М., Штемлер Ю.М. Длинноволновая неустойчивость сдвигового слоя	177

Чертовских Р.А.	
Конвективное динамо во вращающемся слое	178
Шелистов В.С., Демехин Е.А.	
Численное моделирование поверхностной турбулентности	182
Штеменко Л.С., Докунина О.И., Шугаев Ф.В., Терентьев Е.Н.	
Давление за ударной волной в турбулентном потоке воздуха	183
Щур Н.А.	
Численное исследование условий возникновения турбулентной вихревой дорожки Кармана, сходящей с задней кромки профиля	186

Научное издание

Материалы международной конференции
«Нелинейные задачи теории гидродинамической
устойчивости и турбулентность»
01 марта – 07 марта 2010 года
Моск.обл., панс. «Звенигородский»
Российской Академии Наук

Технический редактор И.В.Топорнина

Подписано в печать	20.05.2010	Печать офсетная	Бумага офсетная №1
Формат 60х90	1/16	Усл. печ. л. 12,25	Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе НИИ механики МГУ
117192, Москва, Мичуринский пр., 1