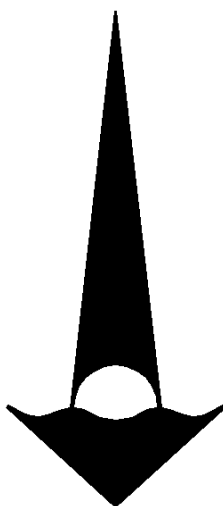


**МГУ имени М.В. Ломоносова**  
**НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова**  
**Научный Совет РАН по механике жидкостей и газов**  
**Российский национальный комитет**  
**по теоретической и прикладной механике**

## ***СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ***

**Тезисы докладов XIX Всероссийской школы-семинара,**  
**посвященной 60-летию Научно-исследовательского института механики**  
**МГУ имени М.В. Ломоносова**

**5–15 сентября, 2019 г.**  
**Сочи, «Буревестник» МГУ**



**Издательство Московского университета**  
**2019**

УДК 531/534  
ББК 22.2  
В 84

**Ответственные редакторы:**  
М.С. Макарова, А.М. Чайка

**Составители:** А.А. Афанасьев, Н.В. Горохова, О.О. Иванов, О.Г. Сутырин

В 84 **Современные проблемы аэрогидродинамики:** Тезисы докладов XIX Всероссийской школы-семинара, посвященной 60-летию Научно-исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова. 5–15 сентября 2019 г., Сочи, «Буревестник» МГУ. – М.: Издательство Московского университета, 2019. – 114 с.

ISBN 978-5-19-011427-0

XIX Всероссийская школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» продолжает традиции авторитетного форума ведущих ученых в области аэромеханики, газовой динамики и гидродинамики из университетов, институтов Академии наук и центральных отраслевых институтов, регулярно проводившегося с 1980 года (Иссык-Куль, 1980; Махачкала, 1982; Форос, 1984; Мелекино, 1987; Рыбачье, 1989; Волга, 1991; Севастополь, 1994, 1996; Сочи, 2001–2007, 2010, 2014, 2016) и являвшегося уникальной школой для молодых ученых, студентов и аспирантов. Цель школы-семинара – 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 531/534  
ББК 22.2

ISBN 978-5-19-011427-0

© Московский государственный  
университет имени  
М.В. Ломоносова, 2019

## **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

## **ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ**

В.А. Садовничий – Председатель Программного комитета (МГУ, Москва)  
Н.А. Остапенко – Зам. Председателя Программного комитета (МГУ, Москва)

### **Члены Программного комитета**

В.Б. Баранов (ИПмех РАН, Москва); И.Г. Горячева (ИПмех РАН, Москва); А.Н. Крайко (ЦИАМ, Москва); К.В. Краснобаев (МГУ, Москва); А.Г. Куликовский (МИАН, 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); В.Я. Нейланд (ЦАГИ, Жуковский, Моск. обл.); Р.И. Нигматулин (ИО РАН, Москва), Ю.М. Окунев (МГУ, Москва); В.А. Полянский (МГУ, Москва), С.Т. Суржиков (ИПМех РАН, Москва)

