

**МГУ имени М.В.Ломоносова**  
**НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова**  
**Научный Совет РАН по механике жидкостей и газов**  
**Российский национальный комитет**  
**по теоретической и прикладной механике**

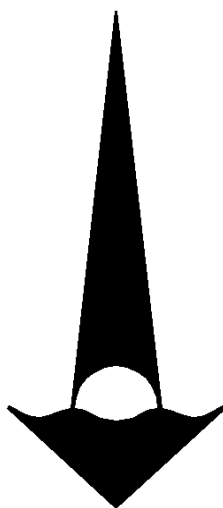
***СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ***  
***АЭРОГИДРОДИНАМИКИ***

**Тезисы докладов XVIII Всероссийской конференции,  
посвященной 60-летию Российского национального комитета  
по теоретической и прикладной механике**

**и**

**125-летию со дня рождения его первого председателя  
академика АН СССР Н.И. Мухелишвили**

**5 – 15 сентября 2016 г.**  
**Сочи, «Буревестник» МГУ**



**Издательство Московского университета, 2016**

УДК 16.3.4.1  
ББК 22.253.3  
С 56

## **ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:**

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

Конференция 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), Ю.А. Виноградов (МГУ, Москва), И.Г. Горячева (ИПМех, 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), А.И. Леонтьев (МГТУ, Москва), И.И. Липатов (ЦАГИ, Жуковский, Моск. обл.), В.В. Лунев (ЦНИИМаш, Королев, Моск. обл.), О.Э. Мельник (МГУ, Москва), Г.К. Михайлов (ВИНИТИ РАН, Москва), В.Я. Нейланд (ЦАГИ, Жуковский, Моск. обл.), Р.И. Нигматулин (ИО РАН, Москва), В.А. Полянский (МГУ, Москва), С.Т. Суржиков (ИПМех РАН, Москва)

**С56** **Современные проблемы аэрогидродинамики:** Тезисы докладов XVIII Всероссийской конференции, посвященной 60-летию Российского Национального комитета по теоретической и прикладной механике и 125-летию со дня рождения его первого председателя академика АН СССР Н.И. Мухелишвили. 5–15 сентября 2016 г., Сочи, «Буревестник» МГУ. – М.: Издательство Московского университета, 2016. – 110 с.

ISBN 978-5-19-011149-1

XVIII Всероссийская конференция «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 конференции – 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 978-5-19-011149-1

© Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Абдухакимов Ф.А., Веденеев В.В.</i> ОДНОМОДОВЫЙ ФЛАТТЕР ПЛАСТИН РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ПРИ МАЛОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ.....	11
<i>Агеев А.И., Азанов Г.М., Голубкина И.В.</i> ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ТЕКСТУРЫ СУПЕРГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, УДЕРЖИВАЮЩЕЙ ПУЗЫРЬКИ ГАЗА.....	12
<i>Акаев П.С., Алексаиов Д.Б., Измоденов В.В., Катушкина О.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ГЕЛИОСФЕРЕ.....	13
<i>Александров С.В., Ваганов А.В., Шалаев В.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВИХРЕЙ, ЗОН ВЫСОКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И РАННЕГО ПЕРЕХОДА В ГИПЕРЗВУКОВОМ ТЕЧЕНИИ ОКОЛО ТРЕУГОЛЬНОГО КРЫЛА .....	14
<i>Айрапетов А.Б., Катунин А.В., Стрекалов В.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КАРТИНЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И АВТОМОБИЛЬНОГО ПУТЕПРОВОДА НА УСТАНОВКЕ ПРЯМОГО ДВИЖЕНИЯ.....	15
<i>Алексаиов Д.Б., Голиков Е.А., Измоденов В.В.</i> ОБ ИСТЕЧЕНИИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ИСТОЧНИКА С АЗИМУТАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В СРЕДУ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ.....	16
<i>Алексаиов Д.Б., Измоденов В.В., Катушкина О.А.</i> РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ОБЛАСТЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА И МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ.....	17
<i>Алексеев М.В., Вожаков И.С., Главный В.Г., Куликов Д.А., Лежнин С.И., Меледин В.Г., Прибатурин Н.А.</i> ВОЛНЫ СЖАТИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ ИСТЕЧЕНИИ КИПЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПРЕГРАДОЙ.....	17
<i>Андронов П.Р., Арутюнян Г.С., Гувернюк С.В., Дынников Я.А., Дынникова Г.Я., Малахова Т.В., Сыроватский Д.А.</i> РАЗРАБОТКА СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БЕССЕТОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ЛАГРАНЖЕВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ УПРУГО СВЯЗАННЫХ ТЕЛ С ПОТОКАМИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ.....	18
<i>Афанасьев А.А., Султанова Т.В.</i> ДВУХМЕРНЫЕ АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ЗАКАЧКУ ГАЗА В ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ.....	19
<i>Балюкин И.И., Измоденов В.В., Катушкина О.А.</i> АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ МЕЖЗВЕЗДНОГО АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА НА КА И ВЕХ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	20

<b>Баранов В.Б.</b> ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМЕТНЫХ АТМОСФЕР С СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ.....	21
<b>Бельмецев Н.Ф., Чиркунов Ю.А.</b> ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ СТАТИЧЕСКОЙ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ УПРУГОЙ МОДЕЛИ.....	22
<b>Богданов А.Н.</b> ПОНЯТИЕ И ЯВЛЕНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ.....	23
<b>Боголепов В.В., Ермолаев И.К., Сухановская Л.Д.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОМАССОПОДВОДА НА ТЕЧЕНИЕ В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ .....	24
<b>Боголепов В.В., Нейланд В.Я.</b> АСИМПТОТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СХОДА ВИХРЕВОЙ ПЕЛЕНЫ С ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БЕГУЩЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ.....	25
<b>Бондарев В.О., Веденеев В.В.</b> ФЛАТТЕР КОНЕЧНЫХ И БЕСКОНЕЧНЫХ ПЛАСТИН ПРИ НАЛИЧИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА.....	26
<b>Боронин С.А., Зилонова Е.М., Осипцов А.А.</b> ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЫТЕСНЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ В ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА С УЧЕТОМ ПЛОТНОЙ УПАКОВКИ И МОБИЛИЗАЦИИ ЧАСТИЦ.....	27
<b>Боронин С.А.</b> НЕМОДАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ТЕЧЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ....	28
<b>Боронин С.А., Чупраков Д.А.</b> НОВАЯ МОДЕЛЬ МНОГОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА В ПРОЦЕССЕ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	29
<b>Брыкина И.Г.</b> АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НА ИДЕАЛЬНО КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ.....	30
<b>Бурцев С.А., Виноградов Ю.А., Киселёв Н.А., Стронгин М.М.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА И СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ, ПОКРЫТЫХ ЛУНКАМИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ.....	31
<b>Быховский Н.Д., Измоденов В.В.</b> ЗАДАЧА О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ХОЛОДНОГО ОБЛАКА И ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ В МЕЖЗВЁЗДНОЙ СРЕДЕ.....	32
<b>Валиев Х.В., Крайко А.Н.</b> ОТРАЖЕНИЕ ЦЕНТРИРОВАННОЙ ВОЛНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ ОТ ОСИ ИЛИ ЦЕНТРА СИММЕТРИИ.....	33
<b>Веденеев В.В., Зайко Ю.С., Юшутин В.С.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГИХ ТРУБОК НА ЛАМИНАРНЫХ И ТУРБУЛЕНТНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ.....	33
<b>Веденеев В.В., Порошина А.Б.</b> УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГОЙ ТРУБКИ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ЧЕРЕЗ НЕЁ НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ.....	34

<b>Вигдорovich И.И.</b> ТЕПЛОВОЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА ПЛАСТИНЕ. АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА И ЗАКОН ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВО ВСЕМ ДИАПАЗОНЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ЧИСЛА ПРАНДТЛЯ.....	35
<b>Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Попович С.С., Стронгин М.М.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН В ПОТОКЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА.....	36
<b>Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ.....	37
<b>Воробьев М.А., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Первунин К.С., Тимошевский М.В.</b> ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ТЕПЛООБМЕН ПУЗЫРЬКОВОГО ПОТОКА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ.....	38
<b>Воробьев М.А., Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАЗНОТЕМПЕРАТУРНОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТРОЙНИКОВОМ СМЕСИТЕЛЕ.....	39
<b>Гайфуллин А.М.</b> ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ОКОЛО ТЕЛ С ПОДВИЖНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ.....	40
<b>Ганченко Н.Ю., Ганченко Г.С., Демёхин Е.А.</b> К ТЕОРИИ МИКРОМАСШТАБНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА ОКОЛО ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	41
<b>Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г.</b> КУМУЛЯТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СТОЛКНОВЕНИИ ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ С ЛОКАЛЬНЫМИ АТМОСФЕРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ.....	42
<b>Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г.</b> ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С УЗКИМ СЛОЕМ ГАЗА ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	43
<b>Главный В.Г., Куликов Д.В., Меледин В.Г., Прибатурин Н.А.</b> ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДНО- И ДВУХ-ФАЗНЫХ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНЫХ ДАТЧИКОВ.....	44
<b>Голубкин В.Н., Сизых Г.Б.</b> НОВЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ.....	45
<b>Голубятников А.Н., Иванов О.О.</b> ЗАДАЧИ ПЛАВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, ДВИЖУЩИХСЯ В РАСПЛАВЕ.....	46
<b>Голубятников А.Н., Ковалевская С.Д.</b> ПОВЕДЕНИЕ РАЗРЫВОВ НА НЕОДНОРОДНОМ СТАТИЧЕСКОМ ФОНЕ: УСКОРЕНИЕ, ОПРОКИДЫВАНИЕ, ЗАТУХАНИЕ.....	46

<b>Горохова Н.В., Мельник О.Э.</b> ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ УСЛОВИЙ РОСТА КРИСТАЛЛА ПЛАГИОКЛАЗА ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЯМ ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	47
<b>Горячева И.Г.</b> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ Н.И. МУСХЕЛИШВИЛИ В МЕХАНИКЕ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ.....	48
<b>Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Симоненко М.М.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНЫ ПОД УГЛОМ АТАКИ.....	49
<b>Демьянов Ю.А., Малашин А.А.</b> ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ НА ПОПЕРЕЧНО-ПРОДОЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ РАСТЯНУТЫХ ТОНКИХ СТЕРЖНЕЙ И СТРУН.....	50
<b>Донской Д.В., Пушкарь Е.А.</b> ВЛИЯНИЕ РЕЗКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ НА МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ТЕЧЕНИЕ В МАГНИТОСЛОЕ.....	51
<b>Дорощенко И.А., Знаменская И.А., Мурсенкова И.В., Наумов Д.С.</b> УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПОТОК ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ.....	52
<b>Дудин Г.Н.</b> О ТЕЧЕНИИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ТРЕУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЕ НА РЕЖИМЕ СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.....	53
<b>Егорова Л.А., Лохин В.В.</b> ОЦЕНКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МЕТЕОРОИДА С КОНЦЕВОЙ ВСПЫШКОЙ.....	54
<b>Жаркова Г.М., Коврижина В.Н.</b> КОЛИЧЕСТВЕННАЯ И КАЧЕСТВЕННАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕЧЕНИЯ НА СТЕНКЕ КАНАЛА С ВЫСТУПАМИ МЕТОДОМ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ.....	54
<b>Жуков А.В.</b> ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА СТРУКТУРУ МЕЖФАЗНОГО СЛОЯ, ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ.....	55
<b>Журавлева Г.С., Пилюгин Н.Н.</b> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ОКОЛО ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ.....	56
<b>Зайко Ю.С., Решмин А.И., Сударикова А.Д., Тепловодский С.Х.</b> ФОРМИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ.....	57
<b>Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Новинская А.М.</b> ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ВОДЫ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ.....	58
<b>Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А.</b> НЕВЯЗКИЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВЫХ КОНИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ.....	59

<i>Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А.</i> V-ОБРАЗНЫЕ КРЫЛЬЯ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ.....	60
<i>Зудов В.Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ, ВЫЗВАННОГО ПОПЕРЕЧНЫМ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	62
<i>Измоленов В.В.</i> НОВЫЕ ЗАДАЧИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВЕЗДНЫХ ВЕТРОВ С МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДОЙ.....	63
<i>Измоленов В.В., Катушкина О.А., Минаев П.Д.</i> ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА НА ГРАНИЦЕ ГЕЛИОСФЕРЫ НА ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ.....	63
<i>Карсканов С.А., Липанов А.М.</i> О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВОЙКОЙ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ СХОДИМОСТИ ПРИ РАСЧЁТЕ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ.....	64
<i>Карцева Е.Ю., Коляда Е.О., Строилов А.В., Шманенков В.Н.</i> ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАРТИНЫ ОБТЕКАНИЯ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ НА ПАССИВНОМ УЧАСТКЕ СПУСКА ПРИ БОЛЬШОМ УГЛЕ АТАКИ.....	65
<i>Ковыркина О.А., Коробкин А.А., Остапенко В.В.</i> ВОЛНОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ПОДЪЁМЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО БРУСА ЧАСТИЧНО ПОГРУЖЁННОГО В МЕЛКУЮ ВОДУ.....	66
<i>Козлов И.И., Очеретяный С.А., Прокофьев В.В.</i> О РЕЗОНАНСНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ КАВИТАЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЯХ В ПРИСУТСТВИИ КАВЕРНЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ЧИСЛОМ КАВИТАЦИИ.....	66
<i>Козулин В.С., Третьяков П.К., Тупикин А.В.</i> ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СТАБИЛИЗАТОР ДЛЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ФАКЕЛА.....	67
<i>Колесников А.Ф., Сахаров В.И.</i> ТЕПЛООБМЕН В НЕДОРАСШИРЕННЫХ СТРУЯХ ГАЗОВ В ВЧ-ПЛАЗМОТРОНЕ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ НА УСЛОВИЯ ВХОДА ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ В АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ.....	68
<i>Коротаева Т.А., Турчинович А.О.</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУЙ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ГАЗООТБОЙНИКОМ НА ЭТАПЕ «ГОНКА ДВИГАТЕЛЕЙ».....	69
<i>Котелкин В.Д.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИКИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ.....	70

<i>Котелкин В.Д., Монахов А.А.</i> ГИДРОДИНАМИКА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ЦИЛИНДРОМ И ДВИЖУЩЕЙСЯ СТЕНКОЙ.....	71
<i>Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р.</i> ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ДВУМЕРНОМ ТЕЧЕНИИ КОМЕТНОГО ГАЗА.....	72
<i>Краснопольский Б.И., Никитин Н.В., Парамонов В.П.</i> СРАВНЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТОРЕ И ЗМЕЕВИКЕ...	73
<i>Куликовский А.Г.</i> О РАЗВИТИИ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СТАЦИОНАРНОМ СЛАБОНЕОДНОРОДНОМ ФОНЕ.....	74
<i>Лебедева Н.А., Синьков К.Ф.</i> ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ПРОНИЦАЕМЫХ УПРУГИХ Тел НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ.....	74
<i>Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.</i> ТРЕХМЕРНАЯ СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОГО СЕЧЕНИЯ...	75
<i>Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ЗА СЧЕТ ЭНЕРГИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА.....	76
<i>Леонтьев А.И.</i> НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА НА ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	77
<i>Липатов И.И.</i> НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ВЯЗКОГО ГАЗА.....	78
<i>Липницкий Ю.М.</i> НЕСТАЦИОНАРНОЕ ОБТЕКАНИЕ Тел, КОЛЕБЛЮЩИХСЯ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ.....	79
<i>Локшин Б.Я., Окунев Ю.М., Привалова О.Г., Самсонов В.А.</i> КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОПЕРЁННЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ Тел В ВОЗДУХЕ.....	80
<i>Лукашенко В.Т., Максимов Ф.А.</i> РАСЧЁТ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОЛЁТА ГРУППЫ МЕТЕОРНЫХ Тел В АТМОСФЕРЕ.....	80
<i>Лущик В.Г., Макарова М.С.</i> К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ НА ПРОНИЦАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ.....	81
<i>Любошиц Д.Б.</i> АННИГИЛЯЦИОННЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И АСТРОФИЗИКА.....	82
<i>Максимов Ф.А., Остапенко Н.А.</i> РОМБОВИДНЫЕ КРЫЛЬЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ.....	82
<i>Маслов С.А., Натяганов В.Л.</i> РОЛЬ ЗАРЯДОВОЙ СТРУКТУРЫ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА И АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ФОРМИРОВАНИИ И ДВИЖЕНИИ ВОРОНКИ ТОРНАДО.....	83
<i>Мельник О.Э., Уткин И.С.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	84
<i>Михайлов Г.К.</i> НИКОЛАЙ ТВАНОВИЧ МУСХЕЛИШВИЛИ И НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКЕ.....	85
<i>Мищенко А.В.</i> ЗАДАЧА ОБ ОБТЕКАНИИ СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ ПЛАНЕТ НЕ ИМЕЮЩИХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	86



<b>Монахов А.А., Полянский В.А., Панкратьева И.Л. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ И КАВИТАЦИОННОЕ СВЕЧЕНИЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТОНКОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ.....</b>	86
<b>Никитин Н.В. МЕТОД АНАЛИЗА РАСХОЖДЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОЛЕЙ (АРТП).....</b>	87
<b>Никитин Н.В., Пивоваров Д.Е. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ВСПЛЕСКОВ ПРИ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В НАКЛОННОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ.....</b>	88
<b>Никитин Н.В., Пиманов В.О. СТРУКТУРА ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОРЫВОВ В КРУГЛЫХ ТРУБАХ.....</b>	89
<b>Никитин Н.В., Попеленская Н.В. ТУРБУЛЕНТНЫЕ ВТОРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМЫХ НЕКРУГЛЫХ ТРУБАХ.....</b>	90
<b>Осипцов А.А. РАЗВИТИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ НЕФТЕСЕРВИСНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ.....</b>	91
<b>Панкратьева И.Л., Полянский В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВЯЗКОГО ЭФФЕКТА В УЗКОМ КОАКСИАЛЬНОМ КАНАЛЕ.....</b>	92
<b>Пилюгин Н.Н. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ КИНЕТИКИ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ КОНУСА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИНИЙ НАТРИЯ И МОЛИБДЕНА.....</b>	93
<b>Погосбемян М.Ю., Сергиевская А.Л. МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕРМИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ.....</b>	94
<b>Прокофьев В.В., Такмазьян А.К., Филатов Е.В. О МЕХАНИЗМЕ ПОЯВЛЕНИЯ ТЯГИ ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЛН С НАКЛОННОЙ ПЛАСТИНОЙ.....</b>	94
<b>Решмин А.И., Сударикова А.Д., Тепловодский С.Х., Трифонов В.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ В ДИФFUЗОРАХ С ПРОНИЦАЕМОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ.....</b>	96
<b>Решмин А.И., Сударикова А.Д., Тепловодский С.Х., Трифонов В.В. ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ПРЯМОМ КРУГЛОМ ДИФFUЗОРЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ ПРИ <math>Re &lt; 3000</math>.....</b>	97
<b>Селюцкий Ю.Д. РАЗЛИЧНЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЕДЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МАЯТНИКА.....</b>	98
<b>Смехов Г.Д., Шаталов О.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫХ СМЕСЕЙ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....</b>	98
<b>Толмачева К.И. НОВАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ В УПАКОВКЕ ПРОППАНТА.....</b>	99
<b>Третьяков П.К. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ.....</b>	100

<b>Фокеев В.П.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ НА СФЕРЕ С ИГЛОЙ В УДАРНОЙ ТРУБЕ.....	101
<b>Фокеев В.П.</b> ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ МАХОВСКОГО ПАРАДОКСА ОТРАЖЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН.....	102
<b>Фомичев В.П., Шипко Е.К., Ядренкин М.А.</b> ВЛИЯНИЕ МГД-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ЛОКАЛИЗОВАННОГО У ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ, НА ЕЁ ОБТЕКАНИЕ ГИПЕРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ...	103
<b>Чиркунов Ю.А.</b> ПОДМОДЕЛИ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ ДИФФУЗИИ С ПОГЛОЩЕНИЕМ.....	104
<b>Чулюнин А.Ю.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ОБТЕКАНИИ ЛУНОК В РАМКАХ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ ПОДХОДОВ.....	105
<b>Шалаев В.И.</b> О СИНГУЛЯРНОСТИ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ТРЕХМЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ОБЛАСТИ ПЛОСКОСТИ СИММЕТРИИ.....	106
<b>Шевелев Ю.Д.</b> К ТЕОРИИ ТРЕХМЕРНЫХ КВАЗИКОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ.....	107
<b>Якунина Г.Е.</b> ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕЛ С ОПЕРЕНИЕМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ.....	108
<b>Якунчиков А.Н.</b> МЕТОД СОБЫТИЙНОГО МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	109

# ОДНОМОДОВЫЙ ФЛАТТЕР ПЛАСТИН РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ПРИ МАЛОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ

*Ф.А. Абдухакимов, В.В. Веденеев*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

Исследуется устойчивость тонкой упругой пластины в однородном сверхзвуковом потоке идеального совершенного газа. Рассматриваются одиночные пластины, имеющие форму прямоугольника, трапеции и параллелограмма, шарнирно опертые по всем краям, а также серии прямоугольных пластин, шарнирно связанных друг с другом.

В докладе описывается метод расчета одномодового флаттера, при котором влияние потока газа на колебание пластины мало. Так как вещественная часть частоты и форма известна из расчета пластины в пустоте, то колебание пластины можно принудительно задать по собственной моде и решать нестационарную задачу аэродинамики при заданных колебаниях пластины. В результате решения вычисляется работа сил давления. Критерием флаттера при таком методе будет положительность работы, совершаемой давлением на периоде собственных колебаний пластины.

Газодинамический расчет проводится в Ansys CFX. Предварительно собственные частоты и формы для трапециевидных пластин и пластин в форме параллелограмма рассчитываются в Abaqus. Для собственных форм с помощью написанной программы строятся интерполяционные многочлены Лагранжа. С помощью этих многочленов рассчитанные формы колебания передаются в Ansys CFX. Результаты расчетов показали, что границы флаттера трапециевидных пластин близки к границам флаттера прямоугольных пластин и что границы флаттера пластин в форме параллелограмма при уменьшении острого угла начинают резко отличаться от границ флаттера прямоугольных пластин. Полученные результаты показывают, что придание панелям обшивок летательного аппарата форм параллелограмма может быть эффективным методом подавления одномодового флаттера.

# ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ТЕКСТУРЫ СУПЕРГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, УДЕРЖИВАЮЩЕЙ ПУЗЫРЬКИ ГАЗА

*А.И. Агеев<sup>1</sup>, Г.М. Азанов<sup>2</sup>, И.В. Голубкина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В стоковом приближении исследовано течение вязкой жидкости над текстурированной супергидрофобной поверхностью, имеющей полосчатые микрокаверны, в которых силой поверхностного натяжения статически удерживаются газовые пузырьки. Для двух режимов течения вычислена осредненная скорость скольжения жидкости, обусловленная наличием газовых пузырьков. Осредненная скорость скольжения (коэффициент скольжения) – важная для приложений характеристика супергидрофобной поверхности, ее величина входит в осредненное граничное условие проскальзывания Навье, связывающее осредненные касательную скорость и касательное напряжение, вычисленные на стенке. Использование стандартных конечно-разностных численных методов для нахождения осредненной скорости скольжения из решения задачи о течении вязкой жидкости над каверной с пузырьком затруднено в связи с необходимостью дискретизации уравнений движения и неоднородных граничных условий в области со сложной геометрией, содержащей межфазную границу. В проведенном исследовании осредненная скорость скольжения вычислена с использованием метода граничных интегральных уравнений, применяемого в стоковой гидродинамике.

Рассмотрены течение вязкой жидкости в канале над с прямой межфазной границей, вызванное перепадом давления, а также обтекание заданным сдвиговым потоком каверны с искривленной межфазной границей. Форма межфазной границы между жидкостью и газом найдена из условия непрерывности нормальных напряжений, учитывающего поверхностное натяжение, и определяется как в статике. Получены зависимости осредненной скорости скольжения от параметров текстуры: доли газового участка, формы межфазной границы и смещения межфазной границы внутрь каверны. Показано, что кривизна мениска, образованного межфазной границей и стенками каверны, приводит к резкому снижению осредненной скорости скольжения по сравнению с идеализированными текстурами с прямой межфазной границей. Смещение точек закрепления мениска со стенками внутрь микрокаверны также приводит к снижению осредненной скорости скольжения. Разработанный метод вычисления осредненной скорости скольжения применим для супергидрофобных поверхностей, содержащих микрокаверны произвольной формы. Найденные значения осредненной скорости скольжения могут быть использованы в макроскопическом

эффективном граничном условии проскальзывания Навье при осредненном описании течения вязкой жидкости вдоль супергидрофобной поверхности на масштабе длины, превышающем размер микрокаверн.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-31-00069 мол-а).

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ГЕЛИОСФЕРЕ**

*П.С. Акаев<sup>1,2</sup>, Д.Б. Алексашов<sup>2,3</sup>, В.В. Измоденов<sup>1,2,3</sup>, О.А. Катушкина<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Москва,

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва,

<sup>3</sup>Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Межзвездная пыль проникает в гелиосферу, и измерения параметров ее потоков осуществлялись в межпланетной среде различными космическими аппаратами. В процессе своего движения из межзвездной среды частицы пыли преодолевают границу гелиосферы — область взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой. Эффект фильтрации пыли в этой области значительно влияет на ее распределение внутри гелиосферы.

В этом докладе приводятся результаты численного моделирования распределения межзвездной пыли внутри гелиосферы и на ее границе. Частица пыли, движущаяся из межзвездной среды внутрь гелиосферы, подвержена действию нескольких сил. В модели учитываются сила гравитационного притяжения к Солнцу, сила радиационного отталкивания и электромагнитная сила Лоренца. Для вычисления распределения концентрации межзвездной пыли нами применен метод, основанный на использовании уравнения неразрывности в лагранжевой форме. Проводится сравнение эффективности этого метода и кинетических методов. Преимущество лагранжева метода состоит в возможности находить поверхности, на которых концентрация частиц пыли бесконечна. В реальности этим поверхностям должны соответствовать области накопления частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 14-12-01096).

# ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВИХРЕЙ, ЗОН ВЫСОКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И РАННЕГО ПЕРЕХОДА В ГИПЕРЗВУКОВОМ ТЕЧЕНИИ ОКОЛО ТРЕУГОЛЬНОГО КРЫЛА

*С.В. Александров, А.В. Ваганов, В.И. Шалаев*

ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Моск. обл.,  
Московский физико-технический институт, Жуковский, Моск. обл.

Рассмотрена проблема обтекания гиперзвуковым потоком вязкого теплопроводного газа треугольных крыльев с затупленными передними кромками, которые являются одним из элементов реальных и перспективных летательных аппаратов. В экспериментальных исследованиях в этом течении обнаружен ряд аномалий, которые до сих пор не получили своего объяснения: образование зон аномальных тепловых потоков и раннего ламинарно-турбулентного перехода на наветренной поверхности.

В статье представлены результаты подробных исследований ламинарного обтекания крыла на основе численных решений уравнений Навье-Стокса. С помощью анализа результатов указанные явления были связаны с образованием за головной ударной волной продольных вихревых структур и их взаимодействием с пограничным слоем на крыле. Проведен анализ механизма образования таких вихрей в переходной области от взрывного обтекания вершины к течению около передней кромки крыла. Показано, что образование повышенных тепловых потоков обусловлено конвективным переносом высокоэнтальпийного газа из внешней части пограничного слоя к поверхности крыла. Возникновение ламинарно-турбулентного перехода связано изменением профиля продольной скорости вследствие взаимодействия вихря с пограничным слоем – образованием точек перегиба на профиле продольной скорости и S-образным профилем поперечной скорости вдоль центра вихря. Эти эффекты могут вызывать развитие невязкой неустойчивости в пограничном слое, что может приводить к более раннему переходу, нежели волны Толлмина-Шлихтинга.

