

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова
Научный совет РАН по механике жидкостей и газов**

**Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике**

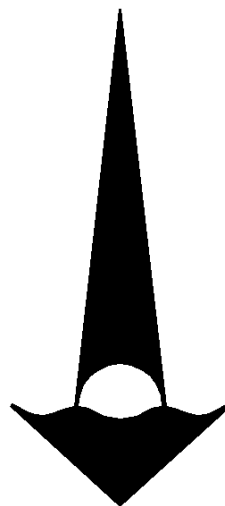
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ

**Тезисы докладов XVII школы – семинара,
посвященной памяти академика Г.Г. Черного**

и

55-летию со дня основания НИИ механики МГУ

**20 – 30 августа 2014 года
Сочи, «Буревестник» МГУ**



Издательство Московского университета, 2014

УДК 16.3.4.1
ББК 22.253.3
С 56

ОРГАНИЗАТОРЫ ШКОЛЫ – СЕМИНАРА:

МГУ имени М.В. Ломоносова,
Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
Научный совет РАН по механике жидкостей и газов,
Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике

Школа-семинар проводится при финансовой поддержке РФФИ.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:

В.А. Садовничий (председатель; МГУ, Москва), Ю.М. Окунев (зам. председателя; МГУ, Москва), Н.А. Остапенко (зам. председателя; МГУ, Москва), М.С. Макарова (ученый секретарь; МГУ, Москва), А.М. Чайка (ученый секретарь; МГУ, Москва), А.А. Афанасьев (МГУ, Москва), В.Б. Баранов (ИПМех, Москва), А.Н. Богданов (МГУ, Москва), А.Б. Ватажин (ЦИАМ, Москва), Ю.А. Виноградов (МГУ, Москва), М.А. Зубин (МГУ, Москва), В.П. Карликов (МГУ, Москва), А.Н. Крайко (ЦИАМ, Москва), К.В. Краснобаев (МГУ, Москва), А.Г. Куликовский (ИМ РАН, Москва), В.А. Левин (МГУ, Москва), И.И. Липатов (ЦАГИ, Жуковский, Моск. обл.), В.В. Лунев (ЦНИИМаш, Королев, Моск. обл.), О.Э. Мельник (МГУ, Москва), В.Я. Нейланд (ЦАГИ, Жуковский, Моск. обл.), В.А. Полянский (МГУ, Москва), С.Т. Суржиков (ИПМех РАН, Москва)

Современные проблемы аэрогидродинамики: Тезисы докладов XVII школы-семинара, посвященной памяти академика Г.Г. Черного и 55-летию со дня основания НИИ механики МГУ. 20 – 30 августа 2014 г., Сочи, «Буревестник» МГУ. – М.: Издательство Московского университета, 2014. – 116с.

ISBN 978-5-19-010961-0

XVII школа–семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» продолжает традиции авторитетного форума ведущих ученых в области аэромеханики, газовой динамики и гидродинамики из университетов, институтов академии наук и центральных отраслевых институтов, регулярно проводившегося с 1980 года (Иссык-Куль, 1980; Махачкала, 1982; Форос, 1984; Мелекино, 1987; Рыбачье, 1989; Волга, 1991; Севастополь, 1994, 1996; Сочи, 2001–2007, 2010, 2014) и являвшегося уникальной школой для молодых ученых, студентов и аспирантов. Цель школы – обмен передовыми идеями и достижениями в области аэрогидродинамики, обучение молодежи, поддержание высокого уровня фундаментальных и прикладных разработок в стране.

Тезисы докладов напечатаны с оригиналов, представленных авторами.

УДК 16.3.4.1
ББК 22.253.3

ISBN 978-5-19-010961-0

© Московский государственный университет, 2014

СО Д Е Р Ж А Н И Е

<i>Агеев А.И., Осипцов А.Н.</i> АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАСТЕКАНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ ТЯЖЕЛОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ВДОЛЬ СУПЕРГИДРОФОБНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	11
<i>Адамов Н.П., Харитонов А.М., Часовников Е.А.</i> АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОИЗВОДНЫЕ ВОЗВРАЩАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ СВЕРХ- И ГИПЕРЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ.....	12
<i>Айрапетов А.Б., Стрекалов В.В.</i> ВИЗУАЛИЗАЦИОННО-ВИДЕОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СВЕРХМАЛЫХ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА.....	13
<i>Алексаиов Д.Б., Измоденов В.В.</i> МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВЕЗДНЫХ ВЕТРОВ С МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДОЙ.....	14
<i>Алексеев Д.П., Зубин М.А., Туник Ю.В.</i> ЗАПУСК СОПЛА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ.....	15
<i>Амиров С.М., Егоров Н.А., Шевелев Ю.Д.</i> АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ДОЗВУКОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	16
<i>Андреев В.Н., Буланкин П.А., Игнатов С.Ф., Козловский В.А., Лагутин В.И., Липницкий Ю.М.</i> РАЗВИТИЕ МЕТОДА СТРУЙНО-ВЕСОВЫХ ИСПЫТАНИЙ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ.....	17
<i>Афанасьев А.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ЗАКАЧКЕ НАГРЕТОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ.....	18
<i>Афонина Н.Е., Громов В.Г.</i> РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛО-ОБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ МОДЕЛИ В КАНАЛЕ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ИТ-2М ЦАГИ.....	19
<i>Баранов В.Б.</i> СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ.....	20
<i>Бегг С., Осипцов А.Н., Рыбдылова О., Сажин С.С., Хейкал М.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ С ПОМОЩЬЮ ЛАГРАНЖЕВЫХ МЕТОДОВ.....	21
<i>Богданов А.Н.</i> ПАМЯТИ УЧИТЕЛЯ	22
<i>Богданов А.Н., Диесперов В.Н., Жук В.И.</i> НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С САМОИНДУЦИРОВАННЫМ ДАВЛЕНИЕМ.....	23
<i>Боголепов В.В., Ермолаев И.К., Сухановская Л.Д.</i> НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ.....	23

<i>Боголепов В.В., Нейланд В.Я.</i> АСИМПТОТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СХОДА ВИХРЕВОЙ ПЕЛЕНА С ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БЕГУЩЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ	24
<i>Бондарев В.О., Веденеев В.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА УПРУГОЙ ПЛАСТИНЕ.....	25
<i>Боронин С.А., Толмачёва К.И.</i> ТРЕХКОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ СУСПЕНЗИИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ.....	26
<i>Боронин С.А., Осипцов А.А.</i> ВЫТЕСНЕНИЕ БИНГАМОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ.....	27
<i>Боронин С.А., Осипцов А.Н.</i> НЕМОДАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ.....	28
<i>Брыкина И.Г.</i> АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ТРЕНИЯ НА ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛАХ В ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА.....	29
<i>Буй В.Т., Лапыгин В.И.</i> ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА МОДЕЛИ НА ЕЁ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ.....	30
<i>Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б., Левашов В.Ю., Сергиевская А.Л., Туник Ю.В., Шаталов О.П.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ДИССОЦИАЦИОННОЙ КИНЕТИКИ КИСЛОРОДА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 4000-11000К.....	31
<i>Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б., Левашов В.Ю., Шаталов О.П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АРГОНА ЗА ФРОНТОМ СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ.....	32
<i>Валиев Х.Ф., Крайко А.Н.</i> АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ О СЖАТИИ И РАЗЛЕТЕ ГАЗА И О СИЛЬНОМ ТОЧЕЧНОМ ВЗРЫВЕ.....	33
<i>Э.Б. Василевский Э.Б., Егоров И.В., Ежов И.В., Новиков А.В.</i> ВЫДУВ ГАЗА ЧЕРЕЗ ТАНГЕНЦИАЛЬНУЮ ОСЕСИММЕТРИЧНУЮ ЩЕЛЬ, РАСПОЛОЖЕННУЮ ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ НОСКА, В СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК	34
<i>Ватажгин А.Б.</i> Г.Г.ЧЕРНЫЙ И РАЗВИТИЕ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В МЕХАНИКЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ (ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, МАГНИТНАЯ ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА, ЭЛЕКТРОГАЗОДИНАМИКА).....	35
<i>Ватажгин А.Б.</i> ЭЛЕКТРОГАЗОДИНАМИКА В АВИАЦИОННЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ (НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАРЯДКА ТЕЛ В ПОТОКЕ С ИОННОЙ КОМПОНЕНТОЙ; УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ В ДИФФУЗОРЕ С ПОМОЩЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА).....	36

<i>Веденеев В.В., Шитов С.В.</i> ФЛАТТЕР УПРУГОЙ, ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОДКРЕПЛЁННОЙ ПОЛОСЫ В ПОТОКЕ ГАЗА ПРИ МАЛЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ.....	37
<i>Веденева Е.А.</i> ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЯ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАВОВЫХ ПОТОКОВ.....	38
<i>Вигдорovich И.И.</i> АВТОМОДЕЛЬНЫЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ	39
<i>Виноградов Ю.А., Егоров К.С., Попович С.С., Стронгин М.М.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ИНИЦИАЦИЕЙ ВОЛН СЖАТИЯ.....	40
<i>Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА.....	41
<i>Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г.</i> ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА КУМУЛЯЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ ВОЛН С ГАЗОВЫМИ ПУЗЫРЯМИ.....	42
<i>Главный В.Г., Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Меледин В.Г.</i> ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ОДНО- И ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ.....	43
<i>Глинов А.П.</i> НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ДЖОУЛЕВЫМ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕМ В НАКЛОННОМ ПЛОСКОМ СЛОЕ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ.....	44
<i>Голубятников А.Н.</i> УСКОРЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ И ЗВЕЗД.....	44
<i>Горохова Н.В.</i> КАЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛАГИОКЛАЗА	45
<i>Горшков А.Б., Лапыгин В.И., Михалин В.А., Сазонова Т.В., Фофанов Д.М.</i> ОПТИМАЛЬНАЯ ФОРМА НЕСУЩИХ ТЕЛ В ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОМ ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОТОКЕ.....	46
<i>Горшков А.Б.</i> ВЛИЯНИЕ КАТАЛИТИЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ И КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ НА КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ДЕСАНТНОГО МОДУЛЯ ДМ-16 ПРОЕКТА ЭКЗОМАРС.....	47
<i>Горячева И.Г.</i> АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ТРИБОЛОГИИ.....	48
<i>Гувернюк С.В., Дынников Я.А., Дынникова Г.Я.</i> О МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ДОРОЖКИ КАРМАНА В ДАЛЬНОМ СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ.....	49

<i>Гувернюк С.В., Дынников Я.А., Дынникова Г.Я.</i> ПРИМЕНЕНИЕ БЕССЕТОЧНОГО МЕТОДА ВВД ДЛЯ РЕШЕНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ С УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	50
<i>Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Симоненко М.М.</i> О ГИСТЕРЕЗИСЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНЫ....	51
<i>Демьянов Ю.А.</i> НЕЗАБЫВАЕМЫЕ ВОСПОМИНАНИЯ.....	52
<i>Дешко А.Е., Тимошенко В.И.</i> ВОПРОСЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОЙ СТРУИ В СПУТНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА.....	53
<i>Дынникова Г.Я., Сыроватский С.А.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ОБТЕКАНИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТЬЮ ТОНКИХ НЕСУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БЕССЕТОЧНЫМ МЕТОДОМ ДИПОЛЬНЫХ ДОМЕНОВ.....	55
<i>Егорова Л.А., Лохин В.В.</i> ДРОБЛЕНИЕ КРУПНЫХ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ.....	56
<i>Егорова Л.А., Турский Г.А.</i> АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ОСНОВНЫХ УРАВНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ МЕТЕОРОВ С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ЭФФЕКТИВНОЙ ЭНТАЛЬПИЕЙ УНОСА МАССЫ.....	56
<i>Жаркова Г.М., Коврижина В.Н.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ.....	57
<i>Ждан И.А., Максимов Ф.А.</i> ОБТЕКАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕЛ.....	58
<i>Жуков А.В.</i> О ВЛИЯНИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ. МОДЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ.....	59
<i>Забайкин В.А., Третьяков П.К.</i> О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ В ТРАКТЕ ГПВРД.....	60
<i>Захарова О.С., Нуриев А.Н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВИБРОРОБОТА В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ.....	61
<i>Звягин А.В.</i> ДИНАМИКА ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МНОГОФАЗНОЙ СРЕДЕ.....	62
<i>Знаменская И.А., Иванов И.Э., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В.</i> ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННЫХ АКТУАТОРОВ НА ПОТОК.....	63
<i>Золотарев С.Л., Плевако Н.Б.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХЗВУКОВЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ.....	64
<i>Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А.</i> ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В УДАРНОМ СЛОЕ ОКОЛО V- ОБРАЗНЫХ КРЫЛЬЕВ.....	65

<i>Зудов В.Н., Третьяков П.К., Тупикин А.В.</i> ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ ГОМОГЕННОГО ГОРЕНИЯ МЕТАНА В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУЕ.....	66
<i>Измоденов В.В., Катушкина О.А.</i> КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ: АНАЛИЗ ДАННЫХ С КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ИВEX-LO.....	67
<i>Исаев С.А.</i> МОДЕЛИ, МЕТОДЫ, МНОГОБЛОЧНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПАКЕТЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА.....	68
<i>Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ CFD КОДОВ.....	69
<i>Квасов Д.И., Налетова В.А.</i> ДЕФОРМАЦИЯ КАПЕЛЬ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....	70
<i>Киселёв Н.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИХРЕОБРАЗУЮЩЕГО РЕЛЬЕФА НА ТЕПЛООБМЕН И ТРЕНИЕ.....	70
<i>Киселева С.В., Тимохин Е.В., Шивринская Е.В.</i> ГЛУБИННО-ПУЗЫРЬКОВАЯ ДЕГАЗАЦИЯ И «НОВОЛУННОЕ ПРОКЛЯТИЕ» АТОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК.....	72
<i>Кишкина Н.Ю.</i> АКАДЕМИК ГОРИМИР ГОРИМИРОВИЧ ЧЕРНЫЙ – УЧЕНЫЙ, УЧИТЕЛЬ, ПАТРИОТ РОДИНЫ (К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ 1923 –2012).....	73
<i>Ковалев В.Л.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕХАНИКЕ НА ОСНОВЕ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ.....	74
<i>Ковалевская С.Д.</i> ОБ УСКОРЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	75
<i>Ковыркина О.А., Остапенко В.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В НЕПРИЗМАТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ.....	76
<i>Козлов И.И., Очеретяный С.А., Прокофьев В.В.</i> ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДЯЩИХ МАГИСТРАЛЕЙ НА ОБЛАСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ И ТИП АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В ПРИСУТСТВИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ГАЗОВОЙ ПОЛОСТИ.....	76
<i>Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В.</i> ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ НА ПЛАМЯ.....	77
<i>Кондратьев А.С., Швыдько П.П.</i> ГИДРОМЕХАНИКА ДВУХ-ФАЗНЫХ ПОТОКОВ: СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ОПЫТНЫХ ДАННЫХ.....	78

<i>Коровин В.М.</i> О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОКОЯЩЕЙСЯ ФЕРРОЖИДКОСТИ В НАКЛОННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	79
<i>Котелкин В.Д.</i> ПРОБЛЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МЕЗОЗОЙСКАЯ ГЕОДИНАМИКА АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА.....	80
<i>Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р., Котова Г.Ю.</i> НЕУСТОЙЧИВЫЕ И АВТОВОЛНОВЫЕ ДВИЖЕНИЯ В ОБЛАСТЯХ АКТИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ.....	81
<i>Кубенин А.С.</i> ВОПРОСЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ СТРОИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ.....	82
<i>Кусов А.Л., Лунев В.В.</i> О СТРУКТУРЕ ВОЛНЫ ИСПАРЕНИЯ С ВНЕЗАПНО ПЕРЕГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА.....	83
<i>Лебедева Н.А., Осипцов А.Н.</i> НОВЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОЛНОСТЬЮ ЛАГРАНЖЕВ ПОДХОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ.....	84
<i>Лебедева Н.А.</i> РАЗВИТИЕ МНОГОКОНТИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ.....	85
<i>Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.</i> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ.....	86
<i>Леонтьев А.И.</i> ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВ: ИДЕИ, ФАКТЫ И ПАРАДОКСЫ	87
<i>Липатов И.И.</i> АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	88
<i>Луцник В.Г., Макарова М.С.</i> ВЛИЯНИЕ ЧИСЕЛ ПРАНДТЛЯ И МАХА НА КОЭФФИЦИЕНТ АНАЛОГИИ РЕЙНОЛЬДСА	89
<i>Луцник В.Г., Решмин А.И.</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КРУГЛЫХ РАСШИРЯЮЩИХСЯ КАНАЛАХ И В КАНАЛАХ С ОТСОСОМ ГАЗА.....	90
<i>Максимов Ф.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ С ВИХРЯМИ ТЕЙЛОРА.....	92
<i>Маслов С.А., Натяганов В.Л., Сытов В.Э.</i> ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОРНАДО И НИЗОВЫХ ПРОРЫВОВ.....	93
<i>Мельник О.Э.</i> НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	94
<i>Минюшкин Д.Н.</i> РАСЧЕТ ЭВОЛЮЦИИ ФОРМЫ ТЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕМОНОТОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ МЕТОДОМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ.....	95
<i>Монахов А.А., Полянский В.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИИ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА В УЗКОМ ЗАЗОРЕ	96

<i>Натяганов В.Л., Скибицкий А.Н.</i> ФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ.....	97
<i>Никитин Н.В., Пиманов В.О.</i> ЛОКАЛИЗОВАННОЕ В ПРОСТРАНСТВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ПО ВРЕМЕНИ ТРЕХМЕРНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА В КРУГЛОЙ ТРУБЕ.....	98
<i>Овсянников В.М.</i> ПОТЕРЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ ФУНКЦИЙ И ИХ ПРОИЗВОДНЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФОРМУЛЫ ГАУССА – ОСТРОГРАДСКОГО ДЛЯ ВЫВОДА УРАВНЕНИЯ НЕРАЗРЫВНОСТИ.....	99
<i>Окунев Ю.М.</i> НИИ МЕХАНИКИ МГУ. 15 ЛЕТ ПЕРЕД 55-ЛЕТИЕМ.....	100
<i>Осипцов А.А., Синьков К.Ф., Спасивцев П.Е.</i> РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В ТРУБОПРОВОДАХ С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ ОСАДКА.....	100
<i>Осипцов А.А.</i> ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД В НЕФТЕСЕРВИСНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ.....	101
<i>Панкратьева И.Л., Полянский В.А.</i> О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ НЕЛИНЕЙНОЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ В ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ.....	102
<i>Пилюгин Н.Н.</i> РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ НАГРЕВ ЭЛЕКТРОНОВ В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ ЗА КОНУСОМ ПРИ ГИПЕРЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ.....	103
<i>Прокофьев В.В., Такмазьян А.К., Филатов Е.В., Якимов А.Ю.</i> ДВИЖЕНИЯ КАТАМАРАНА, ОБОРУДОВАННОГО ПРЯМОТОЧНЫМ ВОЛНОДВИЖИТЕЛЕМ, В ВОЛНОВОМ КАНАЛЕ.....	104
<i>Прудников А.Г., Северинова В.В.</i> О МЕХАНИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ СРЕД.....	105
<i>Пушкарь Е.А.</i> МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В МАГНИТОСЛОЕ ЗА ОКОЛОЗЕМНОЙ ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ПРИ ПАДЕНИИ МЕЖПЛАНЕТНОГО РАЗРЫВА.....	106
<i>Рылов А.И.</i> АНАЛОГИ УРАВНЕНИЙ ЧАПЛЫГИНА И СПИРАЛЬНЫЕ ТЕЧЕНИЯ.....	107
<i>Сахаров В.И.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РАМКАХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА И РЕЙНОЛЬДСА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА МОДЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ....	108
<i>Суржиков С.Т.</i> РАДИАЦИОННО-СТОЛКНОВИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ АЭРОФИЗИКИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОЛЕТА....	110
<i>Туник Ю.В.</i> ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА В СОПЛЕ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ.....	111
<i>Фокеев В.П.</i> НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ БИФУРКАЦИИ ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ.....	112

<i>Харитонов А.М.</i> АКАДЕМИК В.В. СТРУМИНСКИЙ – 100 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ.....	113
<i>Чиркунов Ю.А.</i> НЕЛОКАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ БЕЗВИХРЕВОГО ИЗО- ЭНТРОПИЧЕСКОГО ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ГАЗА.....	114
<i>Чулюнин А.Ю.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОБТЕКАНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЛУНКИ.....	115
<i>Шевелев Ю.Д.</i> О СТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ РИЧЧИ.....	116
<i>Эглит М.Э., Якубенко А.Е., Якубенко Т.А.</i> ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ.....	117
<i>Якунина Г.Е.</i> ТЕЛА С МАКСИМАЛЬНЫМ АЭРОДИНА- МИЧЕСКИМ КАЧЕСТВОМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ.....	118

АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАСТЕКАНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ ТЯЖЕЛОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ВДОЛЬ СУПЕРГИДРОФОБНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.И. Агеев, А.Н. Осипцов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В приближении стоксовой пленки изучается растекание тонкого слоя тяжелой вязкой жидкости вдоль горизонтальной и наклонной неоднородных супергидрофобных поверхностей, на которых задано условие эффективного проскальзывания Навье для касательной компоненты скорости жидкости. Рассматриваются супергидрофобные поверхности, тензор скольжения которых допускает построение автомодельных решений ряда задач о течениях тонкого слоя жидкости. Из уравнений стоксовой пленки в пренебрежении эффектами поверхностного натяжения получены уравнения для определения формы свободной поверхности. Рассмотрены нестационарное растекание слоя вязкой жидкости вдоль горизонтальной плоской супергидрофобной поверхности и установившееся стекание ручейка вязкой жидкости по наклонной супергидрофобной поверхности при локализованном массопроводе в пленку от точечных или линейных источников.

Исследованы плоские и осесимметричные нестационарные пленочные течения вдоль главного направления тензора скольжения супергидрофобной поверхности, когда соответствующая компонента тензора скольжения является степенной функцией пространственной координаты, отсчитываемой в направлении растекания. Найдены условия существования автомодельных решений для степенного и экспоненциального (по времени) законов локализованного массопровода. Проведено параметрическое исследование закона движения переднего фронта от коэффициентов скольжения. Показано, что передний фронт слоя жидкости, растекающейся по супергидрофобной поверхности, за то же время проходит заметно большее расстояние, чем по обычной поверхности с условием прилипания.

В задаче о стационарном стекании ручейка вязкой жидкости по наклонной супергидрофобной поверхности рассмотрен случай, когда параметр скольжения (главное значение тензора скольжения) задан в виде произведения степеней координат точки подстилающей поверхности, и построен класс соответствующих автомодельных решений. Проведено исследование зависимости формы поперечного сечения ручейка и области смачивания от значений параметров, задающих величину супергидрофобного скольжения. Построенные автомодельные решения могут быть использованы для экспериментального определения параметров скольжения промышленных супергидрофобных поверхностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00147).

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОИЗВОДНЫЕ ВОЗВРАЩАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ СВЕРХ- И ГИПЕРЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

Н.П. Адамов, А.М. Харитонов, Е.А. Часовников

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

Возвращаемые космические аппараты при выходе или сходе с орбиты должны обладать рядом свойств, важнейшими из которых являются статическая и динамическая устойчивость. Характеристики статической устойчивости могут быть получены путем проведения весовых испытаний в аэродинамических трубах на моделях аппаратов. Для получения достоверной информации о характеристиках динамической устойчивости проводят испытания моделей в аэродинамических трубах на различного рода динамических установках. На этих установках получают нестационарные аэродинамические характеристики, как правило, в форме аэродинамических вращательных производных. Определение вращательных производных моделей возвращаемых космических аппаратов при сверх- и особенно при гиперзвуковых скоростях связано с большими трудностями, обусловленными малым демпфированием моделей, большим лобовым сопротивлением, малыми размерами и другими факторами. Анализ возможностей различных методов определения вращательных производных моделей возвращаемых аппаратов и практика их использования показывает, что наиболее перспективным методом является метод свободных колебаний. В докладе обсуждается вариант свободных колебаний на подшипниках качения как наиболее технически простой и единственный апробированный для моделей возвращаемых аппаратов. Анализируются результаты измерений вращательных производных модели конуса с углом полураствора 20° и моделей возвращаемых аппаратов в сверхзвуковой аэродинамической трубе ИТПМ СО РАН Т-313 при числах Маха $M=2-7$. Полученные результаты используются для валидации расчётных методов, а также для выявления возможных режимов потери статической и динамической устойчивости.

ВИЗУАЛИЗАЦИОННО-ВИДЕОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СВЕРХМАЛЫХ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

А.Б. Айранетов, В.В. Стрекалов

ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Моск. обл.

Предлагается инновационный принцип и метод измерения сверхмалых скоростей воздушного потока в диапазоне $0 \sim 1$ м/с, недоступном существующим методам (PIV, пневмометрия, термоанемометрия). Метод основан на видеорегистрации потока, освещаемого плоским лазерным лучом и континуально засеянного жидко-капельного агентом с исчезающе малой скоростью витания микрокапель ($\sim 10^{-3}$ м/с). Трассировка и, соответственно, получение лагранжевой скорости потока осуществляются путем слежения за малыми областями среды, содержащими локальный экстремум яркости.

Для апробации метод был реализован в аэродинамической трубе Т-23 ЦАГИ на течении в открытой рабочей части. Для визуализации потока применялся сценический генератор пара с рабочей жидкостью на основе водного раствора многоатомных спиртов. В качестве осветителя использовался зеленый 532 нм лазер непрерывного действия с диаметром луча 2 мм и мощностью 0.4 Вт. Развертывание луча в плоскость осуществлялась линзами Пауэлла с углами раствора луча от 7° до 30° . Для видеосъемки применялась цифровая видеокамера со скоростью съемки 50-200 к/с.

Обработка видеoinформации осуществлялась с помощью программного обеспечения ТЕМА (TrackEyeMotionAnalysis) производства Image Systems АВ (Швеция). Данное ПО предназначено для анализа движения и деформации твердых тел, на поверхность которых предварительно наносятся специализированные трекары-мишени, обладающие ярко выраженной симметричной формой. В настоящей работе для идентификации лагранжевой частицы использовались предлагаемые программным обеспечением трекары иного класса, которые позволяют локализовать малую область точек, яркость которых лежит в заданном диапазоне (обычно это светлый объект на темном фоне, либо темный объект на светлом фоне). Положение трекара в пространстве характеризовалось координатами его центра масс.

На приводящемся примере экспериментального исследования малоскоростного течения со скоростью на оси трубы порядка 0.5 м/с продемонстрированы возможности метода, в частности получена с хорошим количественным соответствием каноническая величина отношения средних скоростей потока в слое смешения струи и на ее оси.

Применение метода для медленных воздушных потоков (вентиляция салонов пассажирских самолетов, помещений медицинского, микро-

электронного, химического и другого назначения с экстремальными экологическими нормативными требованиями) позволяет получать данные, недоступные для других практических методов, не говоря уже о возможностях осуществления тонкого физического эксперимента в фундаментальной аэродинамике малоскоростных течений.

Описанный принцип реализован в виде стенда измерения скоростей потоков в системе кондиционирования воздуха салона на борту натурального самолета Як-42 (НИО-14 ЦАГИ, стенд АС-14, г. Дубна).

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВЕЗДНЫХ ВЕТРОВ С МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДОЙ

Д.Б. Алексашов^{2,3}, В.В. Измоденов^{1,2,3}

¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва

²Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

³Институт космических исследований РАН, Москва

Доклад посвящен газодинамическим структурам, которые возникают при взаимодействии потоков газов в астросферах – областях взаимодействия звездных ветров с окружающей их около- и межзвездной средой (иногда эти области называют звездными пузырями или пузырями звездного ветра). Наиболее хорошо изученным примером астросферы является гелиосфера. Разработанная трехмерная нестационарная кинетико-магнитогидро-динамическая модель гелиосферы позволила предсказать и объяснить данные экспериментов на космических аппаратах Прогноз-5, 6, Voyager 1 и 2, SOHO, Ulysses, HubbleSpaceTelescope (HST), Interstellar Boundary Explorer (IBEX) и др.

В последнее время произошел значительный прогресс в наблюдениях астросфер других звезд. Накопленный к настоящему времени наблюдательный материал показал, что: 1) астросферы отличаются широким разнообразием форм, зависящих как от свойств звездных ветров, так и свойств окружающей их среды (включая магнитные поля и пылевую компоненту), 2) большинство астросфер качественно похожи на модели, описанные в пионерских статьях Паркера (ParkerApJ, 1961) и Баранова и др. (Баранов, Краснобаев, Куликовский, ДАН, 1970). В то же время, имеющийся в литературе анализ астросфер имеет несистематический характер, а некоторые часто используемые допущения не являются верными.

В данном докладе будут представлены первые результаты, полученные в рамках проекта по систематическому исследованию и моделированию астросфер в зависимости от параметров звездных ветров и межзвездной

среды, а также анализ данных наблюдений на основе многокомпонентных моделей взаимодействия звездного ветра с межзвездной средой.

Разработанные модели будут, в частности, использованы и для анализа спектров поглощения в линии Лайман-альфа для звезд солнечного типа. Особая научная актуальность исследования астросфер вокруг звезд солнечного типа состоит в возможности исследования временной эволюции солнечного ветра, и, следовательно, эволюции климата планет солнечной системы.