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

Ю.М. Окунев (Председатель Организационного комитета); Н.А. Остапенко (Зам. Председателя Организационного комитета); М.С. Макарова (Ученый секретарь); А.М. Чайка (Ученый секретарь); А.А. Афанасьев; Ю.А. Виноградов; М.А. Зубин; С.А. Ильин (НИИмех МГУ, Москва)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Ф.А. Абдухакимов</b> ФЛАТТЕР КОНСТРУКЦИЙ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ	10
<b>Н.А. Абросимов, Н.А. Новосельцева</b> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОПЛАСТИКОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ	11
<b>А.Б. Айрапетов</b> О СУЩЕСТВОВАНИИ АВТОМОДЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ ВОЗМУЩЕНИЯ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ ВЕСОМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ С ПОВЕРХНОСТНЫМ НАТЯЖЕНИЕМ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ	12
<b>Ю.В. Акимов, Н.Г. Быкова, И.Е. Забелинский, П.В. Козлов, В.Ю. Левашов</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ	13
<b>Д.С. Алевский, А.С. Сайченко</b> АДАПТАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ФОРСУНКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ	14
<b>М.В. Алексеев, С.И. Лежнин, П.Д. Лобанов, Н.А. Прибатурин, А.И. Светоносков</b> ПОВЕДЕНИЕ ПУЗЫРЕЙ ГАЗА В РАСПЛАВЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА	15
<b>И.А. Амелюшкин</b> РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО, ЧИСЛЕННОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ	16
<b>В.М. Анискин, Т.А. Коротаева, А.Н. Маслов</b> ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ХОЛОДНОЙ МИКРОСТРУИ ВОЗДУХА С ПРЕГРАДОЙ	17
<b>А.Р. Арутюнян, Р.А. Арутюнян, Р.Р. Саитова</b> ПОВРЕЖДЕННОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ	18
<b>А.М. Арутюнян, Г.В. Федотенков</b> НЕСТАЦИОНАРНАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО В ПЛАНЕ ШТАМПА И УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА С ПОЛОСТЬЮ	19
<b>А.А. Афанасьев</b> ДВУХСЛОЙНАЯ ТЕРМОКОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПОРИСТОМ СЛОЕ	20
<b>В.Б. Баранов</b> КАК МЕТОДЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ	21
<b>А.Н. Богданов</b> НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ТРАНСЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ	23
<b>В.И. Бородулин, А.В. Иванов, Ю.С. Качанов, Д.А. Мищенко</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕЙ ГЁРТЛЕРА	24
<b>М.Д. Брагин, И.Г. Брыкина, Л.А. Егорова</b> О МОДЕЛЯХ ФРАГМЕНТАЦИИ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ	25
<b>И.Г. Брыкина</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ УНОСА МАССЫ И ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА	26



<b>Х.Ф. Валиев, А.Д. Егорян</b>	27
УСТОЙЧИВОСТЬ ОДНОМЕРНОГО СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ С ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОЩАДИ	
<b>Е.А. Веденеева</b>	28
РАСТЕКАНИЕ ЛАВЫ, КАК НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ, ВО ВРЕМЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ПО ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ	
<b>И.И. Вигдорovich</b>	29
СВЕРХЗВУКОВОЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ. АСИМПТОТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ЗАКОНЫ ПОДОБИЯ	
<b>Ю.А. Виноградов, С.С. Попович, М.М. Стронгин</b>	30
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА	
<b>Г.С. Ганченко, Н.Ю. Ганченко, Е.В. Горбачева, Е.А. Демехин</b>	31
УСТОЙЧИВОСТЬ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЭЛЕКТРОЛИТ/ВОЗДУХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	
<b>Н.Ю. Ганченко, Д.А. Оксужьян, М.Ю. Репина, Е.А. Демехин</b>	32
ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ И КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТА ОКОЛО ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	
<b>П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин</b>	33
ПРАВИЛО ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ В ЗАДАЧЕ О СНИЖЕНИИ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ ПРИ ПОМОЩИ ЭНЕРГОВКЛАДА В НАБЕГАЮЩИЙ ПОТОК	
<b>П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин</b>	34
ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ	
<b>А.П. Глинов, А.П. Головин, П.В. Козлов, К.В. Шалеев</b>	35
ДИНАМИКА ФОРМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ И СОПУТСТВУЮЩИХ МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАЗМЫКАНИИ ИЗНАЧАЛЬНО ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ	
<b>А.П. Голуб</b>	36
РАБОЧИЕ РЕЖИМЫ ДВУХЗВЕННОГО МАЯТНИКА ПРИ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКЕ	
<b>Ю.Ф. Голубев, Е.В. Мелкумова</b>	37
СУЩЕСТВОВАНИЕ ЗАДАННОГО ДВИЖЕНИЯ РОБОТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИЛИНДРА В КАЧЕСТВЕ ОПОРЫ	
<b>Ю.Ф. Голубев, Е.В. Мелкумова</b>	38
ПЕРЕНОС ХРУПКОГО ЦИЛИНДРА МАНИПУЛЯТОРОМ С ТРЁХПАЛЬЦЕВЫМ СХВАТОМ	
<b>Ю.Ф. Голубев, Е.В. Мелкумова</b>	39
ПЕРЕНОС ХРУПКОГО ЦИЛИНДРА МАНИПУЛЯТОРОМ С ДВУХПАЛЬЦЕВЫМ СХВАТОМ	
<b>А.Н. Голубятников, О.О. Иванов</b>	40
ОБ АВТОМОДЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ПЛАВЯЩЕЙСЯ ЧАСТИЦЫ	
<b>Н.В. Горохова</b>	41
ДОСТИЖЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТЕТЕЧЕНИЯХ СМЕСИ ГАЗ-ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ	
<b>С.В. Гувернюк, А.Г. Кузьмин, М.М. Симоненко</b>	42
ОБ ОТРЫВНЫХ РЕЖИМАХ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ УДЛИНЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ ПОД УГЛОМ АТАКИ	
<b>С.В. Гувернюк, Ф.А. Максимов</b>	43
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ОКОЛО РЕШЕТОК СТЕРЖНЕЙ	
<b>С.А. Давыдов, А.В. Земсков, Д.В. Тарлаковский</b>	44
ДВУМЕРНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОЙ ДИФФУЗИИ ДЛЯ СЛОЯ	