Полученные результаты являются новыми и представляют значительный интерес в аэротермодинамике высокоскоростных течений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 15-01-03615).

# ИССЛЕДОВАНИЕ КАРТИНЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И АВТОМОБИЛЬНОГО ПУТЕПРОВОДА НА УСТАНОВКЕ ПРЯМОГО ДВИЖЕНИЯ

*А.Б. Айрапетов<sup>1</sup>, А.В. Катунин<sup>1,2</sup>, В.В. Стрекалов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИМК ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Москва,

<sup>2</sup>Факультет аэромеханики и летательной техники МФТИ (ГУ), Жуковский,  
Моск. обл.

Течение, возникающее при движении тела относительно неподвижных объектов произвольной формы, при анализе возможности постановки задачи экспериментального моделирования, приходится, вообще говоря, отнести к классу практически нереализуемых в аэродинамической трубе. В связи с этим исследование структуры и характеристик течения, возникающего между движущейся моделью скоростного поезда (СП, масштаб в поперечном сечении 1:40) и неподвижной моделью пролета автопутепровода (АПП) с защитными экранами (ЗЭ) по краям АПП, проводились на установке прямого (не обращенного) движения «Скоростной гидростенд ЦАГИ» в конфигурации «с сухим дном» (геометрия канала 2x2x70 м). Модель СП устанавливалась на тележке стенда и проходила вдоль канала со скоростями в диапазоне  $V = 10 \div 20$  м/с, минуя неподвижные модели АПП и экрана, моделирующего поверхность железнодорожного полотна. Таким образом моделировался проезд СП под АПП. Поля скоростей и возникающие структуры такого течения изучались визуализационно-видеографическим методом с применением программных средств Open CV (эйлеровское представление) и ТЕМА (лагранжево). Параллельно для сопоставления характеристики поля скоростей в отдельных точках измерялись традиционным пневмометрическим методом с использованием трубки Пито-Прандтля. В процессе экспериментов также исследовались нестационарные распределения нагрузки – коэффициенты поля давления – в пятнадцати характерных точках нижней поверхности модели АПП и внешней поверхности ЗЭ (дренированная модель). Испытания показали существование ожидаемого автомоделного режима течения (независимость коэффициентов давления  $c_p$  от чисел Рейнольдса) начиная со скорости модели СП  $V \sim 15$  м/с. Для исследованной конфигурации показан высокий уровень пиковых величин  $c_p \sim 0,45$  и на ЗЭ  $c_p \sim 0,15$ , что при предполагаемой скорости движения СП = 400 км/ч в рассмотренной типовой конфигурации железнодорожного узла соответствует нагрузкам в несколько раз превосходящим, скажем, нормативные показатели ветрового нагружения (на ЗЭ по СНиП – 23 кг/м<sup>2</sup>, по результатам работы ~ 115 кг/м<sup>2</sup>) и сопоставимо с нагрузками на АПП автомобильного трафика.

# ОБ ИСТЕЧЕНИИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ИСТОЧНИКА С АЗИМУТАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В СРЕДУ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ

*Д.Б. Алексашов<sup>2,3</sup>, Е.А. Голиков<sup>1,2</sup>, В.В. Измоденов<sup>1,2,3</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва,

<sup>3</sup>Институт проблем механики РАН, Москва

Звёздный ветер представляет из себя гиперзвуковой радиальный поток плазмы, истекающий в среду с противодавлением — межзвёздное пространство. При таком истечении образуется ударная волна. Звёздный ветер является переносчиком магнитного поля, силовые линии которого в силу вращения звезды приобретают форму спирали — спирали Паркера. Магнитное поле при этом убывает обратно пропорционально расстоянию и не оказывает динамического влияния на течение в области перед ударной волной, поэтому им пренебрегают во многих моделях. Однако, в области за ударной волной магнитное поле напротив, растёт пропорционально расстоянию до оси вращения звезды, а значит, растут и магнитные силы, стремящиеся развернуть поток к оси вращения. Поток разворачивается, формируя поверхность раздела двух сред — звёздного ветра и межзвёздной среды, приводя к качественно отличной картине течения.

Рассматриваемая задача имеет три первых интеграла, позволяющие свести исходную систему уравнений газовой динамики к системе ОДУ в области вдалеке от звезды, а также вычислить расстояние до точки торможения звёздного ветра в экваториальной плоскости. Будет представлена техника, позволяющая по наблюдаемой геометрии структуры разрывов определить значение единственного безразмерного параметра задачи. Кроме того, будут также представлены результаты численных расчётов исходной задачи на подвижной двумерной сетке для различных значений этого параметра.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-12-01096.



## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ОБЛАСТЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА И МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ**

*Д.Б. Алексашов<sup>1,2</sup>, В.В. Измоденов<sup>1,2,3</sup>, О.А. Катушкина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва,

<sup>2</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва,

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

Пылевая компонента является неотъемлемой частью межзвездной среды и встречается в различных астрофизических задачах. В частности, измерение излучения от пылевой компоненты является одним из основных способов наблюдений и удаленной диагностики астросфер – областей взаимодействия звездных ветров с окружающей их межзвездной средой. В последнее время интерес к исследованию астросфер значительно возрос благодаря появлению множества изображений различных астросфер (в основном с телескопа *Herschel*). Причем, встречаются астросферы различных форм, которые свидетельствуют о различном характере взаимодействия звездного ветра и межзвездной среды. Однако, для корректной интерпретации имеющихся наблюдений необходимо иметь модель распределения пыли в астросферах (поскольку большинство изображений получены с помощью измерения интенсивности излучения звезды, рассеянного на пылевой компоненте). В данной работе представлены результаты численного моделирования распределения пыли для различных астросфер. Модель учитывает заряд пылинок и их движение в магнитных полях. Показано, что распределение пыли значительно зависит от гирорадиуса частиц и может быть существенно неоднородным. Приведено сравнение результатов расчетов с наблюдательными данными для нескольких астросфер.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-12-01096).

## **ВОЛНЫ СЖАТИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ ИСТЕЧЕНИИ КИПЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПРЕГРАДОЙ**

*М.В. Алексеев, И.С. Вожяков, В.Г. Главный, Д.А. Куликов,  
С.И. Лежнин, В.Г. Меледин, Н.А. Прибатурин*

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

В работе приводятся результаты расчетного и экспериментального исследования формирования волн сжатия при истечении вскипающей жидкости из трубопровода, вызванного его взрывным разрушением.

Эксперименты проведены для взрывного истечения из торца трубопровода нагретой до высоких температур воды (до 310 °С) находящейся под давлением до 22 МПа. Диаметр отверстия истечения 20 – 60 мм, истечение происходило в атмосферу. В ходе экспериментов фиксировались момент разрушения торцевого разрушения трубопровода, эволюция формирования истекающей струи, изменение давления в окружающем пространстве и внутри трубопровода, изменение паросодержания в струе вскипающей воды. В результате выполненных экспериментов установлены характерные стадии формирования в окружающем пространстве струи вскипающей жидкости, оценены изменения давления и паросодержания в поперечном сечении струи на различном расстоянии от места разрыва.

Проведенные эксперименты позволили обосновать физико-математическую модель процесса взрывного истечения перегретой жидкости, в том числе формирование ударных волн и их взаимодействие с преградой и провести расчетное исследование.

Выполнено численное моделирование образования ударных волн при торцевом разрыве трубопровода в сопряженной постановке расчета волновых процессов внутри трубопровода и в окружающей атмосфере. Расчетное исследование взрывного истечения при торцевом разрыве было проведено для воды, находящейся в трубопроводе различного диаметра 50 – 250 мм при высоких начальных давлениях 10 - 16 МПа и температурах 270 – 300 °С. Результаты расчета показали удовлетворительное соответствие картине истечения, зафиксированной в экспериментах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-29-00093).

## **РАЗРАБОТКА СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БЕССЕТОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ЛАГРАНЖЕВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ УПРУГО СВЯЗАННЫХ ТЕЛ С ПОТОКАМИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ**

*П.Р. Андронов<sup>1</sup>, Г.С. Арутюнян<sup>2</sup>, С.В. Гувернюк<sup>1</sup>, Я.А. Дынников<sup>1,2</sup>,  
Г.Я. Дынникова<sup>1</sup>, Т.В. Малахова<sup>1</sup>, Д.А. Сыроватский<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,  
<sup>2</sup>ЗАО «Т-Сервисы», Москва

Общей целью комплекса проводимых исследований является создание программного обеспечения для вычислительных технологий бессеточного моделирования (методами вязких вихревых и дипольных доменов) нестационарных взаимодействий вязкой несжимаемой среды с упруго связанными телами в полной сопряженной постановке задачи, при которой

сплошная среда и погруженные в неё твердые тела рассматриваются как единая динамическая система (без традиционного расщепления на последовательность динамических и гидродинамических подзадач).

Методика расчета нестационарных сило-моментных нагрузок при обтекании колеблющихся твердых тел обеспечивает определение мгновенных интегральных сил и моментов, действующих на твердое тело при его движении в вязкой жидкости, по параметрам состояния вихревого/дипольного поля, синхронизированного с мгновенными граничными условиями на теле. Разработанные алгоритмы и соответствующие вычислительные коды сохраняют работоспособность при исчезающе малой инерционности движущихся тел (вплоть до их нулевой массы и нулевого момента инерции), а так же – в условиях «граничных коллизий» при столкновении движущихся тел или их соприкосновении с ограничивающими поверхностями.

Представлены результаты тестирования экспериментальных образцов пяти специализированных модулей комплекса: «Взмах 2D» – для расчета аэродинамических характеристик при нестационарном обтекании колеблющегося гибкого крылового профиля в вязкой жидкости; «Взмах 3D» – для расчета обтекания машущей трехмерной пластины произвольной формы; «Мост» – для расчета вихревого флаттера и других видов колебаний тел, закрепленных в упругом подвесе в неограниченном потоке среды; «ГИС-2» – для моделирования интенсивных автоколебаний тел с шарнирными степенями свободы в стесненных потоках сплошной среды; «Насос» – для моделирования прокачки вязкой жидкости в разветвляющихся каналах за счет вынужденных колебаний упругого элемента.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП Министерства образования и науки РФ (соглашение 14.576.21.0079, проект RFMEFI57614X0079).

## **ДВУХМЕРНЫЕ АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ЗАКАЧКУ ГАЗА В ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ**

*А.А. Афанасьев, Т.В. Султанова*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Закачка газа в геологические пласты происходит в технологических процессах, связанных с созданием подземных хранилищ углеводородного газа, разработкой месторождений нефти и газа и при подземном захоронении углекислого газа в водонасыщенных пластах. Нагнетаемый через вертикальную скважину газ, как более лёгкая фаза, поднимается вверх, скапливаясь и растекаясь вдоль кровли пласта. При этом формируется сложное распределение насыщенности газа с косыми разрывами – фронтами

вытеснения. К настоящему моменту времени детально исследовано течение газа на удалении от скважины, а волновые процессы в призабойной зоне скважины остаются мало изученными.

В случае общего положения осесимметричное течение газа и пластовой жидкости, например воды, в окрестности вертикальной скважины зависит от времени и двух пространственных переменных – расстояния от скважины и глубины. В работе найдены нелинейные асимптотические решения задачи о закачке газа, зависящие только от двух автомодельных переменных, являющихся комбинациями отмеченных размерных переменных. Асимптотика строится в предположении значительной мощности пласта, если процессы у его подошвы не влияют на течение газа вдоль кровли. В предположении несмешивающегося изотермического вытеснения определены параметры подобия. Показано, что тип двухмерной волновой картины в окрестности скважины зависит только от двух безразмерных чисел и функций относительной фазовой проницаемости. Первое из безразмерных чисел есть отношение вязкостей пластового флюида и газа, а второе – сложное безразмерное отношение абсолютных проницаемостей породы в вертикальном и горизонтальном направлениях и других параметров задачи.

Рассмотрен более сложный случай неизотермической фильтрации с учётом фазовых переходов, т.е. с учётом растворением газа в пластовой воде и испарения воды в газовую фазу. Методом прямого численного моделирования закачки газа построены двухмерные автомодельные волновые конфигурации, содержащие волны Римана различного типа и несколько фронтов фазового перехода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-31-20585).

## **АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ МЕЖЗВЕЗДНОГО АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА НА КА ИВЕХ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

*И.И. Балюкин<sup>1, 2</sup>, В.В. Измоденов<sup>1, 2, 3</sup>, О.А. Катушкина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>3</sup>Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН, Москва

В 2015 г. были представлены первые количественные данные измерений потоков межзвездных атомов кислорода, третьего (после водорода и гелия) по космическому содержанию элемента в локальной межзвездной среде, на КА ИВЕХ (Park et al., ApJS, 2015). Качественный анализ этих данных показывает, что наряду с первичными межзвездными атомами кислорода была также измерена вторичная компонента межзвездных атомов. Эта компонента образуется в окрестности гелиопазы из-за перезарядки

межзвездных ионов кислорода с атомами водорода и ее существование в гелиосфере было ранее предсказано теоретически (Izmodenov et al, 1997).

Количественный анализ потоков межзвездного кислорода возможен только с помощью модели, которая учитывает, как фильтрацию первичного и рождение вторичного межзвездного кислорода в области взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, так и детальное моделирование движения межзвездных атомов внутри гелиосферы, учитывающее временную и гелиоширотную зависимость процессов ионизации и перезарядки на протонах солнечного ветра, а также силу солнечного гравитационного притяжения. В настоящей работе представлены результаты моделирования межзвездных атомов кислорода в области гелиосферного ударного слоя и внутри гелиосферы на основе новой трехмерной модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой (Izmodenov & Alexashov, 2015). Проводится сравнение результатов расчетов с данными, полученными на КА IBEX.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект14-02-00746).

## **ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМЕТНЫХ АТМОСФЕР С СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ**

*В. Б. Баранов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН, Москва,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва

Когда кометы находятся очень далеко от Солнца ( $>3$  а.е.), у них нет атмосферы. Комета представляет собой твердое тело, состоящее, главным образом, либо из замороженного углекислого газа, либо из водяного льда, либо из их смеси в разной пропорции. По мере приближения к Солнцу ее поверхность начинает нагреваться солнечной радиацией. При этом вокруг нее начинает образовываться атмосфера, состоящая из молекул испаряющегося газа. При отсутствии гравитации молекулярная атмосфера расширяется под действием градиента давления, образуя истечение потоков газа с ее поверхности. Наиболее сильные потоки образуются во время прохождения кометы через перигелий. Благодаря солнечной радиации происходит не только испарение нейтральных молекул, но и их фотоионизация, а также другие фотохимические процессы. Как результат, из кометы истекает частично ионизованная плазма, которая начинает активно взаимодействовать с солнечным ветром, представляющим собой сверхзвуковой поток полностью ионизованной водородной плазмы с вмороженным в него межпланетным магнитным полем.

Детальное экспериментальное исследование такого взаимодействия стало возможным при помощи приборов, устанавливаемых на космических

аппаратах. Ярким примером такого исследования являются пролеты космических аппаратов Vega-1, Vega-2, Giotto, Suisei и Sakigake вблизи кометы Галлея в марте 1986 года. В настоящее время уникальные эксперименты по исследованию кометы Чурюмова-Герасименко проводятся при помощи подлета к этой комете космического аппарата Rosetta, запущенного ESA в 2004 году и совершавшего вокруг ее поверхности маневры во второй половине 2015 года, когда комета проходила перигелий.

В представленной лекции проводится анализ теоретических моделей взаимодействия кометных атмосфер с солнечным ветром и сравнение их результатов с данными экспериментов, полученных при помощи космических аппаратов. Формулируются нерешенные еще задачи по усовершенствованию теоретических моделей для более адекватной интерпретации получаемых экспериментальных данных.

## **ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ СТАТИЧЕСКОЙ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ УПРУГОЙ МОДЕЛИ**

*Н. Ф. Бельмезев<sup>1</sup>, Ю. А. Чиркунов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет, Тюмень,

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Среди моделей линейной теории упругости выделяют модель трансверсально-изотропного упругого тела, позволяющую описывать поведение материалов, обладающих анизотропией упругих свойств. К таким материалам, например, можно отнести некоторые композитные материалы, слоистые горные породы, эффективное исследование которых является актуальной задачей, не укладывающейся в рамки классической линейной теории упругости. При модулях упругости, удовлетворяющих условию Гассмана, эта модель широко применяется в геофизике при исследовании распространения волн в трансверсально-изотропных упругих средах.

Выполнено групповое расслоение системы уравнений, описывающей статическую трансверсально-изотропную упругую модель при условии Гассмана. Построено общее решение автоморфной системы этого группового расслоения. Это решение является аналогом известной формулы Колосова-Мухелишвили. С помощью этой формулы можно получать точные решения исходной системы из решений более простой разрешающей системы этого группового расслоения. Для разрешающей системы найдена ее основная группа Ли преобразований и осуществлена классификация ее инвариантных решений ранга 2. Получены в явном виде некоторые инвариантные решения разрешающей системы, из которых с помощью решения автоморфной системы найдены нетривиальные трехмерные точные решения системы уравнений, описывающей статическую трансверсально-изотропную упругую модель при условии Гассмана. На конкретных примерах описан физический

смысл полученных решений. Разрешающая система имеет, кроме исследованных в статье, еще 23 существенно различных (не связанных точечными преобразованиями) инвариантных решения ранга 2. Кроме этого, построение оптимальной системы двухпараметрических и трехпараметрических подгрупп основной группы разрешающей системы позволит выполнить классификацию ее инвариантных решений рангов 1 и 0. Все это открывает новые возможности для получения точных решений разрешающей системы, а, следовательно, и системы уравнений, описывающей статическую трансверсально-изотропную упругую модель при условии Гассмана.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-01-00446 а).

## **ПОНЯТИЕ И ЯВЛЕНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ**

*А.Н. Богданов*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

К 1970-м годам теория возмущений развивалась, в основном, двумя путями: устранение особенностей модельных уравнений и использование фундаментальной концепции пограничного слоя. Оба пути оказались весьма перспективными.

В ряде случаев надлежащий анализ особенностей парадоксально позволял достичь значительного упрощения математического описания исследуемого явления.

Дальнейшее развитие теории пограничного слоя привело к созданию новых моделей –неклассических пограничных слоев, в первую очередь в этой связи укажем трехпалубную модель В.Я. Нейланда нестационарного свободного вязко-невязкого взаимодействия.

Трехпалубная модель показала себя весьма эффективным инструментом для исследования задач теории пограничного слоя. Вместе с тем, к настоящему времени выяснился сингулярный характер этой модели. Именно, при исследовании нестационарного трансзвукового взаимодействия для моделирования течения в области невязкого течения (верхней «палубе») традиционно использовалось уравнение Линя-Рейсснера-Цяня (ЛРЦ). Это уравнение, обладающее несомненными достоинствами (описывает и сверхзвуковую, и дозвуковую область трансзвукового течения, его неоднородный, нестационарный и нелинейный характер), однако, имеет недостатки, не позволяющие правильно описать распространение в потоке именно нестационарных возмущений: это уравнение является вырожденным гиперболическим уравнением и описывает распространение нестационарных возмущений в поле течения лишь отчасти (только вверх по течению). В этой

связи для исследования задач теории пограничного слоя с взаимодействием на трансзвуковых скоростях была предложена модифицированная модель. Модификация модели заключается в сохранении (т.е., возникающего естественным образом) в уравнении ЛРЦ при его выводе из полных уравнений для потенциала сингулярного (содержащего малый параметр) члена трансзвукового разложения со второй производной по времени. Полученное таким способом уравнение является невырожденным гиперболическим, его включение в математическую модель течения дает регулярную физическую картину поля течения и позволяет рассматривать возмущения, распространяющиеся во всех направлениях.

Использование концепции пограничного слоя привело к созданию эффективного аппарата сращиваемых асимптотических разложений, применимого не только для традиционных задач пограничных слоев у твердых поверхностей, но и в ряде других задач, например, существования и распространения нестационарных ударных волн. Примером такого рода могут служить нелинейные околорезонансные колебания газа в каналах различного устройства, возникающие при близости частоты внешних возмущений, падающих на открытый конец канала или вызываемых колеблющимся у конца канала поршнем, к частоте возможных собственных колебаний газа в канале и проявляющиеся как распространяющиеся по газу периодические ударные волны. По мнению автора настоящей работы, возникновение таких колебаний может являться одной из причин бафтинга – нестационарных колебаний ударных волн у поверхности летательных аппаратов при их движении в трансзвуковом диапазоне скоростей. Анализ особенностей существования околорезонансных колебаний показал, что в каналах, открытых с обоих концов, такие колебания возможны. Аналогичной такому каналу является область у поверхности летательного аппарата, которая выступает стенкой канала, концами такого канала могут быть геометрические границы тела, а также особенности течения. При этом околорезонансный бафтинг может развиваться как при наличии местных сверхзвуковых волн, так и при их отсутствии.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОМАССОПОДВОДА НА ТЕЧЕНИЕ В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ**

*В.В. Боголепов<sup>1</sup>, И.К. Ермолаев<sup>2</sup>, Л.Д. Сухановская<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Моск. обл.,

<sup>2</sup>НИИЯФ имени Д.В. Скобелыцына МГУ, Москва,

<sup>3</sup>НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Создание новых нетрадиционных способов снижения аэродинамического сопротивления летательных аппаратов (ЛА) остается актуальной проблемой. Поэтому продолжена разработка донных тепловых



генераторов (ДТГ), способных создавать донную тягу при частичном подводе тепловой энергии на боковую поверхность кормовой части тела вращения.

Экспериментальные исследования разработанной модели ДТГ с образцами оксидно-металлического порошкового композита новой модификации проведены на аэродинамической установке ГАУ (НИИ механики МГУ) при числе Маха  $M_1 = 6$ . Изучены теплофизические свойства продуктов горения аналогичных композитов и показано, что продуктом реакции горения композита является термическая пылевая плазма (ионизированный газ, содержащий частицы микронных и субмикронных размеров твердого вещества). Исследуемая модель ДТГ позволяет выбрасывать в донную область пылевую плазму под углом к оси тела вращения, так, чтобы оттеснить линию стекания в сторону набегающего потока и, тем самым, увеличить зону рециркуляции в донной области. Для усиления эффекта оттеснения линии стекания, на торце дна тела вращения крепились кольца-магниты, также отбрасывающие пылевую плазму во внешний поток, еще более увеличивая зону рециркуляции. Анализ полученных результатов показал, что время горения пылевой плазмы  $\sim 2$ с, относительное донное давление возрастает незначительно:  $\sim$  на 46%. Разработана модель ДТГ, где дополнительно через кольцевой зазор выбрасывается в сторону зоны рециркуляции пылевая плазма. Показано, что донное давление в этом случае превышает статическое давление  $\sim$  на 34%, что соответствует установлению донной тяги. Для увеличения зоны рециркуляции разработана модель ДТГ с отделяющимся дном. Дно тела вращения крепилось так, чтобы при горении пылевой плазмы оно отделялось и работало, как пластина во фронте пламени. При горении плазма занимает все донное пространство и распространяется на боковую поверхность кормовой части ДТГ, выходя из области ограниченной линиями стекания. Время генерации плазмы  $\sim 2.1$ сек. Наличие в донной области отделяющегося дна увеличивает донное давление по сравнению с закрепленным дном в 3.1 раза и в этом случае также реализуется донная тяга.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-01-07687).

## **АСИМПТОТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СХОДА ВИХРЕВОЙ ПЕЛЕНЫ 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).

## **ФЛАТТЕР КОНЕЧНЫХ И БЕСКОНЕЧНЫХ ПЛАСТИН ПРИ НАЛИЧИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА**

*В.О. Бондарев, В.В. Веденеев*

НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва

Изучается устойчивость упругой пластины в сверхзвуковом потоке газа. Эта задача изучалась в ряде работ по панельному флаттеру, где поток считается однородным без пограничного слоя. В данной работе исследуется влияние пограничного слоя.

В первой части работы изучается устойчивость упругой пластины, обтекаемой с одной стороны плоскопараллельным сверхзвуковым потоком сверхзвукового 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: пластина имеет прогиб  $z=Ae^{ia(x-ct)}$ , возмущение параметров потока  $\psi'(x, z, t) = \hat{\psi}(z)e^{ia(x-ct)}$ . Задача решается в плоской постановке. Течение считается ламинарным.

Исследуются невязкие возмущения, т.е. число Рейнольдса бесконечно большое. Такие возмущения описываются уравнением Рэлея. Уравнение движения пластины описывается уравнением Кирхгофа-Лява.

Во второй части работы исследуется глобальная устойчивость длинной (но конечной) упругой пластины, обтекаемой с одной стороны плоскопараллельным потоком вязкого совершенного газа с использованием критерия А.Г. Куликовского. Для поиска удовлетворяющих ему частот численно решается дисперсионное уравнение, связанное с данной задачей.

Вычислены зависимости скорости роста возмущений от толщины пограничного слоя для различных длин волн для выпуклого профиля скорости и для профиля скорости с точкой перегиба. Проведено сравнение с аналитическим решением для длинных волн, найден диапазон длин волн, при котором эти решения совпадают. Расчеты показывают, что при коротких волнах результаты вычислений дают инкременты роста, превышающие полученные в длинноволновом приближении.

Вычислены частоты конечной пластины, удовлетворяющие критерию А.Г. Куликовского для различных толщин пограничного слоя для выпуклого профиля и профиля с точкой перегиба. По аналогии с первой частью работы получены аналитические (для длинных волн) и численные (в общем случае) решения. Сделано сравнение полученных решений. В частности, результаты расчетов для выпуклого профиля скорости показывают, что для достаточно толстого пограничного слоя численное решение указывает на устойчивость, тогда как аналитическое решение дает область неустойчивости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта МД-4544.2015.1.

## **ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЫТЕСНЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ В ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА С УЧЕТОМ ПЛОТНОЙ УПАКОВКИ И МОБИЛИЗАЦИИ ЧАСТИЦ**

*С.А. Боронин<sup>1,2</sup>, Е.М. Зилонова<sup>1,2</sup>, А.А. Осипцов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

Для стимуляции добычи нефти или газа используется технология гидроразрыва, основанная на образовании трещин вследствие последовательной закачки неьютоновских жидкостей с твердыми частицами в скважину под высоким давлением. Как правило, гидроразрывная смесь это суспензия с частицами на основе водного раствора полимера, обладающая пределом текучести. В работе исследуется двумерная нестационарная модель

течения неньютоновских жидкостей с пределом текучести в трещине гидроразрыва, построенная в приближении тонкого слоя. Система определяющих уравнений включает уравнение переноса для объемной доли жидкостей и частиц, а также нелинейное эллиптическое уравнение для давления с граничными условиями смешанного типа. Система решается численно конечно-разностным методом. Эллиптическое уравнение для давления эффективно рассчитывается многосеточным методом. Рассматривается неустойчивость Сэффмана-Тейлора, возникающая на границе раздела жидкостей при вытеснении более вязкой жидкости посредством менее вязкой. Проведено сравнение с экспериментальными данными. Было выявлено три сценария вытеснения жидкостей в ячейке: гравитационное расслоение, пальцевидная неустойчивость и промежуточный случай. В модели учитываются эффекты бриджинга (формирования плотно упакованных частиц в трещине в ее самых узких местах) и мобилизации частиц. Учитывается также фильтрация жидкости через плотные упаковки частиц.