Работа по моделированию астросфер поддержана грантом РФФИ 14-12-01096.

ЗАПУСК СОПЛА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Д.П. Алексеев¹, М.А. Зубин², Ю.В. Туник²

¹Московский государственный индустриальный университет, Москва

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Традиционно запуск конвергентно-дивергентного сопла осуществляется при истечении газа из ресивера высокого давления или из ударной трубы, после отражения падающей волны от торцевой стенки. Сверхзвуковое течение при этом формируется только в расширяющейся части сопла.

В настоящей работе интерес представляет запуск с формированием сверхзвукового течения во всей внутренней полости осесимметричного сопла. Необходимость такого запуска возникает, например, в связи с решением задачи стабилизации детонационного горения топливно-воздушных смесей, поступающих в конвергентно-дивергентное сопло с гиперзвуковой скоростью. Моделируется две возможности. В первом случае набегающий поток непрерывно ускоряется до необходимой скорости, а во втором – сопло вбрасывается в уже сформированный гиперзвуковой поток. Расчеты проводятся как на базе двумерных газодинамических уравнений Эйлера для осесимметричных течений, так и на основе уравнений Рейнольдса для многокомпонентного вязкого газа. В первом случае используется схема С.К. Годунова, во втором – прикладной программный комплекс STAR-CCM+. В расчетах учитывается взаимодействие истекающего из сопла газа с внешним потоком. Эксперименты выполняются на гиперзвуковой аэродинамической установке ГАУ НИИ механики МГУ.

Установлено, что сверхзвуковое течение в конвергентной части сопла обеспечивает его вбрасывание в поток с достаточно высоким числом Маха. Однако нерегулярное взаимодействие формирующейся в сужающейся части косой ударной волны с осью симметрии приводит к появлению дозвуковой области за диском Маха, диаметр которого зависит от скорости набегающего

потока. Успешный запуск реализуется в сопле с центральным коаксиальным телом вращения, наличие которого обеспечивает регулярное отражение косо́й ударной волны. Эксперименты подтверждают результаты численного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-00440).

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ДОЗВУКОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

С.М. Амиров, Н.А. Егоров, Ю.Д. Шевелев

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

Современная вычислительная аэродинамика располагает весьма обширным инструментарием, обеспечивающим моделирование обтекания летательных аппаратов. При этом наиболее высокое быстродействие демонстрируют подходы, базирующиеся на методах граничных элементов – методах дискретных вихрей и панельных методах (Применение ЭВМ для исследования аэродинамических характеристик ЛА, 1986, Выпуск 1313, издание ВВИ академии под редакцией С.М. Белоцерковского). В их основе лежит математическая модель течения идеальной сплошной среды. Несмотря на то, что такие существенные эффекты, как вязкость и сжимаемость в указанных методиках либо не учитываются, либо отражаются упрощенным образом, методы граничных элементов являются весьма эффективным средством исследования аэродинамических характеристик, особенно на ранних стадиях проектирования ЛА.

Рассмотрены три варианта построения расчетных программ, базирующихся на следующих методах: метод дискретных вихрей (МДВ); панельный метод с граничными условиями в терминах потенциала возмущенной скорости (метод Морино); панельный метод с граничными условиями в терминах нормальной скорости.

Каждая из программ обеспечивает сопряжение отдельных элементов и построение согласованной гранично-элементной (панельной) сетки. Учитывается специфика работы конкретного метода. В случае МДВ расчет телесного крыла затруднен из-за необходимости использования очень большого количества панелей, размер которых не должен превышать толщину данного крыла. Поэтому осуществляется дополнительное упрощение компоновки и телесные крылья заменяются тонкими с учетом формы их срединных поверхностей. В то же время, с помощью МДВ наиболее удобно обеспечивается моделирование отрывного обтекания компоновки. При построении панельной сетки в случае метода Морино для

организации корректного расчета крылатой или оперенной компоновки на поверхности корпуса следует выделить линии сопряжения с панелями пелены, сходящей с крыла. Параметрические расчеты по методу Морино показали необходимость более тщательного учета формы сворачиваемой пелены за крылом по сравнению с МДВ. Панельный метод с граничными условиями в терминах скорости при расчете обтекания компоновок с телесными крыльями помимо необходимости формирования согласованной сетки не предъявляет дополнительных требований к геометрическому модулю расчетной программы. Моделирование пелены за крылом осуществляется с помощью дискретно-вихревых особенностей по схеме, близкой к используемой в МДВ.

Моделируется обтекание компоновок дозвуковых пассажирских (транспортных) самолетов с учетом сворачивания вихревой пелены, сходящей с задних кромок несущих элементов. Исходные данные о форме обводов элементов исследуемых компоновок (крыло, оперение, корпус, мотогондола) представляются в едином формате. Расчетные значения аэродинамических характеристик находятся в хорошем согласовании с экспериментальными данными. Полученные результаты будут использованы при построении более сложных методов оперативных расчетов аэродинамических характеристик, учитывающих влияние пограничного слоя и отрыва потока.

РАЗВИТИЕ МЕТОДА СТРУЙНО-ВЕСОВЫХ ИСПЫТАНИЙ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ

*В.Н. Андреев, П.А. Буланкин, С.Ф. Игнатов, В.А. Козловский,
В.И. Лагутин, Ю.М. Липницкий*

ЦНИИМаш, Королев, Моск. обл.

Рассматривается влияние струй многосопловой двигательной установки (ДУ) на аэродинамику ракет космического назначения (РКН) по результатам испытаний струйно-весовой модели ракеты в крупномасштабных аэродинамических трубах при моделировании струйного потока ДУ, взаимодействующего с обтекающей модель до- и сверхзвуковым потоком. Освоена технология аэродинамических испытаний струйно-весовых моделей ЛА в крупномасштабных аэродинамических трубах с использованием новых тензометрических весов трубчатого типа. Экспериментально апробирована методика учета влияния струй ДУ на аэродинамические характеристики путем введения “струйной поправки”.

Выявлено увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления C_x на дозвуковом участке траектории полета и уменьшение C_x при

числах Маха $M_\infty > 1$. Показана необходимость учета влияния сверхзвуковых струй ДУ на аэродинамическое сопротивление РКН, особенно для “высотных” участков траектории.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-01-00299-а).

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ЗАКАЧКЕ НАГРЕТОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ

А.А. Афанасьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Глобальное потепление – острая проблема, стоящая перед человечеством. Для смягчения его последствий и уменьшения климатических изменений перспективной считается технология захоронения парниковых газов, в частности углекислого газа (CO_2), в проницаемых недрах Земли.

В настоящей работе решена осесимметричная краевая задача Римана в полупространстве, описывающая течение CO_2 от нагнетательной скважины в водонасыщенный пласт. Для смешанной системы уравнений фильтрации предложен асимптотический метод исследования нелинейных волн – возможных волновых картин, описывающих многофазное течение в пласте. Метод основывается на рассмотрении фильтрации при устремлении проницаемости пласта к бесконечности. Решение задачи может состоять из 3-х эволюционных фазовых разрывов, на каждом из которых выполняется условие Жуге, и 3-х простых волн Римана. На фазовой плоскости ограничены области качественно различных решений, взаимное расположение которых определяется околоскритическим термодинамическим состоянием CO_2 . Сравнение с численным решением автомодельной задачи в полной постановке подтвердило хорошую точность построенной асимптотики.

Для оценки влияния силы тяжести и оттока тепла в кровлю и подошву пласта проведены двухмерные расчёты закачки CO_2 . Показано, что волновая картина, полученная из решения задачи Римана, удовлетворительно описывает течение в некоторых важных для практических приложений условиях. В частности, в двухмерном решении отчётливо выделяются фазовые разрывы и волны Римана, соответствующие автомодельному решению.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (СП-2222.2012.5).

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ МОДЕЛИ В КАНАЛЕ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ИТ-2М ЦАГИ

Н.Е. Афонина, В.Г. Громов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

К настоящему времени компьютерное моделирование стало одним из основных инструментов проведения исследований в области высокотемпературной газодинамики. В НИИ механики МГУ разработана эффективная технология таких исследований, основанная на комплексе программ численного интегрирования уравнений Навье-Стокса для различных моделей газовой среды и баз данных по термодинамическим, транспортным и кинетическим свойствам газов и проверенная на решении ряда задач газодинамики.

Импульсная аэродинамическая труба ИТ-М ЦАГИ представляет собой сложную многорежимную электроразрядную установку. Высокие значения давления и температуры газа достигаются в ней путем нагревания рабочего газа в замкнутом объеме импульсным электрическим разрядом большой мощности. Расчетное течение в рабочей части сохраняется в течение около 100 миллисекунд. Во время эксперимента измеряется давление газа в разрядной камере, а температура торможения вычисляется по отношению давлений до и после разряда с использованием уравнения состояния реального газа.

Для интерпретации и дальнейшего использования экспериментальных данных требуется валидация полученных значений потока сравнением с расчетными, представленными в данной работе для заданной обтекаемой модели.

Течение в установке рассматривается в осесимметричном приближении. Расчетная область течения включает в себя сверхзвуковое сопло и отрезок рабочей части установки. В качестве рабочего газа рассмотрен CO_2 . Используется однотемпературная химически неравновесная модель газовой среды, включающая 4 компонента – CO_2 , CO , O_2 , O . Расчеты проведены на многоблочной неравномерной сетке для условий, соответствующих 7 моментам времени работы экспериментальной установки в 3 режимах. Приведены в виде графиков зависимости от времени давления, температуры, мольных концентраций компонентов и показателя адиабаты газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-01-12043-офи-м, 14-01-00742-а).

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

В.Б. Баранов^{1,2}

¹ Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

² Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва

Под космической газовой динамикой понимается теоретическая наука, исследующая физические явления в условиях космического пространства при помощи аппарата механики сплошных сред. Хотя существует много монографий, посвященных этой науке, но они написаны, в основном, учеными-астрофизиками, которые не очень акцентируют свое внимание на обосновании применимости тех или иных уравнений газовой динамики и магнитной гидродинамики (МГД) для построения моделей физических явлений, встречающихся, обычно, в очень разреженной газовой среде.

В настоящем докладе будут проанализированы основные предположения, которые часто делаются при построении газодинамических моделей различных физических явлений, встречающихся в космосе (взаимодействие звездных ветров с окружающей межзвездной средой, обтекание кометных ионосфер солнечным ветром, спиральные структуры галактик и т.п.). Однако роль космической газовой динамики заключается не только в построении моделей для предсказания физических особенностей рассматриваемого явления, но и в интерпретации уже полученных данных наблюдений. Поэтому в докладе будет уделено внимание как к осуществляемым проектам исследований, в которых уже получены экспериментальные данные, требующие соответствующей интерпретации, так и к проектам, для которых требуется создание газодинамических моделей для их предсказания. К последним, в частности, относится проект, связанный с исследованием в 2015 году обтекания ионосферы кометы Чурюмова – Герасименко солнечным ветром при помощи запущенного к этой комете в 2004 году космического аппарата Rosetta.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ С ПОМОЩЬЮ ЛАГРАНЖЕВЫХ МЕТОДОВ

С. Бегг¹, А.Н. Осипцов^{1,2}, О. Рыбдылова¹, С.С. Сажин¹, М. Хейкал¹

¹Брайтонский университет, Брайтон, Великобритания

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Методы на основе вихревых доменов в настоящее время активно используются для исследования течений с вихревыми структурами. В данной работе метод вязких вихревых доменов развит для моделирования двухфазных течений с фазовым переходом. В основе подхода – решение трех систем обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих движение вязких вихревых, тепловых доменов и дисперсной примеси. Двумерное неизотермическое течение газочапельного потока исследуется численно в рамках модели взаимопроникающих континуумов, влиянием частиц на несущую фазу пренебрегается. Несущая фаза – пары капель – вязкий несжимаемый газ. Дисперсная фаза – облако одинаковых сферических частиц жидкости, размер которых со временем меняется из-за испарения. Параметры несущей фазы рассчитываются с помощью метода вязких вихревых и тепловых доменов, параметры дисперсной фазы определяются с помощью лагранжева подхода. Разработанный метод применен для моделирования течения импульсной двухфазной струи: исследуется истечение холодного двухфазного потока в горячий покоящийся газ. Рассмотрены три случая, соответствующие трем размерам капель. Самые мелкие капли (из трех рассмотренных случаев) легче увлекаются потоком несущей фазы и формируют кольцевые структуры, двухфазный поток лучше перемешивается. Более крупные капли испаряются медленнее. В случае средних по размеру частиц, они собираются в областях, вытянутых вдоль оси струи на некотором расстоянии от нее. Крупные капли движутся вдоль оси струи.

Работа поддержана Советом по научным исследованиям в области инженерных и физических наук (грант EPSRC EP/K005758/1, UK) и РФФИ (проект 14-01-00147).

ПАМЯТИ УЧИТЕЛЯ

А.Н. Богданов

НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва

1. Г.Г. Чёрный – бессменный председатель жюри конференции-конкурса молодых ученых НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова с 2001 по 2011 год.

2. В 2003 году, по инициативе профессора В.А.Самсонова стали издаваться Труды конференции-конкурса и Г.Г. Черный стал главным редактором сборника.

3. Когда в том же, 2003 году, по предложению руководства Института при институтском кабинете-музее академика Л.И. Седова был организован лекторий для молодых сотрудников «Выдающиеся ученые математики и механики», Г.Г. Черный принял деятельное участие в его работе. Свет высокого авторитета Г.Г. Черного лег отблеском на мероприятия, проводимые Советом молодых ученых...

4. Педагогические принципы. Удивительно, как при своей большой научной и научно-организационной работе Г.Г. Черный был доступен для студентов. По мере их научного «взросления» доступность значительно уменьшалась, но это был его педагогический прием –увеличение спроса с взрослеющего исследователя с напутствием – учись решать проблемы самостоятельно.

5. Личность Г.Г. Черного имела яркие запоминающиеся черты Учителя. Он обладал редким качеством воспитывать собственным примером, а не словами поучения. Гармонизирующее влияние на окружающих оказывала его дисциплинированность и, особенно, деликатность.

6. Написанные Г.Г. Черным книги воспоминаний –о своих детских и юношеских годах, проблемах выбора жизненного пути, начале учебы в Московском университете, участии в сражениях Великой Отечественной войны, обороне Москвы, долгих месяцах плена, скитаниях, пребывании на оккупированной территории, где трудно было просто выжить, радости освобождения, победоносном наступлении на врага, освобождении Европы, штурме Берлина, возвращении в мирную жизнь и окончании Университета, начале научной карьеры, радости научных открытий, становлении преподавателя высшей школы, участии в организации Института механики и последующем многолетнем руководстве им, избрании в АН СССР, борьбе за механику – предельно откровенны и правдивы, в том числе и по отношению к себе...

7. Запомнились отличавшиеся точной сутью высказывания Г.Г. Черного по разным поводам и в разных ситуациях.

8. В последние годы жизни Г.Г. Черный много сил и времени уделял борьбе за сохранение роли механики как фундаментальной науки в связи с

возникшими в опасными заблуждениями на этот счет. Его мудрые слова о том, что умаление места и роли механики в ряду фундаментальных наук не то, чтобы совершенно необоснованно, а чрезвычайно вредно и приведет к тяжелым последствиям, можно считать научным завещанием Учителя.

НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С САМОИНДУЦИРОВАННЫМ ДАВЛЕНИЕМ

А.Н. Богданов¹, В.Н. Диесперов², В.И. Жук³

¹НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Моск. обл

³ВЦ имени А.А. Дородницына РАН, Москва

Рассмотрены некоторые новые задачи нестационарного свободного вязко-невязкого взаимодействия газовых течений в трансзвуковом диапазоне скоростей (трансзвукового пограничного слоя с самоиндуцированным давлением).

Обсуждаются результаты исследования устойчивости трансзвукового пограничного слоя с самоиндуцированным давлением. Проведено сравнение результатов исследований на классической и регуляризованной авторами асимптотической модели нестационарного свободного вязко-невязкого взаимодействия в трансзвуковом диапазоне скоростей.

Обсуждается возможность сопоставления теоретических результатов с данными экспериментов.

НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

В.В. Боголепов, И.К. Ермолаев, Л.Д. Сухановская

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В НИИ механики МГУ в течение многих лет проводились и проводятся экспериментальные исследования по снижению донного сопротивления тел вращения, движущихся со сверх- и гиперзвуковыми скоростями. Изучены способы воздействия на физическую картину течения в донной области, влияющие на величину донного сопротивления, и представляющие фундаментальный и прикладной интерес:

— вдув в донную область реагирующих продуктов неполного сгорания пиротехнических составов (стационарный режим горения; пульсирующий и комбинированный режим горения до 2100°С);

— теплоподвод в донную область за счет тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) на основе безгазовых пиротехнических составов (типа термитов до 3100°С); за счет электроподогрева ТВЭЛ'ов из высокотемпературной (~ 2200°С) проводящей карбид-кремниевой керамики;

— тепломассоподвод в донную область за счет ТВЭЛ на основе высокоэнергетической смеси металлических порошков (ВСМП), обладающей при горении высокой температурой и концентрацией частиц металла (легкой ~ 6 микрон и тяжелой до 180 микрон фракций).

При числе Маха от 3.0 до 6.0 экспериментально исследованы:

— различные конструктивные схемы размещения пиротехнических элементов с реализацией горения на их боковой поверхности или торцах, а также под углом к оси тела вращения;

— влияние испарения вольфрама с поверхности карбид-кремниевых ТВЭЛ'а с электроподогревом;

— донные тепловые генераторы (ДТГ) с установленными магнитами-кольцами (в полости либо на кормовой части) и горением ВСМП, продуктом реакции горения которого является термическая пылевая плазма;

— ДТГ с оксидно-металлическим порошковым композитом, при горении которого образуется пылевая плазма, позволяющая вбрасывать в донную область плазмоиды.

Результаты исследований показали, что можно обеспечить снижение донного сопротивления от 15 до 60%. Величина снижения донного сопротивления существенно зависит от конструктивной схемы ДТГ, газодинамической схемы вдува и способа тепломассоподвода, а также энергетических и расходных характеристик используемых составов и композитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-01-535).

АСИМПТОТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СХОДА ВИХРЕВОЙ ПЕЛЕНА С ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БЕГУЩЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

В.В. Боголепов, В.Я. Нейланд

ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Моск. обл.

Рассматривается нелинейное взаимодействие бегущего с постоянной скоростью возмущения давления с пограничным слоем несжимаемой

жидкости, когда течение в его пристеночной части описывается «невязкими уравнениями пограничного слоя».

Предполагая, что в подвижной системе координат, связанной с возмущением давления, существует стационарное решение, удастся получить его в конечном виде.

Показано, что пограничный слой может беспрепятственно преодолевать возмущения давления, амплитуда которых не превышает величины скоростного напора, вычисленного по скорости перемещения возмущения давления. При больших значениях амплитуды возмущения давления с поверхности тела в пограничный слой сходит вихревая пелена – поверхность тангенциального разрыва, которая разделяет области прямого и обратного отрывного течения. Известное решение показывает, что такая структура всегда неустойчива. Представлены картины линий тока для различных видов возмущения давления.

Показано, что при произвольной форме возмущения давления вихревая пелена обычно сходит с поверхности тела под конечным углом. Это означает, что линии тока с разными скоростными напорами имеют общую критическую точку. Такая точка может рассматриваться как аналог особенности Ландау – Гольдштейна в точке отрыва при заданном распределении давления, за которую невозможно продолжить решение уравнений пограничного слоя. Построено распределение давления, при котором вихревая пелена сходит с поверхности тела по касательной без образования критической точки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-01-00535).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА УПРУГОЙ ПЛАСТИНЕ

В.О. Бондарев, В.В. Веденеев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Исследуются вязкие возмущения пограничного слоя на упругой пластине, обтекаемой с одной стороны плоскопараллельным потоком сжимаемого вязкого совершенного газа. Пластина имеет форму безграничной плоскости, на её поверхности имеется пограничный слой с полем скорости и температуры, которые считаются заданными. На систему накладываются малые возмущения в виде бегущих волн. Задача решается в плоской постановке. Течение считается ламинарным.

Рассматриваются большие, но конечные числа Рейнольдса и исследуется зависимость скорости возрастания возмущений от толщины пограничного слоя. Проводится сравнение с невязким случаем.

Поиск частных линейно-независимых решений линеаризованной системы уравнений, описывающей движения вязкого совершенного газа, производится в виде рядов по $1/R^{1/2}$, где R – число Рейнольдса. Находя общее решение и используя граничные условия прилипания и теплоизолированности пластины, вычисляется возмущение давления, индуцированное изгибными колебаниями пластины. После подстановки возмущения давления в уравнение движения пластины получается дисперсионное уравнение для совместных колебаний системы «пластина – пограничный слой – внешний поток».

Аналитически исследуется случай длинных волн при ряде дополнительных предположений. Показывается, что влияние конечности числа Рейнольдса при малой толщине пограничного слоя является дестабилизирующим в случае возрастающих возмущений, приводя к увеличению скорости роста возмущений. При произвольной толщине пограничного слоя влияние конечности числа Рейнольдса может оказывать как стабилизирующий, так и дестабилизирующий эффект.

ТРЕХКОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ СУСПЕНЗИИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

С.А. Боронин², К.И. Толмачёва¹

¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

²Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

Проводится исследование фильтрации суспензии в пористой среде. Рассматривается два типа течений: фильтрация суспензии мелких частиц внутри пористой среды (внутренняя фильтрация) и процесс образования внешней корки на границе пористой среды при закачке суспензии крупных частиц (внешняя фильтрация). На основе модели взаимопроникающих континуумов построена модель, учитывающая повреждение проницаемости и пористости среды ввиду осаждения частиц на стенках пор и изменение вязкости суспензии, вызванное наличием твердых частиц. Новым элементом модели, не учитываемым в существующих моделях фильтрации суспензии в пористой среде, является учет фильтрации несущей фазы через пористую среду, сформированную осажденными на стенках пор частицами.

Полученная система уравнений решена численно при помощи конечно-разностного метода на неоднородной сетке. Проведено сравнение результатов расчетов фильтрации суспензии внутри породы с аналитическим решением, построенным для случая постоянной пористости и проницаемости. Получено совпадение профилей концентрации взвешенных

и осажденных частиц с высокой точностью, показана сеточная сходимость решения.

Для внутренней и внешней фильтрации было проведено сравнение с доступными экспериментальными данными и получено качественное и количественное совпадение результатов.

Авторы выражают благодарность руководству Московского научно-исследовательского центра Шлюмберже за возможность опубликовать данную работу.

ВЫТЕСНЕНИЕ БИНГАМОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ

С.А. Боронин, А.А. Осипцов

Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

Рассматривается вытеснение бингамовских жидкостей в ячейке Хеле-Шоу в приложении к развитию технологии гидроразрыва. В существующих моделях гидроразрыва нефтяного пласта учитывается лишь ньютоновская или степенная реология жидкостей, закачиваемых в трещину. В то же время, реометрические эксперименты показывают, что большинство используемых в настоящее время гидроразрывных жидкостей при малых скоростях сдвига имеют ненулевой предел текучести. В реальных течениях это приводит к возникновению пробковых зон в областях течения с низкими сдвиговыми напряжениями, что может существенно исказить распределение жидкостей в процессе закачки и очистки трещин гидроразрыва, по сравнению с результатами, полученными в рамках моделей без учета предела текучести.

В настоящей работе рассматривается течение несмешивающихся несжимаемых бингамовских жидкостей в ячейке Хеле-Шоу. В рамках предположений теории тонкого слоя исходная система трехмерных уравнений упрощена и сведена к системе двумерных уравнений при помощи осреднения поперек ячейки. Полученная система состоит из гиперболических уравнений переноса для объемных долей жидкостей и квазилинейного эллиптического уравнения для давления. Численное решение системы проведено конечно-разностным методом. Уравнение для давления решено итерационным алгоритмом, позволяющим свести решение нелинейного уравнения к последовательному решению систем линейных уравнений. Уравнения переноса решены при помощи TVD схемы с ограничителем потоков *superbee*, которая минимизирует численную диффузию вблизи поверхностей раздела жидкостей.

Проведены тестовые расчеты и сравнение численных результатов с экспериментальными данными по осаждению масла, вытеснению раствора глицерина водой и переносу частиц в ячейках Хеле-Шоу. Получено

качественное совпадение результатов. Параметрическое исследование течений бингамовских жидкостей показало, что при вытеснении бингамовской жидкости маловязкой ньютоновской жидкостью возникает неустойчивость типа Сэффмана-Тейлора. Образование пальцев в бингамовской жидкости приводит к возникновению пробковых зон. Увеличение предела текучести (числа Бингама) приводит к объединению пальцев, их число уменьшается, а глубина проникновения увеличивается.

Авторы выражают благодарность руководству Московского Научно-исследовательского Центра «Шлюмберже» за возможность опубликовать данную работу.

НЕМОДАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

С.А. Боронин^{1,2}, А.Н. Осипцов²

¹Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Проводится исследование модальной и немодальной устойчивости течения запыленного газа в пограничном слое с неоднородным распределением дисперсной примеси в виде локализованного пылевого слоя. Для описания течения двухфазной среды использована модель взаимопроникающих континуумов. В межфазном обмене импульсом учитываются силы Стокса и Сэфмана. Скорости фаз в основном течении совпадают и соответствуют профилю Блазиуса.

В результате модального анализа устойчивости, проведенного на основе рассмотрения двумерных мод, получено, что нейтральная кривая для течения запыленного газа определяется положением и шириной пылевого слоя. Если слой частиц находится вдали от пластины, происходит дестабилизация потока по сравнению с течением чистой жидкости. В случае, когда пылевой слой расположен вблизи пластины в окрестности критического слоя, в котором фазовая скорость первой моды совпадает со скоростью основного потока, критическое число Рейнольдса увеличивается на два порядка. Для потока с достаточно инерционными частицами, распределенными вблизи пластины, учет подъемной силы приводит к значительному росту критического числа Рейнольдса. В широком диапазоне определяющих параметров существуют две неустойчивые моды. Для течения с узким пылевым слоем, расположенным вблизи пластины, нейтральная кривая двусвязна.

Получена система трехмерных нормальных мод и проведен численный анализ немодальной (алгебраической) неустойчивости течения запыленного

газа в пограничном слое. Показано, что «оптимальные возмущения», соответствующие максимальному росту энергии на конечном промежутке времени, имеют вытянутую вдоль потока структуру. При фиксированной средней по толщине пограничного слоя массовой концентрации частиц наибольшая энергия оптимальных возмущений достигается при расположении пылевого слоя примерно посередине толщины пограничного слоя. Учет подъемных сил, действующих на частицы, приводит к усилению алгебраической неустойчивости для течения с инерционными частицами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00147).

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ТРЕНИЯ НА ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛАХ В ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

И.Г. Брыкина

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Исследуется гиперзвуковое течение разреженного газа в переходном режиме обтекания, соответствующем большим числам Кнудсена Kn (малым числам Рейнольдса Re) и высотам более 100 км траектории входа в атмосферу космических аппаратов. Несмотря на развитие эффективных численных методов решения кинетического уравнения Больцмана, решение пространственных задач обтекания в рамках этого уравнения при больших числах Маха представляет до сих пор сложную вычислительную проблему. В настоящее время основным подходом к моделированию гиперзвуковых течений в переходном режиме является метод прямого статистического моделирования Монте-Карло, или гибридные методы, иногда для расчета аэротермодинамических характеристик используются полуэмпирические «мостовые» методы. В предыдущих работах на основе сравнений в широком диапазоне чисел Kn решений континуальных и кинетических уравнений, а также полученных методом Монте-Карло, было показано, что для расчета теплопередачи и трения на лобовой части затупленных тел в переходном режиме применим континуальный подход, основанный на асимптотически согласованных моделях тонкого и полного вязкого ударного слоя. Некоторое кинетическое обоснование такого подхода дано в работах С.К. Ченга.

Трехмерное гиперзвуковое обтекание затупленных тел рассматривается в рамках асимптотически согласованной модели тонкого вязкого ударного слоя. Асимптотическим методом, разработанным для малых чисел Re , получено аналитическое решение для коэффициентов теплопередачи, трения и давления в виде простых зависимостей от параметров течения – числа Re , числа Прандтля, отношения удельных

теплоемкостей, показателя степени в степенной зависимости коэффициента вязкости от температуры, и от геометрических параметров. Показано, что коэффициент теплопередачи зависит от геометрии тела только через два локальных параметра: это угол между нормалью к поверхности и вектором скорости набегающего потока и средняя кривизна поверхности, равная полусумме главных кривизн в данной точке. При стремлении числа Re к нулю значения коэффициентов теплопередачи, полного трения и давления стремятся к их значениям в свободномолекулярном режиме обтекания при единичном коэффициенте аккомодации. Оценена область применимости аналитического решения, показано его хорошее согласование в переходном режиме с расчетами методом Монте-Карло и с решением модельного кинетического уравнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00775).

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА МОДЕЛИ НА ЕЁ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ

В.Т. Буй, В.И. Лапыгин

МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва

Рассматриваются результаты математического моделирования обтекания моделей, помещённых в открытую рабочую часть аэродинамической трубы (АТ) малых скоростей. Даже при равенстве чисел Рейнольдса Re модели и натуры краевые задачи обтекания летательного аппарата безграничным потоком (свободное обтекание) и обтекание его геометрически подобной модели в рабочей части АТ различны.