<b>Л.А. Дегадникова, А.В. Осинцев</b> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРОТЕЗОВ	45
<b>Н.В. Дерендяев, Д.Н. Дерендяев</b> КВАНТОВО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ГИДРОДИНАМИКЕ	46
<b>В.А. Ерошин, А.В. Бойко</b> НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ГИДРОДИНАМИКЕ СКОРОСТНЫХ НАДВОДНЫХ СИСТЕМ	47
<b>А.Х. Закиров</b> ИСТЕЧЕНИЕ ИДЕАЛЬНОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ НАСАДКИ	48
<b>В.И. Запьягаев, Н.П. Киселев, А.В. Савин, П.Г. Смирнов, Е.И. Соколов</b> УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВОБОДНОВИСЯЩИХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ЗОН В СВЕРХЗВУКОВЫХ НЕРАВНОМЕРНЫХ ИЗОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКАХ	49
<b>Н.А. Зверев, А.В. Земсков</b> ЭЛЕКТРОМАГНИТОМЕХАНОДИФфуЗИЯ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ПЬЕЗОМАГНИТНЫХ СРЕДАХ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ	50
<b>И.А. Знаменская, И.В. Мурсенкова, Ю. Ляо, А.Ю. Кузнецов, Н.Н. Сысоев</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ КАНАЛА ЗА ПРЕПЯТСТВИЕМ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ИОНИЗАЦИИ ПЛАЗМЕННЫМ ЛИСТОМ	51
<b>М.А. Зубин, Ф.А. Максимов, Н.А. Остапенко</b> ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СТРУКТУРЫ УДАРНОГО СЛОЯ ОКОЛО РОМБОВИДНОГО КРЫЛА С КОНИЧЕСКИМ СОПРЯЖЕНИЕМ КОНСОЛЕЙ ПРИ ЕГО НЕСИММЕТРИЧНОМ ОБТЕКАНИИ	52
<b>В.Н. Зудов, П.К. Третьяков, А.В. Тупикин</b> ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ГОМОГЕННОГО ГОРЕНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	53
<b>Я.В. Калинин</b> ПРЕОДОЛЕНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ	54
<b>В.С. Каширин, А.В. Осинцев</b> ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ УТЕЧЕК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГЛАВНОМ РАЗЪЕМЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1000	55
<b>В.Д. Котелкин, Л.И. Лобковский</b> ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА	56
<b>Г.Ю. Котова, К.В. Краснобаев</b> ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В МОДЕЛЯХ ОБРАЗОВАНИЯ МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ	57
<b>А.А. Крупнов, М.Ю. Погосбеян</b> ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИССОЦИИРОВАННОГО ВОЗДУХА С ПОВЕРХНОСТЬЮ $\beta$ - КРИСТОБАЛИТА: КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	58
<b>А.А. Крупнов, А.Л. Сергиевская, М.Ю. Погосбеян</b> ВЕРИФИКАЦИЯ УРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ДИССОЦИАЦИИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИХ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ	59
<b>М.О. Кучинский, И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, О.О. Фатталов</b> КОНВЕКТИВНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И УЛЬТРАЗВУК. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ	60
<b>Б.Э. Кэрт, А.В. Панченко, Ю.В. Генкин</b> РАСЧЕТ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАССЕТНОГО СНАРЯДА ПОВЫШЕННОЙ ДАЛЬНОСТИ С УСТРОЙСТВОМ ДОРАЗГОНА НА ТРАЕКТОРИИ	61