## **НЕМОДАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ТЕЧЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ**

*С.А. Боронин*

НИИ Механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,  
Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

В рамках модели эффективной (односкоростной) сплошной среды рассмотрена гидродинамическая устойчивость течения суспензии мелких неколлоидных частиц в плоском канале. В основном течении частицы распределены неравномерно в поперечном к потоку направлении в виде двух локализованных симметричных относительно оси канала слоев. Учет конечной объемной доли частиц приводит к модификации профиля скорости потока и неоднородности плотности суспензии. В число определяющих параметров задачи входит число Рейнольдса, отношение плотности материалов частиц и несущей фазы, средняя по ширине канала массовая концентрация частиц, ширина слоев частиц и координата максимума их концентрации. Линеаризованные уравнения Навье-Стокса сведены к задаче на собственные значения для амплитуд малых возмущений в виде нормальных мод. Численное решение проведено конечно-разностным методом при помощи QR-алгоритма.

Проведен параметрический анализ инкремента нарастания первой моды при заданной средней по ширине канала массовой концентрации частиц. Течение наиболее неустойчиво в рамках классической теории в случае, когда слои частиц находятся вблизи стенок. Уменьшение отношения плотностей

материалов фаз при фиксированных остальных определяющих параметрах приводит к усилению неустойчивости.

В докритической области течения (где все нормальные моды затухают) проанализирована зависимость кинетической энергии оптимальных возмущений от параметров потока. Даже при малой средней массовой концентрации частиц (один процент), кинетическая энергия оптимальных возмущений стратифицированного течения суспензии на два порядка выше таковой для потока чистой жидкости. Форма оптимальных возмущений стратифицированного течения суспензии соответствует «стрикам», вытянутым вдоль потока структурам. При фиксированной средней массовой концентрации частиц, энергия оптимальных возмущений течения суспензии усиливается при уменьшении отношения плотностей фаз. В отличие от потока неоднородно-запыленного газа с пренебрежимо малой объемной долей частиц и чистой жидкости, оптимальные возмущения суспензии зависят от координаты вдоль потока при распределении частиц вблизи стенок или оси канала.

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

## **НОВАЯ МОДЕЛЬ МНОГОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА В ПРОЦЕССЕ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ**

*С.А. Боронин, Д.А. Чупраков*

Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

Рассматривается двухфазная фильтрация сжимаемых ньютоновских жидкостей в плоской трёхмерной трещине гидроразрыва пласта, заполненной гранулированной средой (пропантом). Течение в трещине индуцировано двумя связанными механизмами: (1) притоком углеводородов через пористые стенки, проницаемость которых много меньше проницаемости трещины, и (2) упругим сжатием трещины. Приток через стенки описывается аналитически и получен в предположении линейного режима течения в породе для слабо- и сильносжимаемых пластовых флюидов. Упругие свойства пропанта, заполняющего трещину (проницаемость, пористость и толщина), зависят от сдвигающего напряжения на её стенках и локального давления жидкости. Процесс добычи таким образом, обусловлен сбросом давления жидкости на устье трещины и распространением сбрасываемого давления по всей её длине и высоте. Построенная модель учитывает конкуренцию двух процессов: интенсификации притока из пласта при сбросе давления и одновременного снижения проницаемости трещины. Отметим, что прежние модели, пренебрегающие упругостью трещины, могут серьёзно преувеличивать поток добычи.

При построении модели мы провели осреднение исходной системы уравнений Дарси по толщине трещины. Полученная система уравнений, описывающая двумерную двухфазную фильтрацию, содержит нелинейное параболическое уравнение относительно давления и уравнения переноса относительно насыщенностей флюидов. Изначально трещина зажимает проппант заданной толщины с гидроразрывной жидкостью под высоким давлением (меньше пластового). С течением времени, по мере сброса давления в трещине, её сжатие возрастает, а пористость и проницаемость снижаются.

Численное решение двумерной системы уравнений проведено на прямоугольной равномерной сетке конечно-разностным методом, для расщепления системы уравнений использован IMPES алгоритм. На основе численных расчетов безрамной задачи упруго-гидродинамического отклика трещины, мы провели параметрический анализ и изучили влияние упругих свойств проппанта на потоки флюидов из расчетной области, время вытеснения исходной жидкости и влияние нестационарности распределения давления в трещине на приток флюида через пористые стенки.

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

## **АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НА ИДЕАЛЬНО КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ**

*И.Г. Брыкина*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Рассматривается трехмерное гиперзвуковое обтекание затупленных тел при больших и умеренных числах Рейнольдса  $Re$ , соответствующих наиболее теплонапряженной части траектории спуска космических аппаратов. Разработанным методом получены приближенные аналитические решения уравнений тонкого вязкого ударного слоя (ТВУС) для совершенного газа для теплового потока, отнесенного к его значению в точке торможения, при  $Re \geq 20$  (число  $Re$  определяется по температуре торможения). Такие решения получены в задачах обтекания осесимметричных тел, затупленных крыльев большого удлинения под углами скольжения и атаки, плоскости симметрии и боковой поверхности трехмерных тел. Выражения для относительного теплового потока не зависят от числа  $Re$ , они зависят от геометрии тела, температуры стенки, числа Прандтля и угла скольжения (для крыльев), а для холодной стенки – только от геометрических параметров, инвариантных

относительно выбора системы координат. Аналитические решения хорошо согласуются с численными решениями уравнений ТВУС.

Получены имеющие более широкую область применимости, чем модель ТВУС, выражения для относительного теплового потока, зависящие не только от геометрии тела, но и от распределения давления по поверхности (которое можно брать из решения задачи невязкого обтекания или из аппроксимационных формул), хорошо согласующиеся с численным решением уравнений Навье–Стокса.

Сравнения аналитического решения с численными решениями уравнений ТВУС для многокомпонентного химически реагирующего газа для высот от 90 до 50 км траектории входа космических аппаратов в атмосферу Земли показали, что распределение относительного теплового потока на идеально каталитической поверхности слабо зависит от характера протекания химических реакций в ударном слое, включая замороженные, химически неравновесные и околоравновесные режимы течения, и хорошо описывается полученными формулами. Таким образом, зная тепловой поток в точке торможения сферы (для которого в литературе имеются различные аппроксимационные формулы), с помощью полученного аналитического решения можно рассчитать тепловой поток к идеально каталитической поверхности пространственных затупленных тел, обтекаемых сверхзвуковым потоком химически реагирующего газа.

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

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА И СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ, ПОКРЫТЫХ ЛУНКАМИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

*С.А. Бурцев<sup>2</sup>, Ю.А. Виноградов<sup>1</sup>, Н.А. Киселёв<sup>2</sup>, М.М. Стронгин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана, Москва

В данной работе представлено экспериментальное исследование процессов увеличения сопротивления и интенсификации теплоотдачи при обтекании поверхностей с различными типами лунок. Рассмотрены обычные сферические лунки и со скругленными кромками, каплеобразные лунки, оси которых расположены вдоль направления потока и под углом к нему, овальные лунки и лунки, полученные протяжкой сферы по дуге окружности.

Коэффициенты сопротивления определены путем прямого взвешивания поверхностей на плавающих элементах. Коэффициенты теплоотдачи определялись путем регистрации процесса нестационарного теплообмена и

решения трехмерного уравнения нестационарной теплопроводности с использованием полученных в эксперименте полей температур на исследуемых поверхностях. Число Рейнольдса, определенное по длине пластины менялось в диапазоне  $Re_x = 0.2 \cdot 10^6 - 7 \cdot 10^6$ .

Для указанных моделей получены локальные распределения коэффициентов теплоотдачи на поверхности, зависимости относительных коэффициентов сопротивления  $c_x/c_{x0}$  и теплоотдачи  $St/St_0$  от числа Рейнольдса  $Re_x$  и, соответственно, зависимости теплогидравлической эффективности (фактора аналогии Рейнольдса  $FAR = (St/St_0)/(c_x/c_{x0})$ ) от числа Рейнольдса  $Re_x$ .

Наибольшую теплогидравлическую эффективность  $FAR = 1.14$  имеет сферическая лунка со скругленными краями, максимальное значение  $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})^{1/3} = 1.18$  соответствует обычной сферической лунке. Минимальное значение теплогидравлической эффективности  $FAR = 0.80$  имеет поверхность с прямыми каплеобразными лунками, минимальное значение  $(St/St_0)/(c_x/c_{x0})^{1/3} = 1.05$  также соответствует каплеобразным лункам.

Полученные данные свидетельствуют о возможности опережающего роста интенсификации теплообмена по сравнению с ростом гидравлический потерь. Величина  $FAR > 1$  при малых числах Рейнольдса  $Re_x$  для всех моделей. Для сферических лунок  $FAR > 1$  во всем диапазоне рассмотренных чисел Рейнольдса. При этом найдена поверхность (сферическая лунка со скругленными кромками), для которой теплогидравлическая эффективность превышает теплогидравлическую эффективность обычной сферической лунки.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (проект 15-08-08428) и Совета по грантам Президента РФ (СП-1169.2015.1, МК-6025.2016.8).

## **ЗАДАЧА О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ХОЛОДНОГО ОБЛАКА И ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ В МЕЖЗВЁЗДНОЙ СРЕДЕ**

*Н.Д. Быховский<sup>1</sup>, В.В. Измоденов<sup>1,2,3</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва,

<sup>3</sup>Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского, Москва

Уже более полувека назад были получены первые сведения о неоднородности межзвёздной среды. Наличие ярко выраженных линий поглощения в получаемых спектрах на длине волны 21cm позволяет судить о существовании протяжённых областей холодного плотного атомарного водорода, окружённых горячей разреженной почти полностью ионизированной плазмой. Относительно долгое «время жизни» этих облаков свидетельствует о протекании в них ряда процессов, замедляющих их



испарение. Одним из подобных факторов можно считать процесс перезарядки на границе облака, заключающийся в обмене электроном между атомом водорода и протоном при их столкновении.

Атомы водорода и плазма рассматриваются в двухжидкостном приближении, обе среды считаются идеальными совершенными газами и описываются методами механики сплошной среды. Особый интерес представляет сравнительно малая область перезарядки на границе облака, что позволяет изучать одномерную плоскую задачу.

В докладе представлены результаты численного моделирования разными методами, дано качественное описание распределения параметров в области перезарядки.

## **ОТРАЖЕНИЕ ЦЕНТРИРОВАННОЙ ВОЛНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ ОТ ОСИ ИЛИ ЦЕНТРА СИММЕТРИИ**

*Х.Ф. Валиев, А.Н. Крайко*

ЦИАМ имени П.И. Баранова, г. Москва

Дано полное описание течения в окрестности точки отражения от оси и центра симметрии нестационарной волны разрежения из характеристик второго семейства, которая возникает при расширении цилиндрического или сферического объёмов, заполненных однородным покоящимся газом. Такое расширение возникает, например, при нестационарном разлёте газа в пустоту. Показано, что в сферическом случае в отличие от цилиндрического и плоского в окрестности точки отражения первой характеристики реализуется локально автотельное течение разрежения малой, но конечной интенсивности уже в самой точке отражения. Наряду с чисто теоретическим интересом учёт отмеченной особенности необходим для аккуратного расчёта течения сферического разрежения методом характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00146).

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГИХ ТРУБОК НА ЛАМИНАРНЫХ И ТУРБУЛЕНТНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ**

*В.В. Веденеев, Ю.С. Зайко, В.С. Юшутин*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Экспериментально исследуется неустойчивость упругой трубки при протекании внутри нее жидкости на ламинарном и турбулентном режимах течения. Упругая трубка с обоих концов присоединяется к жестким трубам.

Внешнее давление поддерживается постоянным, течение в трубке происходит под действием разности давлений на входе в упругую трубку  $p_1$  и на выходе из нее  $p_2$ . Перепад давления  $\Delta p = p_1 - p_2$  меняется посредством изменения давления на выходном конце трубки  $p_2$  и изменения расхода  $Q$ . Протекающая через трубку жидкость представляет собой воду (при исследовании турбулентного режима течения), раствор глицерина в воде с различными концентрациями (при исследовании ламинарного режима течения).

Экспериментально получены границы устойчивости для ламинарного и турбулентного режимов течения на плоскости  $(Q, \Delta p)$ . Показано, что при турбулентном течении самовозбуждающиеся колебания происходят следующим образом. После потери устойчивости при фиксированном расходе при увеличении  $\Delta p$  сначала трубка схлопывается два раза, после чего следует пауза, снова схлопывается два раза, после — пауза; при дальнейшем увеличении  $\Delta p$  последовательно происходят уже три пережатия, затем пауза; при дальнейшем увеличении — 4, 5, 6 и так далее до 10 последовательных схлопываний. После чего при определенном значении  $\Delta p$  устанавливаются одночастотные колебания. Для ламинарного режима течения одночастотные колебания устанавливаются практически сразу после потери устойчивости трубкой. Частота колебаний более существенно зависит от перепада давлений при фиксированном расходе в случае ламинарного течения. Также экспериментально получено, что амплитуда колебаний на турбулентном режиме больше амплитуды колебаний на ламинарном режиме течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантом МД-4544.2015.1.

## **УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГОЙ ТРУБКИ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ЧЕРЕЗ НЕЁ НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

*В.В.Веденеев, А. Б. Порошина*

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

Нестабильность упругих трубок была изучена теоретически и экспериментально исследована во многих работах, связанных с биологическим применением. Когда давление внутри трубки становится существенно ниже внешнего давления, трубка изменяет свою геометрическую форму и теряет осесимметричность, а перепад давления вдоль трубки увеличивается. Колебания упругих трубок, ранее наблюдаемых экспериментально и теоретически, связаны с неосесимметричным движением стенок трубки, в то время как осесимметричные возмущения упругих трубок при положительном понижающем давлении затухают.

До сегодняшнего дня исследовалось протекание только ньютоновских жидкостей в упругих трубках. Однако, существуют условия, при которых

кровь, желчь и другие биологические жидкости обладают неньютоновскими свойствами. В данной работе теоретически исследовалась устойчивость осесимметричных упругих трубок при протекании степенных жидкостей. Было показано, что при  $n=1$ , то есть для ньютоновских жидкостей, осесимметричные возмущения затухают. Тем не менее, при  $n < 0,611$  они могут расти, что предсказывает новый тип неустойчивости упругих трубок при протекании псевдопластичных жидкостей. При  $n < 1/3$  неустойчивость осесимметричных возмущений становится абсолютной и, тем самым, может наблюдаться в экспериментах.

## **ТЕПЛОВОЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА ПЛАСТИНЕ. АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА И ЗАКОН ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВО ВСЕМ ДИАПАЗОНЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ЧИСЛА ПРАНДТЛЯ**

*И.И. Вигдорович*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Предлагается рациональная асимптотическая теория, описывающая динамический и тепловой турбулентный пограничный слой на пластине при нулевом градиенте давления. Тот факт, что течение зависит от конечного числа определяющих параметров позволяет сформулировать алгебраические условия замыкания, которые связывают турбулентное касательное напряжение и турбулентный поток тепла с градиентами усредненной скорости и температуры. В результате точного асимптотического решения уравнений пограничного слоя получены известные законы стенки для скорости и температуры и законы дефекта скорости и температуры, а также выражения для коэффициента трения, числа Стантона и аналогии Рейнольдса. Последнее позволяет дать две новые формулировки закона дефекта температуры, одна из которых полностью аналогична закону дефекта скорости и не содержит числа Стантона и турбулентного числа Прандтля, а вторая – не содержит коэффициента трения на стенке. Получен закон теплопередачи во всем диапазоне молекулярного числа Прандтля, который связывает только тепловые величины. Выводы теории хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-01-00172).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН В ПОТОКЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

*Ю.А. Виноградов, А.Г.Здитовец, С.С.Попович, М.М. Стронгин*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Эффект газодинамического энергоразделения в потоке сжимаемого газа заключается в возникновении теплоперепада между дозвуковым и сверхзвуковым потоками газа, разделенными теплопроводной стенкой. Теплоперепад возникает за счет разности между температурой адиабатной стенки со стороны сверхзвукового потока и температурой стенки при дозвуковом обтекании, практически равной температуре торможения потока.

Наиболее ответственной частью устройства газодинамического энергоразделения, определяющей в конечном итоге его эффективность, является сверхзвуковой канал. Наличие сверхзвуковых скоростей движения потока в данном устройстве является одновременно и ограничивающим фактором при возможном внедрении устройства в промышленности. Любые несовершенства поверхности сверхзвукового канала могут стать причиной образования ударных волн и локальных отрывных зон. При этом в области взаимодействия ударной волны с пограничным слоем наблюдается значительное увеличение теплового потока через стенку, что может способствовать интенсификации теплопередачи в устройстве энергоразделения. С другой стороны результаты ранее проведенных исследований свидетельствуют о том, что в области падения ударной волны на стенку адиабатная температура локально увеличивается (в абсолютном значении на 2-3%), что уменьшает теплоперепад в устройстве энергоразделения. Данная работа посвящена выяснению влияния искусственно генерируемых ударных волн на эффект газодинамического энергоразделения потоков.

Экспериментальное исследование проводилось на воздушном прототипе устройства энергоразделения при варьировании числа Маха и температуры торможения на входе в установку, а также при прямооточной и противоточной схемах движения воздуха в дозвуковом и сверхзвуковом каналах устройства. Ударные волны генерировались с помощью установки кольцевых ребер в сверхзвуковом канале устройства. Величина энергоразделения на выходе из устройства сравнивалась с данными, полученными при работе установки без генераторов при одинаковых начальных параметрах газового потока. Исследования проводились с помощью тепловизионной камеры, термопар, датчиков полного и статического давления, современного оборудования автоматизации эксперимента National Instruments.

В результате исследования установлено, что ударные волны практически не оказывают негативного воздействия на эффект безмашинного энергоразделения. Температурный перепад на выходе из устройства с оребрением сверхзвукового канала оказывается практически таким же, как и в гладком канале. Этот результат может способствовать более активному внедрению устройства в промышленности, поскольку существенно снижается риск потери работоспособности устройства в случае непредвиденного возникновения ударных волн в сверхзвуковом потоке. Также получено, что режим противотока работы оребренного устройства энергоразделения оказывается эффективнее, чем проток. Эффект энергоразделения возрастает при увеличении числа Маха и начальной температуры торможения потока.

Работа выполняется при поддержке Совета по грантам Президента РФ (№ МК-6025.2016.8).

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ**

*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 энергоразделения газового потока, т.е. разделения потока на «холодную» и «горячую» части. Наиболее распространенные среди них - вихревые трубы Ранка-Хилша и резонансные трубы Гартмана-Шпренгера. Их безусловными достоинствами по сравнению с машинными методами являются: простота изготовления, высокая надежность, низкая инерционность, отсутствие систем смазки, возможность работать в широком диапазоне температур рабочего тела. Недостатки: существенно меньший термический КПД и высокие потери полного давления на выходе у горячего и холодного потоков.

В работе (Докл. РАН. 1997. Т.354. № 4) был предложен новый способ энергоразделения газового потока, позволяющий существенно снизить потери полного давления у холодного потока. 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 настоящей работе приводятся данные экспериментального исследования данного метода.

Энергоразделение происходит в устройстве идентичном теплообменному аппарату типа «труба в трубе», с той особенностью, что по внутреннему каналу поток движется со сверхзвуковой скоростью, а по внешнему с дозвуковой. При этом на входе в устройство потоки имеют одинаковую начальную температуру торможения. Варьировались, массовый расход воздуха по дозвуковой части, число Маха на входе в сверхзвуковой канал, начальная температура торможения потока, схема организации течения (противоточная, прямоточная) потоков. 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  $25^{\circ}\text{C}$ , а нагрева сверхзвукового потока  $-6^{\circ}\text{C}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№14-19-0069).

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ТЕПЛООБМЕН ПУЗЫРЬКОВОГО ПОТОКА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ**

*М.А. Воробьев, А.С. Курдюмов, П.Д. Лобанов,  
К.С. Первунин, М.В. Тимошевский*

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

К числу основных режимов движения газожидкостной смеси в вертикальной трубе относятся пузырьковый, снарядный, дисперсно-кольцевой. Течение двухфазной смеси в пузырьковом режиме происходит при малых значениях объемного газосодержания. Структура пузырькового течения зависит как от ориентации канала и направления течения, так и от формы канала. Наибольшее число экспериментальных исследований пузырькового течения выполнены в вертикальной круглой трубе как в восходящем, так и в опускном режимах течения. В то же время большой научный и практический интерес представляет течение в каналах более сложной геометрии, в частности, в кольцевом канале. Количество экспериментальных исследований пузырькового течения в кольцевом канале ограничено, основное внимание в них уделено изучению характеристик газовой фазы (локальное газосодержание, скорость пузырей, удельная поверхность раздела фаз).

Задачей настоящей работы явилось экспериментальное исследование локальных характеристик восходящего пузырькового течения в кольцевом канале.

Эксперименты проводились на установке, представляющей собой замкнутый по жидкости циркуляционный контур. Рабочим участком контура является вертикальная труба из оргстекла внутренним диаметром 42 мм и длиной 3,2 м. В эту трубу вставлена центральная труба с внешним диаметром 20 мм и длиной 2,9 м. Восходящее течение газожидкостной смеси происходило в кольцевом зазоре, образованном этими трубами. Расход жидкости контролировался с помощью ультразвукового расходомера. Для подачи газа использовался контроллер расхода газа производства Bronkhorst. С помощью современных измерительных методов получены данные о распределении локальных гидродинамических характеристик для жидкой и газовой фаз, а также теплообмене между нагреваемой стенкой канала и пузырьковым потоком.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№15-38-21040\_мол\_а\_вед).

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАЗНОТЕМПЕРАТУРНОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТРОЙНИКОВОМ СМЕСИТЕЛЕ**

*М.А. Воробьев<sup>1</sup>, О.Н. Кашинский<sup>2</sup>, А.С. Курдюмов<sup>1</sup>,  
П.Д. Лобанов<sup>1</sup>, Н.А. Прибатурин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск,

<sup>2</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Повышение эффективности и безопасности работы ядерных реакторов требует постоянного совершенствования теплогидравлических расчетных кодов. Разработка и верификация таких кодов невозможна без экспериментальных данных о структуре течения в конструктивных элементах реакторов.

Дальнейшее развитие атомной энергетики связано с активным использованием жидкометаллических теплоносителей. Физические свойства этих теплоносителей существенно отличаются от свойств воды, используемой в реакторах типа ВВЭР. Детальное исследование термогидравлики течений жидкометаллических теплоносителей проводилось несколько десятилетий назад как в России, так и за рубежом. К сожалению, в последние годы такие исследования проводятся в очень ограниченном объеме. В то же время развитие расчетных кодов невозможно без новой экспериментальной

информации о структуре течений жидкометаллических теплоносителей, полученной с использованием современной экспериментальной техники.

В задачу данной работы входило экспериментальное исследование процесса смешения жидкометаллического теплоносителя в Т-образном тройнике с целью получения надежных опытных данных о распределении температуры на стенке смесителя и в перемешивающемся потоке.

Приведены результаты экспериментального исследования структуры температурного поля в сечении трубы при течении жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе. Температура жидкости в основном подводе была 120°C, в боковом подводе 150°C. Эксперименты проведены с использованием сплава Розе в качестве рабочей жидкости. Для определения распределения температуры стенки рабочего участка использована инфракрасная термография. Для определения распределения температуры в сечении канала использовалась подвижная микротермопара. Получены поля температуры стенки и профили температуры жидкости в зоне смешения для разных расходов "горячей" и "холодной" жидкости. Показана значительная неравномерность распределения температуры в зоне смешения потоков жидкости различной температуры как на стенке трубы, так и в расплаве теплоносителя. Получена база экспериментальных данных, которая успешно применяется для верификации отечественных кодов нового поколения.

## **ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ОКОЛО ТЕЛ С ПОДВИЖНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

*А.М. Гайфуллин*

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

Рассматриваются две задачи. Первая задача об обтекании пластины с подвижной поверхностью была поставлена выдающимися механиками Дж. Б. Клемпом, А. Активосом и Г.Г. Черным, которые решили эту задачу только при относительно небольшой скорости движения поверхности. В докладе в рамках модели несжимаемой жидкости приводится асимптотическое решение задачи об обтекании полубесконечной пластины. В зависимости от относительной скорости движения поверхности пластины определены схемы рециркуляционного течения. Показано, что при скоростях движения поверхности не превосходящих скорости набегающего потока, около подвижной поверхности происходит отрыв пограничного слоя. В зависимости от относительной скорости движения поверхности строятся также модели рециркуляционного течения при обтекании конечной пластины. Среди этих моделей отметим стационарные, которые наблюдаются при скоростях движения поверхности пластины не более, чем в два раза больших скорости набегающего потока, и автотельные при больших



скоростях. Численно исследуется проблема устойчивости рециркуляционного течения.

Вторая задача о взаимодействии вихря с плоскостью. Вихрь при этом перпендикулярен плоскости. Постановка данной задачи связана с многими именами, среди которых выделим Дж.И. Тейлора, М.А. Гольдштика и Дж. Серрина. После работы Дж. Серрина стало ясно, что особенность в окружной скорости является причиной более слабой логарифмической особенности в скорости вдоль оси вихря. Решение задачи в рамках модели вязкой жидкости оказалось неоднозначным - существующим в достаточно широком диапазоне коэффициентов при логарифме. Осталось не определенным, какое из решений реализуется при заданных параметрах течения. В данной работе вихрь моделируется вращающимся цилиндром с нулевым или конечным радиусом. Показано, что предельное решение о течении около цилиндра конечного радиуса при стремлении этого радиуса к нулю, не соответствует решению задачи о вращающемся цилиндре нулевого радиуса. Также показано, что каждому коэффициенту при логарифме в постановке Дж. Серрина можно поставить в соответствие физическую задачу, где данное течение будет реализовано. Таким образом, вопрос о выборе коэффициента при логарифме должен доопределяться рассмотрением физической реализации вихревого течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-01-00128).

## **К ТЕОРИИ МИКРОМАСШТАБНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА ОКОЛО ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*Н.Ю.Ганченко<sup>1</sup>, Г.С.Ганченко<sup>2</sup>, Е.А.Демёхин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Кубанский государственный университет, Краснодар,

<sup>2</sup>Краснодарский филиал Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, Краснодар

Исследуется поведение электролита около биполярной ионообменной мембраны в микромасштабах под действием нормального к мембране электрического поля. Биполярная мембрана представляет собой комбинацию катион-обменной и анион-обменной мембран. Большое электрическое напряжение в зазоре между мембранами приводит к более интенсивной, чем в мономембранах, диссоциации воды,  $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$ , поэтому биполярные мембраны находят широкое применение в химической промышленности. Однако процессы, происходящие в окрестности биполярных мембран, до сих пор недостаточно изучены.

Для исследования описанных выше явлений рассмотрена трехслойная система электролит-мембрана-электролит. В основе математической модели изучаемых явлений лежит система нелинейных уравнений Нернста–Планка–

Пуассона–Стокса, в которую также включены уравнения транспорта ионов диссоциированной воды с источниковыми слагаемыми.

Численно обнаружено, что наибольшая диссоциация воды происходит на стыке двух мембран. Поток ионов воды не только увеличивает суммарный электрический ток через систему, но и приводит к эффекту экзальтации. Включение в модель эффекта Вина позволяет объяснить появление в системе режима сверхпредельных токов, который наблюдается в экспериментах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 14-08-00789 а, 16-48-230107 р\_а).

## **КУМУЛЯТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СТОЛКНОВЕНИИ ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ С ЛОКАЛЬНЫМИ АТМОСФЕРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ**

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

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Выполнено численное исследование взаимодействия обтекаемых сверхзвуковым потоком затупленных тел с локальными атмосферными неоднородностями – газовыми пузырями пониженной или повышенной плотности.