Решение этих краевых задач строится в рамках уравнений Рейнольдса с использованием SST-модели турбулентности. В качестве решателя используется пакет ANSYSFluent.

Приводятся результаты расчётов обтекания профиля NASA 0012 и круглого цилиндра при различных числах Re и размерах модели. Показано, что при относительной площади затенения $s > 3.5\%$ аэродинамические коэффициенты профиля в свободном потоке и в рабочей части АТ заметно отличаются друг от друга. В случае обтекания круглого цилиндра это отличие наблюдается при $s > 6\%$.

Справедливость математической модели течения проверялась путём сравнения с экспериментальными данными о поле скоростей, о распределении коэффициента давления и значениях аэродинамических коэффициентов.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ДИССОЦИАЦИОННОЙ КИНЕТИКИ КИСЛОРОДА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 4000-11000К

*Н.Г. Быкова, И.Е. Забелинский, Л.Б. Ибрагимова, В.Ю. Левашов,
А.Л. Сергеевская, Ю.В. Туник, О.П. Шаталов*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Исследование колебательной и диссоциационной кинетики молекулярного кислорода в неравновесных условиях за фронтом ударной волны проводилось в несколько этапов. Сначала был разработан и протестирован метод измерения колебательной температуры молекулярного кислорода. Метод основан на измерении сечений поглощения света нагретым кислородом в ультрафиолетовой области спектра и их сравнении с детальными спектрами поглощения, вычисленными в диапазоне колебательно-поступательных температур 1000–11000К для переходов Шумана–Рунге. Последующие измерения за фронтом ударной волны временных профилей поглощения света на различных длинах волн позволяли определить эволюцию колебательной температуры T_v молекулярного кислорода за фронтом ударной волны как в условиях разделения процессов колебательной релаксации и диссоциации ($T \leq 6500\text{К}$), так и при одновременном протекании этих процессов ($T > 6500\text{К}$).

На основе выполненных измерений определялись профили концентраций кислорода, поступательной температуры T , плотности и других параметров течения газа за фронтом ударной волны. Это позволило получить зависимость константы скорости диссоциации от отношения T_v/T вблизи фронта ударной волны.

Временные профили поступательной и колебательной температуры кислорода были использованы для тестирования теоретических и эмпирических моделей термически неравновесной диссоциации молекул. Расчеты течения газа за фронтом сильной ударной волны с учетом теоретических моделей показали, что временной ход температур T_v , T в эксперименте хорошо описывается при начальной температуре за фронтом $T_0 < 6500\text{ К}$. При более высоких температурах теоретические модели не описывают измеренные температурные профили. Эмпирическая модель, предложенная в работе, позволила удовлетворительно описать эволюцию температур в высокотемпературных экспериментах. Анализ этих результатов показал, что эмпирическая модель по сравнению с теоретическими, по существу, соответствует более раннему включению диссоциации до начала колебательной релаксации непосредственно за ударным фронтом при температурах $T_0 > 8000\text{ К}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-00705).

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АРГОНА ЗА ФРОНТОМ СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*Н.Г. Быкова, И.Е. Забелинский, Л.Б. Ибрагимова, В.Ю. Левашов,
О.П. Шаталов*

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

При расчете радиационного нагрева тел, движущихся в атмосфере со скоростями выше 6–7 км/с, возможны существенные расхождения в величинах тепловых потоков. Это обусловлено различиями в моделях физико-химических процессов, происходящих за фронтом ударной волны, используемых при моделировании. В связи с этим определяющим фактором для выбора адекватных моделей, предназначенных для прогностических расчетов термостойкости гиперзвуковых летательных аппаратов при полете в условиях неравновесного тепло- и массообмена является сравнение расчетных и экспериментальных данных.

В настоящей работе выполнено моделирование радиационных характеристик аргона за фронтом ударной волны при скоростях выше 7 км/с и давлении перед фронтом 0.25 тор. Рассматривается чистый аргон с небольшим количеством затравочных электронов и аргон с небольшой примесью кислорода (менее 1%). Присутствующая в смеси легко ионизируемая примесь является источником затравочных электронов.

В результате столкновений Ar-Ar и Ar-e происходит переход аргона из основного в возбужденное состояние. При рассмотрении процесса возбуждения и ионизации аргона используется упрощенный набор реакций, не учитывающий ни тонкой структуры возбужденных уровней аргона, ни процессы многократной ионизации. Аргон моделируется как атом, имеющий четыре энергетических уровня: (1) – основной (невозбужденный) уровень; (2) – возбужденный уровень в состоянии $4p$ (с этого уровня наблюдается излучение в ультрафиолетовой и видимой областях спектра); (3) – возбужденный уровень в состоянии $4s$ (на этот уровень переходит аргон в процессе излучения); (4) – ион аргона. Предполагается, что процесс «тушения» возбужденного состояния возможен как в результате столкновений, так и в результате спонтанного высвечивания.

Вычисленные спектральная плотность и временные развертки излучения ударно нагретого аргона сравниваются с результатами измерений на ударной трубе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-00705).

АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ О СЖАТИИ И РАЗЛЕТЕ ГАЗА И О СИЛЬНОМ ТОЧЕЧНОМ ВЗРЫВЕ

Х.Ф. Валиев, А.Н. Крайко

ЦИАМ имени П.И.Баранова, Москва

Выполнен анализ автомодельных решений, описывающих нестационарные цилиндрически и сферически симметричные течения идеального (невязкого и нетеплопроводного) совершенного газа. В связи с «фокусированием газа к точке» рассмотрены задачи с показателем автомодельности единица об его изэнтропическом сжатии к оси или к центру симметрии. Если итог такого сжатия – однородный поток, движущийся к оси или к центру симметрии, то затем возникает известная задача о торможении газа непрерывной центрированной волной и примыкающей к ней ударной волной. За ударной волной, идущей от оси или от центра симметрии, газ покоится. Изменение знаков времени и скорости в решениях, описывающих изэнтропическое конечное сжатие газа, дает представление о всех вариантах эволюции течения в задаче о разлете газа от оси или от центра симметрии.

Другое известное автомодельное решение с показателем автомодельности единица дает неограниченное сжатие конечной массы газа («сжатие в точку»). При таком сжатии плотность, давление, температура и скорость сжатого газа бесконечны, а энтропия конечна. Энтропия остается конечной и после остановки газа, сжатого в точку, ударной волной, отраженной от оси или от центра симметрии.

Последующий изэнтропический разлет из точки конечной массы газа, обладающей бесконечной энергией, описывается автомодельным решением с показателем автомодельности, который, будучи отличным от единицы, определяется анализом размерностей. Показано, в чем рассмотренные течения близки или отличны от своих плоских аналогов.

Вместе с известной автомодельной задачей о сильном точечном взрыве решение о разлете газа, сжатого в точку, дает представление о сильном точечном взрыве с учетом не только выделившейся энергии, но и начальной массы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-01-00146, 14-01-31057).

ВЫДУВ ГАЗА ЧЕРЕЗ ТАНГЕНЦИАЛЬНУЮ ОСЕСИММЕТРИЧНУЮ ЩЕЛЬ, РАСПОЛОЖЕННУЮ ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ НОСКА, В СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК

Э.Б. Василевский, И.В. Егоров, И.В. Ежов, А.В. Новиков

ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Моск. обл.

В работе приведены результаты расчетного исследования течения и теплообмена на модели продольно обтекаемого цилиндра при вдуве воздуха через осесимметричную щель, расположенную в области критической точки сферического затупления с радиусом R . Экспериментальные исследования выполнены в аэродинамической трубе Людвига УТ-1 ЦАГИ при числе Маха $M_\infty = 6$, давлении полного торможения $P_0 = (17 \div 30)$ бар, температуре торможения $T_0 = 710\text{K}$, числе Рейнольдса $Re_\infty = \rho_\infty u_\infty R / \mu_\infty = (0,19 \div 0,76) \cdot 10^6$, высоте щели в критическом сечении $h^* = h/R = 0 \div 0,021$, угле атаки до 30° .

Тепловой режим модели регистрировался методом тонкой стенки с помощью 30-ти термопар хромель-копель. Термопары располагались на полоске стальной фольги толщиной 0.2 мм, приваренной к поверхности модели вдоль ее образующей $\bar{s} = s/R$, обеспечивая измерения за щелью на участке от s_n до s_k , где $s_n \approx 0,122$ ($\Psi = 20^\circ$), $s_k \approx 1,664$, где s – расстояние вдоль образующей поверхности модели от кромки щели, соответствующей углу $\Psi = 13^\circ$. Теневые картины обтекания модели получены прямым теневым методом. Длительность вспышки импульсной лампы составляла 10^{-6} с. Часть экспериментов сопровождалась тестовыми расчётами.

Численные исследования выполнялись при нулевом угле атаки модели. Использовались уравнения Навье–Стокса для осесимметричных двухмерных вязких сжимаемых нестационарных течений.

Экспериментальные исследования показали, что при вдуве газа в области критической точки сферического затупления продольно обтекаемого цилиндра:

- Снижение теплового потока достигается во всём исследованном диапазоне углов атаки $\alpha = 0 \div 30^\circ$. Однако, при $\alpha \neq 0$ требуется существенно больший расход охладителя, чем при нулевом угле атаки.
- Основным параметром, определяющим уровень снижения теплового потока, является отношение расходов G^* вдуваемого вещества и газа в невозмущённой области течения.
- Форма ударной головной волны у затупления почти не зависит от G^* .

Картины течения, полученные с помощью расчётов, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-08-00971, 14-08-00793).

Г.Г. ЧЕРНЫЙ И РАЗВИТИЕ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В МЕХАНИКЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ (ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, МАГНИТНАЯ ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА, ЭЛЕКТРОГАЗОДИНАМИКА)

А.Б.Ватажин

ЦИАМ имени П.И.Баранова, Москва

6 ноября 2012 года, накануне своего 90-летия, ушел из жизни выдающийся ученый-механик современности, внесший основополагающий вклад в развитие механики жидкости и газа в нашей стране и за рубежом, академик Горимир Горимирович Черный. Наша школа-семинар, создателем и руководителем которой был Горимир Горимирович, посвящает свою научную работу его памяти.

Диапазон научной деятельности Г.Г. Черного громаден. Его достижения представлены в замечательных монографиях и статьях. Анализ его творчества проводится многими учеными.

В данном докладе отмечается ряд этапов творческой жизни Горимира Горимировича – руководителя газодинамической Лаборатории в ЦИАМ (1952 – 1970 гг.) и Института механики МГУ, связанных с развитием новых направлений в механике жидкостей и газов.

I. «Звездный» период творчества Г.Г.Черного в области внутренней и внешней газовой динамики (осреднение неравномерных потоков газа в каналах, взаимодействие косоугольного скачка с текущим у стенки дозвуковым потоком, течения в пограничных слоях с поверхностями разрыва, асимптотический метод расчета нестационарных и стационарных течений с сильными ударными волнами, обтекание гиперзвуковым потоком тонких затупленных тел, оптимизация аэродинамических форм, исследование устойчивости скачка уплотнения в канале переменного сечения).

II. Руководство Г.Г. Черным в ЦИАМ исследованиями по новой движительной и энергетической тематике (электродуговые подогреватели, стационарный холловский ускоритель плазмы, импульсный электромагнитный ускоритель эрозионного типа, каналы МГД генераторов, ионный двигатель).

III. Работы учеников Г.Г.Черного в области магнитной газовой динамики (создание и реализация методов расчета магнитогазодинамических течений в каналах, интегрированный с летательным аппаратом сверхзвуковой воздушно-реактивный двигатель при наличии МГД воздухозаборника).

IV. Работы учеников Г.Г.Черного в области электрогазодинамики (теория ЭГД течений, электризация летательных аппаратов и компенсация их заряда, электростатическая диагностика).

V. Новые модели и задачи теории кумуляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00232).

ЭЛЕКТРОГАЗОДИНАМИКА В АВИАЦИОННЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ (НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАРЯДКА ТЕЛ В ПОТОКЕ С ИОННОЙ КОМПОНЕНТОЙ; УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ В ДИФфуЗОРЕ С ПОМОЩЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА)

А.Б.Ватажин

ЦИАМ имени П.И.Баранова, Москва

Рассмотрены приложения электрогазодинамики к проблемам внешних и внутренних течений в авиационных устройствах.

1. Изучен нестационарный процесс накопления заряда на электрически изолированной сфере при ее обтекании турбулентной средой, содержащей ионную компоненту, при наличии внешнего электрического поля. Численное моделирование проведено на основе нестационарных электродинамических уравнений и осредненных уравнений Навье-Стокса с привлечением модели для турбулентной вязкости. Определены поля электрических величин (концентрации ионов, электрического тока и потенциала). Проанализированы особенности полученной зависимости роста потенциала сферы со временем. Показано, что ее монотонно возрастающий электрический потенциал выходит (или не выходит) на асимптотическое значение при не равной (или равной) нулю концентрации ионов на поверхности сферы.

2. Рассмотрена возможность управления течением в расширяющемся дозвуковом диффузорном канале с помощью диэлектрического барьерного разряда (ДБР). Предложен и реализован приближенный метод расчета течения, состоящий в выделении в нем активного объема, в котором задаются интегральные электрические мощность и сила, плотности которых предполагаются однородными, и в численном интегрировании в ламинарном и турбулентном вариантах системы уравнений газовой динамики с полученной кусочно-постоянной системой энергетических и силовых источников. С помощью этого метода проведено численное моделирование течения в канале модельного дозвукового диффузора с углом раскрытия 18° при наличии ДБР-актуатора, установленного на поверхности наклонной стенки диффузора вблизи ее начала. Рассматривалось трехмерное течение в рамках двухпараметрической модели турбулентности. Показано, что определяющим оказывается силовое электрическое воздействие. При скорости газа на входе в канал 20 м/с продемонстрирована возможность с помощью ДБР-актуатора ликвидировать зону отрыва в диффузоре и снизить потери полного давления на 22 %.

Проведено экспериментальное исследование течения в рассматриваемом диффузоре при ДБР воздействии. Получено качественное соответствие экспериментальных и расчетных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00232).

ФЛАТТЕР УПРУГОЙ, ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОДКРЕПЛЁННОЙ ПОЛОСЫ В ПОТОКЕ ГАЗА ПРИ МАЛЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

В.В. Веденеев, С.В. Шитов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Панельный флаттер хорошо известное явление в авиации, которое заключается в потери устойчивости и интенсивных вибраций панелей обшивок летательных аппаратов. Неустойчивость вызывается аэроупругим взаимодействием с потоком окружающего воздуха. Существуют два типа панельного флаттера: флаттер связанного типа и одномодовый флаттер. Связанный флаттер подробно изучен в линейных и нелинейных постановках, его возникновение приводит к появлению единственного устойчивого предельного цикла колебаний. Одномодовый флаттер до сих пор исследовался в двумерной постановке (рассматривается плоскость среза пластины вдоль потока, течения газа двумерно).

В настоящем докладе изучается флаттер упругой полосы в трёхмерной постановке (течение газа и колебания полосы в трёхмерном пространстве). Полоса периодически шарнирно подкреплена в бесконечном направлении, поперёк течёт сверхзвуковой поток, на задней и передней кромках у полосы шарнирное закрепление. Таким образом, полоса состоит из бесконечной серии одинаковых пролётов, устойчивость полосы определяется устойчивостью пролёта, сам же пролёт представляет собой упругую прямоугольную пластину.

Устойчивость упругой пластины в сверхзвуковом потоке газа исследуется с помощью линейно теории гидродинамической устойчивости. Задача решается численно методом Бубнова. Сначала аналитически выводится выражение для перепада давления, действующего на колеблющуюся пластину, и составляется замкнутое интегро-дифференциальное уравнение движения пластины. Далее, методом Бубнова прогиб пластины приближается суммой базисных функций. Каждая базисная функция имеет свою собственную частоту колебаний. Таким образом, задача на устойчивость сводится к задаче на отыскание собственных значений интегро-дифференциального уравнения движения пластины в сверхзвуковом потоке газа.

Численно были построены границы областей неустойчивости для четырёх первых частот. Свойства пластины фиксировались, изменялись длина, ширина пластины и число Маха набегающего потока. Для каждой из четырёх частот на плоскости безразмерных параметров (вертикальная ось – число Маха; горизонтальная ось – длина пластины) были построены области неустойчивости при различных значениях ширины пластины.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЯ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАВОВЫХ ПОТОКОВ

Е.А. Веденева

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Лава – жидкий продукт вулканических извержений, представляющий собой сильновязкую жидкость со сложными свойствами. Лавовые потоки характерны для медленных извержений и малых расходов магмы. Обычно принимается, что лава прилипает к поверхности, по которой растекается. Однако известно, что это условие не всегда выполнено: на подстилающей поверхности зачастую формируется подслоя, содержащий значительную долю обломков остывшей породы, который при растекании лавы может играть роль гусеничного механизма. Его образование связано с тем что, во-первых, лавовые потоки часто движутся по уже извергнутому ранее материалу, во-вторых, за счет остывания на их поверхности может образовываться «корка», которая растрескивается и обрушивается перед потоком. В основании застывших лавовых потоков этот подслон наблюдается в виде лавобрекчии – породы, представляющей собой обломки лавы, ей же сцементированные. В работе на поверхности вместо условия прилипания ставится условие частичного проскальзывания: скорость на поверхности является степенной функцией трения с постоянным коэффициентом пропорциональности.

Целью работы является исследование влияния граничного условия на подстилающей поверхности на скорость распространения и толщину лавовых потоков. Для этого задача решается в максимально упрощенной постановке: лава моделируется несжимаемой жидкостью с постоянной вязкостью, подстилающая поверхность считается плоской и горизонтальной, течение – осесимметричным. В приближении тонкого слоя построено асимптотическое решение задачи; найдена конечная зависимость, описывающая поведение течения в окрестности его переднего края, которая оказалась применимой не только в этой области, но и во всей области течения, за исключением окрестности источника магмы. Так же задача решена численно в полной постановке. Установлено, что при учете

проскальзывания скорость распространения лавы может быть существенно выше, чем при использовании условия прилипания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-01-00465) и Программы поддержки ведущих научных школ (НШ-3530.2014.1).

АВТОМОДЕЛЬНЫЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ

И.И. Вигдорович

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Исследованы автомодельные течения несжимаемой жидкости в турбулентном пограничном слое, когда скорость набегающего потока задана как степенная, с показателем m , функция продольной координаты. Автомодельная постановка не только упрощает решение, сводя уравнения движения к обыкновенным дифференциальным уравнениям, но и позволяет сформулировать условия замыкания задачи [1. *Вигдорович И. И.* // ДАН. 2011. Т. 437. № 6. С. 759-765, 2.// ЖЭТФ. 2013. Т. 144. Вып. 2(8). С. 413-427]. Показано, что для рассматриваемого класса течений, зависящих от трех определяющих параметров, безразмерный путь смещения во внешней области есть функция относительного расстояния до стенки и показателя m , а в пристеночной области – универсальная функция локального числа Рейнольдса, причем последний вывод справедлив и при обращении в нуль трения на стенке. В расчетах эта функция полагалась не зависящей от градиента давления, что дает результаты очень близкие к экспериментальным данным. Существуют четыре различных автомодельных режима течения [1,2, 3. *Вигдорович И. И.* // ДАН. 2012. Т. 444. № 1. С. 42-46. 4.// ДАН. 2012. Т. 445. № 5. С. 516-520. 5. // ДАН. 2014. Т. 457. № 4]. Каждому режиму отвечает свой параметр подобия, одним из которых является известный параметр Клаузера, а три других установлены впервые [4, 5]. При неблагоприятном градиенте давления, когда показатель степени m лежит в некотором диапазоне, зависящем от числа Рейнольдса, задача имеет два решения с разными значениями толщины пограничного слоя и трения на стенке, что указывает на возможность гистерезиса в пред отрывном течении [3]. Отрыв наступает не при минимальном значении m , которое соответствует наиболее сильному неблагоприятному градиенту давления, а при $m = -0.216 - 0.4R_p^{-1/3} + O(R_p^{-2/3})$, где R_p – число Рейнольдса, образованное по продольному градиенту давления [4, 5]. Результаты теории находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-08-00260).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ИНИЦИАЦИЕЙ ВОЛН СЖАТИЯ

Ю.А. Виноградов, К.С. Егоров, С.С. Попович, М.М. Стронгин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Принцип действия устройства безмашинного энергоразделения потоков (трубы Леонтьева) основан на взаимодействии через стенку дозвукового и сверхзвукового потоков газа одинаковой температуры торможения на входе. В результате такого взаимодействия на выходе из устройства мы получаем два потока с разными температурами – нагретый сверхзвуковой поток и охлажденный дозвуковой.

Количество передаваемого через стенку тепла в данном устройстве определяется коэффициентом теплопередачи и адиабатной температурой стенки в сверхзвуковом канале. Для повышения коэффициента теплопередачи необходимо увеличить наименьшее из значений коэффициентов теплоотдачи, в данном случае – со стороны сверхзвукового канала устройства. Любое внесение конструктивных изменений в сверхзвуковой канал с целью интенсификации теплоотдачи сопровождается образованием волн сжатия и локальных отрывных зон. Увеличение коэффициента теплоотдачи в области взаимодействия волны сжатия с пограничным слоем и в отрывной зоне за препятствием может дополнительно интенсифицировать теплообмен. Однако при этом может измениться и адиабатная температура обтекаемой стенки. Данное экспериментальное исследование направлено на изучение влияния волн сжатия и локальных отрывных зон на адиабатную температуру поверхности, обтекаемой сверхзвуковым потоком сжимаемого газа.

Экспериментальные исследования проводились на сверхзвуковом аэродинамическом стенде с использованием систем регистрации данных National Instruments, автоматизированных программ опроса и обработки показаний датчиков в среде LabView, оптических методов визуализации картины течения и бесконтактных тепловизионных методов фиксации температурных полей.

В результате исследований установлено, что адиабатная температура стенки повышается до 2% в области взаимодействия волны сжатия с пограничным слоем на пластине. При этом коэффициент восстановления температуры меняется в пределах 3% в области взаимодействия. В отрывной области за ребром адиабатная температура стенки уменьшается до 3.5% в сравнении с безотрывным обтеканием пластины при одинаковом локальном числе Маха в потоке. Уменьшение коэффициента восстановления температуры при отрывном течении составило до 10% в отрывной области в

диапазоне изменения числа Маха от 2 до 3. Результаты позволяют сделать вывод, что отрывные течения, приводя к уменьшению коэффициента восстановления, повышают эффективность устройства безмашинного энергоразделения потоков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-08-00084, 14-08-31624).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Ю.А. Виноградов, А.Г. Здитовец, М.М. Стронгин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Под термином «энергоразделение» или «безмашинное энергоразделение» понимается перераспределение полной энтальпии (температуры торможения) в потоке газа без совершения им внешней работы и теплообмена с окружающей средой. Причины, вызывающие энергоразделение потока, могут быть различными. В некоторых случаях это вихревые течения, в других случаях это связано с пульсациями давления и возникновением ударных волн. Они легли в основу устройств для энергоразделения потока. Наиболее распространенные среди них – вихревые трубы Ранка-Хилша и резонансные трубы Гартмана-Шпренгера. На данный момент создано множество разновидностей таких устройств, которые нашли широкое применение в промышленности. Их безусловными достоинствами являются: простота изготовления, высокая надежность, низкая инерционность, отсутствие систем смазки, возможность работать в широком диапазоне температур рабочего тела. С другой стороны им присущ и существенный недостаток, ограничивающий их применение в тепловых двигателях и установках – это высокие потери полного давления на выходе у горячего и холодного потоков. В связи с этим актуальна задача о создании метода энергоразделения сочетающего в себе высокую термическую эффективность с приемлемыми потерями полного давления. Академиком Леонтьевым был предложен новый способ энергоразделения газового потока (Докл. РАН. 1997. Т.354. № 4), удовлетворяющий данным условиям. Он основан на известном газодинамическом эффекте – температура теплоизолированной стенки, обтекаемой потоком сжимаемого газа, может существенно отличаться от температуры торможения потока за счет диссипативных процессов, возникающих в пограничном слое.

В литературе можно найти работы, посвященные численному и аналитическому исследованию энергоразделения потоков с использованием данного метода. Экспериментальные результаты ограничены.

В настоящей работе приводятся данные экспериментального исследования безмашинного энергоразделения по методу Леонтьева.

Энергоразделение происходит в устройстве, идентичном теплообменному аппарату, типа «труба в трубе», с той особенностью, что по внутреннему каналу поток движется со сверхзвуковой скоростью (число Маха на входе $M=1.67$), а по внешнему с дозвуковой. При этом на входе в устройство потоки имеют одинаковую начальную температуру торможения. Варьировался массовый расход воздуха по дозвуковой части. Для всех соотношений массовых расходов по дозвуковому и сверхзвуковому каналам зафиксировано снижение среднemasсовой температуры торможения потока, выходящего из дозвукового канала, и повышение ее у потока, покидающего сверхзвуковой канал. Величина максимального охлаждения дозвукового потока составила 20°C , а нагрева сверхзвукового потока – 6°C .

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА КУМУЛЯЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ ВОЛН С ГАЗОВЫМИ ПУЗЫРЯМИ

П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

На основе уравнений Эйлера в осесимметричной постановке численно исследуется взаимодействие плоских ударных волн с газовыми пузырями. Газовый пузырь моделируется эллипсоидальной областью газа повышенной или пониженной плотности. Описан процесс преломления исходной ударной волны и фокусировки (кумуляции) вторичных скачков уплотнения на оси симметрии, имеющий место как для повышенной, так и пониженной плотности газа в пузыре. Проведена основная классификация режимов кумуляции, включающая внутренние, внешние и переходные режимы.

Проведено параметрическое исследование задачи, определено влияние числа Маха ударной волны, дефекта плотности газа в пузыре, а также геометрической формы пузыря (удлинения) на режим фокусировки вторичных скачков уплотнения. Определена качественная зависимость интенсивности кумуляции от определяющих параметров задачи.

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ОДНО- И ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

*В.Г. Главный, О.Н. Кашинский, А.С. Курдюмов, П.Д. Лобанов,
В.Г. Меледин, Н.А. Прибатурин*

Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Выполнено комплексное экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в модели имитаторе тепловыделяющей сборки (ТВС) реакторной установки. В качестве объекта исследования была использована 37-стержневая сборка стержней гексагональной геометрии, по своим геометрическим параметрам соответствующая тепловыделяющей сборке реакторов ВВЭР. Проведено детальное экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при течении однофазной жидкости в такой модели-имитаторе ТВС, влиянии на это течение дистанционирующих и перемешивающих решеток разной конструкции. Были выполнены прецизионные измерения распределения давления, коэффициентов гидравлического сопротивления, скорости течения жидкости, локального трения на стенке имитаторов ТВЭЛ и локального теплообмена на центральном стержне сборки. Исследовано влияние возмущения, вносимого в поток жидкости в системе вертикальных стержней – имитаторов ТВЭЛов шага расположения и формы дистанционирующих решеток. Изучено влияние перемешивающих решеток на изменение гидродинамики течения и теплообмен между имитаторами ТВЭЛ и жидкостью.

Проведено экспериментальное исследование двухфазного газожидкостного течения. Выполнены измерения распределения газосодержания в межТВЭЛных ячейках, межячеистого перехода газовой фазы, размеров и скорости пузырьков, влиянию двухфазного течения на теплообмен между имитатором ТВЭЛ и жидкостью. На основе измерений предложена карта режимов двухфазного течения в сборке имитаторе ТВС, построены гистограммы распределения газовых пузырьков по размерам. Изучено влияние различных типов дистанционирующих и перемешивающих решеток на характеристики течения жидкости при двухфазном течении жидкости через имитатор ТВС. В частности, установлено, что наличие дистанционирующей решетки приводит к повышенному диспергированию газовой фазы непосредственно за решеткой и частичному перераспределению газа в соседние каналы. Впервые для двухфазного течения в системе вертикальных стержней – имитаторов ТВЭЛов получены результаты по трехмерной структуре течения, закономерности распределений скорости и коэффициента теплообмена.

Авторы благодарны ОАО «ТВЭЛ» и ОАО НЗХК за постоянное внимание к работе и плодотворные обсуждения.

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ДЖОУЛЕВЫМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ В НАКЛОННОМ ПЛОСКОМ СЛОЕ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

А.П. Глинов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

На основе уравнений Обербека-Буссинеска и тепловой модели разряда рассмотрены течения электропроводной сплошной среды, обусловленные джоулевым тепловыделением в наклонном плоском слое в поле силы тяжести. При модельной (линейно убывающей) зависимости удельного электрического сопротивления межэлектродной среды от температуры построены одномерные стационарные фоновые решения и изучены вольт-амперные характеристики (ВАХ). Исследование проведено с учетом теплового и электрического сопротивления электродов и их проницаемости для электропроводящей среды (в т.ч. и при наличии вдува через один электрод и отсоса через другой). Анализ устойчивости в электротехническом (одномерном) приближении показал, что при определенных условиях существуют решения, соответствующие участкам ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Соответствующие этим решениям течения сплошной среды в межэлектродном пространстве разряда могут быть неустойчивы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-01-00305).

УСКОРЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ И ЗВЕЗД

А.Н.Голубятников

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В рамках одномерной задачи газовой динамики с плоскими волнами всесторонне исследуется вопрос об ускорении ударной волны, движущейся по равновесному состоянию газа с падающей плотностью. В частности, такого рода явления наблюдаются в разогретых или ионизованных областях атмосфер и звезд. При этом следует учитывать влияние силы тяжести,

создающей противодействие, поперечное магнитное поле и даже эффекты теории относительности. Известно, что при хромосферных вспышках на Солнце скорость частиц плазмы может достигать 0,8 скорости света. Ускорение ударных волн происходит под влиянием двух факторов: ускорение газа за счет потери инерции, что осуществляется даже без противодействия (Л.И.Седов, задача о сильном взрыве в среде с переменной плотностью), и неограниченный рост начальной скорости звука. Тормозящими эффектами являются встречная сила тяжести и релятивистское ограничение скорости движения скоростью света. Эффект ускорения, сопровождающийся кумуляцией энергии-импульса, уже может быть продемонстрирован на примере решения задачи о волне столкновений в цепочке частиц с убывающей массой.

В связи с задачей ускорения ударных волн в газе построен ряд точных решений, учитывающих влияние тех или иных внешних условий. Рассматриваются автомодельные случаи и решения с разделением переменных. Как правило, отсутствие учета силы тяжести приводит к конечному времени ухода ударной волны на бесконечность при ограниченном вкладе энергии. В рамках линейной теории специально исследуется ускорение слабых ударных волн. В общем случае, не допускающем групповой инвариантности решения, для определения движения ударной волны в рамках ньютоновской механики применяется метод интегральных неравенств, позволяющий свести задачу к двусторонним оценкам, представленным в конечном виде, причем даже в элементарных функциях при степенном убывании начального давления, на основании которых строятся графики. Важным здесь является возможность наглядно представить и исследовать решение при относительно большом количестве входящих параметров, связанных с той или иной постановкой задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00056).

КАЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛАГИОКЛАЗА

Н.В. Горохова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В работе проводится качественное исследование роста кристалла плагиоклаза – одного из основных пороодообразующих минералов. Плагиоклаз представим в виде смеси двух типов молекул: анортита и альбита. Построенные ранее общие модели равновесного и неравновесного роста произвольного кристалла применены для исследования

кристаллизации плагиоклаза в остывающем магматическом расплаве. Равновесная (диффузия происходит мгновенно) модель основана на законах сохранения массы, неравновесная (скорость диффузии сравнима со скоростью роста кристалла) – на системе уравнений многокомпонентной диффузии. Используются модельные зависимости состава кристалла и температуры равновесия от состава расплава. Для равновесной задачи получено аналитическое решение. В неравновесном случае проанализировано влияние граничных условий на процесс кристаллизации. Когда на границе кристалл–расплав применяется условие локального равновесия по температуре (условие Стефана), получено, что кристалл растет монотонно при любых значениях параметров. Если это условие не выполнено, то скорость роста кристалла определяется в зависимости от переохлаждения (разности температуры расплава и температуры равновесия) и температуры расплава. В результате численного моделирования установлено, что в широком диапазоне параметров образуются кристаллы с осцилляторной зональностью. Исследовано влияние параметров задачи на процесс кристаллизации. Получено, что существует максимальная скорость роста, выше которой кристалл растет монотонно, при медленном остывании решение приближается к равновесному.

ОПТИМАЛЬНАЯ ФОРМА НЕСУЩИХ ТЕЛ В ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОМ ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

А.Б. Горшков, В.И. Лапыгин, В.А. Михалин, Т.В. Сазонова, Д.М. Фофонов

ЦНИИМаш, Королёв, Моск. обл.

Рассматривается вариационная задача о форме оптимальной поверхности тела, которая, при заданных объёме, площади в плане, форме затуплений, коэффициенте трения, числе Маха и угле атаки α_* , реализует минимальный тепловой поток Q к боковой поверхности при заданном значении аэродинамического качества K или минимальное лобовое сопротивление.

Давление на поверхности тела определяется по методу касательного клина, коэффициент трения принимается постоянным или задаётся в виде степенной зависимости от продольной координаты.

При определении теплового потока к боковой поверхности тела используется аналогия Рейнольдса, справедливость которой при обтекании несущих тел иллюстрируется на примере расчёта неравновесного ламинарного гиперзвукового течения около треугольного крыла.

Ограничиваясь рассмотрением тонких в продольном направлении тел, вариационная задача сводится к определению формы тела, обладающего максимальным значением K при заданном Q . Решение этой задачи проводится с использованием численного метода локальных вариаций. Навстречная поверхность оптимальных тел является выпуклой, а её кривизна зависит от заданного значения угла атаки a^* или близка к нулю.

После решения вариационной задачи тепловые потоки к поверхности оптимальных тел и аэродинамическое качество определяются путём численного решения уравнений Навье-Стокса с учётом термохимических превращений в ударном слое около тела.

Величина теплового потока к навстречной поверхности оптимальных тел при заданном K не зависит от a^* .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-01-00626 а).

ВЛИЯНИЕ КАТАЛИТИЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ И КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ НА КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ДЕСАНТНОГО МОДУЛЯ ДМ-16 ПРОЕКТА ЭКЗОМАРС

А.Б. Горшков

ЦНИИМаш, Королёв, Моск. обл.

Рассчитаны параметры течения при обтекании десантного модуля проекта ЭкзоМарс ДМ-16, запуск которого планируется в 2016 году. Спускаемый аппарат ДМ-16 входит в атмосферу Марса с гиперзвуковой скоростью (около 6 км/сек). Поэтому особое значение имеет создание оптимальной внешней оболочки аппарата, защищающей его от аэродинамической нагрева во время полета. Чтобы выбрать подходящий тип теплозащитного покрытия и определить его размер необходимо точное предсказание уровня тепловых потоков к поверхности аппарата. Высокоэнтальпийные течения газа, характерные для условий гиперзвукового входа космического аппарата в атмосферу, не могут быть полностью смоделированы в наземных экспериментальных установках. В связи с этим важной составной частью в процессе разработки космических аппаратов является надежное математическое моделирование условий обтекания. Компьютерные программы используют разнообразные численные методы и включают различные данные по химической кинетике и транспортным свойствам. Таким образом, большое значение приобретает проблема верификации численных алгоритмов и проверки моделей молекулярного переноса и химической кинетики, которые используются в расчетных программах.

Были проведены расчеты обтекания и конвективного теплообмена ДМ-16 вдоль так называемой крутой траектории входа в атмосферу Марса под углом атаки 0° . Численный расчет поля течения выполнен с использованием уравнений Навье-Стокса, которые дополнены уравнениями сохранения массы химических компонент и колебательной энергии молекул CO_2 . В расчетах учитывалось 19 химических реакций, протекающих между 10 компонентами (O, N, C, NO, CO, O_2 , N_2 , CO_2 , C_2 , CN). На поверхности аппарата используется условие прилипания потока, температура поверхности получается из условия радиационного равновесия. Концентрации химических компонент находятся из условия конечной каталитичности поверхности, которая варьировалась в расчетах. Учет колебательной неравновесности молекул CO_2 выполнен в рамках модели CVDV Тринора-Маррона. Исследовано влияние каталитичности поверхности и колебательной релаксации на конвективный теплообмен, проведено сравнение с результатами расчетов других авторов.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ТРИБОЛОГИИ

И.Г. Горячева

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

Исследование взаимодействия двух тел и процессов, протекающих в зоне их контакта, строится на основе двух фундаментальных наук: механики контактных взаимодействий деформируемых тел и трибологии. Результаты этих наук позволяют не только разрабатывать модели трения и изнашивания поверхностей при разных условиях взаимодействия, но и решать важные прикладные задачи, связанные с расчетом долговечности работы различных трибосопряжений, определением критических условий, приводящих к нарушению их нормального функционирования, с разработкой способов управления процессами трения и изнашивания. В докладе представлены современные направления развития этих наук, связанные с исследованием свойств и созданием новых материалов для узлов трения, с разработкой методов модификации поверхностей, с изучением особенностей взаимодействия тел в прецизионных механизмах и микромеханических системах, с прогнозированием долговечности трибосистем.

О МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ДОРОЖКИ КАРМАНА В ДАЛЬНЕМ СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ

С.В. Гувернюк, Я.А. Дынников, Г.Я. Дынникова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Вихревая дорожка Кармана, возникающая в следах за плохообтекаемыми телами, является предметом исследований уже более ста лет и, тем не менее, продолжает привлекать внимание ученых. С разных точек зрения исследуются строение и устойчивость вихревых структур ближнего и дальнего следа, их восприимчивость к внешним возмущениям, а также различные способы управления.

Известно, что по мере удаления от тела регулярная вихревая дорожка, прежде чем естественным образом ослабнуть и рассеяться, испытывает довольно резкую перестройку, сопровождающуюся укрупнением вихрей и увеличением расстояний между ними. Численные расчеты следа за цилиндром при числах $Re \sim 100-1000$ показали, что в области начала перестройки дорожки наблюдается аномальное поведение осредненной по времени скорости жидкости на оси следа. В системе координат, связанной с жидкостью, непосредственно за цилиндром она равна скорости цилиндра, затем довольно быстро тормозится практически до скорости жидкости вне следа, а непосредственно перед перестройкой дорожки на расстоянии нескольких десятков диаметров цилиндра вновь существенно возрастает почти до скорости цилиндра, проходит максимум и снова снижается. То есть наблюдается аномальная область повышенной скорости, бегущая за цилиндром.

Известны различные гипотезы причин перестройки дорожки Кармана в дальнем следе, в основном, они сводятся к двум. По одной перестройка происходит из-за тенденции к попарному объединению вихрей Кармана одного знака. По другой – перестройка объясняется затуханием первичной дорожки и возникновением новой из-за неустойчивости симметричного следа, имеющего точки перегиба профиля сдвигового распределения продольной скорости. Однако ни одна из этих теорий не объясняет причин возникновения и поддержания аномальной области повышенной скорости в дальнем следе. В докладе представлены результаты численного (при $Re=600$) и аналитического исследования динамики вихревых структур в следе за цилиндром, дается объяснение механизма аномального поведения продольной скорости жидкости в области перестройки дальнего следа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-01-00985).

ПРИМЕНЕНИЕ БЕССЕТОЧНОГО МЕТОДА ВВД ДЛЯ РЕШЕНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ С УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

С.В. Гувернюк, Я.А. Дынников, Г.Я. Дынникова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Расчет нестационарного нелинейного взаимодействия течений сплошной среды с упругими элементами обтекаемых тел является трудной сопряженной задачей, актуальной при проектировании многих технических устройств. Основная трудность состоит в том, что на каждом шаге по времени должны быть согласованно решены уравнения движения среды и динамики тела изменяющейся формы и положения. Традиционные сеточные конечно-разностные или конечно-объемные подходы, в этом случае требуют перестройки сеток на каждом шаге по времени и итерационного процесса согласования движения тела и жидкостью. Это приводит не только к чрезмерно большим затратам вычислительных ресурсов, но и зачастую к невозможности решения некоторых задач, например, в случаях, когда время установления по одному физическому процессу оказывается во много раз меньше, чем по другим.

В данной работе для решения плоских сопряженных задач используется бессеточный метод вязких вихревых доменов (ВВД). Его основу составляет представление вихревого поля вихревыми частицами, которые непрерывно рождаются на обтекаемых поверхностях и далее движутся относительно жидкости с вихредиффузионной скоростью, сохраняя свою циркуляцию. При этом неизвестная циркуляция новых вихревых частиц, вычисляется из системы линейных уравнений, обеспечивающей выполнение граничных условий. Показано, что описанная процедура сходится к решению двумерных уравнений Навье-Стокса вязкой несжимаемой жидкости. Благодаря тому, что гидродинамические силы, действующие на тела, линейно зависят от циркуляций рождающихся на каждом временном шаге частиц, в линейную систему уравнений для циркуляций вихрей, рождающихся на поверхности тел, можно добавить уравнения динамики тела, в которых гидродинамические силы интегрально выражены через указанные циркуляции. Таким образом, получается расширенная система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных циркуляций и скоростей (поступательной и вращательной) движения тел. Это обеспечивает на каждом шаге по времени безытерационное согласование движения жидкости и тела без расщепления шага по времени на гидродинамическую и динамическую составляющие. Приводятся примеры моделирования методом ВВД интенсивных автоколебаний упруго связанных тел в потоке вязкой несжимаемой

жидкости, а также обтекания машущего крылового профиля, содержащего упругие элементы механизации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 12-01-00985).

О ГИСТЕРЕЗИСЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНЫ

С.В. Гувернюк, А.Ф. Зубков, М.М. Симоненко

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

При сверхзвуковом обтекании каверны (выемки), образованной на поверхности тела, в зависимости от отношения длины L каверны к ее глубине h возможны разные схемы течения в каверне (Чжэн П. Отрывные течения. Том 2. – М.: Изд-во Мир, 1973, 280 с.). Если L/h мало, то реализуется открытая схема, при которой во всей области каверны существует дозвуковое циркуляционное течение, отделенное от внешнего сверхзвукового потока слоем смешения. При увеличении L/h выше некоторого критического значения возникает замкнутая схема. В этом случае в каверне образуются две изолированные области отрыва, одна за передним, другая перед задним уступом, а во внешнем поле возникают интенсивные волны разрежения и скачки уплотнения. Считается, что критерием замыкания каверны является условие $L=L_C=L_D+L_F$, где L_D и L_F – протяженность областей отрыва за передним и перед задним уступом, соответственно. Если длину замкнутой каверны уменьшать непрерывно, то она открывается при некотором значении $L_0 < L_C$. Диапазон $L_0 < L < L_C$ отвечает области гистерезиса, в которой возможны как открытая, так и замкнутая схема течения в каверне.

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований сверхзвукового обтекания осесимметричной кольцевой каверны под углом атаки. Экспериментальная модель представляла собой цилиндрическое тело, снабженное цилиндро-коническим головным и цилиндрическим хвостовым насадками. Образованная этими телами каверна в осевом сечении представляет собой прямоугольный вырез с равновеликими высотами переднего и заднего уступов ($h=h_D=h_F$). Эксперименты проведены в аэродинамических трубах А-7 и А-8 НИИ механики МГУ.

В первой серии экспериментов ($M=2.5$) длина кольцевой каверны менялась дискретно. Воспроизведены режимы обтекания с открытой и замкнутой кавернами. Выявлен диапазон L/h , когда при малых углах атаки могут существовать как замкнутая, так и открытая схемы течения. В этом диапазоне L/h небольшие изменения угла атаки приводили к необратимой

смене первоначально замкнутой схемы обтекания на открытую схему, а открытая схема обтекания восстанавливалась при любых угловых отклонениях с последующим возвратом модели в исходное положение. При увеличении угла атаки во всех случаях происходил переход к комбинированной схеме течения, имеющей черты замкнутой схемы на наветренной и открытой схемы на подветренной стороне каверны. Обнаружена небольшая область гистерезиса по углу атаки.

Во второй серии экспериментов ($M=2.5$ и 3) длина кольцевой каверны менялась непрерывно (в сторону увеличения и в сторону уменьшения) путем перемещения головного насадка в условиях сверхзвукового обтекания. Определена область гистерезиса по длине каверны и установлено, что протяженность этой области существенно зависит от формы головного насадка. Форма насадка варьировалась путем изменения угла раствора β конического наконечника и длины l установленной за наконечником перед входом в каверну цилиндрической вставки. Уменьшение l , равно, как и увеличение β , влекло за собой заметное смещение границ области гистерезиса вниз. Увеличение угла атаки приводит к сужению области гистерезиса по длине каверны, при этом нижняя граница L_0 области гистерезиса смещается вверх, а верхняя граница L_C остается практически неизменной. При угле атаки порядка 5-6 градусов область гистерезиса по длине каверны вырождалась.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-01-00985).

НЕЗАБЫВАЕМЫЕ ВОСПОМИНАНИЯ

Ю.А. Демьянов

ЦНИИМаш, Королев, Моск. обл.

1. Г.Г.Чёрный – мой оппонент по кандидатской диссертации в Спецсовете механико-математического факультета МГУ (председатель – академик С.Л.Соболев). Часть диссертации посвящена распространению результатов статьи Г.Г.Чёрного «Ламинарные движения газа и жидкости в пограничном слое с поверхностью раздела» (1954 г.) на случай спуска космических аппаратов в атмосфере Земли, когда воздух диссоциирует за ударной волной.

2. Тесные связи аэрогазодинамического комплекса НИИ-88 (ныне ЦНИИМАШ) с НИИ механики МГУ и ее руководством (Г.Г. Чёрный, А.И. Зубков).

Совместные исследования. Ряд исследований НИИ механики МГУ выполнены по договорам с НИИ-88 (например, отработка узлов установок

адиабатического сжатия, по аэрогазодинамике спускаемого аппарата «Союз»).

3. Почти полувековая работа с Г.Г. Чёрным в Экспертном Совете ВАК по математике и механике, где он был вначале заместителем Председателя (Председатель – академик В.С. Владимиров), а затем Председателем Экспертного Совета.

4. Постоянное участие коллектива аэрогазодинамиков и специалистов по теплообмену НИИ-88 в Школе Г.Г. Чёрного.

5. Огромная роль Г.Г. Чёрного в организации юбилея в связи со 100-летием Х.А. Рахматулина, которого он считал одним из своих (4-х) учителей: а) вхождение в Президиум соответствующего Оргкомитета; б) статья Г.Г.Чёрного в журнале «Космонавтика и Ракетостроение» 1(54), 2009 г., посвященном этой дате; в) письмо директору ЦНИИМАШ с просьбой о рассекречивании научно-технического задела по аэрогазодинамике и теплообмену, и обещанием поддержать публикацию об этом заделе в МЖГ (опубликована большая статья, приуроченная к 50-летию полета Ю.А. Гагарина).

6. Значение научного семинара Г.Г. Чёрного в НИИ механики МГУ.

7. Представление им статей в ДАН.

8. Впечатления от личных встреч с Г.Г. Чёрным на острове Городомля и в окрестностях озера Селигер. Незабываемое возвращение с ним в Москву с берегов Селигера (на двух маршрутных автобусах и электричке «Тверь-Москва»).

ВОПРОСЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОЙ СТРУИ В СПУТНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

А.Е. Дешко, В.И. Тимошенко

ИТМ НАНУ и ГКАУ, г. Днепропетровск

При подаче центральной углеводородной струи (водород, метан) в спутный поток воздуха, параметры которого соответствуют условиям работы камеры сгорания ГПВРД осуществляется режим горения близкий к диффузионному. Область горения является узкой в поперечном направлении и вытянутой в продольном направлении. Для интенсификации горения можно добавлять небольшое количество окислителя (воздуха или кислорода) в углеводородную струю. Целью исследований, результаты которых обсуждаются в докладе, является иллюстрация возможности уменьшения длины области смешения и воспламенения топлива и увеличение

тепловыделения и полноты сгорания топлива путем выбора параметров истечения струи и ее состава.

В рамках стационарных уравнений вязкого слоя с использованием маршевого алгоритма проведено численное моделирование неравновесного сверхзвукового истечения смеси водорода или метана с воздухом и кислородом в спутный сверхзвуковой поток воздуха (Тимошенко В.И. // Аэродинамика. Проблемы и перспективы: Сб. статей. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», – 2009. – С. 158 – 175). Температура струи намного меньше температуры спутного потока. Механизм окисления водорода в воздухе моделируется при помощи кинетической модели, включающей 9 химических реакций. При моделировании воспламенения и горения метана используются модель, включающая 55 реакций, и брутто модель из двух реакций. Тестирование алгоритма и выбор кинетической модели горения водорода были проведены на основе сравнения распределении давлений в камере сгорания с экспериментальными данными.

Исследовано влияние массового состава струи и ее статической температуры на развитие и протяженность области горения. Особенности воспламенения холодной углеводородной струи в спутном потоке горячего воздуха определяются сочетанием в слое смешения уровня температуры со значениями концентраций горючего компонента и окислителя и разности скоростей в струе и в спутном потоке.

Рассмотрены случаи, когда при изменении массового состава струи или ее температуры сохраняется постоянным число Маха или скорость истечения. Эти режимы истечения обеспечиваются заданием параметров торможения струи в зависимости от массового состава струи. Показано, что по мере увеличения концентрации окислителя в струе происходит увеличение полноты сгорания, тепловыделения и статического давления до тех пор, пока полнота сгорания становится близкой к единице. Дальнейшее увеличение содержания окислителя в струе приводит к уменьшению тепловыделения и статического давления, вследствие сгорания меньшего количества топлива.

На конкретных примерах показано, что рациональное задание режима истечения струи в спутный поток и ее состава с большим избытком горючего позволяет организовать режим горения, оптимальный с точки зрения максимального тепловыделения, полноты сгорания топлива и уменьшения длины области его выгорания.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ОБТЕКАНИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТЬЮ ТОНКИХ НЕСУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БЕССЕТОЧНЫМ МЕТОДОМ ДИПОЛЬНЫХ ДОМЕНОВ

Г.Я. Дынникова, С.А. Сыроватский

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

При обтекании тонких поверхностей однородным потоком идеальной жидкости течение остается безвихревым всюду, кроме области следа, заполненной вихрями, сошедшими с кромок поверхности. Это позволяет применять упрощенные схемы моделирования таких течений. Для инженерных расчетов при моделировании обтекания тонких поверхностей идеальной жидкостью обычно используется метод вихревых рамок. Этот метод является достаточно экономичным, однако обладает рядом недостатков. Так, в процессе эволюции вихревых рамок происходит их деформация с чрезмерным растяжением и самопересечением сторон, что может приводить к большим погрешностям расчетов. Существуют также другие способы моделирования вихревой пелены, сходящей с кромок поверхности, с помощью разнообразных вихревых элементов (вортонов, вихревых отрезков, вихревых зерен и др.) У всех этих методов есть один существенный недостаток – каждый элемент индуцирует поле скорости, которое является вихревым всюду, а не только в области локализации вихревых элементов. Соответствующие численные схемы не обеспечивают выполнение законов сохранения импульса, что может приводить к возникновению погрешностей при расчете сил, действующих на тела.

В данной работе применяется новый бессеточный метод, при котором вихревая пелена моделируется дискретными дипольными элементами. Каждый такой элемент индуцирует поле скорости, которое вдали от элемента стремится к полю точечного диполя. На основе уравнений Эйлера для несжимаемой жидкости выведены уравнения эволюции поля диполей и разработана численная схема, описывающая движение и изменение дискретных дипольных элементов в пространстве. Ценность данного представления заключается в том, что обеспечивается выполнение закона сохранения импульса.

Программная реализация метода выполнена с использованием технологии CUDA на графических ускорителях. Представлены примеры расчета трехмерных течений около пластин различной формы, неподвижных или совершающих поступательные и вращательные движения. Полученные решения сравниваются с результатами расчетов другими методами и известными экспериментальными данными.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-00985).

ДРОБЛЕНИЕ КРУПНЫХ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ

Л.А.Егорова, В.В. Лохин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В настоящем докладе обсуждается движение и разрушение космических тел при их входе в атмосферы планет. Дано одно из возможных объяснений фрагментации крупных метеороидов с помощью модели двухстадийного дробления.

На первой стадии дробления оценивается количество осколков в зависимости от увеличения светимости по данным наблюдений. На второй стадии предполагается взрывоподобное дробление образовавшихся ранее крупных фрагментов. Также рассмотрен эффект «теплового взрыва» на заключительном этапе разрушения.

Получены количественные оценки для некоторых известных крупных болидов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00775а).

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ОСНОВНЫХ УРАВНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ МЕТЕОРОВ С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ЭФФЕКТИВНОЙ ЭНТАЛЬПИЕЙ УНОСА МАССЫ

Л.А.Егорова¹, Г.А. Турский²

¹НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Моск. обл.

Основные уравнения физической теории метеоров представляют собой систему двух обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих движение центра масс тела и унос массы за счет аэродинамических сил и конвективно-радиационных потоков тепла.

Эти уравнения были получены в 30-х годах XX века и содержат коэффициент сопротивления, теплопередачи и энтальпию уноса массы. При постоянных коэффициентах уравнения допускают решение в явном виде. Однако коэффициент сопротивления меняется в несколько раз, коэффициент конвективной теплопередачи меняется до двух порядков, коэффициент радиационной теплопередачи – на порядок, энтальпия уноса массы пропорциональна квадрату скорости движения метеорного тела.

В работе с использованием данных по коэффициентам сопротивления во всех режимах гиперзвукового обтекания тел дается интерполяционная формула для коэффициента сопротивления, как функция числа Рейнольдса. С использованием экспериментальных данных и численных расчетов получено аналитическое решение для скорости торможения в разреженном режиме обтекания при возникновении реактивной силы за счет выбивания атомов кристаллической решетки метеорного тела атомами и молекулами воздуха. Получено также аналитическое и численное решение для скорости для всех режимов обтекания с переменным коэффициентом сопротивления.

На основании известных решений по конвективному теплообмену в критической точке, до скоростей 15 км/с выведено выражение для коэффициента конвективной теплопередачи, с использованием которого уравнение уноса массы решено в аналитическом виде.

Принципиальным результатом является явный вывод выражения для эффективной энтальпии уноса массы из условий динамической совместности на поверхностях плавления и испарения пленки расплава тела при метеорных скоростях.

Работа поддержана РФФИ (14-01-00775а) и грантом Правительства РФ по постановлению N 220 "О мерах по привлечению ведущих учёных в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования" по договору № 11.G34.31.0072, заключенного между Министерством образования и науки РФ, ведущим учёным и Московским физико-техническим институтом (государственным университетом).

ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Г.М. Жаркова, В.Н. Коврижина

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

Для панорамной визуализации полей температур и поверхностного трения в аэродинамическом эксперименте применяются методы, основанные на использовании жидкокристаллических (ЖК) покрытий, которые изменяют свои оптические свойства под влиянием внешних воздействий. Тонкий слой ЖК покрытия на исследуемой поверхности не вносит возмущений в пограничный слой, а оптический отклик на различного рода деформацию позволяет использовать его для измерения этой деформации (температуры и механического сдвига).

Применительно к аэродинамическому эксперименту авторами созданы ЖК смеси на основе холестерических жидких кристаллов чувствительных к

температуре или трению. Они обладают свойством селективного отражения света, длина волны которого зависит от температуры и касательного напряжения. Преимущество этого типа ЖК заключается в их многоцветности, что важно для панорамной визуализации пристенных течений. Пленочные покрытия на основе разработанных смесей нашли применение для визуализации структуры течения в до- транс- сверх- и гиперзвуковых установках.

Развитие методов цифровой обработки изображений, которые интенсивно развивались в последние годы, позволили применять ЖК покрытия для количественных измерений температуры и тепловых потоков в фундаментальных и прикладных исследованиях. В докладе будет приведено сопоставление данных, полученных методом жидкокристаллических покрытий, с данными стандартных датчиков теплового потока.

Накопленный экспериментальный материал позволяет считать, что ЖК покрытия благодаря их уникальным оптическим свойствам, а именно их чувствительности к внешним воздействиям, являются высокоинформативным диагностическим методом в аэродинамическом эксперименте. Полученные с помощью ЖК покрытий панорамные карты распределения температуры и трения позволяют экспериментаторам детально исследовать структуру течения вблизи поверхности и разрабатывать методы управления этой структурой.

ОБТЕКАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕЛ

И.А. Ждан¹, Ф.А. Максимов²

¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

²Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

Работа посвящена аэродинамическим свойствам системы тел, расположенной в сверхзвуковом потоке. Обтекание нескольких тел рассматривается для моделирования движения фрагментов метеорного тела в атмосфере планет и исследования эффекта «взрыва» метеорного тела. Фрагментация приводит к увеличению суммарной аэродинамической силы сопротивления, и, как следствие, к ускорению передачи кинетической энергии метеорного тела воздушной среде. Представляют интерес аэродинамические свойства системы фрагментов исходного метеорного тела и динамика их разлета. Для моделирования течения применен метод построения сетки из набора сеток. Одна из сеток, регулярная с прямоугольными ячейками, отвечает за интерференцию между телами и служит для описания внешнего невязкого течения. Другие сетки связаны с поверхностями обтекаемых тел и позволяют описать вязкие слои около

обтекаемых тел. Эти сетки накладываются на первую, без совмещения узлов. Граничные условия реализуются через интерполяцию функций на границах с одной сетки на другую.

Метод применен для расчета обтекания системы тел одного размера или системы из одного относительно большего тела и набора маленьких тел. В зависимости от отношения радиуса области (в которой расположены тела системы) к радиусу тела, имеющего массу эквивалентную суммарной массе системы, получена оценка аэродинамических свойств – аэродинамического сопротивления и боковой силы. По результатам расчетов выделено три режима обтекания. 1 – коллективное обтекание, когда система имеет общую ударную волну, а аэродинамическое сопротивление всех элементов меньше аэродинамического сопротивления изолированно обтекаемого элемента. Коллективное обтекание реализуется при увеличении размера системы до 3 раз по сравнению с исходным телом. 2 – обтекание с существенной интерференцией, при котором образуемые зоны повышенной плотности могут приводить к существенному увеличению аэродинамического сопротивления и подъемной силы отдельных элементов. Этот режим реализуется при размере системы от 3 до 7 по сравнению с исходным телом. 3 – при размере системы больше 7 реализуется режим близкий к изолированному обтеканию каждого элемента. При фрагментации на систему действует боковая сила, которая в среднем приводит к увеличению поперечного размера. Получена оценка аэродинамических сил в среднем, а также максимальных и минимальных значений.