<b>Б.Э. Кэрт, В.О. Кравцов, Ю.В. Генкин</b> БАЛЛИСТИКА ВСКРЫТИЯ КАССЕТНОГО БОЕПРИПАСА С АДАПТАЦИЕЙ ПЯТНА РАЗБРОСА БОЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ К ФОРМЕ ЦЕЛИ	62
<b>Д.В. Лебедев, М.В. Липатников, А.Г. Кузьменко</b> СОВМЕСТНЫЙ РАСЧЕТ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ	63
<b>А.М. Липанов, И.И. Липатов, С.А. Карсканов</b> ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ БАФТИНГА	64
<b>И.И. Липатов, И.Н. Устинов</b> ПРОЦЕССЫ ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЧЕНИЯ В ЛАМИНАРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ВНЕШНИМ РАЗЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ	65
<b>П.Д. Лобанов, В.Г. Меледин, Н.А. Прибатурин, А.И. Светоносов, И.В. Щепихин</b> ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ЕГО ПРОДОЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ ЖИДКОСТЬЮ	66
<b>В.Т. Лукашенко, Ф.А. Максимов</b> ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФРАГМЕНТОВ МЕТЕОРНОГО ТЕЛА	67
<b>В.Г. Луцник, М.С. Макарова, А.И. Решмин</b> ТЕПЛООБМЕН В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ	68
<b>В.Г. Луцник, М.С. Макарова</b> ЛАМИНАРНЫЙ И ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ СО ВДУВОМ ГАЗА В СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК	69
<b>А.Н. Максимов, П.Ю. Георгиевский</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СХЕМ МАККОРМАКА В ЗАДАЧАХ СОВРЕМЕННОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ	70
<b>В.В. Марков, В.А. Левин, И.С. Мануйлович</b> ВОЛНЫ ДЕТОНАЦИИ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ	71
<b>С.А. Маслов, В.Л. Натяганов</b> РОЛЬ ЭФФЕКТА ГИГАНТСКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В ПРОЦЕССЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОРНАДО ИЗ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА	72
<b>С.А. Маслов, В.Л. Натяганов</b> ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТУРБУЛЕНТНОЙ АНАЛОГИИ И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗАК ИССЛЕДОВАНИЮ ТОРНАДО И УРАГАНОВ	73
<b>Н.А. Маслов, В.М. Анискин, Т.А. Коротаева, Е.О. Цибульская</b> ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ НАТЕКАНИИ МИКРОСТРУИ НА НАГРЕВАЕМУЮ ПРЕГРАДУ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ РОДАМИНА	74
<b>Ю.Ю. Мерзликين</b> РАЗРАБОТКА АМФИБИЙНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ КРУГЛОГОДИЧНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ	75
<b>Д.И. Меркулов, Д.А. Пелевина</b> ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОТРОПНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЭЛАСТОМЕРОВ	76
<b>А.А. Монахов</b> ПАРОГАЗОВАЯ КАВИТАЦИЯ В ГИДРОФОБНОЙ ЖИДКОСТИ	77
<b>И.В. Моршнева</b> РЕЗОНАНСНЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ БИНАРНОЙ СМЕСИ	78
<b>А.Р. Мустаев, Н.А. Остапенко</b> УДАРНЫЕ КОНТУРА МАКСИМАЛЬНОЙ ТЯГИ	79