Обнаружен эффект кумуляции, который проявляется во внезапном повышении давления и плотности в критической точке тела. Так при числе Маха набегающего потока 2 для пузырей пониженной плотности зафиксированы 2-х – 3-х кратные пиковые значения давления, а для пузырей повышенной плотности – 20-ти – 30-ти кратные. Показано, что основной причиной внезапного повышения давления и плотности в критической точке тела является предшествующая ей фокусировка поперечных ударных волн в малом объеме на оси симметрии течения.

Установлено, что быстропротекающий процесс фокусировки в целом согласуется с известными сценариями фокусировки для взаимодействия плоской ударной волны с газовыми пузырями с учетом некоторой специфики, обусловленной наличием тела. Для газовых пузырей пониженной плотности в соответствии с «дивергентным» сценарием взаимодействия реализуется режим «слабой фокусировки» вторичной тороидальной ударной волны сходящейся к оси симметрии. Для газовых пузырей повышенной плотности реализуется режим «сильной фокусировки». В этом случае в соответствии с «конвергентным» сценарием взаимодействия головная ударная волна огибает пузырь, и в результате реализуется схлопывание в очень малой области на оси симметрии сильной ударной волны, которое сопровождается формированием тонких сверхзвуковых кумулятивных струй.

Проведено параметрическое исследование взаимодействия тел с эллипсоидальными газовыми пузырями различной плотности, размера и удлинения. Показано, что для создания наилучших условий для фокусировки поперечных ударных волн, и, соответственно, достижения наибольшей кумуляции размеры пузыря должны быть порядка расстояния отхода головной ударной волны на центральной линии тока, а его форма – близка к сферической.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ (номер государственной регистрации темы АААА-А16-116021110195-4) при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00891-а), Российского научного фонда (проект 14-01-00773) и Совета по грантам Президента РФ (проект НШ-8425.2016.1).

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С УЗКИМ СЛОЕМ ГАЗА ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

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

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Численно исследуется задача о взаимодействии ударной волны с продольным плоским слоем или цилиндрическим каналом конечной ширины, заполненным газом повышенной температуры. Для такого взаимодействия характерно формирование и неограниченный рост газодинамического «предвестника» – крупномасштабной ударно-волновой структуры, обгоняющей фронт исходной волны.

В работе проведено численное моделирование течения с использованием подробных расчетных сеток и на больших временных интервалах. Описана газодинамика течения, обнаружены новые газодинамические элементы течения: высоконапорные струи с волновой внутренней структурой и слоистые вихри. Проверена высказанная ранее в литературе гипотеза о линейном, «почти автомодельном» характере роста предвестника. Выявлено, что на некотором отрезке времени рост предвестника действительно линейен, однако позднее линейность процесса нарушается и рост существенно замедляется за счет эффекта запираания потока и развития крупномасштабной завихренности за его фронтом.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ им. М.В.Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В.Ломоносова при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (НШ-8425.2016.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (14-01-00891-а, 16-31-00111-мол\_а).

## **ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДНО- И ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНЫХ ДАТЧИКОВ**

*В.Г. Главный, Д.В. Куликов, В.Г. Меледин, Н.А. Прибатурин*

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

При всех преимуществах бесконтактных методов изучения процессов переноса (визуализация потоков, LDA, PIV, томографические методы) их применение не всегда возможно либо затруднено. В таких случаях используют контактные методы изучения процессов переноса. Среди широкого множества контактных методов можно выделить методы, основанные на измерениях электрических свойств среды. При этом процессу тепломассообмена сопоставляют процесс изменения электрических свойств среды. Изменения электрических свойств могут быть естественными, что происходит в многофазных потоках или модельными, для чего используются электрически контрастные маркеры в однофазных потоках. Изучая локальные изменения электрических свойств жидкости можно восстановить характеристики процессов тепло и массообмена. Одним из таких методов является метод локальной регистрации электрических свойств среды на основе кондуктометрических зондов сеточного типа. Метод измерения основан на одновременной регистрации локализованных электрических параметров среды в множестве измерительных узлов, которые сформированы по сеточному принципу. Сеточный датчик образован двумя сетками из параллельных проводников. Пространственные пересечения проводников формируют множество узлов, импеданс которых зависит от свойств среды в которую помещен датчик. Измерив импеданс всех узлов можно получить одномоментный пространственный срез кажущихся электрических свойств среды. Результатами измерений являются значения электрической емкости и проводимости, связываемые с локальными параметрами течения жидкости, такими как плотность, газосодержание, перенос массы, скорость. Метод изучения процессов тепломассопереноса с помощью электроимпедансного сеточного датчика обладает хорошей пространственной и временной локализацией. Скорость измерения может достигать десятков тысяч измерений за секунду, что позволяет исследовать вихревые и нестационарные процессы при высоких скоростях исследуемых потоков жидкости.

Приводится обзор выполненных измерений одно и двухфазных течений и их структурной интерпретации.

# НОВЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

*В.Н. Голубкин<sup>1,2</sup>, Г.Б. Сизых<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Моск. обл.,

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Моск. обл.

Представлен ряд новых свойств течений вязкой несжимаемой жидкости, имеющих значение для понимания структуры течения, а также для построения эффективных алгоритмов и верификации результатов численных расчетов.

Для плоских и осесимметричных течений вязкой жидкости обнаружено семейство U-линий (поверхностей), вдоль которых сохраняется постоянной функция Бернулли. Установлена связь формы этих линий с распределением скорости и завихренности. Тем самым получен интеграл уравнений Навье-Стокса, что представляет собой обобщение известного интеграла Бернулли для уравнений Эйлера в идеальной жидкости, который выражает свойство сохранения функции Бернулли вдоль линий тока. Показано, что вдоль тех же U-линий происходит перенос завихренности потока. Это послужило основой для последующей разработки зарубежными и отечественными авторами несеточных методов расчета вязких вихревых течений.

Новые результаты получены и для общего случая пространственного течения вязкой жидкости. Опираясь на теорему Хопфа, известную в теории дифференциальных уравнений, обоснован принцип максимума, согласно которому функция Бернулли достигает наибольшего значения на границе области течения. При этом ее наименьшее значение может достигаться внутри области. Показано, что оператор Лапласа от давления обращается в нуль на обтекаемой твердой поверхности. Это свойство было использовано для тестирования расчетов вязкого обтекания цилиндра при больших числах Рейнольдса.

Применение следствия из упомянутой теоремы Хопфа, позволило также дать более простую в применении, чем в книге Дж. Серрина, формулировку принципа максимума давления в вихревых плоскопараллельных течениях идеальной несжимаемой жидкости: если такое течение происходит в отсутствие массовых сил, и во всех внутренних точках рассматриваемой области скорость жидкости отлична от нуля, то давление либо постоянно, либо его максимум и минимум достигаются на границе и только на границе области. Возможность существования внутренних точек экстремума давления подтверждена новыми примерами точных решений уравнений Эйлера для течения с одной и пятью внутренними точками торможения. Указан также пример реализации промежуточных значений давления во внутренних точках торможения.

## **ЗАДАЧИ ПЛАВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, ДВИЖУЩИХСЯ В РАСПЛАВЕ**

*А.Н. Голубятников, О.О. Иванов*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

Рассматриваются задачи, связанные с изучением движения одной, двух или континуума плавящихся частиц в собственном расплаве. В рамках идеальной жидкости ранее (А.Н. Голубятников, 2011) были найдены в главном приближении поля скоростей для одной и двух взаимодействующих частиц, а также силы, действующие на них, вызванные плавлением другой частицы, движением жидкости на бесконечности и полем температуры. При относительно медленном движении плавящихся частиц задача решена в приближении Стокса и Озеена. Вычислены действующие на частицу силы. Обсуждается теория броуновского движения плавящейся частицы.

С использованием этих результатов в рамках континуальной теории идеальной смеси решена одномерная задача о частичном плавлении твердого тела.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-01-0056).

## **ПОВЕДЕНИЕ РАЗРЫВОВ НА НЕОДНОРОДНОМ СТАТИЧЕСКОМ ФОНЕ: УСКОРЕНИЕ, ОПРОКИДЫВАНИЕ, ЗАТУХАНИЕ**

*А.Н. Голубятников, С.Д. Ковалевская*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Рассматривается одномерная нестационарная задача о движении плоской ударной волны (УВ), вызванной, например, движением поршня, по произвольному статическому фону. Газ считается совершенным, движение — адиабатическим. Равновесный фон может быть создан гравитационным или электрическим полями.

Задача решается путем разложения закона движения газа и давления в ряды Тейлора по специальной временной переменной, равной нулю на УВ, с коэффициентами, зависящими от массы слоя газа. В результате эти коэффициенты последовательно определяются как рациональные функции скорости движения УВ по массе, начального фона и их производных. Затем производится отыскание коэффициентов ряда для времени движения УВ через движение поршня. Доказывается однозначная разрешимость этой процедуры.

Препятствием к построению таким способом решения служит появление малого знаменателя, когда мы имеем дело со слабой УВ. В этом

случае сначала решается задача о движении слабого разрыва. Тогда для ускорения газа на УВ получается дифференциальное уравнение Риккати, которое явно интегрируется с определением произвольной постоянной по начальному ускорению поршня. Причем все последующие уравнения для определения высших производных по времени линейны. Если начальное ускорение поршня положительно, то со временем возможно опрокидывание слабого разрыва. Для слабых разрывов всех высших порядков, когда ускорение газа на УВ равно нулю, опрокидывания решения на фронте нет.

Затем решение для слабого разрыва используется для исследования асимптотики поведения слабой УВ (с малой начальной скоростью поршня). Установлен критерий затухания или роста ее амплитуды. Последние результаты обобщаются на пространственные задачи, связанные с движением расширяющегося поршня, в частности, на случаи цилиндрических и сферических волн. Для однородного фона отсюда следуют все классические результаты по затуханию УВ, причем с явным указанием коэффициентов, связанных с движением поршня.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-01-00056, 15-01-00361).

## **ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ УСЛОВИЙ РОСТА КРИСТАЛЛА ПЛАГИОКЛАЗА ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЯМ ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Н.В. Горохова, О.Э. Мельник*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Кристалл плагиоклаза – одного из породообразующих минералов – часто содержит примесные элементы в своём составе, в частности, стронций и барий. Их концентрации в кристалле, в отличие от основных компонент (таких, как анортит и альбит), малы и не участвуют в стехиометрическом соотношении, но при этом существенно зависят от изменения температуры, давления магмы и концентраций основных компонент. Распределение элемента-примеси в кристалле может служить дополнительным источником информации для определения условий роста кристалла. Для воспроизведения изменения давления и температуры в процессе подъема магмы по известным распределениям в кристалле основных компонент и элементов-примесей (которые могут быть найдены при исследовании реальных кристаллов) построена математическая модель роста кристалла с примесными элементами. Предполагается, что изменение концентраций элементов-примесей в системе кристалл-расплав происходит по равновесному закону. Условием равновесия на границе кристалл-расплав является равенство отношения концентраций элемента в кристалле и расплаве коэффициенту

распределения, определяемого эмпирическими функциями в зависимости от температуры и концентрации анортита в кристалле. Концентрация анортита в кристалле однозначно определяется давлением и температурой. Математическая модель реализована в пакете MATLAB и применена для исследования реальных кристаллов, образованных в результате извержений вулкана Св.Елены (США), произошедших в 1980 г. Полученные результаты соответствуют другим петрологическим данным, имеющимся для данного вулкана.

Авторы выражают благодарность профессору J.Blundy (University of Bristol) за предоставление используемых в работе петрологических данных.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ Н.И.МУСХЕЛИШВИЛИ В МЕХАНИКЕ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ**

*И.Г. Горячева*

Институт проблем механики имени 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 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.

Решения большого класса задач механики контактных взаимодействий упругих тел основаны на применении метода комплексных переменных. Первые исследования в этом направлении были сделаны Г.В.Колосовым в начале двадцатого столетия, а затем систематическое изложение метода дано в трудах Н.И. Мусхелишвили (Н.И.Мусхелишвили. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 708 с., Н.И.Мусхелишвили. Сингулярные интегральные уравнения. М.: Наука. Физматлит, 1968. 512 с.). По сути дела, большинство статических контактных задач для упругих тел в плоской и осесимметричной постановках решаются методами, разработанными Н.И.Мусхелишвили.

В докладе приводятся примеры решений некоторых задач для упругих тел, которые получены в последние годы с применением методов теории функций комплексной переменной и сведения краевых задач к сингулярным интегральным уравнениям. Эти решения позволяют выявить новые механические эффекты, связанные с учетом трения и сцепления в области контактного взаимодействия.



Приводятся также решения контактных задач для определенного класса линейных вязкоупругих материалов, основанные на методе сведения граничной задачи к задаче сопряжения двух аналитических функций, разработанном Н.И. Мухелишвили. Этим методом, в частности, получены решения контактных задач о качении вязкоупругих тел, а также о скольжении штампа по границе вязкоупругой полуплоскости при наличии адгезионного взаимодействия.

В докладе используются результаты исследований, выполненных при поддержке Российского научного фонда (проект 14-29-00198).

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНЫ ПОД УГЛОМ АТАКИ**

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

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

При сверхзвуковом обтекании каверн прямоугольного сечения ( $L$  – длина каверны,  $h$  – ее глубина) различают два режима течения, именуемых «открытая» или «замкнутая» каверна. Если относительное удлинение каверны  $\lambda=L/h$  невелико ( $\lambda<\lambda_0$ ), наблюдается открытая каверна. В этом случае в каверне образуется циркуляционное дозвуковое течение, отделенное от внешнего потока слоем смещения, простирающемся от передней до задней кромки. Если  $\lambda$  превышает некоторое критическое значение  $\lambda_c$ , реализуется замкнутая каверна. В этом случае в полости каверны имеются две отдельные области отрыва: одна из них локализована за передним уступом каверны, другая – перед задним. В переходной области  $\lambda_0<\lambda<\lambda_c$  могут существовать оба типа течения. Несмотря на большое количество работ по исследованию сверхзвукового обтекания каверн, понимание физики течения даже в простейшей прямоугольной каверне все еще остается неполным. В большинстве исследований изучается обтекание относительно коротких двумерных каверн при фиксированной геометрии границ и при заданных параметрах внешнего потока. При этом зависимость таких течений от предыстории формирования гипотетически допускалась, но изучена не была. В частности, не исследовано влияние угла атаки на обтекание кольцевой каверны.

В докладе представлены результаты экспериментального исследования трехмерного сверхзвукового обтекания осесимметричной кольцевой каверны прямоугольного сечения на цилиндроконическом теле в аэродинамической трубе А-7 НИИ механики МГУ при  $M=3$  и  $Re=1,7*10^6$ . В процессе одного запуска трубы можно было непрерывно изменять или угол атаки (в диапазоне

0-15°) при фиксированной протяженности каверны или протяженность каверны ( $\lambda=6-20$ ) при заданном угле атаки.

Определены границы переходной области в зависимости от угла атаки. Показано, что режим обтекания в переходной области зависит от предыстории течения. Дана классификация режимов обтекания кольцевой каверны под углом атаки и описаны основные стадии перестройки режимов при изменении угла атаки и протяженности каверны. Результаты имеют не только фундаментальное, но и важное прикладное значение, как при выборе оптимальных схем обтекания тел с кавернами, так и при разработке новых способов управления течением в каверне.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-01-99623).

## **ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ НА ПОПЕРЕЧНО-ПРОДОЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ РАСТЯНУТЫХ ТОНКИХ СТЕРЖНЕЙ И СТРУН**

*Ю. А. Демьянов, А.А. Малашин*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

Рассмотрено влияние малой жесткости на процесс распространения продольно-поперечных волн и колебаний в предварительно растянутых тонких стержнях, струнах и мембранах. Вклады продольных и поперечных составляющих в динамическое нагружение оказываются одного порядка. Продольные колебания происходят как на собственных частотах, так и на частотах поперечных колебаний. Возможны резонансные явления. Наличие малой жесткости характерной для струн и мембран приводит к изменению их формы в местах соударения твердого тела, креплений и на фронте поперечной волны. Таким образом, волновая картина для поперечных движений представляет собой суперпозицию бегущих поперечных волн. Влияние жесткости сказывается в окрестности точки удара, где возникает стационарный изгиб, а также в малой области за бегущей поперечной волной. В окрестностях этих точек существенное влияние оказывает даже малая жесткость, приводя к отсутствию излома. При этом размер этих областей составляет 2-3 характерных толщин струны или мембраны. Решение задачи об ударе без учета жесткости можно рассматривать как решение для внешнего асимптотического разложения уравнений динамики струн и мембран при наличии малой жесткости. Построение внутреннего асимптотического разложения соответствующих уравнений изменяет картину геометрии струн и мембран в окрестностях точки удара и фронта поперечных волн.

# **ВЛИЯНИЕ РЕЗКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ НА МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ТЕЧЕНИЕ В МАГНИТОСЛОЕ**

*Д.В. Донской, Е.А. Пушкарь*

Московский государственный машиностроительный университет, Москва

В рамках модели идеальной магнитной гидродинамики с помощью решения МГД задачи Римана о распаде произвольного разрыва в трехмерной постановке моделируется влияние межпланетного магнитного поля на трансформацию и распад околоземной головной ударной волны на систему МГД ударных волн, вращательных разрывов и волн разрежения под воздействием резких изменений динамического давления в солнечном ветре. Изменения связаны со скачкообразным ростом или убыванием плотности на контактном разрыва при его падении на головную ударную волну и распространении вдоль ее поверхности. Течение находится как мозаика точных решений, полученных с помощью оригинального пакета программ (MHD Riemann solver), для элементов поверхности головной ударной волны как функция их угловых координат (широты и долготы) для различных значений скачка плотности на контактном разрыве и характерных параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на орбите Земли. Найдено, что при возрастании динамического давления в солнечном ветре всегда возникает быстрая МГД ударная волна, которая первой проникает в магнитослой. При убывании динамического давления на более чем на 25-30% влияние межпланетного магнитного поля может приводить к формированию лидирующей быстрой МГД ударной волны в характерных подковообразных зонах на головной ударной волне. При достижении магнитопаузы ударная волна может приводит к ее неоднородной деформации (локальному сжатию). Продемонстрировано решающее влияние медленных МГД волн (ударных и разрежения) на течение в магнитослое. Найдено, что на головной ударной волне существуют области, в которых рост плотности и напряженности магнитного поля в быстрых ударных волнах или пониженное уменьшение плотности и напряженности в быстрых волнах разрежения в магнитослое сочетаются с существенным ростом напряженности и падением плотности в медленных волнах разрежения. Пространственное наложение этих областей на фоне влияния магнитного поля приводит к формированию характерных зон в магнитослое с существенным понижением плотности и усилением напряженности магнитного поля вне зависимости от роста или падения динамического давления в солнечном ветре. Полученное решение может быть использовано для интерпретации измерений, проводимых на спутниках в солнечном ветре в точке либрации и вблизи магнитосферы Земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№14-01-00335-а).

## УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПОТОК ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ

*И.А. Дорощенко, И.А. Знаменская, И.В. Мурсенкова, Д.С. Наумов*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

Локализованные импульсные разряды могут быть использованы в качестве плазменных актуаторов для управляемого воздействия на газодинамические потоки, в том числе на пограничный слой. Воздействие достигается преимущественно за счет ударно-волновой конфигурации, возникающей при инициировании локализованного разряда. Доля энергии сильноточного импульсного разряда, вводимая в локальную зону газа, может достигать 50-60%. Показано, что в неподвижном воздухе и однородном потоке может реализоваться режим неуправляемого энерговыклада (контракция); в структурированном потоке за обтекаемым объектом – управляемого энерговыклада (локализация происходит в вихревой области в донной части модели).

Экспериментально с использованием теневых методов и высокоскоростной съемки (до 525 тыс. кадров/с) исследована динамика ударных волн, созданных комбинированным разрядом в контрагированной форме; динамика ударных волн, созданных плазменными листами. Проведено численное моделирование динамики цилиндрических ударных волн от импульсного разряда и выполнен расчет энергии контрагированной фазы объемного разряда с помощью решения обратной задачи. Методом цифрового трассирования исследованы нестационарные поля скоростей, возникающие при развитии течения с ударными (взрывными) волнами, иницированными импульсным разрядом. Показано, что время свечения для всех режимов локализации существенно превышает время тока (а значит и время энерговыклада).

Показано экспериментально, что инициирование импульсного объемного разряда в потоке с препятствием приводит к самолокализации энергии объемного разряда в зону отрывного течения за моделью клина (в зону низкой плотности). Зарегистрированы ударно-волновые конфигурации, образованные локализованным в вихрь за клином импульсным наносекундным объемным разрядом, воздействующие на донную часть клина.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-08-00777) и Программы развития МГУ до 2020 года.

## О ТЕЧЕНИИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ТРЕУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЕ НА РЕЖИМЕ СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

*Г.Н. Дудин*

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

Разложение функций течения в окрестности передней кромки плоских треугольных крыльев, обтекаемых на режиме сильного взаимодействия, не является единственным, а содержит неизвестную константу (Козлова И.Г., Михайлов В.В. // Изв. АН СССР МЖГ, 1970, № 6, с. 94-99). Особенности обтекания треугольной пластины были рассмотрены в работе В.Я. Нейланда (Нейланд В.Я. // Учен. зап. ЦАГИ, 1974, Т. V, № 3, с. 28-39), где для главных членов разложений функций течения в окрестности плоскости симметрии была сформулирована краевая задача, так же содержащая неизвестный параметр. В данной работе определены условия, позволяющие связать эти неизвестные постоянные. Рассматривается обтекание полубесконечного плоского треугольного крыла при заданной температуре его поверхности. Предполагается, что размах крыла порядка единицы. Для учета особенностей поведения функций течения в окрестности вершины треугольного крыла вводится преобразование переменных, приводящее задачу к автомодельной по продольной координате (Нейланд В.Я., Боголепов В.В., Дудин Г.Н., Липатов И.И. Асимптотическая теория сверхзвуковых течений вязкого газа. - М.: Физматлит, 2003. – 456 с.). В окрестности передних кромок проведено разложение функций течения в ряды, сформулированы и решены краевые задачи для определения функций течения на кромке и собственных чисел. Для исследования течения в окрестности плоскости симметрии вводятся степенные разложения по поперечной координате для функций течения. Сформулированы краевые задачи, которые зависят от неизвестного параметра, который связан со второй производной от преобразованного индуцированного давления по поперечной координате. Расчеты показали, что решение системы уравнений не является единственным. Определены три условия для сращивания решений. Проведено сращивание полученных разложений для определения зависимости индуцированного давления от поперечной координаты для различных значений удлинения крыла. В результате сращивания определены значения неизвестного параметра в окрестности передней кромки. Проведенные исследования гиперзвукового обтекания теплоизолированного плоского треугольного крыла на режиме сильного вязко-невязкого взаимодействия показали, что уменьшение размаха крыла приводит к значительному изменению характера обтекания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-01-03615).

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МЕТЕОРОИДА С КОНЦЕВОЙ ВСПЫШКОЙ**

*Л.А.Егорова, В.В. Лохин.*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Настоящий доклад продолжает серию работ авторов, посвященную движению и разрушению космических тел при их входе в атмосферы планет. Ранее для объяснения фрагментации крупных метеороидов была предложена модель двустадийного дробления. Согласно этой модели 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.

В докладе подробно рассмотрен эффект «теплового взрыва» на заключительном этапе разрушения. Дан краткий обзор работ, предлагающих объяснение конечной вспышки метеороида.

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

## **КОЛИЧЕСТВЕННАЯ И КАЧЕСТВЕННАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕЧЕНИЯ НА СТЕНКЕ КАНАЛА С ВЫСТУПАМИ МЕТОДОМ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ**

*Г.М. Жаркова, В.Н. Коврижина*

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

Разработка методов диагностики сложных пространственных течений по распределению поверхностного трения является актуальной задачей. Внимание экспериментаторов привлекают тонкопленочные покрытия, позволяющие получить распределение за один эксперимент, в том числе и жидкокристаллические (ЖК). Преимущество покрытий на основе структурно закрученных холестериков (ХЖК) заключается в том, что существует зависимость их цвета от касательного напряжения  $\tau$ , которую можно оцифровать (Г.М. Жаркова, В.Н. Коврижина. Жидкокристаллические материалы и методы диагностики пристенных течений //«Оптические методы исследования потоков»(ОМИП2015), XIII-таяМеждун. науч.-техн. конф. [Электр.ресурс]: Труды конф. – Электрон дан. - М., НИУ «МЭИ», 2015-CD-ROM.-С.8-14 –ISBN 978-5-00086-752-5; G.M. Zharkova, V.N. Kovrizhina, A.P. Petrov. Shear-sensitive liquid crystals for diagnostics of boundary layer structure in aerodynamical experiment/ «Visualization of mechanical processes» VMP-7940

Vol. 3, Issue 1, 2013). Цифровая обработка оптического отклика ЖК покрытий позволяет получить количественную информацию о распределении  $\tau(x, z)$  и его изменении в ходе эксперимента. Данный метод требует создания специальной установки для калибровки цветового отклика (колориметрических координат) ЖК относительно касательных напряжений  $\tau$ , температуры, углового положения. Калибровка ЖК покрытий по  $\tau$  может быть выполнена с помощью полуэмпирических соотношений для коэффициента поверхностного трения для пластины или канала, альтернативных дискретных методов измерения или же непосредственного задания  $\tau$  с помощью грузов. Испытания в ИТПМ СО РАН показали, что в диапазоне  $\tau \approx 2 \div 20$  Па при  $T \approx 23^\circ - 40^\circ\text{C}$  исследованные ЖК составы обладают спектральной чувствительностью  $\Delta\lambda/\Delta\tau$  до 12 нм/Па и колориметрической чувствительностью  $\Delta H/\Delta\tau \approx 6,5$  град/Па ( $H$  – цветовой тон). На примере исследования картины течения и поля касательных напряжений на стенке канала с выступом-трапецией в плане в докладе будут показаны основные особенности методики и результаты ее применения при скоростях невозмущенного потока до 84 м/с.

## **ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА СТРУКТУРУ МЕЖФАЗНОГО СЛОЯ, ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ**

*А.В. Жуков*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Известно, что при постановке задач о распространении фронтов фазовых превращений в сплошных средах во многих случаях, кроме условий непрерывности потоков массы, импульса и энергии, необходимы дополнительные соотношения на поверхности разрыва (например, условия непрерывности обобщенного химического потенциала или уравнения, определяющие интенсивность фазовых превращений).

На основе вариационного уравнения Л. И. Седова, где в число дополнительных определяющих параметров входит интенсивность фазовых превращений, построена уточненная модель движущейся границы раздела жидкостей как двумерной сплошной среды, обладающей поверхностной внутренней энергией и поверхностной энтропией. Получены определяющие уравнения, условия на границе раздела и кинетические соотношения в рамках данной модели. В частности, получено дополнительное соотношение, связывающее скачок обобщенного химического потенциала на границе раздела фаз и скорость изменения потока массы через данную границу.

В квазиравновесном приближении численно решена задача о структуре движущейся плоской межфазной границы, 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. Для некоторых значений определяющих параметров задача допускает точное аналитическое решение. Поверхностные плотности экстенсивных физических величин определяются по Гиббсу с помощью введения разделяющей поверхности и вычисления избыточных величин для соответствующих объемных плотностей. Найдена зависимость поверхностной свободной энергии и поверхностного натяжения от интенсивности фазовых превращений.

В качестве приложения рассмотрен ряд задач о движении фронтов испарения и конденсации в жидкостях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-01-00157 и 14-01-00056).

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ОКОЛО ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ**

*Г.С. Журавлева<sup>1</sup>, Н.Н. Пилюгин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт математики, экономики и информатики ИГУ; Иркутск,

<sup>2</sup>НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Интерес к проблемам обтекания затупленных тел сверхзвуковым потоком газа обусловлен в первую очередь развитием авиационной и ракетно-космической техники. Для совершенствования летательных аппаратов требуется уточнение данных о поле течения, аэродинамических характеристиках, процессах теплообмена.