Расчеты проводились на МВС-100К МСЦ РАН.

О ВЛИЯНИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ. МОДЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ

А.В. Жуков

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Предложено обобщение феноменологической теории А.Н. Голубятникова и Г.И. Субханкулова (1986), построенной для описания зависимости поверхностного натяжения магнитных жидкостей от напряженности магнитного поля, на случай динамики межфазных границ в намагничивающихся жидкостях с учетом необратимых процессов. Примером такой границы является граница раздела между магнитной жидкостью и паром. Областью приложения теории могут служить задачи кипения, испарения и конденсации магнитных жидкостей.

На основе вариационного уравнения Л.И. Седова, где в число определяющих параметров, наряду с кинематическими и электродинамическими, входят параметры, определяющие перенос и производство энтропии, построена уточненная модель движущейся границы раздела многокомпонентных намагничивающихся жидкостей как двумерной сплошной среды, обладающей поверхностной намагниченностью, поверхностной внутренней энергией и поверхностной энтропией. Получены определяющие уравнения, условия на границе раздела и кинетические соотношения в рамках данной модели.

В квазиравновесном приближении решена задача о структуре движущейся плоской межфазной границы между суспензией магнитных частиц и паром, что позволяет найти уравнения состояния двумерной среды и кинетические коэффициенты. При этом внутри межфазного слоя используется уравнение состояния, основанное на теории функционала плотности и обобщенной модели Ван-дер-Ваальса с учетом градиентов плотности и намагниченности. Поверхностные плотности экстенсивных физических величин определяются по Гиббсу с помощью введения разделяющей поверхности и вычисления избыточных величин для соответствующих объемных плотностей. Найдена зависимость компонент тензора поверхностных натяжений и кинетических коэффициентов от напряженности магнитного поля.

В качестве приложения рассмотрена задача о влиянии магнитного поля на процессы образования и роста пузырьков пара в магнитных жидкостях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-01-00035, 14-01-00056).

О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ В ТРАКТЕ ГПВРД

В.А. Забайкин, П.К. Третьяков

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

Анализ лётных испытаний летательных аппаратов с ГПВРД показал, что организация эффективного рабочего процесса в камере сгорания (КС) остаётся одной из основных проблем. Исследования направлены на снижение потерь давления по тракту КС. Применяемые способы инициирования горения изначально приводят к формированию газодинамической структуры с формированием псевдоскачка либо в канале изолятора, либо в канале $F=Const$, переводящей поток в дозвуковой режим

течения. Более предпочтительным является осуществление режима торможения сверхзвукового потока за счёт горения в канале $F=Const$ до числа Маха $M=1$, что может привести к заметному уменьшению потерь полного давления.

Оценки, сделанные на основе квазиодномерного подхода к описанию процесса торможения сверхзвукового потока, показали, что для показателя адиабаты равного 1,4 и начальных значений чисел Маха $M=2,0$; 2,5 и 3,0 максимальное значение коэффициента восстановления полного давления $v \approx 1,25$; 1,5 и 1,86 раза (соответственно) выше коэффициента восстановления полного давления для режима с изотермическим псевдоскачком. Нашими исследованиями показана возможность осуществления такого режима путём применения импульсно-периодического теплогазодинамического воздействия на процесс горения.

Эксперименты выполнялись на стенде «Сверхзвукового горения» в осесимметричном и плоском каналах переменного сечения при температурах потока соответствующих самовоспламенению водорода и сверхзвуковых скоростях на входе в канал ($M=2,2$ и $2,0$). Экспериментами установлено, что теплогазодинамическое воздействие приводит к переходу диффузионного режима горения в части канала $F=Const$ к «преддетонационному» со средней скоростью продуктов сгорания соответствующей числу $M \approx 1$. Этот факт был подтверждён расчётами, выполненными в ИПМех РАН. Изменением энергией импульса, его длительностью и скважностью можно управлять положением области интенсивного горения в канале.

Важной особенностью такого способа воздействия на горение является экспериментально установленный факт сохранения «преддетонационного» режима в части канала $F=Const$ с прекращением воздействия при осуществлении горения в расширяющейся части канала.

Ведутся исследования по экспериментальной проверке эффективности предложенного способа организации рабочего процесса в КС.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект №14-08-00820) и в рамках Проекта СО РАН III.22.6.2.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВИБРОРОБОТА В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

О.С. Захарова, А.Н. Нуриев

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Рассматривается прямолинейное движение двухмассовой системы в вязкой несжимаемой жидкости. Перемещение системы как целого происходит за счет продольного периодического движения одного тела

(внутренней массы) относительно другого (корпуса). Исследуемая механическая система моделирует виброробот (виброход) – мобильное устройство, способное перемещаться в сопротивляющейся среде без подвижных внешних частей (колес, ног, гусениц и т.п.). Такой принцип передвижения представляется целесообразным для мини- и микророботов. Герметичность, отсутствие подвижных внешних частей (винтов, колес, гусениц и т.д.) – свойства, позволяющие использовать вибророботы для неразрушающей инспекции миниатюрных технических объектов, таких как тонкостенные трубопроводы малого диаметра, а также в медицине.

В данной работе проводится прямое численное моделирование движения виброробота клиновидной формы в вязкой жидкости при гармонических осцилляциях внутренней массы. Задача рассматривается в плоской постановке. Гармонический закон движения, очевидно, не является оптимальным с точки зрения эффективности движения, однако несимметричная форма корпуса обеспечивает различную реакцию внешней среды на разных фазах движения корпуса (в прямом и обратном направлении) робота, обеспечивая его направленное движение в жидкости. Целью работы является исследование взаимодействия виброробота с вязкой средой, изучение законов движения корпуса робота при гармонических осцилляциях внутренней массы, изучение структуры течения вокруг виброробота и ее влияния на гидродинамическую силу, действующую на робота.

Моделирование движения проводится на базе пакета OpenFOAM. В расчетах задействованы как оригинальные, так и модифицированные модули пакета. Вычисления проводятся на высокопроизводительных кластерах КазФ МСЦ РАН и проекта unihub.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 14-01-31230_мол) и программы «Университетский кластер» (www.unicluster.ru).

ДИНАМИКА ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МНОГОФАЗНОЙ СРЕДЕ

А.В. Звягин

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В работе исследуются задачи, связанные с волновым воздействием на многофазную среду. В качестве конкретных сред рассматриваются несжимаемая жидкость с твёрдыми включениями и пористая упругая среда, насыщенная вязкой сжимаемой жидкостью.

Показано, что колебания цилиндрической нити в жидкости с частицами модулируют дрейф частиц в сторону источника колебаний. Получены оценки скорости дрейфа в зависимости от параметров жидкости, частиц, частоты и амплитуды колебаний поверхности нити.

Рассмотрена задача о волновом воздействии на пласт (волновод) пористой среды, насыщенный сжимаемой жидкостью. Показано существование резонансных частот колебаний, при которых возможна эффективная закачка энергии в ограниченную пористую среду. Найден закон затухания амплитуды колебаний в зависимости от величины вязкости. Показано, что резонансная частота зависит не только от среды и геометрии пласта, но и от принятых условий его границ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-08-00319).

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННЫХ АКТУАТОРОВ НА ПОТОК

И.А. Знаменская¹, И.Э. Иванов¹, А.Е. Луцкий², И.В. Мурсенкова¹

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²ИППМ им. М.В. Келдыша, Москва

На протяжении последнего десятилетия в приложении к задачам плазменной аэродинамики исследуются различные типы плазменных актуаторов, в том числе – поверхностных электрических разрядов. В данной работе рассмотрены газодинамические аспекты воздействия сильноточных поверхностных разрядов на поток. При фронте напряжения наносекундной длительности инициирование таких разрядов приводит к возникновению газодинамических возмущений – от звуковых до ударных (взрывных) волн. Их изучение, наряду с изучением теплового воздействия и ионного ветра от разрядов, необходимо для определения влияния разряда на пограничный слой течения и на газодинамический поток в целом. Физический механизм образования ударных волн связан с явлением «сверхбыстрого» нагрева газа, т.е. перехода электрической энергии разряда в тепловую энергию за время до 1 мкс; процесс определяется кинетикой неравновесного возбужденного газа. Результатом такого быстрого энерговклада является распад разрыва на границе плазменной области. Эксперименты по исследованию ударно-волновых конфигураций, возникающих при инициировании скользящего поверхностного разряда (плазменного листа), проводились на ударной трубе с разрядной секцией при числах Маха ударных волн 2.5-5, плотности 0.05-0.30 кг/м³). Разряды площадью 3×10 см² инициировались на двух стенках разрядной камеры, через две другие стенки осуществлялась диагностика

разряда и потока. Напряжение, подаваемое на электроды, составляло 25 кВ, время нарастания тока – до 10 нс.

Исследовались экспериментально и численно возникающие в потоке ударно-волновые конфигурации и их воздействие на высокоскоростные потоки газа в канале. Численное моделирование выполнялось на основе системы уравнений Эйлера и Навье-Стокса. Величина энерговклада при прохождении электрического разряда моделировалась путем задания дополнительного давления в области разряда.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-08-00777).

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХЗВУКОВЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ

С.Л. Золотарев, Н.Б. Плевако

ЦНИИМаш, Королев, Моск. обл.

Рассматривается проблема измерений параметров высокотемпературных (до 10000К) сверхзвуковых потоков электродуговых установок (ЭДУ). Основными параметрами потока, определяющими тепловое воздействие на испытуемый объект, являются полная энтальпия и давление торможения за прямым скачком уплотнения P_0' . Соответственно, точность экспериментального определения параметров абляции ТЗМ в ЭДУ существенно зависит от точности определения этих параметров потока. Измерение давления P_0' не представляет больших трудностей, в то время как определение полной энтальпии потоков электродуговых установок представляет большую проблему ввиду отсутствия эталонных средств измерения.

При испытаниях в ЭДУ теплообмен с поверхностью испытуемого объекта определяется главным образом центральной трубкой тока, где значения энтальпии, в зависимости от режима работы и типа подогревателя, могут существенно отличаться от среднемассовых, определяемых расчетным путем по известным значениям давления перед звуковым сечением и массового расхода. Использование различного рода калориметрических устройств является в настоящее время практически единственным средством измерения энтальпии в ядре потоков. Рассматриваются проблемы влияния как термодинамического состояния потока, так и степени каталитичности поверхности калориметра на точность таких измерений.

Наибольшее применение в практике ЭДУ ЦНИИМаш имеет метод измерения энтальпии с помощью теплового зонда, представляющего собой комбинацию стационарного проточного калориметра и заборника давления.

Приводятся методы и результаты экспериментальных оценок точности и области применения метода.

Традиционно проводимые в ЭДУ испытания с целью определения абляционных характеристик теплозащитных материалов являются сравнительными и требуют преемственности средств и методов измерений как параметров потоков, так и характеристик разрушения ТЗМ, однако постоянное расширение круга проводимых в ЭДУ экспериментальных исследований, в том числе носящих методологический характер, требует более тщательной и полной диагностики потоков, включающей оценку термодинамического состояния плазмы.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В УДАРНОМ СЛОЕ ОКОЛО V- ОБРАЗНЫХ КРЫЛЬЕВ

М.А. Зубин, Ф.А. Максимов, Н.А. Остапенко

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Представлены результаты численного и экспериментального исследования структуры течения около V-образных крыльев различной геометрии с головной ударной волной, присоединенной к передним кромкам, в широком диапазоне изменения числа Маха.

Установлено, что в плоскости симметрии течения около V-образных крыльев с увеличением угла атаки в дополнение к одной особенности Ферри узлового типа, расположенной в точке излома поперечного контура крыла, возникают еще две критические точки: растекания и стекания (вторая особенность Ферри), расположенная ближе к мостообразному скачку уплотнения маховской системы ударных волн. Она может быть как узлового, так и седлового типа. Во втором случае в вершинах контактных разрывов, выходящих из критической точки, по обе стороны плоскости симметрии располагаются вихревые структуры невязкого происхождения (вихревые особенности Ферри).

Обнаружены режимы обтекания: со сверхзвуковыми областями конического течения (на сфере) в окрестности оси симметрии; с вихревыми структурами как по обе стороны от плоскости симметрии течения, так и в окрестности поверхности консолей крыла; с одним или двумя скачками уплотнения, нормально падающими на каждую из консолей. Установлено, что вихревые особенности Ферри существуют у поверхности консолей при маховском отражении внутренних ударных волн от поверхности крыла и исчезают при их регулярном отражении от стенки.

В рамках гипотезы об определяющем влиянии интенсивности контактных разрывов, порождаемых точками ветвления головной ударной

волны, на возникновение в ударном слое вихревых структур невязкого происхождения найдены интервалы порогового изменения интенсивности контактных разрывов и числа Маха составляющей скорости, нормальной лучу конической системы координат, проходящему через точку ветвления.

Обнаружены переходные режимы течения, когда высокие значения критериальных параметров приводят к «взрывному» характеру роста маховской конфигурации ударных волн. Установлено, что при больших числах Маха с увеличением угла атаки масштабный рост возмущенной области с вихревыми особенностями Ферри приводит к существенно неравномерному распределению давления в ударном слое и его значениям, в несколько раз превышающим уровень давления на эквивалентном клине.

Экспериментально показано, что установленные в рамках модели идеального газа критерии возникновения в ударном слое вихревых структур пригодны и для диагностики реальных конических течений, в том числе содержащих отрыв турбулентного пограничного слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-01-00343).

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ ГОМОГЕННОГО ГОРЕНИЯ МЕТАНА В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУЕ

В.Н.Зудов¹, П.К.Третьяков¹, А.В.Тупикин^{1,2}

¹Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

В настоящее время активно развивается направление, связанное с использованием плазмы для организации процессов горения (Plasma assisted combustion). Изучаемые эффекты связаны с изменением газодинамики (эффект локального тепловыделения) и протеканием кинетических процессов под воздействием неравновесной газоразрядной плазмы.

В работе изучалось воздействие импульсно-периодического лазерного излучения на сверхзвуковой поток, в котором могут присутствовать газообразные углеводороды (метан, пропан-бутан). В отдельных опытах была исследована динамика развития оптического пробоя среды. В эксперименте реализован импульсный режим взаимодействия оптического разряда со сверхзвуковым потоком ($M \approx 2$, частота следования импульсов $f=18 \text{ -- } 60$ кГц, средняя мощность лазерного излучения $W_{\text{cp}} \sim 2$ кВт). Регистрировалось собственное свечение плазмы разряда с короткой экспозицией ($\tau \sim 10^{-6}$ с). Были получены последовательные фазы развития плазмы разряда. Наблюдалось развитие вихревой структуры, которая задаёт

поперечный размер следа за областью разряда, т.е. экспериментально было подтверждено существование структур, полученных ранее теоретически. Топливо-воздушная смесь истекла из сопла и подвергалась воздействию сфокусированного лазерного излучения CO₂-лазера. Визуализация структуры сверхзвукового потока проводилась с помощью теневой схемы с адаптивным фильтром и регистрацией на камеру, одновременно велась прямая регистрация собственного свечения от области горения и разряда.

Исследования показали, что:

– в сверхзвуковом потоке за оптическим разрядом формируется область, в которой возможна стабилизация пламени;

– экспериментально в сверхзвуковом потоке за областью разряда зарегистрировано излучение на длинах волн радикалов OH, CH, свидетельствующее о горении гомогенной смеси метана с воздухом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-01-00830).

КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ: АНАЛИЗ ДАННЫХ С КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА IBEX-LO

В.В. Измоденов^{1,2}, О.А. Катушкина¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва

²Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва

Локальная межзвездная среда (ЛМС), окружающая Солнечную систему, представляет собой частично-ионизованную водородную плазму. Межзвездные атомы водорода проникают из ЛМС внутрь гелиосферы (т.е. области вокруг Солнца, занятой солнечным ветром) за счет больших длин свободного пробега, сравнимых с характерным размером области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой (эту область в литературе называют гелиосферным ударным слоем). На границе гелиосферы атомы водорода эффективно перезаряжаются на межзвездных протонах, что приводит к образованию “вторичных” атомов водорода. В результате, внутри гелиосферы функция распределения межзвездных атомов по скоростям существенно отличается от максвелловской. В данной работе на основании результатов численной кинетической модели распределения атомов водорода в гелиосфере проведено исследование влияния кинетических эффектов на потоки атомов водорода. С 2009 г. потоки межзвездных атомов впервые стали измеряться напрямую на космическом аппарате *Interstellar Boundary Explorer (IBEX)*. В работе представлен анализ экспериментальных данных на основании результатов численной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-02-00746). Расчеты проводились с использованием суперкомпьютерного центра МГУ.

МОДЕЛИ, МЕТОДЫ, МНОГОБЛОЧНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПАКЕТЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

С.А.Исаев

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
Санкт-Петербург

Сценарий доклада – объединение научных и практических направлений в МЕГА-проекте по моделированию физико-технических процессов в аэротермодинамике большегрузных автомобилей. Используется иерархия моделей турбулентности: одно, двух и многопараметрических, как широко употребительных с поправками на кривизну линий тока, так и развиваемых и тестируемых в МЕГА- проекте К.Ханьялика. Обобщенная факторизованная процедура решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для сжимаемого вязкого газа дополняется алгебраическим многосеточным ускорителем сходимости в блоке коррекции давления. Многоблочные вычислительные технологии, основанные на пересекающихся структурированных сетках, модернизируются под композитные сетки с блоками структурированных сеток и неструктурированными вставками в местах их соединения. Перечень тестовых задач включает циркуляционное течение в квадратной и кубической кавернах с подвижной крышкой, течение в плоскопараллельном и расширяющемся каналах с квадратной и цилиндрической кавернами на стенке, круговой цилиндр, конус, профили в до- и сверхзвуковом потоке, отрывное течение в поворотном канале, периодическое обтекание и теплообмен около кубика на плоскости и в канале, аэродинамика тела Ахмеда, отрывное обтекание круговой каверны на стенке канала, отрывное течение и теплообмен около уединенных лунок на плоской стенке и в узком плоскопараллельном канале, обтекание пакета упорядоченных лунок на стенке канала. Особое внимание уделено влиянию типа и густоты расчетных сеток на точность получаемых решений. Акцент в исследованиях делается на управлении обтеканием тел на основе преднамеренного формирования или самоорганизации крупномасштабных струйно-вихревых структур с целью снижения аэродинамического сопротивления, вихревой интенсификации теплообмена при умеренных гидравлических потерях, повышения подъемной силы и аэродинамического качества несущих поверхностей. Особо следует выделить исследования по мезомасштабной аэродинамике

окружающей среды, имеющей отношение к ветровому воздействию на объекты с учетом рельефа местности, в том числе в прибрежной среде «море–суша».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-01-00043, 14-08-90001) и при государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый — С. Исаев, КНИТУ-КАИ, г. Казань) по гранту Правительства России № 14.Z50.31.0003.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ CFD КОДОВ

О.Н. Капшинский, А.С. Курдюмов, П.Д. Лобанов, Н.А. Прибатурин

Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Для энергетических установок характерно движение охлаждающей жидкости в каналах со сложной геометрией. Для таких условий характерна трехмерная структура течения. Одним из примеров таких течений может служить взаимодействие потока с дистанционирующими решетками в тепловыделяющих сборках АЭС.

Детальные исследования 3D течений в настоящее время ограничены. Это приводит к дополнительным проблемам в разработке расчетных кодов, предназначенных для анализа теплогидравлических процессов и делает невозможной детальную валидацию.

В работе проведено экспериментальное исследование течения жидкости в кольцевом канале. Канал состоял из двух соосных труб с диаметрами 20 и 42 мм. Гидравлический диаметр канала 22 мм. В канал была установлена преграда, перекрывающая сектор, площадь которого составляла четверть поперечного сечения канала. Высота преграды – 2 мм. Наличие преграды позволяло создавать трехмерное возмущение потока.

При проведении экспериментов применялись хорошо апробированные методы исследования потоков. Для исследования теплообмена внутренняя труба подогревалась при помощи электрического тока. Температура стенки измерялась при помощи резистивного датчика температуры. Для измерений напряжения трения на стенках канала применялся электродиффузионный метод. Для исследования распределения скоростей жидкости в канале применялись методы цифровой трассерной визуализации (PIV) и лазерной доплеровской анемометрии. Эксперименты проводились в одно- и двухфазном потоках. Для реализации двухфазного потока производился ввод газовых пузырей в поток жидкости.

Полученные результаты представляют собой распределения локальных гидродинамических параметров и коэффициентов теплообмена в зоне трехмерных возмущений, вызванных обтеканием перегородки потоком.

Данные экспериментов могут быть использованы для верификации существующих и разрабатываемых трехмерных расчетных кодов.

ДЕФОРМАЦИЯ КАПЕЛЬ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Д.И. Квасов^{1,2}, В.А. Налетова^{1,2}

¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В данной работе решается задача о деформации двухслойной сферической капли, окруженной другой жидкостью в переменном электрическом поле. Диэлектрические проницаемости и проводимости всех жидкостей считаются постоянными. Жидкости считаются несжимаемыми и вязкими. Задача решается методом разложения по малому параметру, пропорциональному квадрату амплитуды электрического поля. При решении задачи учитываются капиллярные силы. Сила тяжести не учитывается. Находятся средние формы поверхности внутренней и средней жидкостей. Показывается, что эти поверхности могут вытягиваться или сплющиваться в зависимости от физических свойств жидкостей. Обнаружено, что достаточно тонкий внешний слой жидкости может качественно изменить форму капли: например, если в отсутствии этого слоя капля вытягивается, то в присутствии этого слоя внешняя граница капли сплющивается.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-01-90003, 13-01-00035).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИХРЕОБРАЗУЮЩЕГО РЕЛЬЕФА НА ТЕПЛООБМЕН И ТРЕНИЕ

Н.А. Киселёв

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В настоящее время значительное внимание уделяется механизмам интенсификации теплообмена, обеспечивающим прирост интенсивности переноса теплоты при минимальном (желательно отстающем) росте

гидравлических потерь. Использование в качестве интенсификаторов теплообмена вихреобразующего рельефа (лунок) представляется наиболее перспективным, так как при сопоставимом росте теплообмена они обеспечивают меньшие потери давления в сравнении с другими методами интенсификации.

Экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик проводились на малой дозвуковой аэродинамической трубе НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова. На секционной нижней стенке щелевого канала (высота – 30 мм, ширина – 300 мм, длина – 1080 мм) установлен рабочий участок, включающий в себя два плавающих элемента, смонтированных на нагревателях. На плавающие элементы устанавливаются 2 поверхности, одна из которых – «эталонная» – гладкая, другая – пластина с исследуемым рельефом.

Коэффициент сопротивления определялся по усилию на упругом элементе с учетом перепада давления в зазорах плавающего элемента; коэффициент теплоотдачи в каждой точке термограмм, записанных с частотой 1 Гц – по темпу охлаждения поверхности исследуемой пластины.

При обработке поля температур на исследуемой «облуненной» поверхности (глубина лунки – 1 мм, диаметр пятна лунки – 7,5 мм, расположение – коридорное, шаг в поперечном направлении – 12 мм, в продольном – 20 мм) были получены двумерные поля коэффициентов теплоотдачи на исследуемой поверхности. Коэффициент теплоотдачи достигает минимума в области обратных токов в передней части лунки; далее значение коэффициента теплоотдачи увеличивается вдоль продольной оси лунки и достигает максимума около задней кромки лунки, где происходят отрыв и присоединение.

Результаты экспериментов показывают, что значения коэффициентов трения и теплообмена, а также значения интенсификации трения и теплоотдачи (в сравнении с гладкой поверхностью при том же числе Рейнольдса) уменьшаются при увеличении числа Рейнольдса.

Значение отношения коэффициентов трения c_f/c_{f0} падает от 2.3 при $Re = 0.5 \cdot 10^6$ до 1.42 при $Re = 10^7$, при этом интенсификация теплообмена St/St_0 падает от 1.4 до 1.05 при тех же числах Рейнольдса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-08-31624).

ГЛУБИННО-ПУЗЫРЬКОВАЯ ДЕГАЗАЦИЯ И «НОВОЛУННОЕ ПРОКЛЯТИЕ» АТОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

С.В. Киселева, Е.В. Тимохин, Е.В. Шивринская

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Анализ географических данных по местам зарождения и траекториям сериальных тайфунов (возникающих в одном месте океана с разницей в 2-4 дня) и их корреляций с подводными литосферными разломами (границами литосферных плит) позволяют подтвердить предварительный вывод В.Л. Сывороткина о связи феномена сериальных тайфунов с озоновыми аномалиями и глубинной дегазацией перегретых флюидов земных недр через подводные литосферные разломы.

Усиление глубинной дегазации должно коррелировать с особыми фазами Луны: датами ново- и полнолуний, когда гравитационные деформации Земли являются максимальными. Интересно, что и крупные аварии с необъяснимыми пожарами и взрывами на борту и даже гибелью АПЛ – атомных подводных лодок СССР (в том числе титанового «Комсомольца») и США (Трешер, Скорпион) произошли вблизи новолуний. Это «новолунное проклятие» АПЛ, специально сконструированных на полную автономность и живучесть даже при атаках глубинными бомбами, до сих пор не находит разумных объяснений.

В работе представлена модель глубинной дегазации в пузырьковой форме, а не в виде обычных флюидно-гидротермальных излияний как у черных и белых курильщиков. Возможность импульсной пузырьковой дегазации (с высвобождением больших объемов глубинных газов) объясняет не только «новолунное проклятие» для АПЛ, но и многие натурные факты, кажущиеся аномальными: псевдокипение, вспучивание и фонтанирование воды перед землетрясениями (как в 1927 г. в Черном море перед Крымским и в 2004 г. в Балтийском море перед Калининградским землетрясениями); возникновение гигантского водоворота у порта Оараи в префектуре Ибараки после мега-землетрясения Тохоку 11.03.2011 в Японии или восходящего смерч-вихря с быстрой (в течение нескольких минут) конденсацией в грозовое облако с последующим образованием из него нижней части классической воронки торнадо (как 20.09.1997 г. у о. Русский вблизи Владивостока над литосферным разломом в Амурском заливе) и т.д.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-08-00795).

АКАДЕМИК ГОРИМИР ГОРИМИРОВИЧ ЧЕРНЫЙ
– УЧЕНЫЙ, УЧИТЕЛЬ, ПАТРИОТ РОДИНЫ
(К 90 ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ 1923 –2012)

Н.Ю. Кишкина

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Родился Горимир Горимирович Черный 22 января 1923 г. в г. Каменец-Подольске, окончил школу в г. Херсоне и поступил на механико-математический факультет МГУ в г. Москве.

Отец – Г.Г. Черный – член коммунистической партии с 1918 г., в августе 1941 г. был расстрелян немцами, как член подпольной организации.

Г.Г. Черный – ученый с мировым именем, академик Российской академии наук, профессор Московского университета, участник Великой Отечественной войны. Он ушел в армию в 1941 г. в первые дни войны добровольцем со студенческой скамьи. С июня 1941 г. по ноябрь 1945 г. находился на фронте – рядовым наводчиком орудия, затем командиром орудия на I и III Белорусских и I Украинском фронтах, а также на Западном фронте. Несколько раз был тяжело ранен. Человек с трудной военной судьбой он начал свой боевой путь в сражениях за Москву, а завершил его в операциях по взятию Берлина и освобождению Праги. Был в немецком плену и на оккупированной немцами территории. За военные заслуги награжден орденами и медалями. Возвратился Г.Г. Черный в МГУ в 1945 г. и в июне 1949 г. закончил с отличием механико-математический факультет МГУ.

Остановимся на основных этапах научной деятельности Г.Г. Черного. С мая 1949 г. – инженер филиала ЦИАМ, с 1952 г. по 1960 г. создатель, начальник и научный руководитель лаборатории газовой динамики авиационных силовых установок ЦИАМ. В 1953 г. защищает диссертацию кандидата технических наук. 1956 г. – защита докторской диссертации, профессор кафедры гидромеханики МГУ, читает курс по гидродинамике и газовой динамике. В 1959 г. заместитель директора по научной работе НИИ механики МГУ, а с 1960 по 1992 г. г. директор НИИ механики МГУ. Участвует в формировании научного коллектива и главных направлений исследований. В определении жизненного и научного пути Черному большую помощь оказали его учителя – академики Л.И. Седов и М.В. Келдыш.

Г.Г. Черный – лидер в гиперзвуковой аэродинамике, в проблемах создания двигателей со сверхзвуковым горением (вместе с академиком В.А. Левиным). Он создатель и руководитель школы по МЖГ, его оценки являются руководством к важнейшим проблемам в масштабах нашей страны и в мировой науке. Широкое признание получили его монографии «Течение газа с большой сверхзвуковой скоростью» (1959 г.) и учебник «Газовая

динамика» (1988 г.). Вклад Г.Г. Черного в мировую науку отмечен многими наградами и премиями.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕХАНИКЕ НА ОСНОВЕ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

В.Л. Ковалев

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Перспективы развития наукоемких отраслей промышленности требуют проведения новых исследований физико-химических процессов в экстремальных условиях и при конструировании новых материалов.