<b>К.А. Мухин, В.М. Анискин</b>	80
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКИХ ДОЗВУКОВЫХ МИКРОСТРУЙ	
<b>Р.И. Низматулин</b>	81
ФОКУСИРОВКА ЭНЕРГИИ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ	
<b>Н.В. Никитин, В.О. Пиманов</b>	82
НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРИРОДУ ПРОДОЛЬНЫХ ВИХРЕЙ В ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ	
<b>В.М. Овсянников</b>	83
ВИБРАТОР ЛАНДАУ-ЛИФШИЦА, ГЕНЕРИРУЮЩИЙ КОЛЕБАНИЯ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЧЕНИЯХ ГАЗА И ЖИДКОСТИ	
<b>Н.А. Остапенко, С.С. Страдомский</b>	84
ОПТИМАЛЬНЫЕ ВОЛНОЛЕТЫ НА ПЛОСКИХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ	
<b>С.А. Очеретяный, И.И. Козлов, В.В. Прокофьев</b>	85
О ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАВИТАЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ	
<b>А.В. Подопросветов</b>	86
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОМЕХАНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ПОМОЩИ РАБОТНИКАМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	
<b>В.А. Полянский, И.Л. Панкратьева</b>	87
О МЕХАНИЗМЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГАЗОВУЮ СМЕСЬ С НЕРАВНОВЕСНЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ	
<b>А.Б. Порошина</b>	88
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОЙ ТРУБКИ	
<b>М.И. Провидухина, И.Н. Сибгатуллин, Д.А. Рязанов</b>	89
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ НА ДИАГРАММЕ МААСА ДЛЯ АТТРАКТОРОВ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН	
<b>В.В. Прокофьев, А.К. Такмазьян, Е.В. Филатов</b>	90
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЯМОТОЧНОГО ВОЛНОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ И ВОЛНОДВИЖИТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭНЕРГИЮ КАЧКИ СУДНА	
<b>Е.А. Пушкарь</b>	91
ПЛОСКОПОЛЯРИЗОВАННОЕ МАХОВСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЫСТРЫХ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН	
<b>А.И. Реимин, В.В. Трифионов, В.Г. Луцик, М.С. Макарова</b>	92
О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ ЗА СЧЕТ ЛАМИНАРИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБЕ	
<b>В.И. Сахаров, Б.Е. Жестков, И.В. Сенюев</b>	93
ТЕПЛООБМЕН И ТЕРМОХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУЙ ДИССОЦИИРОВАННОГО ВОЗДУХА С ПОВЕРХНОСТЬЮ МОДЕЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КЕРАМИКИ: РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЧ-ПЛАЗМОТРОНЕ	
<b>И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, М.О. Кучинский, М.М. Гончаров</b>	94
ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ КОМПАКТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ И РАЗМЕРОВ	
<b>И.Н. Сибгатуллин, М.И. Провидухина, Д.А. Рязанов, К.А. Ватутин</b>	95
УСТОЙЧИВОСТЬ АТТРАКТОРОВ ВНУТРЕННИХ И ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН	
<b>О.Г. Сутырин, Р.Р. Хабибуллин</b>	96
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПУЗЫРЕМ ГАЗА ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ВБЛИЗИ ТВЕРДОЙ СТЕНКИ	
<b>И.В. Тимофеев, В.М. Анискин</b>	97
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТРУЙ, ИСТЕКАЮЩИХ ИЗ ПЛОСКИХ МИКРОСОПЕЛ С РАЗЛИЧНЫМ СООТНОШЕНИЕМ СТОРОН	