Определение силового и теплового воздействия неравномерных потоков на помещенные в них затупленные тела является актуальной в связи с исследованием сверхзвукового движения и торможения разделяемых частей спускаемых аппаратов. С увеличением скоростей движения и давления в газе большую роль начинают играть аэродинамический нагрев и трение на поверхности тела при турбулентном режиме течения газа в ударном слое. В рамках теории вязкого ударного слоя проведено численное исследование гиперзвукового неравномерного обтекания затупленных тел с учетом турбулентности в ударном слое. Для коэффициентов турбулентного переноса использована алгебраическая модель.

Набегающий поток сжимаемого газа представляет собой осесимметричное сдвиговое течение типа следа. На ударной волне зададим модифицированные соотношения Рэнкина-Гюгонио. На поверхности тела -



условия прилипания и непроницаемости для продольной и поперечной составляющих скорости, температуру стенки.

Проведены расчеты обтекания затупленного конуса как при ламинарном, так и при турбулентном режимах течения вязкого газа. Исследована зависимость отхода ударной волны, распределения давления, теплового потока и коэффициента от режима течения. Показано, что во всем рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса турбулентность потока газа приводит к увеличению коэффициента трения и теплового потока к телу, зависимость которого от продольной координаты немонотонна.

Исследовано влияние затупления конуса на тепловой поток к поверхности тела и коэффициент трения. Показано, что затупление конуса оказывает влияние на течение как в области сопряжения сферического затупления и конуса, так и на боковой поверхности конуса. Исследовано влияние неравномерности набегающего потока, угла конуса и числа Рейнольдса на аэродинамические коэффициенты удлиненного тела.

## **ФОРМИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ**

*Ю.С. Зайко, А.И. Решмин, А.Д. Сударикова, С.Х. Тепловодский*

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

Для защиты объекта с помощью газовой струи необходимо, чтобы коэффициенты переноса в ней соответствовали молекулярному уровню, то есть поток должен быть ламинарным. На практике, однако, переход к турбулентности в таких струях происходит сразу после вытекания. Экспериментальные результаты, полученные А.А. Павельевым и его коллегами, показывали, что увеличение длины участка перехода при больших числах Рейнольдса может быть реализовано, когда профиль скорости и характеристики пульсационного движения в начальном сечении формируются независимо.

Для создания затопленной струи с увеличенным начальным ламинарным участком нужно сначала любым способом подавить турбулентные пульсации в поступающем по трубопроводу очищенном газе, а затем расширить поток до нужного диаметра и сформировать выпуклый (без точек перегиба) профиль скорости на минимально возможной длине без нарушения ламинарного режима течения.

Для формирования струи с нужным профилем скорости и низкой интенсивностью турбулентности используется сверхкороткий безотрывный диффузор. Диаметр диффузора увеличивается в несколько раз на длине примерно 1 входной диаметр. Переходный участок выполнен в виде тела вращения. Диффузор снабжен установленной на выходе переходного участка

проницаемой перегородкой в виде мелкопористой металлической сетки. Проницаемая перегородка тормозит поток и вызывает его расширение в направлении от оси канала, направляя среду к образующей переходного участка. Одновременное воздействие на поток профилированной стенки и проницаемой перегородки приводит к тому, что отрыв потока не происходит.

Разработана экспериментальная установка с диффузором, в котором диаметр увеличивается с 40 до 120 мм на длине 15 мм. Форма стенки канала выбрана так, что на выходе формируется требуемый профиль скорости. Визуализация течения показала существование ламинарного начального участка струи при числах Рейнольдса примерно 10000 на длине около 5 диаметров струи. При натекании струи на защищаемую поверхность ламинарный участок течения не разрушается.

Предлагаемый способ локальной гидродинамической защиты является перспективным способом создания высокочистых сред. Система формирования локальной гидродинамической защиты задумывается как малогабаритная, малошумная и легко перестраиваемая.

## **ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ВОДЫ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ**

*И.А. Знаменская, Е.Ю. Коротеева, А.М. Новинская*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

Целью настоящей работы являлось: экспериментально на основе метода термографии высокоскоростных потоков жидкости (ТВПЖ) исследовать особенности спектров температурных пульсаций в пристеночной области струйных турбулентных неизотермических течений воды. Метод позволяет снимать информацию из приповерхностного слоя воды толщиной менее 1 мм. Используется свойство воды поглощать инфракрасное (ИК) излучение на субмиллиметровом масштабе. Исследования проводились с использованием тепловизионной камеры FLIR SC7700, работающей в спектральном диапазоне 3.7-4.8 мкм (по уровню 60% от максимальной чувствительности) и позволяющей проводить съемку с частотой кадров 100-115 Гц в полнокадровом режиме. Исследованы спектры температурных пульсаций струйных турбулентных течений в диапазоне частот 1-40 Гц: область взаимодействия импактной струи с поверхностью, прозрачной для инфракрасного излучения, и пристенная область взаимодействия под углом 120 градусов двух затопленных струй в дискообразном тройниковом устройстве. Пульсационные характеристики пограничного слоя жидкости исследованы через стенку, прозрачную для ИК излучения. Для количественного анализа энергии турбулентных течений используется

спектральное разложение процесса при помощи преобразований Фурье, определяющее спектральную плотность изучаемого процесса. Температура в данной серии экспериментов играет роль пассивной примеси.

Получены наклоны спектра, приближенные к значению  $-5/3$ , для одиночной импактной затопленной струи, и показано наличие двойного инерционного интервала в квазидвумерном турбулентном потоке, образующемся при взаимодействии двух затопленных струй в дискообразном тройнике. При смещении точек по течению вдоль линии взаимодействия струй получен наклон спектра, близкий к  $-3$ . Обсуждается механизм формирования различных спектральных интервалов в струйном течении; он может быть связан как со стратификацией жидкости в пристенном течении, зависящей от скорости, так и с особенностями струйного течения в сосуде квазидвумерной геометрии.

Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ до 2020 года.

## **НЕВЯЗКИЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВЫХ КОНИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ**

*М.А. Зубин<sup>1</sup>, Ф.А. Максимов<sup>1,2</sup>, Н.А. Остапенко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

Представлены результаты численного и экспериментального исследования структуры течения около V-образных крыльев различной геометрии с головной ударной волной, присоединенной к передним кромкам, при числах Маха 3, 6 и 10. Установлены критерии возникновения в ударном слое вихревых структур невязкого происхождения. С использованием расчетных и экспериментальных данных несимметричного обтекания крыла с нулевым углом стреловидности передних кромок и углом раскрытия  $2\pi/3$  при числе Маха невозмущенного потока  $M=3$  показана возможность распространения этих критериев для случаев образования контактных разрывов соответствующей интенсивности, исходящих из точки ветвления  $\lambda$ -конфигурации ударных волн, сопровождающей отрыв турбулентного пограничного слоя под воздействием внутренней ударной волны, падающей на подветренную консоль. Определена область изменения углов атаки и скольжения указанного крыла, в которой могут существовать невязкие вихревые структуры, порожденные как контактным разрывом, исходящим из точки ветвления головной ударной волны, так и контактным разрывом от  $\lambda$ -конфигурации ударных волн.

Ранее было установлено, что, соотношение интенсивностей контактного разрыва  $\lambda$ -конфигурации ударных волн и контактного разрыва, исходящего из точки ветвления головной ударной волны, определяет краевые

условия на границе эллиптической области конического течения и приводит, при определенных условиях, к возникновению на наветренной консоли трех новых особых линий в дополнение к линии стекания, имеющей место на наветренной консоли как при обтекании крыла идеальным газом, так и в реальном течении. Для реализации режимов обтекания с двумя вихревыми особенностями Ферри их область существования должна пересекаться с областью существования четырех особых линий конического потока на наветренной консоли, когда устанавливается определенное соотношение интенсивностей указанных контактных разрывов.

Установлены условия, когда при наличии центрированной волны разрежения на передней кромке подветренной консоли крыла, четыре особые линии на наветренной консоли перестают существовать, а реализуются режимы обтекания либо с одной точкой стекания, либо с точками растекания и стекания. Причем наличие первой из них обусловлено областью отрыва турбулентного пограничного слоя на подветренной консоли.

Справедливость критерия существования невязких вихревых структур в ударном слое конического течения тестирована и также подтверждена на примере течения около пластины с установленным на ней полуконусом, имеющим различные значения угла раствора, под углами атаки и скольжения при числе  $M=3$ .

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-01-02361).

## **V-ОБРАЗНЫЕ КРЫЛЬЯ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ**

*М.А. Зубин<sup>1</sup>, Ф.А. Максимов<sup>1,2</sup>, Н.А. Остапенко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

Представлены результаты численного исследования структуры течения около V-образных крыльев с центральным телом в рамках модели идеального газа при числах Маха 3 и 6 на режимах с ударной волной, присоединенной к передним кромкам. Приведены данные для крыла с углом раскрытия  $80^\circ$  и углом при вершине консолей  $45^\circ$  при различных значениях полуугла  $\nu$  конуса в качестве центрального тела, таких, чтобы головная ударная волна при различных углах атаки  $\alpha$  и скольжения  $\beta$  оставалась присоединенной к передним кромкам.

Определены величины угла  $\nu$ , когда в ударном слое при симметричном обтекании тела возникают невязкие вихревые структуры – вихревые особенности Ферри. Установлено, что их возникновение и существование хорошо согласуются с полученными ранее критериями, связанными с

величинами интенсивности контактного разрывов, исходящего из точек ветвления головной ударной волны, и числа Маха компоненты скорости невозмущенного потока, нормальной лучу конической системы координат, проходящему через ту же точку ветвления. Однако течение около крыла с центральным телом имеет свои особенности. При увеличении угла  $\nu$ , несмотря на выполнение критериев существования вихревых структур, вычисленных в точках ветвления при симметричном обтекании тела, вихревые особенности Ферри исчезают. Это, как показал анализ, связано с тем, что при увеличении тела вытеснения – полуугла  $\nu$  конуса две тройные точки ветвления головной ударной волны приближаются к передним кромкам и, следовательно, к поверхности консолей крыла настолько, чтобы контактные разрывы вошли в соответствующие окрестности точек излома поперечного контура тела, где реализуется повышенное давление, близкое к его величине в критических точках. Торможение частиц газа по обе стороны контактных разрывов в указанных окрестностях приводит к сближению их полных давлений на сфере, а, следовательно, и снижению величины критериального соотношения, определяющего наличие вихревых структур в ударном слое. При приближении к режимам обтекания с отсутствием вихревых структур сначала в плоскости симметрии ударного слоя средняя из трех критических точек – точка растекания опускается на поверхность конуса, а узел линий тока исчезает. Далее точка стекания седлового типа, из которой в обе стороны от плоскости симметрии выходят контактные разрывы к вихревым особенностям Ферри, приближается к поверхности конуса и превращается в узел линий тока. В этот момент вихревые структуры прекращают свое существование. При дальнейшем увеличении угла  $\nu$  узел линий тока опускается на поверхность конуса, после чего на поверхности конуса в плоскости симметрии образуется линия растекания, а на периферии две точки стекания.

Определены последовательности и особенности структур течения при изменении угла скольжения. В частности обнаружено существование сверхзвуковых областей течения на сфере, с замыкающими их вниз по потоку скачками уплотнения, вдоль наветренной консоли крыла за внутренней ударной волной, имеющей при больших числах Маха невозмущенного потока точку ветвления.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-01-02361).

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ, ВЫЗВАННОГО ПОПЕРЕЧНЫМ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

*В.Н. Зудов*

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

Современные достижения, в исследовании и создании плазменных технологий, используемых для инициирования и повышения эффективности горения в двигателях и силовых установках, привели к формированию новой области науки, известной как инициирование горения плазмой.

Цели данного исследования были направлены на определение пределов воспламенения и механизма стабилизации горения углеводородной смеси, вызванного импульсно-периодическим лазерным излучением в сверхзвуковом воздушном потоке. В качестве источника энергии использовался импульсно-периодический СО<sub>2</sub> лазер (со средней мощностью 0.5 - 2.5 кв), созданный в Институте Лазерной физики (Новосибирск). Проведено экспериментальное исследование воздействия сфокусированного излучения от импульсно-периодического СО<sub>2</sub> лазера на формировании и развитие процесса распространения пламени в потоке гомогенной топливно-воздушной смеси. Стабилизация горения осуществлялась: плазмой оптического разряда (оптический стабилизатор) и созданием локальной отрывной зоны за механическим стабилизатором (конус) в центре потока. Установлено, что для водородо - воздушной смеси, при формировании в ней поперечного импульсно-периодического оптического разряда, вниз по потоку возникают периодические зоны горения. Частота возникновения этих зон совпадает с частотой падающих лазерных импульсов. При использовании механического стабилизатора (конус) получено горение в сверхзвуковом потоке для водородо - воздушной смеси. В поперечном сечении область горения занимала всю площадь струи и значительно превышала донную площадь конуса. Изучалась структура зоны горения на примере собственного свечения пламени на длинах волн радикалов ОН, СН и С<sub>2</sub>. Для этого была задействована камера Imager intense CCD. Применение спектрозональной регистрации на длине радикалов ОН, СН позволило зарегистрировать инициирование горения в следе за областью пробоа.

В работе рассматриваются результаты численных исследований сверхзвуковых потоков с локальным энергоподводом. Главное внимание уделено нестационарным эффектам, которых являются определяющими для структуры потока. Сформулирована физическая модель энергоисточника.

# НОВЫЕ ЗАДАЧИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВЕЗДНЫХ ВЕТРОВ С МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДОЙ

*В.В. Измоденов<sup>1,2,3</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>3</sup>Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

После пионерских работ Паркера (1961) и Баранова, Краснобаева и Куликовского (1970) задача о взаимодействии солнечного ветра с локальной межзвездной средой имеет уже более, чем полувековую историю. Модели области взаимодействия эволюционировали от аналитических или сводящихся к решению обыкновенных дифференциальных уравнений до сложных кинетико-магнитогидродинамических многокомпонентных моделей для реализации которых требуются расчеты на современных суперкомпьютерах.

Интерес к исследованию звездных ветров с межзвездной средой резко возрос в последнее десятилетие. Это связано с появившимся в хорошем многочисленными изображениями астросфер вокруг других звезд с одной стороны, а также новыми данными о границе гелиосферы, полученными на космических аппаратах IBEX и Вояджер -1 и 2.

В докладе будет представлен обзор новых результатов по многокомпонентному моделированию астросфер, полученных в рамках проекта РФФИ №. 14-12-01096. В частности, будут обсуждаться эффекты, связанные с тороидальным полем звезды, внешним магнитным полем, нестационарные эффекты, эффекты, связанные с диссипативными процессами и высвечиванием.

## ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА НА ГРАНИЦЕ ГЕЛИОСФЕРЫ НА ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ

*В.В. Измоденов<sup>1,2,3</sup>, О.А. Катушкина<sup>2</sup>, П.Д. Минаев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва,

<sup>3</sup>Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Для описания течения межзвездных атомов в межпланетном пространстве необходимо использовать кинетический подход, так как их длина свободного пробега сопоставима с размерами гелиосферы. При

прохождении гелиосферного ударного слоя – области, где солнечный ветер взаимодействует с межзвездной средой – функция распределения сильно изменяется из-за взаимодействия атомов с протонами гелиосферного ударного слоя посредством перезарядки. В частности, из-за так называемого эффекта селекции функция распределения атомов на границе гелиосферы (в области гелиосферной ударной волны) является асимметричной относительно своего максимального значения. Целью данной работы является исследование того, как эффекты асимметрии функции распределения на границе гелиосферы будут проявлять себя в распределении атомов в межпланетном пространстве. Для этого будет представлено решение кинетического уравнения внутри гелиосферы и проведен его анализ в зависимости от внешнего граничного условия.

## **О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВОЙКОЙ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ СХОДИМОСТИ ПРИ РАСЧЁТЕ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ**

*С.А. Карсканов<sup>1</sup>, А.М. Липанов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт механики УрО РАН, Ижевск,

<sup>2</sup>ИПМ имени М.В. Келдыша, Москва

В отличие от газодинамических задач и даже от ламинарных течений вязкой среды турбулентные потоки характерны своей не стационарностью и не монотонностью в зависимости от любой из пространственных координат. По мере перемещения вниз по потоку частота этих колебаний гидромеханических параметров (ГМП) растёт, а амплитуды колебаний уменьшаются. Основной причиной такого поведения ГМП (согласно А.Н. Колмогорову) является диссипация вихревых структур и постепенное их измельчение вследствие взаимодействия между собой, когда крупные вихри постепенно заменяются средними, средние – мелкими, а последние исчезают. Их энергия переходит в теплоту. Чтобы получить такую картину турбулентных процессов, необходимо решать, вообще говоря, 3-хпараметрическую задачу. Здесь в качестве параметров выступают: шаги интегрирования по пространственным координатам, порядок  $N$  точности аппроксимации частных производных от ГМП по пространственным координатам и величина  $\alpha$  точности сходимости приближённого решения. Для этого, задавшись определённым значением параметра  $\alpha$ , сначала решаем задачу, рассчитывая частные производные по пространственным координатам со 2-ым порядком точности, пока вычислительный процесс с заданной точностью  $\alpha$  не сойдётся. Далее, используя полученную пространственную разностную сетку, определяем такую величину  $N = N_{opt}$  порядка точности расчёта частных производных по пространственным координатам, при



которой вычислительный процесс с заданной точностью  $\alpha$  вновь сойдётся. После этого, используя полученную величину  $N_{opt}$ , начинаем вновь измельчать шаги пространственной разностной сетки. Поскольку более высокий, чем 2-ой, порядок  $N_{opt}$  позволит не сглаживать мелкие вихри, на кривых реализаций ГМП появятся отступления от заданной точности  $\alpha$ , но они не будут большими. Поэтому при уменьшении шагов пространственной сетки в два или четыре раза результаты расчётов сойдутся. Если величину  $\alpha$  не менять, то на этом процесс методических вычислений можно закончить.

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАРТИНЫ ОБТЕКАНИЯ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ НА ПАССИВНОМ УЧАСТКЕ СПУСКА ПРИ БОЛЬШОМ УГЛЕ АТАКИ**

*Е.Ю. Карцева, Е.О. Коляда, А.В. Строилов, В.Н. Шманенков*

ЦНИИМаш, Королев, Моск. обл.

Представляются результаты численного решения уравнений Рейнольдса на основе различных программных комплексов: Fluent, FLoEFD, ЛОГОС применительно к трёхмерному течению при обтекании сверхзвуковым потоком ступеней ракеты под большим углом атаки ( $M=2\div 4$ ,  $Re_D=2\cdot 10^6\div 2.6\cdot 10^6$ ,  $\alpha\approx 174^\circ$ , т.е. движение соплами вперёд). Задача тесно связана с проблемой спуска на землю отработанных ступеней ракеты и уменьшением районов их падения с целью снижения экологического ущерба. Нестационарный характер обтекания тела требует применения сеток очень высокого качества и малых шагов интегрирования по времени ( $10^{-5}\div 10^{-6}$  с).

Расчёт параметров течения осуществлялся с использованием численного решения нестационарных уравнений Рейнольдса (RANS). При этом варьировались расчётные сетки и количество используемых точек. При проведении расчётов в рамках пакета Fluent были использованы две модели турбулентной вязкости – модель  $(k-\omega)$ SST Ментера и Спалларта-Алмараса. Расчет в программной среде FloEFD проводился на структурированной сетке, использовался алгоритм адаптивной сетки – число расчётных ячеек автоматически увеличивалось в областях с большими градиентами параметров, например, на поверхностях разрыва и скачках уплотнения, до  $N=2,2\cdot 10^6$  в конце расчета).

Из особенностей течения следует отметить, что внутри сопел имеются области, где уровни давления превышают на 10% величину полного давления за прямым скачком уплотнения  $P'_0$ . В центральной части днища ракеты давление на 18% ниже, чем величина  $P'_0$ . В целом можно отметить, что уровни давления, полученные на донной поверхности цилиндрической части ракеты различными методами, близки между собой.

## **ВОЛНОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ПОДЪЁМЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО БРУСА ЧАСТИЧНО ПОГРУЖЁННОГО В МЕЛКУЮ ВОДУ**

*О.А. Ковыркина<sup>1</sup>, А.А. Коробкин<sup>2</sup>, В.В. Остапенко<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup> Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск,

<sup>2</sup> School of Mathematics, University of East Anglia, UK,

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск

В рамках длинноволнового приближения рассмотрена задача о течениях, возникающих при вертикальном подъёме прямоугольного бруса, частично погружённого в мелкую воду, заполняющую прямоугольный призматический канал с горизонтальным дном. Ширина бруса совпадает с шириной канала и его нижняя и верхняя плоскости параллельны дну канала. Процесс подъёма в общем случае состоит из трёх этапов. На первом этапе нижняя поверхность бруса полностью находится под водой, а жидкость под ней поднимается вслед за брусом за счёт действия гидростатического давления. На втором этапе (который в некоторых случаях отсутствует), края нижней поверхности бруса выходят из воды, в силу чего смоченная часть бруса сокращается, а жидкость под неё поднимается. В начале третьего этапа брус отрывается от воды, после чего произошедший на втором этапе подъём жидкости приводит к формированию двух расходящихся волн. Моделирование течений проводилось без учёта влияния трения, вязкости жидкости и её поверхностного натяжения.

Получены условия корректности данной задачи и для различных законов подъёма бруса построены решения, описывающие течение жидкости в области, примыкающей к нижней поверхности бруса. Во внешних областях со свободной границей проведено численное моделирование течений по схеме КАБАРЕ, обеспечивающей второй порядок точности на гладких решениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-01-00333).

## **О РЕЗОНАНСНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ КАВИТАЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЯХ В ПРИСУТСТВИИ КАВЕРНЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ЧИСЛОМ КАВИТАЦИИ**

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

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

В Институте механики МГУ было проведено экспериментальное моделирование течения с образованием искусственной вентилируемой

каверны с отрицательным числом кавитации. Известны кавитационные автоколебания возникающие при возникновении естественной кавитации в гидравлических системах. В присутствии вентилируемой газовой полости с повышенным давлением наблюдаются режимы с сильными пульсациями давления, как в самой каверне, так и в гидравлической системе выше каверны. Проведенные авторами исследования на плоской струйной установке показали, что при одинаковых расходонапорных характеристиках могут реализовываться различные автоколебательные режимы с различными частотами, амплитудами и сдвигом фаз колебаний давления в различных частях экспериментальной установки. В докладе представлены результаты исследования течения с помощью скоростной видеосъемки. Обнаружено, что автоколебания сопровождаются возникновением волн жидкости на границе каверны. Различные моды отличаются количеством волн, находящихся между кавитатором и областью замыкания каверны. Оказалось, что скорость распространения волн постоянна и близка к скорости жидкости на границе каверны при стационарном течении. Кадры видеосъемки показывают, что развитый колебательный процесс разбивается на две стадии: движение жидкой волны вдоль границы и выбрасывание порции жидкости в атмосферу в области замыкания каверны под действием повышенного давления. Причем с ростом давления в каверне для первой фазы увеличивается. Проведена серия экспериментов для случая доминирования первой фазы. Показано, что в этом случае период самой низкой моды автоколебаний определяется числом кавитации и длиной каверны. Экспериментально показано, что в случае, когда характерные частоты акустические колебаний в трубопроводе значительно выше частот кавитационных автоколебаний и при небольшом объеме каверны возбуждается самая низкая первая мода автоколебаний. В других ситуациях может происходить возбуждение более высоких мод (наблюдалось возбуждение 2-й, 3-й и 4-й мод) в зависимости от характерных акустических частот подводящего трубопровода.

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СТАБИЛИЗАТОР ДЛЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ФАКЕЛА**

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

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

Одним из наиболее распространенных способов организации горения в настоящее время является диффузионный режим сжигания топлив. Воздействие на пламя нестационарных электрических полей (ЭП) может быть применено для повышения безопасности и контроля процесса. ЭП с изменяемой во времени конфигурацией способствует интенсификации

диффузионного горения. Возможность создания систем стабилизации и контроля процесса сжигания углеводородных топлив связана с наличием в их пламёнах свободных зарядов. Основными носителями отрицательного заряда являются электроны, среди положительных ионов следует выделить  $H_3O^+$ , его концентрация во фронте пламени сопоставима с концентрацией электронов. Именно поэтому нестационарное ЭП наиболее эффективно для управления процессом сжигание углеводородных топлив.

В работе представлены результаты исследования влияния нестационарного ЭП на стабилизацию поднятого диффузионного пламени. В качестве топлива применялись метан и пропан. В опытах регистрировалась форма пламени и определялась безразмерная высота подъема факела. Основываясь на подходе критериального описания стабилизации поднятого пламени, представленного в работе В.К. Баева и В.А. Ясакова (Изв. СО АН СССР, 1969), были обработаны данные эксперимента. Для обоих типов топлив характерно наличие на графиках участка с постоянным значением безразмерной высоты подъема, т.е. области работы электрического стабилизатора пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№14-01-00225-а).

## **ТЕПЛООБМЕН В НЕДОРАСШИРЕННЫХ СТРУЯХ ГАЗОВ В ВЧ-ПЛАЗМОТРОНЕ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ НА УСЛОВИЯ ВХОДА ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ В АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ**

*А.Ф. Колесников<sup>1</sup>, В.И. Сахаров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва,

<sup>2</sup>НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

ВЧ-плазмотрон ВГУ-4 (ИПМех РАН) мощностью 100 кВт – многофункциональная установка для исследований теплообмена и термохимических испытаний теплозащитных материалов. Установка может работать на воздухе и других газах (азот, кислород, углекислый газ, аргон) в режимах до- и сверхзвукового истечения плазмы из разрядного канала. Выбор того или другого режима зависит от конкретной задачи эксперимента. Например, для определения каталитических характеристик покрытий оптимален дозвуковой режим, в котором набегающий на модель струйный поток химически равновесный, а пограничный слой близок к замороженному. С другой стороны, максимальные плотности теплового потока в критической точке водоохлаждаемой модели достигнуты в сверхзвуковых потоках воздушной плазмы.

Теплообмен с поверхностью в сверхзвуковых струях индукционного плазмотрона изучался экспериментально и численно в ряде работ. В результате получены согласующиеся экспериментальные и расчетные данные

по тепловым потокам и давлению в точке торможения на цилиндрической модели с плоским носком в первой сверхзвуковой зоне недорасширенных струй диссоциированных газов.

На основе концепции локального моделирования теплообмена по параметрам сверхзвукового обтекания цилиндрических водоохлаждаемых моделей с плоским торцом радиуса  $R_m$ , расположенных на расстоянии  $Z_m$  от среза разрядного канала, можно определить параметры обтекания сфер радиуса  $R_{w0}$  гиперзвуковыми равномерными потоками в атмосферах Земли или Марса так, чтобы тепловые потоки в их точках торможения могли быть пересчитаны через тепловые потоки в точках торможения цилиндрических моделей в плазмотроне.

Установлено, что нормированные зависимости тепловых потоков в точках торможения на модели и сфере от эффективного коэффициента каталитической рекомбинации диссоциированных компонентов для условий экспериментов на ВЧ-плазмотроне и соответствующих условий входа сферы в атмосферы планет, связанных условиями локального моделирования теплообмена, подобны, что ведет к формуле для экстраполяции рассчитанных тепловых потоков к модели в плазмотроне на условия гиперзвукового обтекания сферы при ее полете в атмосферах Земли или Марса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№14-01-00738).