В работе приводятся результаты исследований, проведенных на основе методов молекулярной динамики и квантовой механики, связанные с исследованием каталитических свойств теплозащитных покрытий многоразовых космических аппаратов и адсорбционных свойств углеродных наноструктур. Без привлечения экспериментальных данных определены коэффициенты скоростей элементарных стадий (адсорбции–десорбции, ударной и ассоциативной рекомбинации) на поверхностях SiO_2 и Al_2O_3 в диссоциированном воздухе. Рассчитаны относительное массовое содержание и средняя плотность водорода в массиве углеродных нанотрубок в зависимости от температуры, давления и геометрии массива. Найдены оптимальные для адсорбции расстояния между трубками.

Такие методы позволили также разработать многоуровневые модели и соответствующие программные средства их реализации для исследования неравновесных физико-химических процессов в перспективных авиационных двигателях и энергетических установках.

Исследовались особенности устойчивости пористых цеолитных материалов в процессе разделения смесей, содержащих углекислый газ. Установлена зависимость прочностных свойств цеолитов как от концентрации образующихся карбонат – ионов, так и от типа входящего в него катиона. Проведены исследования влияния примеси меди на скорость зарождения дислокации в алюминии. Теоретическое описание позволило существенно уменьшить объем экспериментальной работы при исследовании таких задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-01-00310, 13-01-12091- офи-м).

ОБ УСКОРЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

С.Д. Ковалевская

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Исследуется класс решений уравнений магнитной гидродинамики с плоскими волнами, описывающий твердотельное движение идеально проводящего газа за ударной волной в однородном гравитационном поле, в рамках ньютоновской механики. Движение вызвано поршнем, порождающим ударную волну, распространяющуюся по начальному равновесному фону с падающей плотностью. Такого рода явления могут происходить в нагретых или ионизованных областях атмосфер звезд и планет. Эффект ускорения ударной волны за счет уменьшения начальной плотности в рамках газовой динамики был впервые обнаружен Л.И. Седовым при решении задачи о сильном взрыве в среде с переменной плотностью в отсутствие противодействия. Если пренебречь силой тяжести и магнитным полем, то при постоянном начальном давлении падение плотности среды приведет к росту скорости звука и, следовательно, скорости ударной волны, что влечет появление эффектов обострения вследствие потери инерционности среды, когда ударная волна уходит на бесконечность за конечное время. Напротив, гравитационное поле, направленное против движения волны, препятствует ускорению, а присутствие поперечного магнитного поля также способствует ускорению ударной волны. Ниже исследуется общий смешанный случай.

Представлено точное решение задачи, содержащее одну произвольную функцию лагранжевой переменной, выбор которой существенно влияет на картину движения. Решение строится методом обратной задачи. Показано, что, несмотря на тормозящее влияние гравитационного поля, существуют условия, связанные с падением начальной плотности газа, когда даже очень малое ускорение поршня обеспечивает движение ударной волны с конечным ускорением, равным произведению показателя адиабаты на ускорение силы тяжести, даже без магнитного поля. В свою очередь, магнитное поле, ограниченное на бесконечности, только усиливает этот эффект, приводя к неограниченному росту ускорения разрыва, линейному по времени.

Рассматриваются следующие задачи: отсутствие магнитного поля; однородное начальное магнитное поле, «дрожание» ударной волны в переменном магнитном поле; прохождение ударной волны через токовый слой, «наполненный» магнитным полем, и другие варианты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00056).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В НЕПРИЗМАТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

О.А. Ковыркина¹, В.В. Остапенко²

^{1,2} Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Проведено теоретическое, численное и лабораторное моделирование волновых течений жидкости, возникающих при решении задачи о разрушении плотины на скачке площади сечения прямоугольного канала. Теоретические решения получены на основе первого приближения пространственно одномерной теории мелкой воды. Однозначная разрешимость задачи доказана при условии, что на неподвижном гидравлическом прыжке, формирующемся на скачке площади сечения, заданы потери полной энергии набегающего потока. Величина этих потерь учитывается путём введения в точные автомодельные решения эвристического параметра, значение которого выбирается путем сравнения одномерных теоретических решений с осредненными по ширине канала результатами численного моделирования этой задачи на основе плановых уравнений теории мелкой воды.

Для случая, когда ширина канала в верхнем бьефе больше, чем в нижнем, проведена серия лабораторных экспериментов. Теоретические и численные решения получили достаточно хорошее согласование с результатами лабораторных экспериментов по возможным типам волн, скорости их распространения и асимптотическим глубинам за их фронтами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых российских учёных (проект МК-3477.2013.1).

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДЯЩИХ МАГИСТРАЛЕЙ НА ОБЛАСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ И ТИП АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В ПРИСУТСТВИИ ИСКУССТВЕННОЙ ГАЗОВОЙ ПОЛОСТИ

И. И. Козлов, С.А. Очеретяный, В.В. Прокофьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Исследования на струйной установке кавитационных автоколебаний, возникающих при создании с помощью струйной завесы вентилируемой газовой полости с повышенным (по сравнению с внешним) давлением, показали, что могут иметь место два основных типа автоколебаний. В

отличие от стационарного течения при автоколебательном режиме в магистралях подводящих воздух и воду имеются существенные пульсации гидродинамических параметров, поэтому и сами кавитационные автоколебания существенно зависят от характеристик магистралей подвода газа и жидкости. Эксперимент был организован таким образом, что колебания в подводящих магистралях происходили в контролируемой области, ограниченной сопротивлением, работающим в запертом газодинамическом режиме в магистрали подвода газа и баком-демпфером с постоянным давлением в водяной магистрали. Показано, что низкочастотные колебания существенно зависят от объема, присоединенного к газовой полости. Более того, существует предельная величина объема, выше которой низкочастотные режимы автоколебаний не наблюдаются. Показано, что наличие области высокочастотных колебаний связано с упругостью материала подводящих воду труб. Например, они наблюдались для дюритовых труб, а для стальных существовали только низкочастотные автоколебания (скорость распространения волн давления в дюритовых трубах на порядок ниже по сравнению со стальными). Причем, имеется некоторая пороговая длина – для дюритовых вставок меньших этой длины высокочастотные автоколебания не наблюдались.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ НА ПЛАМЯ

В.С. Козулин, П.К. Третьяков, А.В. Тупикин

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

При выполнении работ по проектам РФФИ 08-01-00582а, 11-01-00158а было показано, что воздействие электрического поля (ЭП) локализовано в зоне протекания химических реакций. Механизм связан с влиянием гидродинамических деформаций, возникающих от воздействия ЭП на внутреннюю структуру гомогенного пламени. Гидродинамическое равновесие возможно только тогда, когда электрические силы согласованы с распределением давления на фронте пламени. При размещении пламени между плоскими электродами процесс установления стационарного конвективного течения может оказать существенное влияние на динамику смещения фронта горения. Если электродами ограничиваются конвективные потоки, возникают процессы, приводящие к отклонению фронта пламени большему, чем при воздействии постоянным ЭП. Можно подобрать такие временные характеристики импульсно-периодического ЭП, что эффект будет больше, чем от постоянного ЭП.

Заметную роль играет пространственная конфигурация ЭП. Изменяя во времени направление вектора напряженности ЭП можно существенно влиять на процессы смешения в случае диффузионного горения. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют об уменьшении длины факела и смещении положения максимума интенсивности собственного свечения пламени на длинах волн промежуточных продуктов реакций (радикалов CH и C_2).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00225-а).

ГИДРОМЕХАНИКА ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ: СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

А.С. Кондратьев, П.П. Швыдько

Университет машиностроения, Москва

При движении двухфазного потока учитывалось воздействие на твердые частицы сил давления, веса, Архимеда, Магнуса, Сафмана, турбофореза и гидродинамического сопротивления, а также ударное взаимодействие твердых частиц между собой и стесненность потока жидкости в межчастичном пространстве. Распределение объемной концентрации твердых частиц определялось процессом их диффузии и скоростью перемещения частиц в поперечном направлении потока, под действием вышеуказанных сил. Коэффициенты диффузии твердых частиц в жидкости определялись как произведение известного коэффициента диффузии жидкости на отношение усредненного квадрата пульсационной скорости твердой частицы к усредненному квадрату пульсационной скорости жидкости. Пульсационные колебания жидкости представлялись в виде синусоидальных колебаний. При расчете течения в горизонтальных трубах принималось, что течение обладает симметрией в вертикальной диаметральной плоскости, а величина объемной концентрации твердой фазы постоянна в горизонтальном сечении. Течение потока в круглой горизонтальной трубе представляется в виде суперпозиции слоев плоских течений проведенных в вертикальной плоскости, при расчете распределения частиц твердой фазы по вертикальному диаметральному сечению трубы, или в виде суперпозиции слоев плоских течений проведенных в горизонтальной плоскости, при расчете объемного расхода жидкой и твердой фаз. В рамках модели Прандтля предложено выражение для касательного трения во взвешенном потоке в виде суммы сил трения, возникающих в жидкости при ее движении, и сил трения, которые возникают в жидкости при перемещении в ней твердых частиц. Полученные расчетные соотношения позволяют определить распределение концентрации полимодальной смеси

твердых частиц и поле скоростей жидкости и твердых частиц по поперечному сечению горизонтального трубопровода без использования, каких либо согласующих коэффициентов.

Результаты теоретических расчетов сравнивались с опытными параметрами движения шести модальной смеси твердых частиц размером от 38 до 575 мкм, плотностью 2820 кг/м^3 при объемной доле твердых части 0,04 и 0,26 и средней скорости движения 2 и 3,5 м/с в трубопроводе диаметром 0,105 м. Между опытными и расчетными данными имеется соответствие на уровне 20 % при объемной доле твердых части 0,04 и скорости 2 м/с и на уровне 14% при объемной доле твердых части 0,26 и скорости 3,5 м/с.

О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОКОЯЩЕЙСЯ ФЕРРОЖИДКОСТИ В НАКЛОННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В.М. Коровин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Изучена вызываемая магнитными силами неустойчивость свободной поверхности слоя нелинейно намагничивающейся невязкой феррожидкости, покрывающего немагнитную пластину, находящуюся в наклонном по отношению к свободной поверхности кусочно-однородном магнитном поле. Толщина слоя велика по сравнению с амплитудой волн, развивающихся при возникновении неустойчивости, но мала по сравнению с линейным масштабом, характеризующим площадь свободной поверхности. Давление в газе над жидкостью постоянно. В рамках уравнений и граничных условий феррогидродинамики получено дисперсионное уравнение, связывающее частоту и две компоненты волнового вектора, образующего произвольный угол с осью абсцисс, направленной вдоль горизонтальной компоненты поля.

С целью упрощения исследования введена вспомогательная функция компонент волнового вектора. Параметрами этой функции являются горизонтальная и вертикальная компоненты вектора намагниченности плоского слоя, ускорение свободного падения и физические свойства жидкости. При любых физически допустимых значениях параметров введенная функция имеет в плоскости своих аргументов четыре стационарные точки, лежащие на осях координат. Расстояния от начала координат до каждой из этих точек равны обратной величине капиллярной длины и представляют критическое значение волнового числа.

Показано, что в двух стационарных точках, лежащих на оси ординат, введенная функция имеет минимум. С использованием закона намагничивания, критического значения волнового числа и минимального

значения введенной функции получено уравнение, позволяющее вычислить критическое значение вертикальной компоненты поля в плоском слое в виде функции от напряженности приложенного горизонтального поля. В частном случае, когда горизонтальное поле отсутствует, это уравнение совпадает с результатом, полученным Розенцвейгом при использовании принципа обмена устойчивостей.

В рамках двухпараметрического ланжевеновского закона намагничивания ионных суспензий магнитных частиц исследовано влияние горизонтальной компоненты приложенного магнитного поля на критическое значение вертикальной компоненты вектора намагниченности, а также на критические значения вертикальных компонент поля в плоском слое и в газе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00056).

ПРОБЛЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МЕЗОЗОЙСКАЯ ГЕОДИНАМИКА АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

В.Д. Котелкин

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва

Появление сейсмотомографических данных о внутреннем строении многих регионов Земли привело к публикациям численных результатов, опирающихся на эти данные и претендующих на реальное моделирование. Авторы берут расчетную область в форме параллелепипеда (rectangular box) и постулируют на границах отсутствие тепло-массовых потоков и силовых воздействий. Так как геодинамика относится к эллиптическим задачам, где локальное поведение решения зависит от всей области, то правильно описать движение в куске мантии, вырезанном из полного объема, очень проблематично. Использование данных сейсмотомографии позволяет найти только неоднородную часть решения, а “обнуление” граничных условий означает отбрасывание его однородной части. Кроме того, новый подход нивелирует смысл геодинамического моделирования и неприменим к описанию эволюции в прошлом. Предлагается иной более традиционный подход к реальному моделированию, как к некорректной задаче, нуждающейся лишь в некоторых дополнительных условиях регуляризации.

Согласно исследованиям российских геологов современные структуры Центральной Арктики: хребет Ломоносова, поднятия Альфа, Менделеева и Нортвинд – представляют фрагменты древнего континента Арктида и являются естественным продолжением материковых окраин Евразии и Северной Америки. Считается, что в юрско-меловое время произошел отрыв

от Канадского архипелага микроплиты «Чукотка-Аляска», который привел к образованию Канадской котловины Северного Ледовитого океана.

Проведено численное моделирование мезозойской геодинамики Арктического региона. Согласно предположению Л.И. Лобковского учтено действие с юго-востока зон субдукции Тихого океана и Южно-Аннуйского палеоокеана, а с северо-запада – Арктического плюма, для чего в качестве условий регуляризации конвекции было задано их положение на внешней поверхности. Расчет движений в верхней мантии и литосфере выполнен по модели термической конвекции в среде с вязкостью, экспоненциально зависящей от температуры. Кроме того, чтобы учесть твердость литосферного покрытия, резко падающую в результате частичного плавления, эффективная вязкость мантийного вещества в расчете изменялась на два порядка при переходе через значение температуры солидуса ($\approx 1100^\circ\text{C}$).

Численное моделирование показало, что получаемые поверхностные перемещения действительно ведут к разрыву литосферы и раскрытию бассейна, что подтверждает достоверность российской модели мезозойской эволюции Арктического региона.

НЕУСТОЙЧИВЫЕ И АВТОВОЛНОВЫЕ ДВИЖЕНИЯ В ОБЛАСТЯХ АКТИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

К.В. Краснобаев^{1,2}, Р.Р. Тагирова², Г.Ю. Котова¹

¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

²Институт космических исследований РАН, Москва

Представлены результаты аналитического и численного исследования неустойчивых газодинамических движений, происходящих в наблюдаемых областях активного звездообразования. Основное внимание уделяется особенностям морфологии возникающих в результате развития неустойчивости уплотнений (конденсаций), накоплению массы в этих уплотнениях, влиянию радиационных процессов и сил самогравитации на фрагментацию сгустков вещества. Рассматриваются крупномасштабные движения ускоренно движущихся плотных оболочек, приводящие к образованию конденсаций, содержащих порядка 1000 и более молодых звездных объектов. Определены форма и интегральная плотность возмущений, выявлены условия роста и насыщения бегущих волн в газопылевой излучающей среде, установлен вклад автоволн в зависимость длины Джинса от параметров газа. Проведен анализ морфологических особенностей конденсаций при различных значениях сил самогравитации и

ускорения оболочки. Исследованы эффекты нарастания возмущений в первоначально неоднородной оболочке. Оценено изменение интенсивности диссоциирующего молекулярный водород излучения, обусловленное неоднородной структурой оболочки. Построена новая модель расширения области NIRCW 82, позволяющая устранить противоречие между возрастом туманности и временем формирования молодых звездных объектов на ее периферии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00747).

ВОПРОСЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ СТРОИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ

А.С. Кубенин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

На примере численного моделирования турбулентного обтекания объекта сложной конфигурации исследовано влияние параметров конечно-объемной сетки на точность получаемого решения. Объектом исследования был макет башни известной московской высотки МИД в масштабе 1:75. В качестве эталонных брались данные физического эксперимента в аэродинамической трубе А-6 НИИ механики МГУ. Численное моделирование выполнено в виртуальной среде компьютерного пакета STAR-CCM+ с использованием технологии URANS на базе *k-eps* модели турбулентности с автоматическим переключением от полного «разрешения стенки» (при $y^+ \leq 5$) к использованию пристеночных функций (при $y^+ > 5$).

Отмечается важность тщательного подхода к выбору сеточных параметров при моделировании обтекания строительного сооружения методом конечного объема. Анализ полученных результатов показал, что на сетках с y^+ менее 300 наблюдается хорошее сопоставление расчетов с экспериментальными данными по интегральным характеристикам – коэффициентам сил и моментов. С увеличением y^+ расхождения увеличивались, но были в пределах 10%. При этом, судя по распределению давления на поверхности сооружения, переход от «разрешения стенки» к использованию пристеночных функций с ростом y^+ приводит к нефизичному увеличению разрежения в областях ветрового отсоса. На локальных участках фасадов (в окрестности угловых стыков) занижение давления на «высокорейнольдсовых» сетках доходило до двух раз. Подобные ошибки характерны при попытках строить численные решения задач внешней аэродинамики непосредственно для натурной геометрии зданий, когда значения y^+ достигают нескольких сотен и даже тысяч, но это игнорируется на том основании, что достаточно получить «тенденцию» течения. Однако

при дальнейших расчетах на прочность конструкции использование завышенных прогнозов величины ветрового отсоса может привести к дополнительным экономическим затратам на усиление конструкции (к примеру, при проектировании навесных фасадных систем). Причем это затраты сверх учета нормативных повышающих коэффициентов надежности по нагрузке.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-90468).

О СТРУКТУРЕ ВОЛНЫ ИСПАРЕНИЯ С ВНЕЗАПНО ПЕРЕГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

А.Л. Кусов, В.В. Лунев

ЦНИИМаш, Королев, Моск. обл.

Рассмотрена задача об одномерном нестационарном внезапном разлёте в разреженную среду паров материала, поверхность которого нагрета до заданной температуры, например, под воздействием внезапно приложенного интенсивного облучения. Выявлены структура плоского пристеночного слоя Кнудсена и условия достижения им стационарного состояния. Расчёты проведены методом прямого статистического моделирования Монте-Карло. Результаты сравниваются с соответствующим аналоговым решением уравнений Эйлера для задачи о распаде невязкого разрыва.

Получен аналитически и подтвержден численно эффект существования двух предельных режимов разлёта газа в сильно разреженную среду: предельные картины течения при исчезающе малой, но конечной, тем не менее, плотности внешней среды и при первоначально нулевой отличаются качественно. Если в последнем случае реализуется классическая волна разрежения (Римана) в пустоту, то в первом случае этой волне предшествует слой горячего газа с температурой, многократно превышающей температуру поверхности.

Продольные и поперечные слагаемые температуры в процессе разлёта газа не совпадают между собой, но в пределе, при большой протяжённости волны течение стремится к молекулярно-кинетическому равновесию.

НОВЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОЛНОСТЬЮ ЛАГРАНЖЕВ ПОДХОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Н.А. Лебедева^{1,2}, А.Н. Осипцов²

¹ Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

² НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Доклад посвящен обсуждению нового комбинированного полностью лагранжева подхода для моделирования нестационарных течений с вязкой несущей фазой и инерционной дисперсной примесью. Рассматриваются математические основы подхода, а также приводятся примеры применения метода для расчета нестационарных вихревых дисперсных течений.

Подход основан на развитии и комбинации двух лагранжевых методов: полного лагранжева метода (Osipov A.N., 2000) для параметров дисперсной среды и бессеточного вихревого метода на основе диффузионной скорости для двумерных уравнений Навье-Стокса (Ogami Y., Akamatsu T., 1991). Соответствующая модификация и сочетание этих двух методов позволили свести задачу нахождения параметров обеих фаз (включая концентрацию и градиенты концентрации и температуры примеси) в основном к решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка и вычислению конечных интегральных сумм. Метод реализует полностью бессеточное моделирование движения как несущей, так и дисперсной фазы, и позволяет вести аккуратный расчет поля концентрации примеси, учитывающий существенную деформацию элементарного фазового объема дисперсной среды. Предложенный подход делает возможным детальное изучение структуры областей аккумуляции примеси и особенностей поля числовой концентрации частиц в сложных нестационарных вихревых потоках, в которых присутствуют локализованные зоны накопления дисперсной фазы, области пересекающихся траекторий частиц, складки и фрагментация в дисперсном континууме примеси. Подход позволяет проводить исследования дисперсных течений в широком диапазоне определяющих параметров и делает возможным моделирование течения разнообразных смесей (аэрозолей, запыленных газов, пузырьковых сред, разреженных суспензий и пр.).

При помощи развитого подхода в работе исследуются вихревые многофазные течения с особенностями типа вихревого кольца в двумерном и осесимметричном случае. Обсуждаются проблемы переноса, перемешивания и аккумуляции дисперсных частиц в зависимости от параметров дисперсной примеси и условий формирования вихревой структуры. Проводится сравнение результатов с известными экспериментальными данными и аналитическими моделями вихрей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00147).

РАЗВИТИЕ МНОГОКОНТИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ

Н.А. Лебедева

Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

В докладе обсуждаются современные подходы к моделированию нефтегазовых течений в скважинах и трубопроводах. Сложность описания таких течений обусловлена многокомпонентностью движущихся газожидкостных смесей и большим числом возможных нестационарных режимов. Так, в зависимости от технологического процесса, в состав смеси могут входить газы, различные типы нефти, вода, разнообразные технологические жидкости, а также твердые частицы. При этом, в зависимости от скоростей, объемных долей фаз и других параметров режим течения может быть расслоенным, пробковым, пузырьковым, кольцевым, капельным и др. На современном этапе развития моделей скваженных течений широко распространен подход, в рамках которого на основе многоконтинуального приближения строятся одномерные нестационарные модели многофазных течений в длинных трубах. В инженерной практике актуальной является задача создания эффективных программных пакетов (симуляторов), основанных на быстром численном решении уравнений многоконтинуальной модели и позволяющих предсказывать режимы и рассчитывать параметры скваженных и трубных нефтегазовых течений.

Настоящая работа посвящена развитию одномерной нестационарной комбинированной модели течения многофазной многокомпонентной смеси применительно к созданию численного симулятора скваженных течений. Развиваемый подход основан на двухуровневом представлении газожидкостной смеси, при котором движение различных фаз (например, газа и жидкости) описывается уравнениями сохранения многожидкостной модели, а движение отдельных компонент каждой фазы подчинено модели дрейфа. Массообмен между компонентами (например, появление или осаждение капель, газовыделение из нефти и др.), а также межфазное трение и трения о стенки описываются при помощи экспериментальных замыкающих соотношений. В работе исследуются вопросы корректности математических моделей многофазных течений и новые подходы для обеспечения гиперболичности системы определяющих уравнений. Обсуждаются возможные замыкающие соотношения и их влияние на режимы течения. Исследуются преимущества различных численные схем и

их эффективность для описания пробковых течений. Приводятся примеры расчетов газожидкостных скваженных течений и сравнение результатов с экспериментальными данными.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

В.А. Левин, И.С. Мануйлович, В.В. Марков

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

По мере совершенствования компьютерной техники расширяются возможности применения вычислительных методов для решения фундаментальных и прикладных задач аэромеханики и газовой динамики, связанных с быстропротекающими физико-химическими процессами. В настоящее время можно рассматривать такие проблемы, о которых несколько лет назад можно было только мечтать. В докладе представлены результаты исследований коллектива сотрудников НИИ механики МГУ и МИАН, в которых отражается история развития неклассической теории детонации. Как известно, классическая теория детонации базируется на модели детонационной волны, рассматриваемой как поверхность разрыва, на которой химическая энергия горючей смеси переходит в кинетическую и тепловую энергию продуктов детонации. В рамках этой теории рассматривались как автомодельные, так и неавтомодельные задачи. Среди них стоит упомянуть полученные аналитически Г.Г. Черным и В.А. Левиным законы ослабления слабо пересжатых волн по мере их распространения, которые были подтверждены численными расчетами задач о точечном взрыве в детонирующем газе. Ограниченность этой модели связана с тем, что используя ее невозможно описать процессы инициирования и затухания детонационного режима горения. В.П. Коробейниковым и В.А. Левиным была предложена модель волны с учетом периода индукции и конечного времени тепловыделения, которая позволила, в частности, впервые показать существование минимальной критической энергии инициирования детонации, нестационарный периодический характер изменения газодинамических параметров на ее фронте, а в двумерном случае смоделировать ее ячеистую структуру. В дальнейшем были определены критические энергии инициирования различными источниками энергии, установлена возможность инициирования детонации без объемного подвода энергии извне, а за счет кумуляции или поршневого эффекта на границе горючей смеси. С использованием суперкомпьютера «Ломоносов» изучена двумерная и трехмерная ячеистая детонация, исследована детонация при тороидальном электрическом разряде. При

моделировании детонации в канале уступом или стенкой в сверхзвуковом потоке обнаружен неизвестный ранее галолирующий режим слоистой детонации. Решена двумерная задача об инициировании детонации при вращении камер и в камерах с деформируемыми стенками, проведено численное исследование инициирования трехмерной детонации в сверхзвуковом потоке в каналах винтовой формы и каналах переменного сечения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-01-12043-офи_м), Совета по грантам Президента РФ (НШ-5436.2014.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН. Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова.

ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВ: ИДЕИ, ФАКТЫ И ПАРАДОКСЫ

А.И. Леонтьев

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Одним из перспективных способов энергоразделения газов является метод газодинамической температурной стратификации, основанный на зависимости равновесной температуры теплоизолированной стенки от критерия Прандтля, принцип действия которого состоит в следующем: если поток газа разделить нетеплопроводной пластиной на два потока, дозвуковой и сверхзвуковой, то со стороны дозвукового потока температура пластины будет равна температуре торможения, а со стороны сверхзвукового потока при $Pr \neq 1$ она будет отличаться от температуры торможения. Если пластину сделать теплопроводной, то через стенку возникнет тепловой поток, направление которого зависит от числа Pr . Если $Pr < 1$, то сверхзвуковой поток будет нагреваться, а дозвуковой – охлаждаться, и наоборот. Обычная величина критерия Прандтля для газов мало отличается от единицы, и эффект стратификации получается несущественным. Однако для гелий-ксеноновых смесей, используемых в замкнутых ГТУ космического назначения, критерий Pr значительно меньше, а для перегретого пара – значительно больше единицы. В этом случае эффект температурной стратификации в предложенном устройстве может быть очень существенным.

В НИИ механики МГУ проведены численный и физический эксперименты по влиянию различных факторов на эффективность работы предложенного устройства энергоразделения. В частности исследована температурная стратификация для случая, когда стенка трубы выполнена из проницаемого материала. В этом случае поперечный поток вещества на

поверхности теплообмена приводит к уменьшению коэффициента восстановления, что увеличивает количество переданного тепла. Однако здесь возникают некоторые дополнительные эффекты, такие как уменьшение коэффициентов теплоотдачи на проницаемой поверхности, и парадокс, связанный с изменением направления теплового потока при использовании проницаемых стенок.

Стратификация также может возникнуть при впрыске в сверхзвуковой поток газа мелких капелек жидкости, которые интенсивно охлаждаются в проточной части сопла и, попадая на стенку канала, уменьшают равновесную температуру стенки. Эксперименты продемонстрировали существенное влияние отрывных течений на коэффициент восстановления температуры. Этот эффект также можно использовать, применяя “смерчевой” метод охлаждения поверхности теплообмена. Кроме того, в предполагаемом методе можно воспользоваться каскадным способом разделения газа, так как практически не теряется давление в дозвуковом потоке.

АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

И.И. Лунатов

ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Моск. обл.

Среди работ, посвященных исследованию течений вязкой жидкости, следует упомянуть две работы, сыгравшие исключительную роль в развитии гидродинамики.

Первая из них принадлежит Людвигу Прандтлю и была представлена почти столетие назад на математическом конгрессе в Гейдельберге. В этой работе были заложены основы теории пограничного слоя. В основу теории течений вязкой жидкости были положены опытные данные и физические соображения о малом влиянии вязкости при больших числах Рейнольдса.

Вторая работа была несколько позднее выполнена создателем квантовой механики Вернером Гейзенбергом и была посвящена развитию теории гидродинамической устойчивости и, в частности, исследованию решений линейной теории устойчивости при больших числах Рейнольдса. В дальнейшем оба этих направления получили интенсивное развитие.

Более пятидесяти лет тому назад Джеймс Лайтхилл представил модель распространения возмущений в пограничных слоях и сформулировал линейную постановку задачи, в которой существенную роль играли процессы взаимодействия течения в пограничном слое и внешнего сверхзвукового течения.

Дальнейший прогресс был связан с формулированием и развитием методов асимптотического анализа задач математической физики, в том числе и проблем гидродинамики при больших или малых значениях параметров. Эти методы были использованы для формального вывода уравнений пограничного слоя и решения ряда других задач, в том числе и таких, для которых классическая теория пограничного слоя оказалась неприменимой.

Асимптотический анализ позволил установить, что процессы вязко-невязкого взаимодействия играют существенную роль и при возникновении отрыва пограничного слоя. В дальнейшем теория взаимодействия была обобщена для описания нестационарных процессов.

В данной работе обсуждаются вопросы приложения теории взаимодействия для исследования развития возмущений, хотя и малой амплитуды, но превосходящей такие величины, при которых в области нелинейных возмущений существенно влияние вязкости.