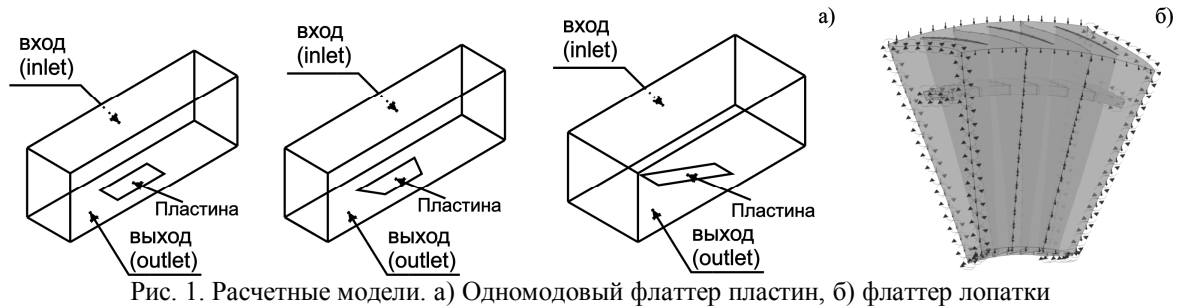
<b>Ю.В. Туник, В.О. Майоров</b> ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕТОНАЦИОННОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА	98
<b>Ю.В. Туник</b> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ	99
<b>Э.В. Усов, И.А. Климонов, В.И. Чухно, Н.А. Прибатурин</b> ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ИЗ БАСЕЙНА РАСПЛАВА ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ В РЕАКТОРЕ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ	100
<b>В.П. Фомичев, М.А. Ядренкин</b> ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ ГИПЕРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ	101
<b>Д.Р. Халитова, А.А. Афанасьев</b> ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОЙ СРЕДЕ	102
<b>С.А. Халявин, А.А. Афанасьев</b> ОСРЕДНЁННАЯ АСИМПТОТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ СРЕДАХ	103
<b>А.К. Цатурян</b> МЕХАНИКА МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ НА УРОВНЕ МОЛЕКУЛ, КЛЕТОК, ТКАНЕЙ И ОРГАНОВ	104
<b>А.А. Чернова, А.А. Афанасьев</b> РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ЗАКАЧКЕ НАГРЕТОГО РАСТВОРА СОЛИ В ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ	105
<b>Ю.А. Чиркунов</b> ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ОБОБЩЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕДИ ЛЕЙТА ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ВОЛНОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	106
<b>Ю.А. Чиркунов, Н.Ф. Бельмецев</b> ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ГИДРОАКУСТИКИ ХОХЛОВА-ЗАБОЛОЦКОЙ-КУЗНЕЦОВА	107
<b>Ю.А. Чиркунов, Ю.Л. Сколубович</b> ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЛИ ГАЗА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ НАЛИЧИИ ИСТОЧНИКА ИЛИ ПОГЛОЩЕНИЯ	108
<b>А.Ю. Чулюнин</b> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ПРИ ОБТЕКАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО РЕЛЬЕФА НА СТЕНКЕ КАНАЛА	109
<b>В.И. Шалаев</b> ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ТРЕХМЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ	110
<b>Н.Г. Шаронов, А.В. Ивченко</b> ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО УЗЛА НЕРВЮРЫ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ	111
<b>Н.Г. Шаронов, Г. Ю. Прокудин</b> ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ И МАКЕТА ПОВОРОТНО-ЛИНЕЙНОГО ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ	112
<b>Ю.Д. Шевелев</b> ТРЕХМЕРНЫЕ КВАЗИКОНФОРМНЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ	113

## ФЛАТТЕР КОНСТРУКЦИЙ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

Ф.А. Абдухакимов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail:

Исследуется влияние формы пластины на границы одномодового флаттера (Рис 1а) и конструктивных параметров на границы флаттера лопаток компрессоров газотурбинных двигателей (Рис 1б). В исследовании применяется энергетический метод [1].