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУЙ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ГАЗОТБОЙНИКОМ НА ЭТАПЕ «ГОНКА ДВИГАТЕЛЕЙ»**

*Т.А. Коротаева<sup>1,2</sup>, А.О. Турчинович<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики  
имени С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск,

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

«Гонка двигателей» является одним из важных этапов эксплуатации самолетов. На данном этапе осуществляется проверка работы силовых установок на всех режимах тяги в соответствии с программой испытаний, определенной для данного типа двигателей. Для защиты персонала и окружающей среды от высокотемпературных и высокоскоростных струй продуктов сгорания авиатоплива воздушное судно располагают на специальной площадке, оборудованной струеотклоняющими устройствами – газотбойниками, конструкция которых может быть различной (сплошной, ячеистой и т.д.).

Существуют различные подходы к моделированию, позволяющие с различной степенью детализации определить уровень загрязнения, полученного при эксплуатации авиатранспорта. Однако вопрос о наиболее

эффективной с точки зрения рассеивания загрязняющих веществ конструкции газоотбойника и его расположении относительно воздушного судна до сих пор не рассматривался.

В настоящей работе численно моделируется обтекание трехмерной конфигурации самолета, стоящего на площадке для гонки двигателей, оборудованной струеотклоняющим щитом. Из сопел двигателя истекают продукты сгорания, состав которых соответствует режиму максимальной тяги. Полагается, что продукты сгорания авиатоплива являются химическими активными веществами. При этом кинетическая модель ограничивается рассмотрением продуктов сгорания авиатоплива, которые отнесены к наиболее опасным Международной организацией гражданской авиации (ИКАО). К тому же, часть из этих веществ способна вступать в реакции с кислородом воздуха с дополнительным образованием загрязняющих веществ. Задача решается в рамках уравнений Навье-Стокса, дополненных кинетическими уравнениями взаимодействия продуктов сгорания авиатоплива с кислородом воздуха с использованием программного продукта Ansys Fluent.

Определены особенности течения и поля концентраций монооксидов и диоксидов азота и углерода. Рассмотрено влияние расстояния от сопел авиадвигателей до газоотбойника сплошной конструкции на формирование областей с максимальными долями ПДК. Сделаны выводы об эффективности сплошных и ячеистых струеотклоняющих устройств.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИКИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ**

*В.Д. Котелкин*

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

Ранее численное моделирование конвекции в верхней мантии исследователи проводили в постановке изолированного региона. Было установлено, что важнейшей составляющей верхнемантийной конвекции является процесс субдукции (погружения литосферных плит в мантию). В частности было показано, что субдукция служит спусковым механизмом для верхнемантийных плюмов, эта причинно-следственная связь прослеживается во многих регионах Тихого океана и в Средиземноморье.

В фанерозойской истории Земли геологи выделяют около 20 орогенических фаз продолжительностью 50-60 млн. лет. Орогеническая цикличность выражается в перестройках направления и скорости смещения литосферных плит, в перемещении зон спрединга и субдукции, в неравномерности вулканизма и метаморфизма. В чем причина этой цикличности? Другой геологический феномен представляет миграция островных дуг в сторону океана и образование задуговых бассейнов. Кроме

того известно, что иногда имеет место обратная миграция зон субдукции в сторону континента. Глубинный физический механизм миграции островных дуг вместе с зонами субдукции до последнего времени оставался неясным. Улучшенная постановка задачи регионального моделирования конвекции в верхней мантии позволила воспроизвести отмеченные выше циклические закономерности и особенности поведения зон субдукции.

Для расчета движений в верхней мантии с учетом литосферного покрытия была использована модель термической конвекции в среде с резко изменяющейся вязкостью. Принято, что на подошве литосферы из-за изменения агрегатного состояния вещества вязкость падает на два порядка. Сначала было смоделировано чисто гидродинамическое явление – погружение сильновязкой струи в слой менее вязкой жидкости. Получен известный практический результат периодического складывания струи и чередования направлений её растекания вдоль нижней границы. Этим чередованием можно объяснить цикличность геологических процессов.

Затем модель была усложнена добавлением легкого вещества, имитирующего действие континентальной коры. Легкое покрытие дрейфует вверх мантии, препятствуя погружению вещества. В итоге взаимодействия зона субдукции располагается около края континента, а нестационарный характер конвекции приводит к их совместному перемещению. Когда плита задвигается под континент, наблюдается феномен отката зоны субдукции в сторону океана, а когда погружающаяся плита переворачивается и движется в обратном направлении, зона субдукции наступает на континент.

## **ГИДРОДИНАМИКА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ЦИЛИНДРОМ И ДВИЖУЩЕЙСЯ СТЕНКОЙ**

*В.Д. Котелкин<sup>1</sup>, А.А. Монахов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Механико-математический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Представлены результаты расчета и экспериментального исследования течения жидкости в малом зазоре между неподвижным цилиндром и движущейся цилиндрической стенкой. Эта задача представляет интерес, как для различных инженерных приложений, так и для медицины и биологии. Перед зазором возникает область с повышенным давлением, а за линией минимального зазора происходит понижение давления. Уменьшение давления до давления растворенных газов может привести к возникновению газовой кавитации. Для паровой кавитации понижение давления должно быть не выше давления паров насыщения самой жидкости.

Численные расчеты выполнены с использованием биполярных координат. Показано, что с уменьшением зазора между цилиндром и

движущейся стенкой, область минимального давления на поверхности внутреннего цилиндра смещается к линии минимального зазора. Изменение скорости движения при постоянном зазоре приводит только к уменьшению давления, не смещая его положения. Получено, что с увеличением радиуса внутреннего цилиндра (при постоянном радиусе внешнего цилиндра) точка минимума давления отодвигается от линии минимального зазора. Эти данные подтверждены экспериментально.

Эксперименты, включающие измерение давления на поверхности внутреннего цилиндра, показали, что понижение давления в диффузорной области до давления растворенных газов приводит к возникновению кавитации в виде цепочки пузырьков на поверхности внутреннего цилиндра вдоль образующей. Соответственно течение при этом становится трехмерным. Кавитация в виде цепочки пузырьков на линии минимального давления указывает на модуляцию давления вдоль этой линии. Показано, что давление в кавитационной области с уменьшением зазора, не может быть ниже давления растворенных газов и определяется степенью насыщения жидкости газами. С уменьшением зазора кавитационная область расширяется к линии минимального зазора, не достигая ее. Для предельно малой величины зазора между цилиндрами обнаружено два разных режима кавитационного течения. Выбор режима определяется предысторией процесса создания такого зазора. Показано, что вдоль поверхности внутреннего цилиндра в конфузорной и диффузорной областях формируются зоны с возвратным течением.

## ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ДВУМЕРНОМ ТЕЧЕНИИ КОМЕТНОГО ГАЗА

*К.В. Краснобаев<sup>1,2</sup>, Р.Р. Тагирова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Механико-математический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва

Рассматривается неустановившееся истечение газо-пылевой смеси из ядра кометы. Принимаются во внимание фотохимические реакции и перенос излучения. Существенной особенностью модели является учет присутствия в смеси ранее не рассматривавшейся компоненты – энергичных электронов, возникающих при термализации нетепловых фотоэлектронов. Предполагается, что направленная скорость энергичных электронов равна скорости смеси, в то время как их температура может существенно отличаться от температуры смеси. Плазма считается квазинейтральной, ее степень ионизации  $\sim(10^{-2}-10^{-3})$ , а изменение электронной концентрации происходит в результате фотоионизации и рекомбинации. Влиянием электронов на движение смеси пренебрегается.



Выявлены области течения, в которых выполняется критерий развития конденсационной моды тепловой неустойчивости и определены соответствующие инкременты нарастания возмущений. Расчеты показали, что на нелинейной стадии развития неустойчивости происходит переход в устойчивое «холодное» или «горячее» состояние – разбиение среды на две фазы. При этом переход в устойчивое состояние с более низкой концентрацией происходит существенно быстрее, чем переход в состояние с ее более высокими значениями. Возмущение концентрации достигает максимума по абсолютной величине примерно на расстояниях  $10^4$  км. Результаты моделирования согласуются с наблюдениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 14-01-00747).

## СРАВНЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТОРЕ И ЗМЕЕВИКЕ

*Б.И. Краснопольский<sup>1</sup>, Н.В. Никитин<sup>1</sup>, В.П. Парамонов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Механико-математический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Змеевик, или спирально-изогнутая труба с кривизной и кручением, является распространенным теплообменным устройством, активно применяемым в промышленности. Для труб с кривизной и кручением зачастую используют эмпирические законы сопротивления, полученные для тора, пренебрегая влиянием кручения трубы. Целью настоящей работы является изучение особенностей турбулентного течения с учетом кручения трубы, и влияние кручения на вторичные течения, возникающие в таких трубах.

В работе представлены особенности разработки и реализации вычислительного алгоритма для прямого численного моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости. Этот алгоритм рассчитан на использование ортогональной системы координат, для чего вводится соответствующая спиральная система координат. Ввиду сложного вида уравнения Пуассона для определения давления, применение прямых быстрых методов для решения системы линейных алгебраических уравнений оказывается невозможным. В работе для этих целей используются итерационные методы общего вида, эффективная параллельная реализация которых была разработана авторами ранее.

В докладе обсуждаются полученные зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса и картины течений для стационарных режимов при различных значениях параметров кривизны и кручения трубы. Приводятся и сопоставляются основные характеристики турбулентного течения в змеевике и тороидальной трубе эквивалентной кривизны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№14-01-00295-а).

## О РАЗВИТИИ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СТАЦИОНАРНОМ СЛАБОНЕОДНОРОДНОМ ФОНЕ

*А.Г. Куликовский*

Математический институт имени В.А. Стеклова РАН, Москва

Изучаются процессы развития линейных одномерных возмущений на слабонеоднородном стационарном фоне, т.е. на фоне, зависящем от координаты  $x$  через отношение  $x/L$ , где  $L$  – большой масштаб. Время развития возмущений  $T$  считается достаточно большим, так что возмущения успевают распространиться на расстояния, сравнимые с  $L$  и неоднородность успевают повлиять на поведение возмущений. Рассматриваются возмущения, порожденные локализованным в малой области внешним воздействием, ограниченным во времени. Предполагается, что во всей рассматриваемой области или ее части выполняются условия локальной неустойчивости, т.е. считается, что если «заморозить» параметры фона, то в некоторой области значений  $x/L$  будут существовать растущие возмущения. На основании преобразования Фурье по времени и применении метода перевала формулируется процедура нахождения асимптотики возмущений при больших значениях  $L$  и  $T$ . Показывается, что возмущения могут описываться с помощью комплексных уравнений Гамильтона, в которых функция Гамильтона – это частота, выраженная из дисперсионного уравнения как функция волнового числа и координаты, эти величины в случае локальной неустойчивости комплексны. Рассматривается связь полученной асимптотики с собственными функциями задачи.

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ПРОНИЦАЕМЫХ УПРУГИХ ТЕЛ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

*Н.А. Лебедева<sup>1</sup>, К.Ф. Синьков<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва,

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт  
(государственный университет), Москва

Во многих технологических процессах имеет место перемещение в трубах различных пористых агрегатов. К примеру, для целлюлозно-бумажной промышленности представляют интерес задачи, связанные с движением волокнистых суспензий, ключевой особенностью которых является формирование пространственной сети соприкасающихся волокон, имеющей конечную прочность при относительно невысоких объемных долях твердой фазы. Для таких течений в некотором диапазоне расходов через трубопровод

имеет место стержневое течение суспензии с пористым проницаемым ядром, отделенным от стенки трубы зазором чистой несущей жидкости.

Значимыми характеристиками подобных процессов являются скорость перемещения проницаемых тел и перепады давления необходимые для их транспортировки. Поскольку характерные напряжения возникающие в твердом скелете при движении тела могут быть сравнимы с его предельными сдвиговыми напряжениями, вопросы возможного перехода части скелета в пластическое состояние также интересны с практической точки зрения.

В работе построена стационарная модель транспорта и перехода в пластическое состояние длинного проницаемого упругого тела, переносимого потоком несжимаемой вязкой жидкости со степенной реологией. Рассматриваются две геометрические постановки – вертикальная труба круглого сечения и плоский горизонтальный канал. Найдены возможные режимы течения и установлены граничные значения параметров, отвечающие за смену режимов. Получены полуаналитические выражения для распределения скорости жидкости в зазоре между телом и стенками канала, перепада давления и стационарной скорости движения тела. Исследованы условия перехода тела в пластическое состояние в зависимости от определяющих параметров задачи.

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

## **ТРЕХМЕРНАЯ СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

*В.А. Левин<sup>1</sup>, И.С. Мануйлович<sup>1</sup>, В.В. Марков<sup>1,2</sup>*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,  
Математический институт имени В.А. Стеклова РАН, Москва

В трехмерной нестационарной постановке моделируется процесс спонтанного формирования трехмерной структуры детонации и ее распространения в каналах различного поперечного сечения. Исследуется процесс нарастания возмущений и трансформация одномерного течения в течение с существенно трехмерной структурой детонации, называемой, по аналогии с двумерным случаем, ячеистой. Численное моделирование осуществляется на базе системы уравнений Эйлера. Химические реакции в горючей пропановоздушной смеси описываются одностадийной кинетикой с одной необратимой реакцией. Предполагается, что инициирование детонации происходит при воздействии плоской одномерной ударной волны, вызванной подводом энергии у закрытого торца канала. Исследование проводится модифицированным методом С.К. Годунова 1-го порядка точности по пространству и по времени. Метод реализован в оригинальном программном

комплексе, предназначенном для решения широкого круга одномерных, двумерных и трехмерных задач нестационарной динамики газообразных горючих смесей. Расчеты выполнены на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов» с числом расчетных ячеек от 0,1 до 10 миллиардов.

Согласно расчетам, в определенный момент времени происходило формирование трехмерной структуры. В каналах с достаточно большими размерами поперечного сечения наблюдалась нерегулярная трехмерная ячеистая структура детонации. Установлено, что уменьшение обоих поперечных размеров канала приводит к исчезновению трехмерной ячеистой структуры детонации. Если ширина канала меньше критической, поперечные волны не развиваются и детонация является почти одномерной. Если ширина канала больше упомянутого критического значения, но достаточно мала для большого количества поперечных волн, то происходит упорядочение ячеистой структуры. В канале круглого сечения достаточно малого диаметра изначально плоская волна детонации спонтанно трансформируется в волну спиновой детонации, проходя четыре фазы. Найдено критическое значение диаметра канала, разделяющее режимы с трехмерной ячеистой детонацией и режимы со спиновой детонацией. Исследована устойчивость спиновой детонации при ее переходе в канал большего (или меньшего) диаметра. Установлено, что спин сохраняется, если диаметр канала меньше (или, соответственно, больше) определенного критического значения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-50-00005.

## **ФОРМИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ЗА СЧЕТ ЭНЕРГИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА**

*В.А. Левин<sup>1</sup>, И.С. Мануйлович<sup>1</sup>, В.В. Марков<sup>1,2</sup>*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,  
Математический институт имени В.А. Стеклова РАН, Москва

Представлены результаты численного исследования формирования детонации в трехмерных сверхзвуковых потоках горючей газовой смеси за счет ее кинетической энергии. Инициирование детонации в потоке происходит без объемного подвода энергии от внешних источников. Расчеты выполнены на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов». Исследование проводится модифицированным методом С.К. Годунова, реализованном в оригинальном программном комплексе, предназначенном для решения широкого круга одномерных, двумерных и трехмерных задач нестационарной динамики газообразных горючих смесей. Рассматривается пропановоздушная смесь, горение которой описывается одностадийной кинетикой.

Рассмотрены течения в трехмерных каналах нескольких различных конфигураций. Исследован процесс формирования детонации в трехмерном

канале, входное сечение которого является прямоугольником, через который поступает комбинированный сверхзвуковой поток. Одна часть потока – стехиометрическая пропано-воздушная смесь, другая – воздух. На некотором расстоянии от входного сечения располагается уступ, перекрывающий часть канала и продолжающийся вниз по потоку, образуя канал меньшего поперечного сечения.

Представлены результаты расчетов в трехмерном канале квадратного поперечного сечения, изменяющегося по гармоническому закону в продольном направлении. Согласно расчетам, при недостаточной скорости потока наблюдается эффект запираия и движения детонационной волны ко входному сечению благодаря тепловыделению.

В случае винтового канала эллиптического сечения обнаружен режим стационарной детонации, формирующейся вблизи поверхности канала.

Проведено исследование течения в цилиндрическом канале с набором из семи криволинейных лопастей. Сечения лопастей плоскостями, перпендикулярными оси канала, являются параболическими, а ненулевой угол наклона лопастей к набегающему потоку обеспечивается равномерным «вращением» парабол при перемещении вдоль канала. Изучены процессы при различных скоростях набегающего потока  $U$ . Найдены два критических значения скорости –  $U_1$  и  $U_2$ . При  $U < U_1$  детонации нет. При  $U_1 < U < U_2$  формируется нестационарная детонация, распространяющаяся ко входному сечению канала. При  $U > U_2$  возникает течение со стационарной детонацией.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-19-01759.

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА НА ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*А.И. Леонтьев*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

В докладе представлены обобщенные результаты многолетнего исследования процессов трения и теплообмена на проницаемых поверхностях. Основное внимание уделено особенностям и параметрам возникновения критического и сверхкритического вдува в до- и сверхзвуковых течениях. С определением коэффициента восстановления температуры стенки в сверхзвуковом потоке вводится понятие процесса энергоразделения и метода газодинамической температурной стратификации, основанного на зависимости равновесной температуры теплоизолированной стенки от критерия Прандтля. Представлены результаты численного и экспериментального исследования влияния параметров потока, вдува и отсоса газа на стенке, впрыска жидкой фазы в поток, критериев Прандтля и Рейнольдса как на величину коэффициента восстановления температуры, так

и на величину энергоразделения потоков в целом. Подробно рассмотрен парадокс температурной стратификации в теплообменнике типа «труба в трубе», обнаруженный в опытах, проведенных в НИИ механики МГУ. Опыты показали, что при использовании трубы с проницаемыми стенками меняется знак температурной стратификации. Приводится объяснение парадоксального результата. Представлены новые данные по исследованию процесса энергоразделения при впрыске жидкой фазы в сверхзвуковой поток.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№14-19-00699).

## **НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ВЯЗКОГО ГАЗА**

*И.И. Лунатов*

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

Работа посвящена обзору некоторых современных достижений в области применения асимптотических методов к решению задач аэрогидродинамики.

За прошедшие годы вычислительная техника и численные методы развивались достаточно интенсивно, что позволяло, по мнению ряда авторов, надеяться на решение как теоретических, так и практических задач аэродинамики исключительно вычислительными средствами. Вместе с тем, оказалось, что существует довольно много проблем, не решаемых, по крайней мере в ближайшие десять лет средствами вычислительной аэродинамики. К таким проблемам относится в первую очередь описание турбулентных течений и ряда других, имеющих непосредственное отношение к практической аэродинамике проблем, таких как псевдоскачок, бафтинг и т.д. Поэтому, кроме вычислительного эксперимента сохраняют значение и физический эксперимент, наряду с теоретическими методами анализа.

Под теоретическими мы понимаем здесь преимущественно асимптотические, использующие предельные переходы при малых и больших параметрах. Таковыми параметрами в рассматриваемой работе являются число Рейнольдса и разность числа Маха и единицы. Хотя асимптотические теории имеют ограниченную область применения и их точность существенно зависит от величины малого параметра, тем не менее, эти теории позволяют получать параметры подобия, выявлять структуру сложных течений и по существу выявлять главные физические механизмы, ответственные за возникновение тех или иных эффектов.

Настоящая работа посвящена в основном приложению асимптотических методов к исследованию устойчивости и отрыва пограничных слоев при трансзвуковых скоростях, а также исследованию нелинейных процессов вязко-невязкого взаимодействия для несжимаемых и сжимаемых течений. Сложность первой из проблем характеризуется

наличием в задаче двух малых параметров - числа Рейнольдса и разности числа Маха и единицы. Понимание физических процессов, происходящих при трансзвуковых скоростях позволяет надеяться на адекватное описание отрыва, и устойчивости для режимов обтекания реализующихся при крейсерских скоростях полета транспортной авиации. Весьма важными представляются исследования нелинейных режимов вязко-невязкого взаимодействия. Применение современных методов анализа обещает обеспечить, как продвижение в области изучения нелинейной фазы ламинарно-турбулентного перехода, так и для описания автоколебательных режимов вязко-невязкого взаимодействия.

## **НЕСТАЦИОНАРНОЕ ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ, КОЛЕБЛЮЩИХСЯ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ**

*Ю.М. Липницкий*

ЦНИИМаш, Королев, Моск. обл.

При полете в плотных слоях атмосферы летательных аппаратов (ЛА), под воздействием возмущающих факторов формируется колебательная форма движения объекта относительно центра масс. Характер изменения амплитуды колебаний ЛА определяется его динамической устойчивостью, которая является одной из основных характеристик, влияющих на параметры траектории. Поскольку во многих случаях скорость линейных перемещений точек поверхности ЛА за счет колебаний значительно меньше скорости потока, то при решении задач определения нестационарных аэродинамических характеристик ЛА чаще всего использовался метод малого параметра, в рамках которого нестационарные возмущения представлялись в виде разложения по кинематическим параметрам движения. В силу малости параметров возмущения С.М. Белоцерковским (1959 г.) была введена гипотеза гармоничности, в соответствии с которой нестационарное движение тела полностью определяется значениями кинематических параметров в рассматриваемый момент времени.

Наличие современных многопроцессорных вычислительных машин позволяет проверить эту гипотезу, а прогресс в развитии измерительной техники замерить не только значения демпфирующего момента, но и запаздывание давления при колебаниях тела.

Изложению расчетных и экспериментальных подходов к определению демпфирующих характеристик на колеблющихся телах, развитых в ФГУП ЦНИИМаш, посвящено данное сообщение.

## **КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОПЕРЁННЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЛ В ВОЗДУХЕ**

*Б.Я. Локшин, Ю.М. Окунев, О.Г. Привалова, В.А. Самсонов*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Доклад содержит обзор серии задач о движении оперённого тела в среде в рамках квазистатических (и точечных) моделей воздействия среды на тело.

В рамках этого подхода удалось сформировать замкнутую модель воздействия, которая позволила провести сопоставление поведения тела при различных условиях движения: поведение тела с частичным закреплением в аэродинамической трубе, поведение этого же тела в свободном полёте при разных типах тяги, спуск этого тела под действием силы тяжести.

Проведено сравнение условий устойчивости тривиального режима авторотации, одинакового для рассмотренных задач. Сравнены также и нетривиальные притягивающие режимы движения (типа различных винтовых движений), неизбежно возникающие при потере устойчивости тривиального.

## **РАСЧЁТ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОЛЁТА ГРУППЫ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ В АТМОСФЕРЕ**

*В.Т. Лукашенко<sup>1,2,3</sup>, Ф.А. Максимов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Механико-математический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Институт автоматизации проектирования РАН, Москва,

<sup>3</sup>Вычислительный центр имени А.А. Дородницына РАН, Москва

При полете в атмосфере метеорное тело под воздействием увеличивающегося скоростного напора и теплового нагрева разрушается. При этом рассчитать баллистические характеристики каждого отдельного элемента представляется сложным из-за наличия соседних элементов и, как следствие, существенной интерференции. Наиболее оправданным в этих условиях представляется рассмотрение сопряженной задачи, когда баллистическая и аэродинамическая задачи решаются параллельно. Исходя из текущей конфигурации всей совокупности тел рассчитываются аэродинамические свойства каждого элемента, а затем изменяются их координаты и скорости в соответствии с их скоростями и силами, действующими на них. В докладе приведены разработанные методы решения задач об обтекании и динамики движения системы тел.

Метод решения сопряженной задачи о движении системы тел был применен для поиска стационарной конфигурации полета из 10 тел, изначально расположенных на прямой, перпендикулярной вектору скорости



набегающего потока. При достаточно малом расстоянии между телами максимальное значение аэродинамического сопротивления реализуется для элементов системы расположенных в центре. Максимальная подъемная сила, направленная вбок от оси симметрии, реализуется для крайних элементов. Такое распределение сил в начальный момент приводит к тому, что крайние элементы должны перемещаться вперед и от оси симметрии. После сложного ряда перестроек в конечном итоге получена конфигурация по форме напоминающая «галочку». Для данной установившейся конфигурации характерна одинаковая продольная сила, и нулевая подъемная. Фактически, получается картина, когда элементы системы перестают между собой взаимодействовать.

Проведенные расчеты показали, что разработанный метод решения сопряженной аэробаллистической задачи позволяет проследить движение группы тел за относительно большой промежуток времени. В дальнейшем метод предполагается применить для анализа динамики полета системы тел в сверхзвуковом потоке. Реализованный алгоритм предполагается дополнить учетом торможения группы метеорных тел как единого целого, которое может быть значительным при больших временах моделирования, и взаимодействием тел при их соударении.

## **К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ НА ПРОНИЦАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ**

*В.Г. Луцик, М.С. Макарова*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Проведено численное исследование влияния молекулярного числа  $Pr$  на величины турбулентных характеристик течения для газа с постоянными и переменными физическими свойствами. Расчеты выполнялись в широком диапазоне изменения числа Прандтля газа. Отмечена неоднозначная зависимость исследуемых величин. Так, на непроницаемой стенке с уменьшением числа  $Pr$  величина  $Pr_t$  возрастает в пристеночной области и тем сильнее, чем меньше число  $Pr$ . Для воздуха величина  $Pr_t$  слабо меняется по сечению трубы и близка к величине 0.85, обычно используемой в расчетах теплообмена. Показано, что при слабом отсосе влияние его на число  $Pr_t$  для воздуха и газовых смесей слабое. С увеличением интенсивности отсоса число  $Pr_t$  в логарифмической области возрастает и тем сильнее, чем меньше молекулярное число  $Pr$ . Причиной этого роста числа является существенная деформация профилей скорости и температуры. Исследованное влияние переменности на характеристики теплообмена показало, что отличие числа  $Nu$ , определенного в предположении постоянства турбулентного числа Прандтля от результатов, полученных в расчетах с использованием уравнения для турбулентного потока тепла, возрастает с уменьшением молекулярного

числа  $Pr$  и с увеличением интенсивности отсоса. Так, для  $Pr=0.18$  это отличие составляет  $\sim 8\%$ . При значительном подогреве теплоносителя, когда свойства нельзя считать постоянными, это отличие возрастает до  $\sim 10\%$ .

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ (№МК-6025.2016.8).

## **АННИГИЛЯЦИОННЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И АСТРОФИЗИКА**

*Д.Б. Любошиц*

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

В докладе в рамках общей теории относительности представлено решение задачи о волне аннигиляции, возникающей при сжатии однородной пылевой смеси частиц и античастиц под действием собственной гравитации. Решение содержит несколько управляющих параметров, зависимость от которых, а также все предельные случаи систематически исследуются. Задача может рассматриваться как описание класса физических явлений, например, детализации процесса формирования разлета гравитирующего газа при неоднородном коллапсе пыли. Согласно концепции А. Тауба(1971), развитой затем А.Н. Голубятниковым (1976–1987) с учетом детонационного перехода части массы покоя в энергию разлетающегося вещества, такого рода явление могло бы быть положено, в частности, в схему эволюции Вселенной типа «сжатие – разлет», причем при всех ограниченных физических переменных без всяких точечных особенностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №14-01-00056, 15-01-00361).