ВЛИЯНИЕ ЧИСЕЛ ПРАНДТЛЯ И МАХА НА КОЭФФИЦИЕНТ АНАЛОГИИ РЕЙНОЛЬДСА

В.Г. Луцук, М.С. Макарова

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Одним из критериев эффективности теплообмена является соотношение между теплоотдачей (числом Стантона) и гидравлическими потерями (коэффициентом гидравлического сопротивления) – так называемый коэффициент аналогии Рейнольдса. Удобство использования коэффициента аналогии Рейнольдса в инженерных расчетах для определения теплового состояния стенки (числа Стантона) состоит в том, что коэффициент сопротивления практически не зависит от числа Прандтля и рассчитывается по известным зависимостям от чисел Рейнольдса и Маха.

Использование в качестве теплоносителей газовых сред с малыми и большими значениями числа Прандтля представляет интерес для ряда прикладных задач. Поскольку экспериментальные данные для используемой в инженерных методиках расчета зависимости коэффициента аналогии Рейнольдса в широком диапазоне чисел Прандтля отсутствуют, установление такой зависимости расчетным путем с использованием дифференциальной модели турбулентности представляется актуальной задачей.

Расчеты проводились в следующей постановке. Пластина обтекалась потоком идеального газа с постоянной сверхзвуковой скоростью, соответствующей заданному числу Маха, при постоянной температуре

торможения. Параметрами задачи являются: число Маха, число Рейнольдса по длине при значениях теплофизических свойств, определенных при заданной температуре и давлении, и число Прандтля.

Численное исследование зависимости коэффициента аналогии Рейнольдса от чисел Рейнольдса и Маха проведено в диапазоне чисел Прандтля 0.1 – 10, чисел Маха 0.01 – 3 и чисел Рейнольдса до 10^8 . В указанном диапазоне чисел Прандтля коэффициент аналогии Рейнольдса слабо зависит от числа Рейнольдса, а зависимость от числа Маха появляется при значениях числа Прандтля больше трех.

Наиболее информативной представляется зависимость коэффициента аналогии Рейнольдса от числа Прандтля. Полученная расчетная зависимость коэффициента аналогии Рейнольдса для дозвукового потока близка к общепринятым интерполяционным зависимостям для чисел Прандтля 0.5 – 10. Для сверхзвукового потока зависимость коэффициента аналогии Рейнольдса от числа Прандтля расслаивается по числу Маха и не может быть описана одной интерполяционной зависимостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-08-00084, 14-08-31624) и Совета по грантам Президента Российской Федерации (СП-3874.2013.1).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КРУГЛЫХ РАСШИРЯЮЩИХСЯ КАНАЛАХ И В КАНАЛАХ С ОТСОСОМ ГАЗА

В.Г. Луцик, А.И. Решмин

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Течение с уменьшающимся по длине числом Рейнольдса может быть реализовано в диффузоре или в трубе постоянного сечения с отсосом газа через проницаемую стенку.

Экспериментальное исследование течения воздуха в безотрывном диффузоре подтвердило возможность реализации турбулентного течения в диффузоре при числах Рейнольдса вплоть до 1000. Измеренные профили скорости напряжения сдвига показали, что в выходном сечении диффузора формируется развитое турбулентное течение, подтвержденное также результатами расчета с использованием трехпараметрической модели турбулентности. Использование этой модели турбулентности в расчетах течения в трубе с отсосом при больших числах Рейнольдса также дало хорошее согласование с экспериментом по профилям скорости и интенсивности турбулентности.

Таким образом, можно считать обоснованным использование трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности в расчетах как течения в безотрывном диффузоре, так и в трубе с отсосом, что является целью настоящей работы.

Задачи решались в следующей постановке. Входу в диффузор и участку трубы с отсосом предшествовал участок стабилизации, на котором устанавливается развитое турбулентное течение при числе Рейнольдса 3200. Далее следовал участок с диффузором или с отсосом, на котором число Рейнольдса линейно менялось по длине до заданной величины (2800, 1600 или 800) в зависимости от угла раскрытия диффузора или величины интенсивности отсоса. Далее следовал участок трубы постоянного сечения, на котором устанавливалось развитое турбулентное течение при низком числе Рейнольдса. Для решения задачи использовались уравнения неразрывности и движения в приближении узкого канала.

Проведенное сравнение результатов расчета интегральных и локальных характеристик течения в диффузоре и трубе с отсосом газа позволило установить основные особенности достаточно сложных процессов перестройки течения. Показано, что в канале с расширением при всех рассмотренных изменениях числа Рейнольдса характеристики турбулентности – энергия турбулентности и напряжения Рейнольдса – оказываются значительно выше, чем в канале с отсосом. При переходе через границы участка с расширением, на длине примерно 25 калибров, профиль скорости сильно деформируется. Далее профиль скорости турбулентного течения в канале с расширением почти не отличается от профиля скорости в трубе при тех же числах Рейнольдса. В канале с отсосом резкие изменения скорости не обнаружены. Профиль скорости отличается от профиля в трубе при тех же числах Рейнольдса и оказывается более заполненным.

В расширяющемся канале, как и в канале с отсосом имеет место турбулизация потока. В канале с диффузором турбулентные характеристики потока существенно выше, чем в трубе, и развитое турбулентное течение на выходе такого канала реализуется при числах Рейнольдса больше 1000, что подтверждается экспериментальными данными. В канале с отсосом рост турбулентных характеристик заметен при числах Рейнольдса меньше 2000. Поэтому можно ожидать, что турбулентное течение в таком канале будет поддерживаться при меньших числах Рейнольдса, чем в трубе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 13-08-00084-а, 13-01-00218-а, 14-01-00052-а).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ С ВИХРЯМИ ТЕЙЛОРА

Ф.А. Максимов^{1,2}

¹Институт автоматизации проектирования РАН, Москва,

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Численный метод, разработанный на основе уравнений Навье-Стокса вязкого газа в трехмерной постановке, применен к расчету течений между вращающимися цилиндрами, конусами, сферами. Основное внимание уделено моделированию экспериментов, в которых наблюдаются вихри Тейлора. Возможность при численном эксперименте учитывать или не учитывать те или иные члены уравнений, а также сопоставление с экспериментом, позволяют назначить требования к математической модели течения. При расчете течения между цилиндрами для уменьшения области расчета и исключения краевых эффектов рассматривалась только часть области по длине с заданием условия периодичности. Решения с образованием вихрей Тейлора можно построить в некотором интервале размера периодичности. При задании размера периодичности меньше некоторой величины трехмерная неустойчивость не развивается, и вихри Тейлора не образуются. Это важно для численного моделирования. Задавая размеры ячейки сетки, фактически можно исключить саму возможность появления неустойчивостей. Существует некоторый размер периодичности, при котором реализуется максимальный момент трения, и который, по всей видимости, является наиболее устойчивым. Из экспериментов известно, что в условиях одной геометрии может реализовываться разное количество вихрей Тейлора. Этот факт подтверждается и численным моделированием. В частности смоделированы эксперименты с разным количеством вихрей при течении между конусами.

Представляет интерес переход от регулярного плоского течения типа Куэтта к течению с вихрями Тейлора. По результатам моделирования переход осуществляется из-за развития трехмерных неустойчивостей в плоском течении и через нестационарный режим, которое имеет черты турбулентности, течение устанавливается в другом устойчивом положении, которое соответствует течению с вихрями Тейлора.

Метод моделирования применен к достаточно широкому кругу геометрий и в частности к течению между торами, внутренний из которых вращается относительно своей оси. Между криволинейными цилиндрами при определенных условиях также образуются вихри Тейлора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-01229). Расчеты проводились на МВС-100К МСЦ РАН.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОРНАДО И НИЗОВЫХ ПРОРЫВОВ

С.А. Маслов, В.Л. Натяганов, В.Э. Сытов

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва

Анализируется роль электрической структуры грозовых облаков на процессы образования торнадо из нижней части вращающегося облака (так называемого торнадо-циклона) с трипольной электрической структурой и низовых прорывов (downburst) с дипольной: верх облака заряжен положительно, низ – отрицательно.

Рассматривается механизм перезарядки облака с изменением его структуры с дипольной на трипольную, в результате чего в центральной и отрицательно заряженной нижней части облака появляется дополнительная локальная область положительного заряда. Интегральный электрический ток из окружающего воздуха к этой области является электровихревой причиной вращения в торнадо-циклоне и появления касательного электрического поля вдоль его нижней границы. Это поле препятствует началу реализации гидродинамической неустойчивости Рэлея-Тейлора (прорыву газокапельной среды облака к земной поверхности) и задерживает формирование воронки торнадо.

Для дипольной структуры подобного стабилизирующего механизма нет, а электростатическое взаимодействие низа облака с индуцированным зарядом на подстилающей поверхности способствует реализации неустойчивости Рэлея-Тейлора и развитию низового прорыва.

Предложена квазистационарная электрогидродинамическая модель низового прорыва в виде параболоида вращения газокапельной среды грозового облака в атмосферный воздух. Обсуждается стабилизирующая роль возникновения вдоль границы низового прорыва двойного электрического слоя с эффективным поверхностным натяжением, что позволяет рассматривать форму области газокапельной среды низового прорыва как квазистационарную.

Анализируются электро- и гидродинамические механизмы взаимодействия заряженных капель (при условии их малой объемной концентрации) внутри области низового прорыва, влияние возможного их испарения с его интенсификацией в ее нижней части на формирование двойного электрического слоя и сохранение параболоидальной формы низового прорыва.

Для случая линейного по времени уменьшения радиуса испаряющихся капель для их скорости падения получено дробно-рациональное выражение через модифицированные функции Бесселя и Макдональда; обсуждаются

дополнительные условия, когда скорость низового прорыва с испаряющимися каплями можно считать квазистационарной.

НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

О.Э. Мельник

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В докладе будет сделан ретроспективный обзор нелинейных моделей вулканических процессов, разработанных в группе динамической вулканологии под руководством А.А. Бармина и О.Э. Мельника.

Магма представляет собой уникальный объект со сложными свойствами. При ее подъеме к земной поверхности происходят физико-химические превращения, включающие нуклеацию пузырьков, их рост, коалесценцию, фильтрацию газа через подвижную пористую среду, нуклеацию и рост кристаллов различных минералов. Эти процессы сказываются на режиме течения и реологических свойствах магмы. Нелинейная зависимость между движущим перепадом давления и скоростью подъема магмы приводит к наличию нескольких стационарных решений краевой задачи при фиксированных условиях в очаге извержения. Переход между этими стационарными режимами приводит к периодическим или непериодическим изменениям расхода магмы.

В докладе будут рассмотрены модели взрывного (взрывного), экструзивного и фреатомагматического (происходящего за счет взаимодействия магмы в канале с водой из пористого слоя) извержений. Кроме того будут освещены разработанные нами подходы, позволяющие по текстурам изверженных пород определить условия подъема магмы, в частности площадь поперечного сечения вулканического канала. Этот параметр не может быть измерен никакими ныне существующими прямыми или косвенными методами.

РАСЧЕТ ЭВОЛЮЦИИ ФОРМЫ ТЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕМОНОТОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ МЕТОДОМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ

Д.Н. Минюшкин

ЦНИИМаш, Королев, Моск. обл.

Представлен вычислительный метод расчёта изменения формы теплозащитного материала под действием немонотонных тепловых потоков, основанный на использовании метода определения уровня (Level Set Method). Проблема уноса особенно актуальна в процессах высокоскоростной газовой динамики. Высокая энтальпия набегающего потока приводит к повышенным тепловым потокам к поверхности летательных аппаратов, движущихся в атмосфере с гиперзвуковыми скоростями, и как следствие, порождает унос теплозащитного материала. Разрушение и унос материала приводит к изменению формы объекта и, тем самым, оказывает ощутимое влияние на основные характеристики процесса – аэродинамику аппарата, тепловые потоки к его поверхности и прогрев тепловой защиты.

Особенностью подхода, изложенного в рамках нашей работы, является использование метода определения уровня (Set Level Method) для отслеживания изменения во времени формы тела.

Основная идея метода определения уровня заключается в задании поверхности границы в неявном виде $\phi(x,t)=0$ и отслеживании переноса уровня $\phi(x,t)=0$ в поле скоростей, заданном во всём пространстве определённым образом: на самой границе скорость в точности равна скорости движения границы, а в её окрестности поле скоростей является достаточно гладким и близко к скорости движения границы.

Форма тела, заданная неявным образом, мало зависит от структуры расчётной сетки и при моделировании движения позволяет устранить возможные трудности, связанные с адаптацией расчётной сетки под перемещение границы заранее неизвестной немонотонной формы.

Для валидации вычислительного метода решались модельные задачи с помощью открытого пакета OpenFOAM. В расчётах использовались заданные модельные немонотонные скорости уноса.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИИ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА В УЗКОМ ЗАЗОРЕ

А.А. Монахов, В.А. Полянский

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Явление кавитации при малых числах $Re < 1$ известно более полувека. Кавитация возникает при взаимном перемещении двух тел в жидкости с узким зазором в области расширения потока. По этой тематике имеется большое число работ. Тем не менее, остается ряд фундаментальных вопросов, невыясненных до сих пор. Это влияние величины зазора на возникновение кавитации, область возникновения кавитации и предельное значение падения давления в области кавитации. Всестороннее исследование этого явления может существенно повлиять на улучшение различных технологических процессов, в которых есть движение тела вдоль стенки при малом зазоре (теория смазки). Это явление также интересно для медицины и биологии.

В работе излагаются результаты экспериментального исследования движения стенки около цилиндра в вязкой жидкости (силиконовое масло, 100cst) с изменяемым зазором. В плоскости параметров величина зазора — скорость движения стенки определена граница возникновения кавитационных пузырьков. Граница имеет асимптотическую зависимость и при некоторой величине зазора кавитация не возникает. Показано, что в кавитационной области на поверхности цилиндра вдоль образующей, за линией минимального зазора возникает цепочка кавитационных пузырьков. Граница возникновения кавитации зависит от степени дегазации жидкости и вязкости. Показано, что для недегазированной жидкости кавитация является газовой.

Проведена серия экспериментальных исследований по измерению давления на поверхности цилиндра по окружности для дегазированной и недегазированной жидкости. Измерено давление в конфузурной области перед линией минимального зазора и в дифузурной, где возникает кавитация, в зависимости от величины зазора. Показано, что давление в кавитационном пузырьке не меняется с уменьшением зазора и остается на уровне давления насыщенных паров. Это дает возможность определять степень насыщения газов в жидкости. Для дегазированной жидкости давление в области ожидаемой кавитации существенно меньше, и может приводить в тонких зазорах к возникновению паровой кавитации. Установлено, что дегазированная жидкость в открытом резервуаре довольно быстро восстанавливается до первоначального значения давления насыщенных паров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-01-00035).

ФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В.Л. Натяганов, А.Н. Скибицкий

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва

Хотя «предупреждающие огни» или световые предвестники землетрясений (ПЗТ) различных геометрических форм и расцветок известны с глубокой древности, адекватных физических механизмов, теоретически объясняющих эти интригующие явления природы, не было предложено до последнего времени.

В докладе развивается гипотеза, что многие типы световых ПЗТ обусловлены эффектом гигантского комбинационного рассеяния света (ГКРС) на микроаэрозольных металлизированных частицах, взвешенных в дегазационных восходящих потоках над литосферными разломами при усилении сейсмической активности. Далее такие механизмы и соответствующие потоки (течения) будут называться гидроэлектромагнитными (ГЭМ).

На основе широко известных моделей сферического вихря Хилла-Тейлора, тороидальных вихрей Максвелла-Ламба или Шафранова получено теоретическое объяснение наблюдаемых на практике световых ПЗТ сфероидальной, тороидальной и грибовидной форм, а также в виде булавы. На основе ГЭМ-течений типа Громеки-Бельтрами можно получить спирально-цилиндрические или колоннообразные световые ПЗТ. Рассматриваются спиралевидные ГЭМ-течения относительно нового типа, на основе которых возможны световые ПЗТ в виде так называемых “петард” и в форме “зонтика” или “фонтана”.

Все перечисленные геометрические формы наблюдаемых на практике световых ПЗТ и ряд более экзотических типов в виде визуально стоящих на месте, но мерцающих “занавесей”;двигающихся цепочек сфероидов, квазиплоских “стен” и даже многогранников также возможны при соответствующих режимах дегазации и разных условиях реализации эффекта ГКРС.

ЛОКАЛИЗОВАННОЕ В ПРОСТРАНСТВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ПО ВРЕМЕНИ ТРЕХМЕРНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

Н.В. Никитин¹, В.О. Пиманов^{1,2}

¹НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва

При переходных числах Рейнольдса в трубе круглого сечения возникают пространственно-локализованные турбулентные структуры, называемые турбулентными порывами. Турбулентные порывы отделены друг от друга ламинарным потоком и располагаются случайным образом по длине трубы. Протяженность турбулентного порыва не меняется с течением времени, оставаясь равной нескольким диаметрам трубы. Порывы сносятся вниз по потоку примерно со средней скоростью течения. Понимание механизмов формирования и самоподдержания турбулентного порыва, возможно, позволит понять структуру более сложных турбулентных течений.

Эволюция турбулентного порыва во времени имеет хаотический характер. К тому же в произвольный момент времени турбулентный порыв может исчезнуть в ламинарном потоке. Это осложняет его исследование. В работе [Avila et al. "Streamwise-localized solutions at the onset of turbulence in pipe flow." *Physical review letters* 110.22 (2013): 224502.] численно было найдено решение уравнений Навье-Стокса, напоминающее турбулентный порыв, но имеющее более простую структуру. Это решение принадлежит сепаратрисе, разделяющей области притяжения ламинарного и турбулентного режимов и, следовательно, неустойчиво.

В настоящей работе было численно воспроизведено решение на сепаратрисе. Уравнения Навье-Стокса в достаточно длинной области (60 диаметров трубы) решаются конечно-разностным методом. Решение на сепаратрисе находится вариацией начальных условий методом бисекции. Удастся удержать неустойчивое решение на сепаратрисе достаточно долго, чтобы определить основные его характеристики. Полученное решение оказывается периодическим по времени с периодом $15D/U$ (D – диаметр трубы, U – средняя скорость) и локализованным в продольном направлении на отрезке длиной около $20D$. Скорость сноса структуры вниз по потоку составляет примерно $1.5U$. Определены области обмена энергией между стационарной и периодической составляющими, что позволяет судить о механизме самоподдержания полученного решения.

Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00295).

ПОТЕРЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ ФУНКЦИЙ И ИХ ПРОИЗВОДНЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФОРМУЛЫ ГАУССА – ОСТРОГРАДСКОГО ДЛЯ ВЫВОДА УРАВНЕНИЯ НЕРАЗРЫВНОСТИ

В.М.Овсянников

МАМИ, Москва

При выводе Н.Е.Жуковским уравнения неразрывности построением эллипсоида деформаций указано, что уравнение $\operatorname{div}V=0$ получается при пренебрежении членами второго порядка малости по времени. Вывод уравнения неразрывности с использованием формулы Гаусса-Остроградского сразу приводит к результату $\operatorname{div}V=0$, не давая формы с членами более высокого порядка. Для выяснения причины этого был проведен анализ пути получения Остроградским формулы без направляющих косинусов (4) со стр. 334 третьего тома учебника Г.М.Фихтенгольца и пути вывода уравнения неразрывности с использованием формулы с направляющими косинусами (5) со стр. 335. Использование направляющих косинусов подразумевает зануление тангенциальных компонент скорости. Это проиллюстрировано на примере плоского двухмерного обтекания прямого угла потенциальным потоком несжимаемой жидкости с комплексным потенциалом $w=z^2$. Контрольная фигура была взята в виде единичного квадрата. Натекание потока на прямой угол происходило вертикально вниз со стороны больших значений координаты y . После разворота по гиперболам вблизи начала координат поток уходил в бесконечность вдоль положительного направления оси x . Для исходного, точного поля скоростей производные компонент скорости по координатам $\partial v/\partial y, \partial u/\partial x$ во всем поле течения имели постоянные значения минус 2 и плюс 2 соответственно. Однако, при расчете баланса втекающей и вытекающей жидкости из единичного квадрата согласно построениям формулы (5) со стр. 335 предположено, что $u=0$ и $\partial u/\partial x=0$ на стороне квадрата с $y=1$. И аналогично предположено, что $v=0$ и $\partial v/\partial y=0$ на стороне квадрата с $x=1$. Введение таких изменений поля скорости, хотя и на небольшой части пространства, прилегающей к границе, противоречит требованиям точной формулы Гаусса-Остроградского без направляющих косинусов – непрерывности функций, к которым она применяется, вместе с их производными. Имеются основания считать, что аналогичные дополнительные члены уравнения неразрывности для сжимаемого газа проникают в волновое уравнение и являются ответственными за генерацию потоком звука и волн давления или плотности. Для контрольного объема с размером меньше половины длины волны $\lambda/2$, генерирующего волны давления, сохранение количества вещества в

объеме не выполняется. И уравнение неразрывности контролирует в этом случае интенсивность обмена веществом контрольного объема с окружающим пространством в процессе генерации звука.

НИИ МЕХАНИКИ МГУ. 15 ЛЕТ ПЕРЕД 55-ЛЕТИЕМ

Ю.М. Окунев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Изложены проблемы, стоявшие перед Институтом механики МГУ на рубеже нового тысячелетия. Продемонстрированы действия руководства института, направленные на модернизацию экспериментальной базы и ее энергетического обеспечения.

Приведены примеры передовых научных достижений сотрудников института в различных областях механики. Среди них, в частности, отмечены работы по созданию экзоскелетона, а также деятельность коллектива по заявкам Спорткомитета России, которая принесла сборной команде на Олимпиаде в Сочи ряд олимпийских наград.

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В ТРУБОПРОВОДАХ С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ ОСАДКА

А.А. Осипцов¹, К.Ф. Синьков^{1,2}, П.Е. Спесивцев¹

¹Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Моск. обл.

Моделирование транспорта частиц в скважинах и длинных трубопроводах представляет значительный интерес для приложений в нефтегазовой индустрии. Предсказательное моделирование течения суспензий в трубах требуется для дизайна и контроля широкого спектра технологических операций, таких как транспорт шлама при бурении скважины, установка гравийных фильтров, гидравлический разрыв пласта, очистка скважины после бурения или гидроразрыва и контроль выноса песка из пласта при добыче. Одновременное присутствие нескольких жидких фаз может существенно влиять на транспорт твердой фазы.

В настоящей работе предлагается математическая модель, описывающая перенос твердых частиц турбулентным многофазным потоком, и способ сопряжения предлагаемой модели с существующими симуляторами многофазных течений в длинных трубопроводах на основе модели дрейфа и многожидкостной модели.

Предполагается, что в каждом сечении трубы могут одновременно присутствовать насыщенный жидкостями осадок частиц твердой фазы и один или несколько слоев суспензии. Уравнения законов сохранения записываются в одномерном приближении на масштабе длины трубопровода. Уравнения неразрывности решаются для каждой из фаз, уравнения законов сохранения импульса решаются отдельно для осадка и для суспензии в целом. Поперечное распределение частиц твердой фазы в каждом сечении описывается квазистационарным уравнением конвекции-диффузии для локальной концентрации частиц в предположении, что имеет место локальный баланс между гравитационным осаждением и турбулентным ресуспензированием. Данный подход применим к течениям в трубопроводах произвольного наклона к горизонту и позволяет моделировать образование и движение осадка твердых частиц на стенках трубы.

В работе представлены результаты решения сопряженной задачи о многофазном газожидкостном течении и транспорте частиц в трубопроводах. Приводится сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Работа выполнена в Московском научно-исследовательском центре компании «Шлюмберже».

ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД В НЕФТЕСЕРВИСНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

А.А. Осипцов

Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

В настоящем докладе представлен обзор проблем механики многофазных сред, которые возникают при развитии современных нефтесервисных технологий. Рассматриваются следующие приложения: бурение скважин в нефтеносных пластах; гидроразрыв пласта для повышения нефтеотдачи; запуск, очистка и тестирование скважин после бурения и стимуляции нефтеотдачи. Приводится обзор современного состояния развития моделей многофазных течений в пористой среде, трещинах гидроразрыва и скважинах, а также освещен ряд фундаментальных

проблем, остающихся нерешенными с точки зрения построения математических моделей и их численной реализации.

В частности, подробно рассматриваются фундаментальные вопросы построения самосогласованных моделей многофазных течений в трещинах гидроразрыва и скважинах в процессе закачки и очистки. При построении одномерных гидравлических моделей скважинных течений остаются открытыми вопросы безусловной гиперболичности получаемых уравнений, а также вопросы вырождения системы уравнений при переходе многофазного режима течения в однофазный, что особенно важно для корректного описания процесса развития пробкового режима течения, при котором фазы в трубе макроскопически разделены. В задаче о течении суспензии в трещине гидроразрыва остаются пока еще не исследованными следующие явления: перенос и осаждение смеси частиц и гибких полимерных волокон в вязкой жидкости, течение суспензии во всем диапазоне объемных долей твердой фазы от разреженных суспензий до плотной упаковки с учетом эффектов МДТТ, ускоренное осаждение в наклонных трещинах (эффект Бойкотта), наличие предела текучести и разжижения при сдвиге у гидроразрывной жидкости (полная реологическая модель Хершеля-Балкли), а также перенос частиц в ресуспензированном осадке на дне трещины (“дюнный” перенос). Приводятся экспериментальные иллюстрации изучаемых явлений.

Автор выражает благодарность руководству Московского Научно-исследовательского Центра Шлюмберже за возможность опубликовать данную работу.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ НЕЛИНЕЙНОЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ В ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ

И.Л. Панкратьева, В.А. Полянский

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Рассматриваются некоторые возможные физические механизмы, вызывающие неустойчивость плоского слоя многокомпонентной жидкости, содержащей в качестве малой примеси ионы электролитной природы и находящейся между двумя стенками-электродами под воздействием электрического поля. Исследуемые условия соответствуют умеренным числам Дебая, характерным для задач, возникающих в биологических исследованиях, в различных биотехнологиях, в медицинской диагностике и т.п. При умеренных числах Дебая некомпенсированный электрический заряд, возникающий в среде за счет электрохимических процессов на

электродах и приложенного к электродам поля, может занимать весь межэлектродный объем. При этом, в отличие от случая малых чисел Дебая, традиционно рассматриваемых в литературе по устойчивости, весь объем среды находится под воздействием кулоновских сил. Распределение объемного заряда существенным образом зависит от граничных условий на электродах для концентраций заряженных компонент. Анализ состояния среды после включения напряжения на электродах проведен на основе численного решения серии нестационарных двумерных задач о формировании структуры межэлектродного слоя жидкости под действием поля. При этом учитываются процессы диффузии ионов, их дрейф в электрическом поле, конвективный перенос и электрохимические процессы в объеме и на поверхности стенок канала.

Интерпретация полученных решений показала, что возможны несколько механизмов возникновения неустойчивости как нестационарного переходного процесса, так и стационарного состояния. Эти механизмы аналогичны механизмам при рэлей-тейлоровской неустойчивости, термогравитационной неустойчивости и неустойчивости в сдвиговых течениях. Предложено качественное объяснение обнаруженной в известных из литературы численных расчетах эволюции возникающих после потери устойчивости цилиндрических конвективных валов, периодически меняющих направление вращения. Это явление может быть связано с образованием в области течения узких сильно заряженных слоев, где стремится к нулю скорость движения заряженных частиц (когда конвективный перенос заряда и его дрейф в поле имеют противоположные направления) и происходит нестационарное накопление заряда.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-01-00035, 12-08-00924).

РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ НАГРЕВ ЭЛЕКТРОНОВ В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ ЗА КОНУСОМ ПРИ ГИПЕРЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ

Н.Н. Пилюгин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Ранее нами были представлены результаты зондовых измерений концентрации и температуры электронов в следе за конической моделью при ее сверхзвуковом обтекании воздушной плазмой из дугового плазмотрона низкого давления. Режим обтекания был близок к свободномолекулярному. Было установлено, что температура электронов в следе заметно превышает температуру газа. Для объяснения такого различия

предложена простейшая модель неравновесного стационарного течения внутри трубки тока, проходящей от носка тонкого конуса вдоль его поверхности и охватывающей вершины зондов. Система уравнений содержит уравнение кинетики электронов, уравнение сохранения (баланса) энергии электронов, уравнение сохранения энергии для газа в целом. Учтены потери энергии при упругих столкновениях электронов с ионами и нагрев электронного газа при диссоциативной рекомбинации, которая сопровождается выделением энергии. Нагрев газа является наиболее медленным процессом, т.к. время этого процесса примерно в тысячу раз больше характерного времени нагрева электронов. Поэтому допустимо рассматривать рекомбинацию на фоне постоянной температуры газа. В уравнениях пренебрегается рядом реакций и процессами переноса, считая, на основе оценок, их медленными по сравнению с рекомбинацией и охлаждением путем столкновений. При указанных допущениях получено аналитическое решение, которое позволило найти неизвестные параметры из сравнения с измерениями. Из расчетов следует, что отрыв температур в ближнем следе достигается за счет энергии рекомбинации. Отметим, что в дальнем следе будет происходить выравнивание электронной и газовой температур за счет усиления обмена энергией между электронами и колебательными степенями свободы молекул, концентрация которых в следствии рекомбинации будет увеличиваться.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00775).

ДВИЖЕНИЯ КАТАМАРАНА, ОБОРУДОВАННОГО ПРЯМОТОЧНЫМ ВОЛНОДВИЖИТЕЛЕМ, В ВОЛНОВОМ КАНАЛЕ

В.В. Прокофьев, А.К. Такмазьян, Е.В. Филатов, А.Ю. Якимов

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

В Институте механики МГУ предложен новый тип волновых движителей, использующих для движения судов энергию опрокидывающихся морских волн. Причем, механизм создания силы тяги здесь не связан с качкой самого судна. Основным элементом такого движителя является погруженная в жидкость наклонная пластина. Обнаружено, что в зависимости от угла наклона и глубины погружения пластины может иметь место движение, как по волнам, так и против волн.

В настоящей работе представлены результаты исследования движения против (и в направлении) волн судна катамарана, оборудованного волновым движителем – пластиной. Корпус катамарана состоит из двух симметричных относительно центральной плоскости прямоугольных корпусов (расстояние

между корпусами 1000 мм). Общая длина катамарана 6110 мм. Волнодвигатель устанавливался в средней части катамарана между корпусами. Большая длина корпусов обеспечивала отсутствие килевой качки судна. Имела место вертикальная качка, обусловленная переменной вертикальной составляющей силы, действующей на пластину.

Исследована зависимость скорости движения катамарана против волн в зависимости от параметров волнодвигателя и самих волн. Показано, что зависимость скорости движения от длины набегающих волн носит немонотонный характер. Катамаран движется против волн, периодически увеличивая скорость, причем, соответствующий период либо совпадает с периодом волн, либо в два раза больше. Для коротких волн имеет место монотонное движение. Показано, что те же волнодвигатели при измененных параметрах установки пластины могут весьма эффективно использоваться для обеспечения хода катамарана по волнам.

С помощью вычислительного пакета XFlow проведено численное моделирование процесса образования волн в канале с помощью клиновидного волнопродуктора и, одновременно, воздействия этих волн на наклонную пластину. Плавуемость взаимодействующей с волнами пластины обеспечивалась плавуемостью катамарана. Сравнение рассчитанных параметров волн и параметров движения катамарана с экспериментальными данными показало их удовлетворительное согласование.

О МЕХАНИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ СРЕД

А.Г. Прудников, В.В. Северинова

Центральный институт авиационного моторостроения, Москва

Механика взаимодействующих сред – это механика многих сплошных, но разных сред, действующих друг на друга одновременно и перемежаемо, вплоть до исчезновения одних и появления других сред (при расщеплении встречных струй на прямую и реверсивную, при слиянии, смешении, дожигании и горении исходных сред и т.п.). По виду взаимодействия и плотности сред МВС разделяется на механику разноплотных сред, вихревую механику перемежающихся и перемежаемых (когерентных) сред. В данном ознакомительном сообщении рассматривается только вихревая механика перемежающихся сред: ее кинетика и теплогазоаэродинамика (американское не полное название thermoaerochemistry).

Напомним основные этапы развития вихревой механики перемежающихся сред (ВМПС).

Л.Д. Винчи – вихревые дорожки водяных струй, турбулентность лорда Кельвина, вихри ренкина, каскады крупных и мелких вихрей снежной бури

А.С. Пушкина, «константы турбулентности» Прандтля-Толмина, локальная турбулентность Ричардсона, Обухова-Колмогорова, горящие вихри, вихри современных компьютерных программ, шестиуровневая теплогазоаэродинамика над молекулярной термодинамикой.

Основные положения ВМПС.

Лагранжевые крупные вихревые клубки и их турбулентные вихри, единые для всех семи естественных и рукотворных погранслоев.

ВМПС различает шесть уровней вихревой кинетики, над молекулярной кинетикой и ее 24D многомерность.

Аналитические определяются зависимости «констант» Прандтля-Толмина от числа Маха и располагаемого перепада давления.

Три физических модели ВМПС, позволяют линеализировать и аналитически решить уравнения Рейнольдса каждой среды. Обоснованы ограничения правил осреднения и вида уравнений Рейнольдса разных сред.

Этапы развития физической математики ВМПС.

ВМПС 70-х годов двусредного приближения диффузионной кинетики крупных вихрей.

Дифференциальные и интегральные уравнения Рейнольдса и уравнения статкинетики многосредной ВМПС 80-е года.

Базовые структурные уравнения и параметры современной ВМПС, уравнения статкинетики крупных вихрей (1985 г.), замыкающие уравнения Рейнольдса макровихревой кинетики. Вместо диффузионных коэффициентов двусредного приближения используется скорость инъекции крупных вихрей вихревого слоя.

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В МАГНИТОСЛОЕ ЗА ОКОЛОЗЕМНОЙ ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ПРИ ПАДЕНИИ МЕЖПЛАНЕТНОГО РАЗРЫВА

Е.А. Пушкарь

Московский государственный индустриальный университет, Москва

В рамках модели магнитной гидродинамики в трехмерной постановке исследовано воздействие на околоземную головную ударную волну и магнитослой плоского фронта разрывного возмущения солнечного ветра в виде быстрой магнитогиродинамической ударной волны или вращательного разрыва с круговой поляризацией. Рассмотрены характерные значения параметров солнечного ветра на орбите Земли. Трехмерная глобальная волновая картина течения найдена как мозаика решений задачи о распаде разрыва между состояниями за взаимодействующими волнами. Она

является функцией широты и долготы точки на головной ударной волне. Определены типы и интенсивности всех волн, возникающих при взаимодействии, которые существенно зависят от числа Маха ударной волны или угла поворота магнитного поля во вращательном разрыве. Выявлены особенности изменения параметров среды (плотности, давления и скорости) и магнитного поля в магнитослое, которые тесно связаны с ориентацией магнитного поля относительно фронта головной ударной волны и проявляющиеся в асимметрии возникающего течения относительно флангов заря-сумерки. При падении межпланетной ударной волны на фланге заря могут происходить катастрофические перестройки течения, обусловленные совпадением альфвеновской и медленных магнитозвуковых характеристических скоростей в некоторых точках головной ударной волны. На фланге сумерки на линии, где проекция магнитного поля становится параллельна переносной скорости (собственное электрическое поле равно нулю), происходит катастрофа тангенциального разрыва, который формируется при слиянии альфвеновских разрывов и медленных волн в группах волн, распространяющихся в сторону магнитосферы и к Солнцу. Все газодинамические параметры и магнитное поле в этих четырех волнах изменяются скачком на линии катастрофы. Детально исследовано влияние поворота магнитного поля в межпланетном вращательном разрыве на газодинамические параметры и магнитное поле. Полученные решения необходимы для интерпретации измерений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, проводимых на космических аппаратах, расположенных вблизи точки Лагранжа в солнечном ветре, где силы притяжения Солнца и Земли уравновешены, и в окрестности магнитосферы Земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00335).

АНАЛОГИ УРАВНЕНИЙ ЧАПЛЫГИНА И СПИРАЛЬНЫЕ ТЕЧЕНИЯ

А.И. Рылов

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

Рассматриваются некоторые аспекты построения спиральных течений. В основе лежит анализ аналогов уравнений Чаплыгина, которых, в том числе и нестационарных, бесконечно много (Рылов, ДАН-2002, ПММ-2005). Некоторые решения аналогов уравнений Чаплыгина и приводят к спиральным течениям, и к их нестационарным аналогам.

Простейший анализ указанных аналогов (Рылов, ДАН-2013), отвечающих разделению переменных, при котором решения содержат

экспоненциальные сомножители, указывает на течения, в которых изобары являются логарифмическими спиралями. В свое время Толлмин (Tollmien, ZAAM-1937) построил данное течение очень сложным путем, основанном на далеко не очевидном заранее допущении, что изобары в искомом течении являются логарифмическими спиралями. Возможно по этой причине решение Толлмина осталось малоизвестным.

В ряде работ автора (СибЖИМ-1998, ПММ-2006 и др.) был построен и использован аналог уравнений Чаплыгина на плоскости потенциала с зависимыми переменными, являющимися некоторыми комбинациями компонент вектора ускорения. Как оказывается, одно очевидное решение, в котором зависимые переменные постоянны, является спиральным течением Тейлора (Teulor-1930), т.е. суперпозицией радиального течения и течения от источника, а другое, в котором зависимые переменные нужным образом приравниваются либо потенциалу, либо функции тока, является отмеченным выше спиральным течением Толлмина. Указанные течения Тейлора и Толлмина являются одними из немногих примеров точных решений, содержащих звуковую и предельную линии. При этом через предельную линию, т.е. линию бесконечных ускорений, течение не может быть продолжено.

К спиральным течениям можно отнести течение несжимаемой жидкости, занимающее полупространство с положительной функцией тока (Рылов, ДАН-2014). На физической плоскости этого течения нулевая граничная линия тока образуется двумя логарифмическими спиралями, каждая из которых повернута относительно другой спирали вокруг начала координат на угол π . В отличие от течения Толлмина, начало координат здесь является точкой торможения.

В заключение отметим, что содержание данного доклада в значительной степени отвечает продолжающемуся циклу работ автора, начатому в свое время со статьи автора в ДАН-2002, представленной Г.Г. Черным.

Работа частично поддержана РФФИ (проект 12-01-00648).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РАМКАХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА И РЕЙНОЛЬДСА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА МОДЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.И. Сахаров

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Численное моделирование обтекания моделей ЛА для условий трубного эксперимента и сопоставление результатов численных расчётов с

экспериментальными данными, позволяет оценить возможности расчётного моделирования для условий реальных полётов ЛА.

В работе приведена физико-математическая постановка задачи для расчёта сверхзвукового пространственного обтекания затупленных тел в рамках осреднённых по Рейнольдсу/Фавру уравнений Навье-Стокса, дополненных двухпараметрической SST $k-\omega$ моделью турбулентности.

Проведено тестирование используемой модели турбулентности в расчетах гиперзвукового обтекании сферически затупленных конусов для различных значений чисел Маха и Рейнольдса.

Приведены результаты численного решения задач сверхзвукового обтекания пространственных компонок: треугольной пластины с затупленными кромками и расположенным на ее поверхности круговым конусом и конфигурации "сферически затупленный конус – цилиндр – оперение" ламинарным потоком газа и с учётом турбулентности.

Дано сопоставление результатов численных расчётов с данными трубных экспериментов. Сравнение расчётных и экспериментальных данных теплового нагружения передних кромок рулей показывает хорошее (до 10%) согласование между максимальными величинами тепловых потоков.

Проведенное численное исследование гиперзвукового обтекания пространственной конфигурации, состоящей из связки кругового конуса и треугольной пластины с затупленными кромками, подтвердило наличие особенностей в теплообмене на наветренной стороне компоновки, обнаруженных ранее в экспериментах и в численных расчетах для ламинарных режимов обтекания.

Сравнение расчётных и экспериментальных данных по теплообмену, выполненное в областях экстремальных значений тепловых потоков при ламинарном режиме обтекания, показало их удовлетворительное совпадение. Экспериментально измеренные и рассчитанные значения тепловых потоков при развитом турбулентном течении около наветренной стороны модели ЛА также близки.

Результаты сравнений тепловых потоков, полученных в численных расчётах и в трубном эксперименте, позволяют рассчитывать на правильное прогнозирование характеристик теплообмена для реальных условий полёта ЛА.

РАДИАЦИОННО-СТОЛКНОВИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ АЭРОФИЗИКИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОЛЕТА

С.Т.Суржиков

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

В данной работе приводится пример радиационно-столкновительной модели физической механики, построенной для решения задач радиационной аэрофизики спускаемых космических аппаратов. Основными элементами данной модели, свидетельствующими о многоуровневом подходе и интеграции моделей, являются следующие:

- объединение в единый расчетный комплекс задач феноменологической механики (уравнения Навье-Стокса и сохранения энергии химически неравновесного газа), физической и химической кинетики, теории межмолекулярных взаимодействий, моделей квантовой механики (для предсказания спектральных оптических свойств высокотемпературных газов) и моделей переноса селективного теплового излучения,

- использование моделей классической теоретической механики и квазиклассической квантовой физики для расчета потенциалов межъядерного взаимодействия,

- использования результатов молекулярно-динамического моделирования для расчета констант скоростей химических реакций и времен колебательной релаксации двухатомных молекул,

- использование моделей квантовой механики для расчета вероятностей элементарных радиационных процессов.

Очевидно, что представленная в докладе модель интегрирована весьма неоднородно. Часть моделей многоуровневого подхода используются отдельно от модели аэрофизики космических аппаратов, в которой используются лишь некоторые результаты указанных моделей (константы скоростей химических реакций, времена релаксации и т.п.).

Другая часть моделей интегрирована в единый расчетный комплекс (расчет спектральных оптических свойств и переноса селективного теплового излучения). Процесс создания интегрированных моделей не следует трактовать как примитивное объединение всевозможных моделей разного уровня в некоторую большую компьютерную систему. Здесь требуется взвешенный анализ возможностей *on-line* расчета и использования разного рода аппроксимаций и электронных баз данных.

Представленная модели использована для решения задачи радиационной газовой динамики возвращаемого на Землю космического аппарата Stardust. Обсуждаются данные по заселенностям электронно-возбужденных состояний двухатомных молекул, полученные по разным кинетическим моделям.

ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА В СОПЛЕ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

Ю.В. Туник

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Рассматривается возможность стационарного детонационного горения водородо-воздушной смеси, поступающей с высокой сверхзвуковой скоростью в осесимметричное конвергентно-дивергентное сопло в общем случае при наличии центрального коаксиального тела. Численно решаются задачи запуска сопла и инициирования детонационного горения с учетом взаимодействия истекающего газа с внешним сверхзвуковым потоком. Исследуется динамика процессов воспламенения и развития детонационного горения водорода в соплах различной конфигурации.

Моделирование проводится на базе двумерных газодинамических уравнений Эйлера для осесимметричных течений. Расчеты выполняются с использованием схемы С.К. Годунова на мелкой неподвижной сетке, позволяющей детально изучить взаимодействие формирующейся в диффузоре косоугольной ударной волны с осью сопла и центральным телом. Описание процессов воспламенения и горения осуществляется на основе детальных кинетических моделей обратимых неравновесных реакций в смесях водорода с воздухом.

Численно установлено, что вбрасывание осесимметричного конвергентно-дивергентного сопла без центрального тела в сверхзвуковой поток приводит к спонтанному воспламенению водородо-воздушной смеси за формирующимся у оси симметрии диском Маха. Возникающее детонационное горение распространяется вверх по потоку, исключая возможность получения тяги. Наличие центрального коаксиального тела обеспечивает регулярное отражение косоугольной ударной волны и, как следствие, сверхзвуковое течение во всей полости соплового канала. В этом случае принудительное инициирование позволяет получить режим стационарного детонационного горения водородо-воздушной смеси в расширяющейся части сопла и тягу необходимую для реализации полета при числах Маха более 6. Стабилизации детонационного горения способствует взаимодействие внутреннего и внешнего течения на выходе из сопла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-00440).

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ БИФУРКАЦИИ ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

В.П. Фокеев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Представлены экспериментальные данные по исследованию процесса формирования бифуркации отраженной ударной волны при ее взаимодействии с пограничным слоем в набегающем потоке. Исследование проведено в воздухе и углекислом газе при начальном давлении 30Торр и числах Маха падающей ударной волны в интервале (2 – 2,5).

Визуализация и регистрация ударноволновых конфигураций зоны бифуркации осуществлялась с помощью теневого прибора ТЕ-19 и цифровой камеры DICAM-Пров режиме двухкадровой съемки. Пьезоэлектрические датчики, расположенные заподлицо в стенках ударной трубы и экспериментальной секции, использовались для определения скорости падающей ударной волны и для измерения давления в области бифуркации.

Параметры и эволюция трехударных конфигураций и зон отрыва пограничного слоя анализировались для бифуркации на стенках ударной трубы и на тонкой игле, выступающей из торца ударной трубы или из сферы, на которой после взаимодействия с падающей ударной волной реализуется бифуркация формирующейся головной ударной волны.

В результате экспериментального исследования выявлены проблемные особенности явления:

- размер зоны бифуркации на игле превышает соответствующий размер на плоской стенке ударной трубы при меньшей толщине пограничного слоя на игле;
- размер зоны бифуркации на гладкой игле превышает соответствующий размер на шероховатой игле в противоположность явлению, известному по литературным данным, на гладкой и шероховатой плоской боковой стенке ударной трубы;
- выявлена, в отличие от известной модели бифуркации, эволюция как параметров трехударной конфигурации, так и отрывного пузыря по мере распространения зоны бифуркации по набегающему газу.

Анализ экспериментальных данных показывает необходимость уточнения существующей модели бифуркации отраженной ударной волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00891).

АКАДЕМИК В.В. СТРУМИНСКИЙ – 100 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

Харитонов А.М.

ИТПМ СО РАН, Новосибирск

29-го апреля 2014 г. исполнилось 100 лет со дня рождения академика В.В. Струминского. После окончания аспирантуры МГУ и защиты кандидатской диссертации Владимир Васильевич был распределен в ЦАГИ, где весьма энергично и плодотворно работал в течение 25 лет. Он выполнил гигантскую работу в области аэродинамики и внёс огромный вклад в развитие авиационной техники. Коллектив под его непосредственным руководством выполнил исследования стреловидных крыльев, компоновок многих самолётов различного назначения.

В первой части доклада приводится краткая биография В.В. Струминского и характеристика его большой роли в ЦАГИ. Вторая часть посвящена периоду его работы директором ИТПМ СО РАН в Новосибирске с 1966 по 1971 г. (Институт теоретической и прикладной механики: Годы, люди, события // Под редакцией А.М. Харитонова. – Изд-во СО РАН, 2000. Владимир Васильевич Струминский, Библиографии учёных РАН – М. «Наука», 1993).

Возглавив институт, Владимир Васильевич в соответствии с решением Президиума Сибирского отделения установил главным научным направлением деятельности института – теоретические и экспериментальные исследования аэродинамического профиля и в первую очередь – развитие экспериментальной базы: модернизации Т-313 с расширением чисел M_∞ до 7, создание новых аэродинамических труб периодического действия с пониженной степенью турбулентности, импульсной трубы с разрядной камерой, а также гиперзвуковых труб Т-326, Т-327 и Т-333. За очень короткий срок были созданы и официально произведены пуски аэродинамических труб с малой степенью турбулентности – дозвуковой Т-324 и сверхзвуковой Т-325.

В это же время интенсивно развивались: теоретические и экспериментальные исследования устойчивости ламинарных течений; структуры турбулентных потоков; динамика разреженных газов; исследования способов применения жидкого водорода на космических аппаратах; исследования процессов смешения и горения новых криогенных топлив.

Именно в эти годы была создана единственная в АН СССР аэродинамическая экспериментальная база, удостоенная премии Совета министров СССР, которая способствовала развитию фундаментальных исследований по аэрогазодинамике. Эти годы характерны освоением экспериментальной базы института, которая в последующий период

определила высокий уровень проводимых в ИТПМ исследований и признание как отечественных, так и зарубежных аэродинамических центров и университетов.

Несомненной заслугой Владимира Васильевича является то, что за несколько лет на посту директора института, он создал (воспитал) коллектив учёных аэродинамиков. Многие результаты: по устойчивости и переходу к турбулентности; по отрывным течениям; аэродинамической интерференции; динамике разреженных газов, были получены впервые и носят фундаментальный характер.

Период с 1966 по 1971 гг. Владимир Васильевич Струминский посвятил развитию аэродинамики в Сибири. Надо отдать ему должное за весьма значительный вклад, который он сделал в практическом отношении, применительно к развитию нашей авиации. Ещё в 1947 г. в конструкторских бюро С.А. Лавочкина, А.И. Микояна, А.С. Яковлева были созданы первые истребители со стреловидными крыльями. Необходимо всегда помнить и ценить сколь многим обязана ему наша отечественная аэродинамика.

НЕЛОКАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ БЕЗВИХРЕВОГО ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОГО ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ГАЗА

Ю.А. Чиркунов^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

²Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

Показано, что множество законов сохранения для нелинейной системы, описывающей установившееся безвихревое изоэнтропическое плоскопараллельное движение газа, исчерпывается законами сохранения для системы Чаплыгина. Найдены все законы сохранения нулевого порядка для системы Чаплыгина, среди которых содержатся как уже известные, так и новый нелинейный закон сохранения. Установлено, что число, как не зависящих от потенциала вектора скорости, так и не зависящих от функции тока, нелинейных законов сохранения первого порядка, которыми обладает система Чаплыгина, не более трех, и их компоненты квадратичны соответственно относительно функции тока и потенциала вектора скорости и их производных. Перечислены все функции Чаплыгина, для которых система Чаплыгина имеет три таких закона сохранения. Найдены эти законы сохранения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию №2014/138 (проект

435); гранта № НШ-2133.2014.1в рамках Программы Президента РФ по поддержке ведущих научных школ; РФФИ (проект 12-01-00648).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОБТЕКАНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЛУНКИ

А.Ю. Чулюнин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Проблема взаимодействия потока вязкой несжимаемой жидкости с луночными углублениями в течение многих лет привлекает внимание исследователей со всего мира. В немалой степени это связано с тем, что луночные поверхности являются эффективными интенсификаторами теплообмена, обладая при этом небольшим гидравлическим сопротивлением. В зависимости от отношения высоты к диаметру пятна (H/D) выделяют «мелкие» и «глубокие» лунки. Мелкие лунки, с отношением $H/D < 0.25$ характеризуются стационарным характером течения, в отдельных случаях являясь безотрывным. В экспериментах по изучению обтекания глубоких лунок наблюдается нестационарный режим, характеризуемый чередованием «левосторонней» и «правосторонней» несимметрией течения. С помощью дополнительных внешних воздействий можно зафиксировать один из несимметричных режимов, а также получить стационарный режим симметричного обтекания. Это дает основание предположить, что задача об обтекании глубокой лунки имеет три стационарных решения: одно симметричное неустойчивое и два несимметричных метастабильных.

В работе рассматривается канал прямоугольного сечения с лунками различной глубины. В качестве пассивного элемента управления для глубоких лунок введен выступающий с их дна плоский рецептор, ориентированный под различными углами к плоскости симметрии. Для моделирования турбулентного течения использовались методы RANS и DES. Разбиение расчетной области на контрольные объемы проводилось с использованием сетки многогранного типа со сгущением у поверхности лунки. Размерность сеточной модели варьировалась от 1.2 до 9 млн. ячеек в зависимости от метода решения и высоты лунки.

В результате вычислительных экспериментов с применением пассивных элементов управления воспроизведены три равновесных состояния обтекания одиночной лунки: один симметричный и два несимметричных. Использование метода DES для моделирования обтекания лунок без рецепторов позволило воспроизвести переключение режимов. Несимметричные режимы обтекания обладают примерно на 24% большим коэффициентом теплоотдачи лунки по сравнению с симметричным

режимом, однако при этом коэффициент гидравлического сопротивления возрастает на 33%.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-00985).

О СТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ РИЧЧИ

Ю.Д. Шевелев

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

В работе рассматриваются стационарные течения Риччи. Для изучения метрики пространств используется эволюционное уравнение, которое связывает изменение метрических коэффициентов в зависимости от тензора кривизны рассматриваемого пространства. Такой подход оказался удачным математическим инструментом для изучения структуры многомерных пространств. Методы, развитые при построении геометрических структур в многомерном пространстве, позволяют исследовать общие геометрические законы сохранения, включая уравнения механики сплошных сред. Один из главных результатов изучения течений Риччи состоял в доказательстве гипотезы Пуанкаре.

Тензор Римана–Кристоффеля обычно получают из условия перестановочности ковариантного дифференцирования, а тензор кривизны Риччи второго порядка, который входит в эволюционное уравнение, получается как свертка тензора Римана–Кристоффеля. Для того чтобы пространство было евклидово (т.е. существовала прямоугольная, прямолинейная система координат) необходимо и достаточно, чтобы тензор Римана–Кристоффеля тождественно равнялся нулю. В любом криволинейном 3-мерном пространстве величина тензора Римана–Кристоффеля имеет шесть независимых компонент, которые представляют дифференциальные уравнения в частных производных. Построены решения для ряда случаев. Если задать составляющие метрического тензора в виде, который соответствует выбору на поверхности изометрической системы координат, а третья координата выбирается вдоль вектора нормали, то решение построено в общем виде для классов произвольных аналитических функций. Такое же решение получено для более сложной метрики.

Развиваемые методы используются в задачах построения структурированных подвижных сеток в 3-мерном случае, для построения структурированных сеток в 4-мерном случае, для исследования фундаментальных проблем динамики многомерного пространства – времени.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

М.Э. Эглит¹, А.Е. Якубенко², Т.А. Якубенко²

¹Механико-математический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Рассматриваются природные потоки, движущиеся по склонам под действием силы тяжести, такие как снежные лавины, сели, быстрые оползни. Знание их динамических параметров и границ распространения необходимо для организации защиты различных объектов в горах. Склоновые потоки при движении захватывают материал, лежащий на склоне, в результате чего их масса может увеличиться в несколько раз по сравнению с начальной. Захват донного материала существенно влияет на их размеры, динамику и дальность выброса.

Большая часть существующих моделей основана на уравнениях, осредненных по глубине потока, аналогичных уравнениям теории мелкой воды. В этой работе мы строим и исследуем модели склоновых потоков, основанные на полных (не осредненных по глубине) уравнениях. Предполагается, захват донного материала происходит тогда, когда касательное напряжение на дне потока достигает значения предела прочности на сдвиг материала дна. Таким образом, при движении с захватом на дне ставится два граничных условия: условие прилипания (или проскальзывания) и условие на величину касательного напряжения. Это позволяет найти не только распределение скорости в потоке, но также вычислить его растущую со временем глубину. Важной частью исследования является выбор реологических уравнений движущейся среды. Как правило, природные склоновые потоки описываются различными моделями неньютоновских жидкостей.

Большая часть природных склоновых потоков являются турбулентными. В этой работе было проведено численное исследование нестационарных турбулентных движений с захватом донного материала с использованием трехпараметрической модели турбулентности, предложенной В.Г. Лушиком, А.А. Павельевым и А.Е. Якубенко (МЖГ, 3, 1978, 13–25.) для расчета движения жидкостей вдоль проницаемых и непроницаемых стенок в присутствии градиента давления, массообмена и других процессов. В склоновых потоках роль градиента давления играет сила тяжести. В частности, показано, что независимо от реологических свойств потока при движении с захватом по длинному однородному склону скорость и глубина потока при больших временах растут пропорционально времени, а скорость захвата донного материала стремится к константе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-08-00084, 12-08-01227, 12-01-00960).

ТЕЛА С МАКСИМАЛЬНЫМ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ КАЧЕСТВОМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Г.Е. Якунина

Государственный университет управления, Москва

При определенных допущениях на форму тела и характер взаимодействия сверхзвукового потока с поверхностью тела рассматриваются задачи построения оптимальных пространственных тел, обладающих максимальным аэродинамическим качеством. В предположении, что коэффициент давления на поверхности тела определяется углом между местной нормалью к поверхности тела и вектором скорости набегающего потока, построены тела с максимальным аэродинамическим качеством, имеющие при заданной подъемной силе фиксированный объем и заданную площадь донного сечения. Показано, что при постоянном коэффициенте трения оптимальное тело имеет плоскую наветренную поверхность, расположенную под углом атаки к невозмущённому потоку. Подветренная поверхность оптимального тела является цилиндрической с образующей параллельной вектору скорости невозмущённого потока. При заданном объеме направляющей цилиндрической поверхности оптимального тела в плоскости основания является дуга окружности, радиус и расположение центра которой зависят от изопериметрических условий. Показано, что при превышении критического значения объема у оптимального тела появляются боковые грани, параллельные плоскости симметрии. При разных условиях обтекания тела в зависимости от числа Маха и коэффициента трения проведен сравнительный анализ аэродинамического качества построенных форм с аэродинамическим качеством абсолютно-оптимального клина, являющегося решением задачи при отсутствии ограничений на габариты тела. Учитывая, что верхняя поверхность построенных оптимальных тел является поверхностью тока невозмущенного скачком уплотнения течения, что является характерной особенностью поверхности тел типа волнолетов, исследованы возможности увеличения аэродинамического качества волнолетов, обтекаемых с плоским скачком уплотнения, присоединенным к передним кромкам. При известных площади донного сечения и ограничениях на габариты тела при заданном режиме обтекания (заданы угол атаки, число Маха и коэффициент трения) найдена верхняя граница аэродинамического качества волнолета. При разных изопериметрических условиях и режимах обтекания даны рекомендации к построению волнолетов, аэродинамическое качество которых мало отличается от максимально возможного значения.

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ

Тезисы докладов XVII школы – семинара,
посвященной памяти академика Г.Г. Черного

и

55-летию со дня основания НИИ механики МГУ

20-30 августа 2014 года

Сочи, «Буревестник» МГУ

Технический редактор И.В. Топорнина

Подписано в печать 18.06.2014 г.

Бумага офсетная № 1

Объем 8 п.л.

Формат 60x90 1/16

Тираж 220 экз.

Издательство Московского университета
125009, Москва, ул. Б.Никитская, 5
Отпечатано на ризографе НИИ механики МГУ
119192, Москва, Мичуринский пр., 1