## **РОМБОВИДНЫЕ КРЫЛЬЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ**

*Ф.А. Максимов<sup>1,2</sup>, Н.А. Остапенко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

Разработаны методы моделирования течений около конических крыльев с ромбовидным профилем. Приведены результаты теоретического исследования несимметричного обтекания ромбовидных крыльев на режимах со сверхзвуковыми передними кромками. Обнаружено широкое разнообразие ранее в литературе не описанных схем течения в ударном слое в зависимости от числа Маха, углов атаки и скольжения, обусловленное наличием точки излома поперечного контура крыла. К ним, в частности, следует отнести: срыв потока с наветренной консоли и наличие вихря на режимах обтекания со скольжением и с дозвуковым течением на сфере в окрестности центральной

хорды крыла; при увеличении угла скольжения существование транс- и сверхзвукового течения по обводу вихря и в возвратном потоке около стенки подветренной консоли с образованием ударных волн. Для одной из последовательностей схем течения, имеющих место при умеренных числах Маха невозмущенного потока с ростом угла скольжения, характерно сближение точки растекания линии тока, замыкающей вихрь, и узла линий тока на поверхности подветренной консоли. Когда в окрестности точки излома контура реализуются условия, допускающие существование центрированной волны разрежения, вихрь сдвигается вниз по потоку вдоль поверхности крыла, а перед ним образуется ударная волна. После «слияния» указанных точки растекания и узла линий тока на подветренной консоли остается лишь точка стекания, в которую входят линии тока, идущие от передних кромок крыла, и вихревая особенность Ферри над ней. При умеренных и гиперзвуковых числах Маха в ограниченном диапазоне изменения угла скольжения характерно появление дополнительных критических точек на подветренной консоли: стекания и растекания. На таких режимах вихрь у точки излома контура прекращает свое существование и на изломе контура осуществляется течение в центрированной волне Римана. При гиперзвуковых числах Маха и больших углах скольжения на поверхности подветренной консоли реализуется лишь узел линий тока.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-01-02361).

## **РОЛЬ ЗАРЯДОВОЙ СТРУКТУРЫ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА И АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ФОРМИРОВАНИИ И ДВИЖЕНИИ ВОРОНКИ ТОРНАДО**

*С.А. Маслов, В.Л. Натяганов*

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

Анализируется влияние электрического поля под грозовым облаком на движение формирующейся заряженной воронки торнадо (смерча). Показано, что электрическое поле может обеспечивать как опускание воронки к земной поверхности, так и ее «втягивание» в облако.

Среда полагается несжимаемой (т.к. скорость потока гораздо меньше скорости звука), движение – осесимметричным. Собственное электрическое поле воронки, размеры которой малы в сравнении с облаком, не учитывается. Движение среды описывается уравнением Навье – Стокса с учетом электрической силы. Считается, что электрическое поле под облаком и вязкость среды вносят малую поправку в поле скоростей, которое в начальный момент времени представляет собой вихрь Рэнкина, т.е. внутри ядра торнадо скорость прямо пропорциональна расстоянию до оси воронки,

вне ядра – обратно пропорциональна. Радиус ядра предполагается постоянным во времени. На расстояниях до оси потока порядка размера воронки атмосферное электрическое поле меняется мало, и в линеаризованной по возмущениям скорости потока системе уравнений учитывается лишь нулевое приближение напряженности поля.

После линеаризации уравнения Навье – Стокса получаем, что радиальная и азимутальная скорости в первом приближении не меняются, а вертикальная по модулю линейно растет со временем. При этом чем больше зарядовая плотность нижней части облака и электрическое поле под ним, тем сильнее ускоряется воронка. Кроме того, в зависимости от зарядовой структуры грозового облака (дипольной или трипольной) воронка может как достигать поверхности Земли, часто приобретая интенсивную завихренность, так и «втягиваться» в облако. Если радиус ядра воронки меняется со временем, то вязкость среды оказывает влияние не только на возмущения скорости, но и на основной поток. В этом случае структура течения усложняется и для выявления основных закономерностей движения полезен вейвлет-анализ экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-31-00456) и Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт №14.577.21.0109, УИ проекта RFMEFI57714X0109).

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*О.Э. Мельник, И.С. Уткин*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

В докладе будет сделан обзор существующих моделей подъема магмы по каналу вулкана в процессе различных типов вулканических извержений, а также представлены модели роста кристаллов в магме и обсуждено их использование для реконструкции истории кристаллизации магмы.

Вулканическая активность часто проявляется в виде циклов коротких взрывных извержений, сопровождающихся выбросом пепла и газа в атмосферу. Примером такого типа активности может служить вулкан Сантьягито в Гватемале или вулкан Карымский на Камчатке.

Канал вулкана при таких извержениях обычно большую часть времени закрыт твёрдой лавовой пробкой, образующейся в результате дегазации и охлаждения столба магмы. Предложена и исследована одномерная модель канала вулкана, закрытого подвижной пробкой, под которой находится газовая полость. Изучен процесс изменения давления в полости и движения пробки. Проведено сравнение с наблюдаемыми величинами периода извержения и потока газа для вулкана Сантьягито.

Построена диффузионная модель роста кристаллов оливина и циркона в охлаждающейся магме. Проанализирована связь состава кристалла и скорости роста с температурной историей. Изучено влияния осцилляций температуры на зональность примесных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 15-01-02639).

## **НИКОЛАЙ ТВАНОВИЧ МУСХЕЛИШВИЛИ И НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКЕ**

*Г.К. Михайлов*

ВИНИТИ РАН, Москва

Академик Н.И. Мусхелишвили (1891–1976) происходил из дворянской семьи и получил прекрасное домашнее и высшее образование, окончив Санкт-Петербургский университет (1914). С 1918 г. он преподавал в Тбилисском университете и в 1941 г. возглавил созданную тогда Академию наук Грузии. Был одним из первых математиков страны, удостоенных звания Героя Социалистического Труда (1945). В середине XX века он был едва ли не наиболее уважаемым в научных и правительственных кругах СССР ученым в области математики и механики.

В середине 1950-х годов директивными органами было принято решение о восстановлении прерванных до того контактов ученых СССР с зарубежьем. В связи с этим Академия наук СССР создала группу Национальных комитетов по отдельным специальностям, которым было разрешено войти в международные союзы, объединяемые Международным комитетом научных союзов. В 1956 г. был создан и Национальный комитет СССР по теоретической и прикладной механике (в составе 48 человек) в целях расширения международных научных контактов в области механики. Но, если практически все другие Национальные комитеты, созданные тогда в Академии наук, превратились вскоре в недолго просуществовавшие простые комиссии при соответствующих Отделениях Академии, Национальный комитет по теоретической и прикладной механике разработал под руководством своего первого председателя Н.И. Мусхелишвили свой собственный устав («Положение») с широко поставленными задачами и придерживался его, сохраняя известную самостоятельность, в течение более полувека. Этим Национальный комитет был обязан прозорливости и авторитету Н.И. Мусхелишвили, возглавлявшему Комитет в течение 20 лет.

Национальный комитет сразу же сформулировал весьма широкий круг своих задач, который был утвержден Президиумом АН СССР.

В них входили, в частности: проведение всесоюзных съездов и конференций по теоретической и прикладной механике; содействие

координации научных исследований в стране; укрепление связей советских механиков с зарубежными учеными в интересах развития механики; рассмотрение вопросов, связанных с изданием в СССР журналов по механике; представительство советских механиков в Международном союзе по теоретической и прикладной механике; подготовка участия советских механиков в зарубежных конгрессах и конференциях; содействие развитию международного книгообмена.

## **ЗАДАЧА ОБ ОБТЕКАНИИ СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ ПЛАНЕТ НЕ ИМЕЮЩИХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

*А.В. Мищенко*

Институт космических исследований РАН, Москва

В настоящей работе исследуется взаимодействие набегающего потока солнечного ветра с планетой, которая не имеет собственного магнитного поля, но имеет атмосферу (пусть и очень разреженную). В частности, задача может относиться к обтеканию солнечным ветром Луны или Меркурия.

В работе формулируется постановка задачи в размерном и безразмерном видах. Обсуждаются безразмерные параметры задачи. Будет представлено численное решение задачи в зависимости от безразмерных параметров. Задача об обтекании сферы сверхзвуковым потоком газа решается методом Лакса-Фридрихса без выделения разрывов.

## **ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ И КАВИТАЦИОННОЕ СВЕЧЕНИЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТОНКОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ**

*А.А. Монахов, В.А. Полянский, И.Л. Панкратьева*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Задача транспортировки слабопроводящей жидкости в различных технологических процессах по диэлектрическим каналам часто осложняется процессом электризации, то есть образованием нескомпенсированного электрического заряда в среде. Возникающие при этом сильные электрические поля могут существенно изменить условия транспортировки. Наибольший эффект присутствия сильных полей проявляется в тонких каналах, когда толщина канала становится соизмеримой с толщиной пограничного слоя. В случае возникновения кавитации процессы электризации жидкости еще больше усложняются. Возможны ситуации,

когда не весь заряд выносится потоком, а значительная его часть аккумулируется на стенках канала. Используемые теоретические модели еще недостаточно хорошо развиты и расчеты, выполненные на их основе, не в полной мере согласуются с экспериментальными данными.

На экспериментальной установке проведены исследования электризации и разряда углеводородной жидкости в тонких диэлектрических каналах. Найден новый, аргумент в поддержку электрической природы свечения кавитационных пузырьков, ранее не приводившийся в литературе. Показано, что в расширяющейся области коаксиального канала может возникать кавитационное свечение в виде дискретных, стационарных образований. Установлено, что в начальном участке коаксиального канала возникают светящиеся электропроводные кавитационные нити, движущиеся вместе с потоком. Обнаружено, что при разряде кавитационных областей на металлическое кольцо возникает высокочастотное излучение в рентгеновской области.

При численном моделировании процессов электризации показано, что в тонких пристеночных слоях формируются области нескомпенсированного электрического заряда, приводящие к образованию сильных электрических полей. При этом возникают условия для эмиссии электронов из стенок канала. Образовавшиеся электроны прилипают к входящим в состав жидкости и примесей атомам и молекулам, имеющим большое сродство к электрону. Образующиеся при этом высоковозбужденные отрицательные ионы дезактивируются при тепловых столкновениях, что вносит вклад в экспериментально наблюдаемое свечение.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 16-01-00157).

## **МЕТОД АНАЛИЗА РАСХОЖДЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОЛЕЙ (АРТП)**

*Н.В. Никитин*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Интенсивные экспериментальные, а в последние годы и численные исследования показывают, что в пристенном слое турбулентного течения, где производится доминирующая часть энергии турбулентных пульсаций, наблюдаются отчетливо выраженные структуры с квазипериодическим распределением во времени и в пространстве. Попытки объяснить возникновение пристенных структур предпринимались неоднократно, однако консенсуса в этих вопросах до сих пор нет, а имеющиеся экспериментальные, численные и теоретические данные весьма противоречивы.

В данной работе предлагается принципиально новый подход к численному исследованию структуры и динамики пристенной турбулентности, который в значительной степени свободен от недостатков,

свойственных традиционным подходам. Предлагаемый подход основан на Анализе процесса Расхождения Турбулентных Полей (АРТП), близких друг к другу в начальный момент времени. Новый метод позволяет исследовать все стадии цикла самоподдержания турбулентности. При этом не требуется каких-либо специальных приемов обработки исследуемого поля скорости, которые могут повлиять на результат. Таким образом, метод Анализа Расхождения Турбулентных Полей представляет совершенно новые, не применявшиеся ранее возможности изучения турбулентных структур, определения их качественных и количественных характеристик, выделения определяющих свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№14-01-00295). Вычисления проводились на суперкомпьютерном комплексе МГУ «Ломоносов».

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ВСПЛЕСКОВ ПРИ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В НАКЛОННОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ**

*Н.В. Никитин, Д.Е. Пивоваров*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Турбулентные всплески являются примером локализованных турбулентных структур, наблюдающихся в различных гидродинамических течениях. Впервые эти структуры были обнаружены Осборном Рейнольдсом в опытах по изучению течения в круглых трубах. Он заметил, что в ламинарном потоке могут внезапно возникать ограниченные по длине трубы зоны турбулентного движения.

Недавно подобное явление было обнаружено в экспериментах по тепловой конвекции. В наклонном слое жидкости, ограниченном двумя изотермическими пластинами, при определенных значениях разности температур пластин устанавливается движение в виде конвективных валов. При некоторых значениях угла наклона в слое возникают зоны, в которых происходит разрушение течения турбулентными структурами, названными турбулентными всплесками. Со временем эти структуры исчезают и на их месте восстанавливаются конвективные валы.

В настоящей работе турбулентные всплески изучаются с помощью компьютерного моделирования. Численно решается система уравнений тепловой конвекции, записанная в приближении Буссинеска. Для решения используется конечно-разностный метод. В работе определены статистические характеристики турбулентных всплесков, прослеживается их эволюция во времени и взаимодействие между собой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-31-00521).



# СТРУКТУРА ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОРЫВОВ В КРУГЛЫХ ТРУБАХ

*Н.В. Никитин, В.О. Пиманов*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

В трубах круглого сечения при переходных числах Рейнольдса турбулентность принимает форму локализованных в пространстве структур, разделенных ламинарным потоком, называемых *турбулентными порывами*. Порывы сносятся вниз по течению примерно со средней скоростью потока, при этом их форма и пространственная протяженность в несколько десятков диаметров трубы остаются практически постоянными. В некотором смысле порыв можно рассматривать как единицу турбулентности, в которой в локальной форме заключен механизм ее самоподдержания.

Исследование турбулентного порыва осложнено присутствием беспорядочных турбулентных пульсаций, на фоне которых теряется его внутренняя структура. Недавно [Avila et al. "Streamwise-localized solutions at the onset of turbulence in pipe flow", Phys. rev. let. 110.22 (2013), p.224502] было найдено решение уравнений Навье-Стокса, напоминающее турбулентный порыв, но имеющее более простую динамику. В фазовом пространстве это решение принадлежит сепаратрисе, разделяющей области притяжения решений, соответствующих ламинарному и турбулентному режимам течения. Решение на сепаратрисе неустойчиво, однако может быть найдено численно. При наложении определенных условий симметрии оно оказывается периодическим по времени, что делает его удобным объектом для исследования.

Мы воспроизвели турбулентный порыв и решение на сепаратрисе численно, решая уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Решение на сепаратрисе действительно выходит на периодический режим. Так же, как и турбулентный порыв, оно оказывается локализованным в пространстве. В нем можно выделить продольные полосы повышенной и пониженной скорости, вытянутые вдоль стенки трубы. Наличие таких полос является неотъемлемой частью всех сценариев самоподдержания пристенной турбулентности.

В докладе будут представлены результаты исследования внутренней структуры решения на сепаратрисе и, в частности, описание процесса формирования продольных полос.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-01-00295-а и 16-31-00522-мол-а). Вычисления проводились на базе суперкомпьютерного комплекса МГУ.

## ТУРБУЛЕНТНЫЕ ВТОРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМЫХ НЕКРУГЛЫХ ТРУБАХ

*Н.В. Никитин, Н.В. Попеленская*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Исследуя турбулентные течения в прямых трубах с треугольным и прямоугольным сечением И. Никурадзе в 1926 году обнаружил специфические выпуклости в распределении средней скорости в угловых областях. Л. Прандтль объяснил это явление наличием трансверсального движения, направленного в сторону угловых точек в поперечном сечении и дал качественное объяснение возникновения таких вторичных течений. Вторичные течения в турбулентных потоках в прямых некруглых трубах (вторичные течения Прандтля второго рода) возникают в результате действия турбулентных пульсаций. Несмотря на их малую интенсивность (порядка 1-2% от основного течения), вторичные течения вносят существенный вклад в распределение продольной компоненты скорости, заметно влияют на распределения трения и теплообмена на стенках. Целью работы является выявление качественных свойств и количественных характеристик вторичных течений при турбулентном движении вязкой несжимаемой жидкости в прямых прямоугольных трубах. Экспериментальное исследование вторичных течений затруднительно, поскольку их величина сравнима с точностью измерений. Существующие полуэмпирические модели турбулентности либо основаны на теории Буссинеска и не могут описать вторичные течения, либо описывают их с неизвестной достоверностью из-за недостаточности экспериментальных данных для точного определения коэффициентов. Надежная информация о свойствах и структуре вторичных течений может быть получена при численных расчетах путем прямого решения полных уравнений Навье-Стокса. В настоящей работе рассчитаны турбулентные течения вязкой несжимаемой жидкости в прямых трубах с прямоугольным сечением при числах Рейнольдса 2205, 4410 и 10000. Использован консервативный конечно-разностный метод для несжимаемой жидкости (*Nikitin N. Finite-difference method for incompressible Navier-Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates. Journal of Computational Physics, № 217(2), с. 759-781, 2006*). Вычисления проводились на суперкомпьютерном комплексе МГУ. В развитом прямолинейном турбулентном потоке вторичное течение определяется по средней продольной компоненте завихренности и зависит от геометрических особенностей поперечного сечения. В частности, в прямоугольном (неквадратном) сечении вторичное течение в угловой области несимметрично относительно биссектрисы угла. В работе проверяется гипотеза о том, что в отличие от распределения скорости во вторичном течении распределение продольной компоненты завихренности в окрестности углов не зависит от

дальних границ и определяется исключительно локальными условиями. С этой целью рассчитаны течения в трубах с разной геометрией: соотношение сторон поперечного сечения составляло 1:1, 1:2 и 1:4. Результаты подтверждают высказанную гипотезу. Показано, что поле продольной компоненты завихренности, осредненное по времени и продольной координате, остается симметричным относительно биссектрисы угла поперечного сечения при изменении соотношения сторон поперечного сечения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00295).

## **РАЗВИТИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ НЕФТЕСЕРВИСНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

*А.А. Осипцов*

Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

В докладе обсуждаются современные проблемы гидродинамики в сфере нефтесервисных приложений. Рассматриваются технологии бурения, заканчивания и гидродинамического исследования скважин (ГИС), а также технология стимуляции нефтегазодобычи путем многостадийного гидроразрыва пласта (ГРП). Сформулированы ключевые направления развития технологий, требующие создания математических моделей многофазных течений в пористых средах, трещинах гидроразрыва и скважинах. Несмотря на существенное развитие методов прямого численного моделирования с использованием параллельных вычислений, вопросы построения самосогласованных моделей в рамках механики многофазных сред остаются актуальными. В частности, в докладе освещены вопросы построения многоконтинуальных моделей для газо-жидкостных сильно-инерционных турбулентных течений в скважинах, а также для мало-инерционных ламинарных течений суспензий в пористых средах и трещинах гидроразрыва. Дополнительная сложность моделирования обусловлена существенно неньютоновским характером реологии жидкостей, используемых в нефтесервисных технологиях (буровые растворы и гидроразрывные жидкости обладают свойствами вязко-пластичности и вязко-упругости). В заключении суммируется предлагаемая долгосрочная программа исследований по гидродинамике для нефтесервисных приложений.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВЯЗКОГО ЭФФЕКТА В УЗКОМ КОАКСИАЛЬНОМ КАНАЛЕ

*И.Л.Панкратьева, В.А.Полянский*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Исследуется течение вязкой слабопроводящей жидкости, содержащей малую примесь молекул электролитной природы, в узком коаксиальном канале с диэлектрическими стенками. При движении такой среды в малой окрестности стенок образуется слой нескомпенсированного электрического заряда, который при конвективном переносе в отсутствие продольного электрического тока индуцирует составляющую электрического поля, направленную против течения. При этом в заряженном слое возникает объемная кулоновская сила, которая может тормозить поток. Исследованию этого явления, получившего название электровязкого эффекта, в литературе посвящено в последние годы довольно много экспериментальных и теоретических работ. В экспериментах используются плоские достаточно узкие каналы с большим отношением ширины канала к высоте. При этом отмечаются большие технологические трудности в изготовлении узких протяженных щелевых каналов с диэлектрическими стенками, так как для выявления электровязкого эффекта необходимо полностью исключить влияние на гидравлическое сопротивление канала такого фактора, как искажение прямоугольной формы поперечного сечения на всей длине канала. Изготовление прецизионного коаксиального цилиндрического канала представляет существенно меньшие технологические трудности.

В докладе разрабатываются теоретические основания для интерпретации данных, которые можно получить в экспериментах по измерению электровязкого эффекта в узких коаксиальных каналах в условиях умеренных чисел Дебая. В рамках развиваемой авторами модели электризации слабопроводящих сред при их течениях в каналах различной конфигурации проводится оценка возможного воздействия кулоновских сил на распределение скорости в пристенных слоях жидкости и на величину касательных напряжений на стенке. Рассматриваются разные модели электрохимических процессов на стенках с заряженными пристенными слоями различной интенсивности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-01-00157).

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ КИНЕТИКИ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ КОНУСА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИНИЙ НАТРИЯ И МОЛИБДЕНА

*Н.Н. Пилюгин*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Представлены результаты измерений в зависимости от времени интенсивности излучения спектральных линий Na с длиной волны  $\lambda=588,9$  нм и Mo ( $\lambda=379,8$  нм) при испарении  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ , а также линии Mo при испарении  $\text{MoO}_3$ . Эксперименты проводились на сверхзвуковой аэродинамической установке НИИТ-10 с дуговым плазмотроном низкого давления, на выходе которого имелось сверхзвуковое сопло с числом Маха  $M=2,6$  и температурой воздушной плазмы  $\approx 8000$  К. Модель представляла собой затупленный конус из графита. На его боковой поверхности имелось два отверстия, в которых размещались вкладыши со слоями исследуемых веществ. Режим течения около отверстий был близок к свободномолекулярному. При обтекании конуса происходит испарение индикаторных слоев и их термическое разложение на молекулы и атомы. При этом образуются возбужденные состояния атомов Na и Mo, что приводит к появлению линейчатого спектра. Для регистрации интенсивности излучения  $I_\lambda$  спектральных линий использовался электронно-оптический канал, состоящий из двух линз, монохроматора с дифракционной решеткой, фотоэлектронного умножителя и цифрового вольтметра, который регистрировал ток, пропорциональный  $I_\lambda$ . Длительность каждого эксперимента составляла около 10 с. Теоретический анализ результатов измерений позволил выявить схему неравновесных химических реакций в слое испарения, рассчитать унос массы, решить систему уравнений химической кинетики для основных компонент, получить формулу для  $I_\lambda(t)$ , которая зависит от температуры и концентрации атомов. Из сопоставления теоретической и трех измеренных зависимостей  $I_\lambda(t)$  найдена температура в слое испарения ( $T=3100$  К) и три константы скоростей реакций распада для молекул, испаряющихся из исходных индикаторных слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 14-01-00775).

## **МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕРМИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ**

*М.Ю. Погосбемян, А.Л. Сергиевская*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

В работе рассматриваются процессы диссоциации и колебательной релаксации молекул  $O_2$ , протекающие при высоких температурах, в термически неравновесных условиях, характерных для сильных ударных волн. В этом случае время колебательной релаксации становится сравнимым с характерным временем протекания реакций диссоциации двухатомных молекул и константы скорости химических реакций могут существенно отличаться от равновесных.

Традиционно рассмотрение термически неравновесных процессов проводится в двух приближениях кинетики химических реакций: в отсутствие равновесия между поступательными и колебательными степенями свободы молекул-реагентов, но с сохранением больцмановского распределения (двухтемпературный газ), или в отсутствие больцмановского распределения с описанием заселенностей отдельных колебательных уровней (уровневая кинетика).

С использованием вычислительного комплекса "MD Trajectory" методом квазиклассических траекторий было проведено детальное исследование процессов диссоциации и колебательной релаксации  $O_2+O$  и получены ключевые характеристики этих процессов для разных уровней описания – двухтемпературного и уровневого.

На основе результатов траекторных расчетов проведена верификация теоретических моделей Мэрроуна – Тринора, Смехова, Мачерета – Фридмана,  $\gamma$ -модель, и получены рекомендации для их параметров. Проведено сравнение с экспериментальными данными, которое выявило хорошее согласие на широком диапазоне поступательных и колебательных температур от 2000 до 10000 К.

## **О МЕХАНИЗМЕ ПОЯВЛЕНИЯ ТЯГИ ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЛН С НАКЛОННОЙ ПЛАСТИНОЙ**

*В.В. Прокофьев, А.К. Такмазян, Е.В. Филатов*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Ранее с помощью физического и численного эксперимента был обнаружен эффект движения против волн погруженной в жидкость пластины. Пластина не имела вертикального перемещения и была закреплена на

тележке, свободно перемещавшейся вдоль волнового канала по рельсам. В настоящей работе представлены результаты физического и численного эксперимента с волнодвижителем-пластиной, установленным на судно катамаран. Расстояние между корпусами – 1000 мм, общая длина судна 6110 мм. Наклонная пластина была установлена в средней части катамарана. Большая длина корпусов обеспечивала отсутствие килевой качки судна. Однако в отличие от пластины, жестко закрепленной на тележке, для катамарана имела место вертикальная качка, обусловленная переменной вертикальной составляющей силы, действующей на пластину. Были проведены исследования зависимости скорости движения катамарана против волн в зависимости от параметров волнодвигателя и самих волн. Оказалось, что величина скорости движения против волн даже увеличилась по сравнению с волнодвижителем, прикрепленным к тележке. Эффект движения катамарана под действием волн (и направление движения судна) весьма сильно зависит от глубины погружения (верхняя кромка пластины может быть ниже или выше невозмущенной поверхности воды) и угла наклона пластины. Показано, что при некоторых параметрах направление движения судна определяется заданием начальной скорости. Наибольшую скорость движения судна против волн обеспечивали волнодвигатели сравнительно малых размеров (длина пластины ~ 0,3 м при длине катамарана 6 м и длине волны 3 – 4 м). Показано, что те же волнодвигатели при измененных параметрах установки пластины могут весьма эффективно использовать энергию волн для обеспечения хода катамарана по волнам.

С помощью вычислительного пакета XFlow было проведено численное моделирование процесса образования волн в канале с помощью клиновидного волнопродуктора и одновременно воздействие этих волн на наклонную пластину. Причем плавучесть взаимодействующей с волнами пластины полагалась равной плавучести катамарана из эксперимента. Сравнение рассчитанных параметров волн и параметров движения катамарана с экспериментальными данными показывает хорошее согласование. С помощью численных расчетов удалось определить механизм эффекта движения пластины против волн. Оказалось, что он, в основном, зависит от гидростатической составляющей гидродинамических сил и, в конечном счете, определяется высотой уровня находящейся над кромкой пластины волны. Наиболее интенсивное движение против волны имеет место в фазе, когда центр впадины приближается к верхней кромке пластины. Эффект движения против волн связан с дефицитом среднего по периоду уровня жидкости над пластиной, за счет нелинейной перестройки профиля и частичного обрушения волны в окрестности верхней кромки. Для проверки гипотезы о гидростатическом характере наблюдаемых эффектов была использована теория мелкой воды первого приближения. Амплитуда набегающих волн задавалась такой, чтобы обеспечить обрушение волн вблизи верхней кромки пластины. Результаты проведенных вычислений средней скорости движения пластины в зависимости от частоты волн,

качественно повторяют экспериментальные данные, а с учетом пересчета по амплитуде получено и количественное соответствие.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ В ДИФFUЗОРАХ С ПРОНИЦАЕМОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ**

*А.И. Решмин, А.Д. Сударикова, С.Х. Тепловодский, В.В. Трифонов*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Проведено экспериментальное исследование течения в сверхкоротких диффузорах. Сверхкороткий диффузор представляет собой круглый расширяющийся канал, имеющий переходную часть, выполненную в виде тела вращения. Диаметр канала увеличивается в несколько раз на длине примерно 0.5 входного диаметра. В выходном сечении диффузора установлена проницаемая перегородка в виде тканой металлической сетки, которая тормозит поток и вызывает его расширение в направлении от оси канала к образующей переходного участка. Одновременное воздействие на поток профилированной стенки и проницаемой перегородки приводит к тому, что отрыв потока не происходит.

Измерения показали, что потери давления в диффузоре могут быть меньше входного скоростного напора, так что при выходе потока в открытое пространство давление перед диффузором становится меньше атмосферного. При безотрывном течении полное давление на оси канала внутри диффузора сохраняется, потери давления имеют место только на сетке.

Проведено измерение распределения статического давления вдоль образующей канала диффузора. Для этого исследования был изготовлен диффузор с дренажными отверстиями в стенке канала. Обнаружено, что при безотрывном течении в канале статическое давление вдоль образующей распределено монотонно и градиент давления вдоль образующей отрицателен. При немонотонном изменении давления на стенке расширяющейся части канала возникает отрыв потока от стенки. В этом случае пульсации скорости в выходном сечении диффузора значительно увеличиваются.

Целью исследования является разработка технологии создания диффузора, формирующего безотрывное течение внутри канала с заданным профилем скорости на выходе из него. Этого можно добиться с помощью выбора формы стенки канала и свойств перегородки. При подаче на вход такого диффузора симметричного малотурбулентного потока на выходе диффузора можно сформировать затопленную струю с начальным ламинарным участком длиной, равной нескольким диаметрам. На основе таких диффузоров могут быть созданы устройства для формирования газодинамической защиты объектов в медицине и технике.



## ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ПРЯМОМ КРУГЛОМ ДИФфуЗОРЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ ПРИ $Re < 3000$

*А.И. Решмин, А.Д. Сударикова, С.Х. Тепловодский, В.В. Трифонов*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Проведены экспериментальные и расчетные исследования характеристик течения в коническом диффузоре с углом раскрытия  $\sim 1.2^\circ$ , входным  $D_1 = 6$  мм и выходным  $D_2 = 20.4$  мм диаметрами ( $D_2/D_1 = 3.4$ ), длиной  $L = 710$  мм (параметры во входном сечении диффузора обозначаются индексом 1, в выходном — 2). В отличие от диффузора с углом раскрытия  $\sim 0.6^\circ$  и длиной 420 мм, где формировалось течение с отрицательным продольным градиентом давления, в исследуемом диффузоре, согласно расчетам, имеет место положительный продольный градиент давления, который может вызывать отрыв потока от стенок диффузора. Для определения характера течения и обнаружения возможных отрывов потока было измерено статическое давление в канале.

Исследовалось влияние условий на входе на характер течения в диффузоре. Для этой цели воздух на вход в диффузор подавался через трубы с различными диаметрами  $d$ . Диаметр и длина труб выбирались так, чтобы на выходе из трубы было сформировано развитое турбулентное течение для всего диапазона расходов, соответствующих числам Рейнольдса на выходе из диффузора  $400 < Re_2 < 3000$ . В случае, когда диаметр трубы был равен входному диаметру диффузора ( $d = D_1 = 6$  мм), параметры течения на входе в диффузор менялись непрерывно. При  $d = 3$  и 1.7 мм ( $d < D_1$ ) имело место внезапное расширение канала, и это создавало на входе в диффузор возмущения потока различной интенсивности.

Экспериментальное исследование течения в канале конического диффузора показало, что при различных способах подачи турбулентного потока воздуха на выходе диффузора формируется турбулентное течение, при  $Re_2 > 800$ . Статическое давление в канале диффузора меняется монотонно с положительным продольным градиентом, при этом течение в канале — безотрывное. Параметры потока в выходном сечении диффузора не зависят от способа подачи воздуха в диффузор. Процесс формирования турбулентного течения при числах Рейнольдса на выходе больше 800 полностью происходит внутри диффузора. Параметры турбулентного течения на выходе из диффузора определяются только числом Рейнольдса и не зависят от условий на входе, пока эти условия достаточны для формирования турбулентного течения.

## **РАЗЛИЧНЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЕДЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МАЯТНИКА**

*Ю.Д. Селюцкий*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Рассматривается серия задач о динамике тела типа флюгера (аэродинамического маятника) в потоке сопротивляющейся среды. Для описания нестационарного взаимодействия маятника с потоком используется феноменологический подход, основанный на применении так называемого присоединенного осциллятора. В рамках этого подхода для моделирования внутренней динамики потока среды в исходную динамическую систему вводится дополнительная обобщенная координата.

Исследованы области устойчивости положений равновесия системы в пространстве параметров.

Проведено сравнение с результатами натуральных и численных экспериментов.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНО- КИСЛОРОДНЫХ СМЕСЕЙ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

*Г.Д. Смехов, О.П. Шаталов*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Приведены результаты численного моделирования процесса воспламенения водородно-кислородных смесей, разбавленных аргоном, при температурах (700-2500) K в широком диапазоне начальных параметров газа. Рассчитывались временные развёртки концентрации электронно-возбуждённого радикала  $\text{OH}^*$  и других компонентов, а также интенсивности интегрального излучения этого радикала на длинах волн вблизи  $\lambda=306.4$  нм.

В работе использовалась система кинетических уравнений для многокомпонентного реагирующего газа, предложенная в Институте механики. Численное решение системы уравнений позволяет получить не только распределения во времени концентраций компонентов, но и дополнительную информацию о вкладе любой реакции в производство тех частиц, которые в ней участвуют.

Отмечены особенности развёрток во времени интенсивности излучения и концентрации излучающего радикала. Установлено соответствие между измеренными развёртками интенсивности излучения, полученными в экспериментах на ударной трубе, и вычисленными при моделировании. Для

смесей с различными начальными параметрами установлены температуры, при которых происходит их воспламенение. Определены зависимости времени задержки воспламенения смесей от давления и компонентного состава.

Найденные закономерности использованы для получения температурной зависимости времени задержки воспламенения, приведённого к одному, заранее выбранному давлению и составу газа. Вычисленные значения приведённого времени задержки воспламенения водородно-кислородных смесей удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, известными из литературных источников.

## **НОВАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ В УПАКОВКЕ ПРОПАНТА**

*К.И. Толмачёва<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Механико-математический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,

<sup>2</sup>Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже», Москва

Задача о переносе частиц при фильтрации суспензии в пористой среде актуальна при моделировании процессов загрязнения и очистки прискважинной зоны, а также процесса очистки трещины гидроразрыва.

Новым элементом модели является учет эффекта конечной пористости упаковки частиц, осажденных на пористом скелете, и возможности течения жидкости в этой упаковке. Проведено сравнение с экспериментами по загрязнению пористого образца. Получено, что новая модель лучше, чем классическая, описывает профиль концентрации осажденных частиц в тех областях течения, где концентрация последних близка к максимальной.

Была установлена зависимость критической скорости мобилизации (минимальная скорость для начала вымывания частиц) от параметров потока, размера частиц и пор. Получено хорошее совпадение с экспериментальными данными по мобилизации частиц в прямоугольных трубах и пористых средах.

Изучены основные режимы притока нефти и газа из резервуара в трещину. Проведено моделирование процесса очистки с использованием реальных параметров нефтяных и газовых месторождений.

Автор выражает благодарность за научное руководство Боронину С.А. и Осипцову А.А.

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

*П.К. Третьяков*

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

В одной из своих работ, относящихся к ГПВРД, Е.С. Щетинков отмечал, что «процессы горения тесно переплетаются с процессами, протекающими в высокотемпературных потоках, двигающихся с дозвуковыми и сверхзвуковыми скоростями». А. Ферри также писал о сложности течения в камере сгорания (КС), в которой горение происходит в неоднородном потоке, содержащем волновые структуры, дозвуковые области и локальные отрывные зоны. Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал свидетельствует о проблемах организации рабочего процесса в КС с увеличением скорости потока, определяющими из которых являются смешение топлива с воздушным потоком, инициирование горения, стабилизация пламени и эффективное сжигание. Эти проблемы успешно решаются с применением различных способов активного и пассивного воздействия на течение, остаётся актуальной задача о минимизации потерь давления в проточном тракте, которая определяется особенностями развития и протекания процесса горения. Можно выделить некоторые газодинамические особенности структуры течения, которые определяют возникновение того или иного режима горения, причём, естественно, происходит процесс взаимовлияния.

Подача топлива в сверхзвуковой поток при соответствующих параметрах приводит к реализации диффузионного режима горения. Это слабоинтенсивный режим горения, который определяется процессом смешения. Попытки применения промотирующих способов, уменьшающих задержку воспламенения и время протекания химических реакций, становятся эффективными только при создании условий интенсифицирующих процесс перемешивания. Как правило, совокупность таких воздействий приводит к интенсивному турбулентному режиму горения в дозвуковом потоке, переход к которому осуществляется либо заранее (на участке торможения сверхзвукового потока воздуха перед входом в КС), либо непосредственно в КС. Организация такого процесса приводит к значительным потерям полного давления и не обеспечивает высокой полноты сгорания особенно при использовании углеводородных топлив. Альтернативным приведённому режиму является организация преддетонационного режима горения. Основная особенность режима заключается в переходе от сверхзвукового течения на входе в КС в звуковое на выходе из неё. Этот процесс осуществляется за счёт интенсификации смешения и горения путём кратковременного воздействия на течение в КС пакетом

теплогазодинамических импульсов. В зависимости от вида топлива подбираются энергия в импульсе, длительность и частота импульсов. Выполненные экспериментальные исследования в осесимметричном и прямоугольном каналах подтвердили эффективность организации рабочего процесса с реализацией преддетонационного режима горения.

Работа выполнена в рамках проекта по фундаментальным исследованиям ИТПМ СО РАН (номер государственной регистрации 01201351870) и при финансовой поддержке РФФИ (№14-08-00820).

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ НА СФЕРЕ С ИГЛОЙ В УДАРНОЙ ТРУБЕ**

*В.П. Фокеев*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

В работе представлены экспериментальные данные исследования нестационарного процесса падения ударной волны на затупленное тело с иглой, направленной навстречу газовому потоку. Ранее в многочисленных работах обтекание затупленного тела с иглой стационарным потоком в аэродинамических трубах исследовалось в связи с необходимостью выявления закономерностей формирования передней зоны циркуляционного течения, отрыва потока на игле и, вследствие этого, уменьшения лобового сопротивления. Нестационарное течение при переходе от процесса отражения падающей ударной волны от затупленного тела к стадии стационарного (или квази-стационарного) его обтекания с отрывом на игле ранее не исследовалось.

Эксперименты проведены на ударной трубе «Квадрат» НИИ механики МГУ в углекислом газе при начальном давлении 4000Па (30 Торр) и числах Маха падающей ударной волны в интервале от 2 до 5. В экспериментальной секции ударной трубы сечением (98x98) мм в поле зрения теневого прибора ТЕ-19 располагалась сфера диаметром 45мм с иглой длиной 80мм и диаметром 1,1мм. Фоторегистрация визуализированной картины течения производилась с помощью цифровой камеры DICAM-Pro в режиме двух-кадровой съемки. В результате прослежена эволюция отраженной от сферы ударной волны с переходом от течения с бифуркацией отраженной волны к картине обтекания сферы с иглой, определены параметры течения в области отрыва потока на игле.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ (номер государственной регистрации темы АААА-А16-116021110195-4) при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00891-а), Российского научного фонда (проект 14-19-01759) и Совета по грантам Президента РФ (проект НШ-8425.2016.1).

## ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ МАХОВСКОГО ПАРАДОКСА ОТРАЖЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН

*В.П. Фокеев*

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

Маховский парадокс (МП) включает в себя два экспериментальных явления для процессов отражения нестационарных падающих плоских ударных волн (УВ) от плоской твердой гладкой поверхности:

-во-первых это наблюдение регулярного отражения (РО) ударной волны при таких значениях исходных параметров (число Маха падающей волны и угол падения), при которых теоретически РО невозможно;

-во-вторых (это уже для маховского отражения (МО) слабых УВ) радикальное отклонение экспериментальных значений угла наклона отраженной ударной волны от значений, полученных теоретически для трехударной конфигурации с однородными течениями идеальных газов в окрестности тройной точки маховской конфигурации.

В данной работе на основе экспериментов, проведенных в ударных трубах, анализируется МО сильных УВ от плоской поверхности, которое не привлекало особого внимания вследствие хорошего соответствия экспериментальных и расчетных значений параметров трехударных конфигураций. Однако из экспериментальных данных различных авторов выявляется характерная особенность эволюции МО вблизи перехода к РО, то есть вблизи области исходных параметров, для которых наблюдается первый маховский парадокс.

Парадоксальность эволюции МО при приближении к РО заключается в том, что при увеличении угла наклона отражающей плоской поверхности, что является определяющим граничным условием, траектория тройной точки маховской трехударной конфигурации сохраняется неизменной и совпадающей с предельным углом отражающей поверхности границы области существования РО.

В работе дается оценка размера области в переменных (число Маха падающей УВ - угол падения УВ на отражающую поверхность), в которой наблюдается рассматриваемая особенность процесса отражения УВ. Отмечается связь с механизмом течения, определяющим первый маховский парадокс.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ (номер государственной регистрации темы АААА-А16-116021110195-4) при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00891-а), Российского научного фонда (проект 14-19-01759) и Совета по грантам Президента РФ (проект НШ-8425.2016.1).

# ВЛИЯНИЕ МГД-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ЛОКАЛИЗОВАННОГО У ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ, НА ЕЁ ОБТЕКАНИЕ ГИПЕРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

В.П. Фомичев, Е.К. Шипко, М.А. Ядренкин

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

Магнитогидродинамические (МГД) способы воздействия на аэродинамические характеристики гиперзвукового обтекания моделей показали свою эффективность в ряде экспериментальных, расчетных и аналитических работ. В данной работе МГД-эффекты систематизированы по величине параметра гидромагнитного взаимодействия, имеющие силовую природу,

Исследования влияния МГД-взаимодействия на структуру гиперзвукового потока воздуха у поверхности пластины проводились на МГД-стенде, позволяющим моделировать высокоскоростные газовые потоки с числами Маха  $M = 6-10$  с параметрами близкими к условиям полёта в стратосфере. Электромагнит создаёт в рабочей камере однородное магнитное поле с индукцией до 2,5 Тл. Ионизация газового потока осуществляется в области между узкими электродами ( $15,0 \times 1,5$  мм), вмонтированными в поверхность модели ( $50 \times 50$  мм) на расстоянии 15 мм от передней кромки, с помощью импульсного и высокочастотного разряда (1 МГц). Направление набегающего потока и линий магнитной индукции взаимно перпендикулярны, а направление тока такое, что возникающая электромагнитная сила направлена навстречу набегающему потоку.

Результаты экспериментальных исследований локального МГД-взаимодействия у поверхности пластины при ионизации гиперзвукового потока воздуха импульсным и ВЧ-разрядом показали, что при величине параметра взаимодействия  $S < 0,03$  имеет место *слабое МГД-взаимодействие*, которое не оказывает существенного влияния на ударно волновую структуру (УВС) потока. При  $S = 0,03-0,15$  наблюдается *умеренное МГД-взаимодействие*. Оно характерно тем, что величина силы  $\vec{j} \times \vec{B}$  становится достаточной для поддержания устойчивой зоны ионизации у поверхности. При этом может происходить увеличение угла наклона скачка уплотнения, присоединенного к передней кромке пластины. Увеличение параметра  $S$  до значений  $\sim 0,25$  приводит к полной перестройке картины течения такой, как трансформация присоединённого скачка в прямой отошедший скачок, наблюдается *сильное МГД-взаимодействие*. При дальнейшем увеличении параметра гидромагнитного взаимодействия ( $S > 0,3$ ) происходит нарушение целостности зоны ионизации и деструктуризация УВС, сам процесс становится сугубо нестационарным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-31-00226 мол\_а).

# ПОДМОДЕЛИ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ ДИФФУЗИИ С ПОГЛОЩЕНИЕМ

*Ю.А. Чиркунов*

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

В работе исследована пятипараметрическая модель, описывающая процесс нелинейной диффузии в неоднородной среде при наличии поглощения. С помощью предложенного автором алгоритма, основанного на использовании обобщенных преобразований эквивалентности, выполнена групповая классификация нелинейного вырождающегося дифференциального уравнения этой модели. Найдены шесть обладающих разными симметричными свойствами подмоделей исходной модели нелинейной диффузии, для пяти из которых поглощение является нестационарным. Для каждой из этих шести подмоделей получены формулы производства решений, содержащие произвольные постоянные, а все инвариантные решения, либо найдены в явном виде, либо их отыскание сведено к решению нелинейных интегральных уравнений. Наличие произвольных постоянных в интегральных уравнениях, определяющих эти решения, и формулы производства решений открывают новые возможности аналитического и численного исследования краевых задач для полученных подмоделей, а, тем самым, и для исходной модели нелинейной диффузии. Для полученных инвариантных подмоделей исследованы диффузионные процессы, для которых в начальный момент времени в фиксированной точке заданы либо концентрация и ее градиент, либо концентрация и ее скорость. Решение краевых задач, описывающих эти процессы, сведено к решению нелинейных интегральных уравнений. При некоторых условиях установлено существование и единственность решений этих краевых задач.

Полученные результаты могут быть использованы при исследовании диффузии вещества, диффузии электронов проводимости и других частиц, диффузии физических полей, распространения тепла в неоднородной среде, а также для изучения турбулентности в рамках феноменологической диффузионной модели Лейта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-01-00446-а).



# ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ОБТЕКАНИИ ЛУНОК В РАМКАХ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ ПОДХОДОВ

*А.Ю. Чулюнин*

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Проблема взаимодействия потока вязкой несжимаемой жидкости с лунками различной глубины привлекают внимание многих научных групп. Известно, что подобного рода углубления являются хорошими интенсификаторами теплообмена и не вызывают при этом сильного роста коэффициента гидравлического сопротивления. Это свойство применяется при разработке теплообменных устройств, как макро-, так и микро-масштабов. Кроме исследований по теплообмену, также известны работы, показывающие, что нанесение лунок на гладкие поверхности способно уменьшить значение коэффициента сопротивления.

Известно, что в зависимости от отношения высоты лунки к диаметру пятна их можно классифицировать как «мелкие» ( $h/D < 0.26$ ) и «глубокие» ( $0.26 < h/D < 0.5$ ). Картина течения, наблюдаемая в этих типах лунок, существенно различается. Наибольший интерес представляют «глубокие» лунки, в которых наблюдается нестационарный режим течения, характеризуемый не периодичным чередованием «левосторонней» и «правосторонней» несимметрии течения. При этом следует отметить, что попытки некоторых авторов воспроизвести данное явление в рамках URANS (Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes)-технологии заканчивались неудачей.

В данной работе в рамках вихреразрешающих методов – DES (Detached Eddy Simulation) и LES (Large Eddy Simulation) исследуется структура течения в лунках различной глубины. В качестве объекта исследования рассматривается плоскопараллельный канал с нанесенными углублениями на нижней стенке. Для разбиения тела на контрольные объемы используется как структурированная сетка с ячейками типа hexa, так и неструктурированная многогранная сетка с призматическим слоем у твердых стенок. Во всех случаях величина  $y^+ \leq 1$ . Число Рейнольдса, посчитанное по скорости набегающего потока и диаметру пятна лунки варьировалось от  $2 \cdot 10^4$  до  $1.2 \cdot 10^5$ . В результате серии расчетов получены интегральные значения коэффициентов сопротивления, а также картины течения в окрестности лунки, которые сравниваются с полученными ранее в рамках RANS-моделей.

# О СИНГУЛЯРНОСТИ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ТРЕХМЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ОБЛАСТИ ПЛОСКОСТИ СИММЕТРИИ

*В.И. Шалаев*

ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Моск. обл.,  
Московский физико-технический институт, Жуковский

Представлены новые результаты аналитических исследований поведения решения уравнений в пристеночной части пограничного слоя плоскости симметрии на конусе. Выяснилось, что существует один параметр  $\alpha$  – линейная комбинация продольного и поперечного напряжений трения, – который управляет поведением решения. Обнаружено, что при изменении знака параметра меняется топологическая структура течения, что, в частности, характеризуется появлением новой области течения у стенки. Течение в новой области не описывается теорией пограничного слоя, здесь в решениях уравнений Навье-Стокса обнаруживается вихрь, для которого важен эффект вязкой диффузии в двух поперечных направлениях. С другой стороны, для сращивания с решением в основной части течения решение уравнений пограничного слоя в пристеночной области не должны расти быстрее степенной функции при росте нормальной координаты. В явном виде получена асимптотическая форма решений уравнений для этой области и показано, что оно растет экспоненциально при  $\alpha < 0$ .

На основе опубликованных в литературе и новых численных решений в широком диапазоне чисел Маха и при различных температурах поверхности, показано, что граница области отсутствия решений согласуется с критическим значением нового параметра,  $\alpha = 0$ , связь которого с напряжениями трения и объясняет зависимость от указанных физических параметров течения. Представленные результаты не зависят от внешних краевых условий и справедливы как для сверхзвуковых, так и гиперзвуковых пограничных слоев. Они могут быть использованы для анализа особенностей ламинарного течения в плоскостях симметрии различных тел.

С использованием инвариантных преобразований исследованы уравнения трехмерного пограничного слоя в окрестности плоскости симметрии. Обнаружены собственные, решения уравнений, которые зависят от расстояния до плоскости симметрии по степенному закону с показателем, пропорциональным  $\alpha$ . Эти решения нерегулярны и приводят к особенностям степенного типа в плоскости симметрии при  $\alpha < 0$ . Аналитические исследования подтверждены численными решениями для тонкого треугольного крыла, где поперечное обтекание генерируется углом атаки или вторым приближением теории пограничного слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-01-03615).

## К ТЕОРИИ ТРЕХМЕРНЫХ КВАЗИКОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

*Ю.Д. Шевелев*

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

В работе рассматриваются трехмерные аналоги теории функций комплексного переменного. Методы решения математических и физических задач с помощью плоских (двумерных) конформных отображений являются мощным и элегантным инструментом. Конформные отображения используются для расчета и визуализации гармонических векторных полей в гидродинамике, теории упругости, фильтрации, электромагнетизме и др.

В трехмерном случае свойства плоских конформных отображений в общем виде не обобщаются. Конформные отображения трехмерных областей являются более узкими по сравнению с классом таких отображений двумерных областей. Частными случаями конформных преобразований трехмерного пространства являются движение, подобие и инверсия. В качестве аналога конформных отображений можно использовать отображения трехмерных областей градиентами гармонических функций. Частным случаем являются квазиортогональные отображения, осуществляемые потенциальными отображениями, которые являются аналогом конформных отображений плоских областей для специально подобранных преобразованиях линейных операторов в частных производных.

Рассматривается теория гармонических по Лаврентьеву М.А. отображений трехмерных областей и аналог условий Коши-Римана. Изучается вопрос о применимости гидродинамической аналогии. В трехмерном случае, наряду с потенциалом скоростей, можно определить две функции тока, удовлетворяющие уравнениям таким, что поверхности уровня пересекаются по линиям тока течения, причем трехмерное семейство поверхностей не является взаимно ортогональным. Как частный случай, приводятся плоские задачи при наличии скольжения, осесимметричные задачи и трехмерный случай. Квазиконформные отображения осесимметричных областей обладают основными свойствами конформных отображений с той разницей, что они отображают бесконечно малые квадраты в прямоугольники. На эту систему распространяется теорема Римана о существовании и единственности отображений. Если отказаться от некоторых ограничений, то частично свойства конформных отображений можно обобщить и на трехмерный случай. Гармонические функции в трехмерном случае хорошо изучены и обладают свойствами аналогичным свойствам гармонических функций двух переменных.

Приводятся примеры конформных отображений и методы построения сеток в трехмерном случае.

## ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕЛ С ОПЕРЕНИЕМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

*Г.Е. Якунина*

Государственный университет управления, Москва

Построение тел, обладающих в сверхзвуковом потоке среды минимальным сопротивлением или имеющих при инерционном движении в среде максимальную длину траектории, является актуальной проблемой механики. Оптимизация форм тела по указанным характеристикам движения была проведена ранее в рамках модели локального взаимодействия (МЛВ) среды с поверхностью тела. Было показано, что при прямолинейном движении формы тела минимального сопротивления и тела с максимальной глубиной проникания образуются участки поверхностей, нормаль которых составляет с направлением движения постоянный угол. Был развит метод построения оптимальных форм, позволяющий строить бесконечное множество оптимальных тел заданной длины и заданной площади основания, в том числе конических и пирамидальных, составленных из участков кругового конуса и плоскостей, касательных к нему. Было показано, что для сред, обладающих малой и средней прочностью, оптимальные тела – тонкие. Высокоскоростное движение тонких тел в среде часто неустойчиво, и в этом случае их использование для достижения оптимальных характеристик может быть неэффективным. В рамках МЛВ при безотрывном обтекании тел и малых возмущениях, наложенных в начальный момент времени на параметры прямолинейного движения, был найден критерий устойчивости движения тонких конических и пирамидальных тел. Было показано, что тела, обладающие отрицательным запасом статической устойчивости, движение которых в газе неустойчиво, в плотной среде могут двигаться устойчиво.

В настоящем исследовании рассмотрена задача построения однородного оптимального тела, движение которого в рамках МЛВ всегда устойчиво. Увеличить запас устойчивости движения тела можно, если сместить центр давления действующей на него силы назад, сформировав у тела «оперение». Развита методика построения оптимальных тел с «оперением», которая позволяет строить однородные тела, в носовой части которых лежит оптимальный конус, а кормовая часть строится из участков оптимального конуса и плоскостей, касательных к нему. Такое тело при заданных длине, площади основания и массе имеет в классе однородных оптимальных тел больший запас устойчивости. Показано, что среди оптимальных тел с «оперением» всегда найдется тело с положительным запасом статической устойчивости, которое будет двигаться устойчиво в любой среде. Апробация аналитических результатов проведена на основе численного решения задачи Коши системы уравнения движения тела методом

Рунге-Кутта четвертого порядка, построенного без упрощающих ограничений на форму тела и характер его движения.

## **МЕТОД СОБЫТИЙНОГО МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*А.Н. Якунчиков*

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

Разработан численный метод для исследования течений газа в микро- и наноканалах, областях со сложной геометрией в свободномолекулярном и переходном режимах, основанный на подходах событийного молекулярно-динамического моделирования (EDMD). Сильными сторонами данного подхода являются:

1. Метод бессеточный: отсутствие общего для всех молекул шага по времени и пространственной сетки позволяет избежать типичных недостатков сеточных методов (например, появление фиктивной скорости распространения малых возмущений, равной отношению шага пространственной сетки к шагу по времени).

2. Более высокая детализация и отсутствие стохастичности при выборе частиц для столкновения по сравнению с методом прямого статистического моделирования Монте-Карло (DSMC).

3. Существенное снижение вычислительной нагрузки по сравнению с классическим молекулярно-динамическим моделированием (MD), что дает возможность увеличивать пространственные и временные масштабы изучаемых явлений.

К недостаткам метода событийного моделирования по сравнению с DSMC и MD следует отнести алгоритмическую сложность эффективной реализации и сложность распараллеливания вычислений.

Разработанный метод был успешно протестирован на задаче о течении разреженного газа в плоском канале под действием перепада давления (задача Пуазейля), для которой имеются приближенные решения уравнения Больцмана.

С помощью разработанного метода проведены расчеты течения газа в нескольких узлах перспективных микрогазодинамических систем (микроканал с перфорированной стенкой, течение вблизи неизотермической мембраны).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№14-01-00310-а). Расчеты проведены с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В.Ломоносова и МСЦ РАН.

Научное издание

***СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ***

**Тезисы докладов XVIII Всероссийской конференции,  
посвященной 60-летию Российского национального комитета  
по теоретической и прикладной механике**

**и**

**125-летию со дня рождения его первого председателя  
академика АН СССР Н.И. Мухелишвили**

**5–15 сентября, 2016 г.  
Сочи, «Буревестник» МГУ**

Технический редактор И.В. Топорнина

---

Подписано в печать 20.06.2016  
Офсетная печать

Формат 60x90 1/16  
Усл. печ. л. 7,0

Бумага офсетная № 1  
Тираж 150 экз.

---

Издательство Московского университета  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15  
(ул. Академика Хохлова, 11)  
Отпечатано на ризографе НИИ механики МГУ  
119192, Москва, Мичуринский пр., 1

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**