Одномодовый флаттер — один из типов панельного флаттера, который возникает при малой сверхзвуковой скорости без взаимодействия между модами колебания. Для исследования одномодового флаттера поршневая теория неприменима, и поэтому необходимо использовать более сложные аэродинамические модели. Флаттер лопатки можно определить как самовозбуждающиеся колебания лопатки в потоке газа, возникающие как результат их взаимодействия. Инженеры и конструкторы, как правило, используют при проектировании упрощенные критерии, основанные на опыте, накопленном при конструировании двигателя и его доводке. Более точные результаты дает статистический метод, основанный на обработке большого числа проведенных испытаний и прогнозировании на их основе флаттера лопаток новых компрессоров. Другим методом прогнозирования флаттера лопаток является частотный метод, основанный на вычислении собственных частот связанной системы поток-лопатка. Еще один метод, прямой, заключается в моделировании движения во времени связанной системы лопатка-поток. Наконец, энергетический метод, основан на вычислении работы, совершаемой аэродинамическими силами на поверхности лопатки, гармонически колеблющейся по собственной форме за период колебаний.

Используемый в исследовании метод заключается в следующем. Предполагается, что влияние потока воздуха на собственные колебания конструкции (лопатки или пластины) незначительно и сводится лишь к аэродинамическому демпфированию, положительному или отрицательному. При этом собственные формы и частоты колебаний конструкции в потоке и в пустоте совпадают и могут быть вычислены стандартными методами. Движение конструкции в потоке принудительно задается по собственной моде [2, 3], и решается нестационарная задача аэродинамики при заданных колебаниях конструкции. В результате решения вычисляется работа, совершенная силами давления на одном периоде колебаний. Критерием флаттера при таком подходе является положительность этой работы.

Были определены границы одномодового флаттера прямоугольной формы в различных конфигурациях. Проведено сравнение с результатом расчета флаттера в точной постановке. Определены границы одномодового флаттера пластин в форме трапеции и параллелограмма при разных значениях длины и угла скоса пластины. Рассчитаны границы флаттера лопаток при различных конфигурациях. Выявлено, какие конструктивные параметры существенно влияют на прогнозирования флаттера, а какие незначительно.

1. Vedenev V.V., Kolotnikov M.E., Makarov P.V. Experimental validation of numerical blade flutter prediction // Journal of propulsion and power. 2015. Vol. 31. No. 5. P. 1281-1291.

2. Абдухакимов Ф. А., Веденеев В. В. Исследование одномодового флаттера пластин различной формы при малой сверхзвуковой скорости // Ученые записки ЦАГИ. 2017. Т. 48. № 1. С. 86-98.

3. Абдухакимов Ф.А., Веденеев В.В., Колотников М.Е., Макаров П.В. Численное исследование влияния конструктивных параметров на прогнозирование флаттера лопаток // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 2. С. 17 -26 (в печати).

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОПЛАСТИКОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

*Н.А. Абросимов, Н.А. Новосельцева*

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
e-mail: abrosimov@mech.unn.ru

Композитные материалы благодаря эффективной способности к поглощению энергии, повышенной трещиностойкости и безосколочности возможного разрушения широко применяются при создании защитных конструкций, подвергающихся действию интенсивных импульсных нагрузок. В этой связи весьма актуальными являются экспериментальные и теоретические исследования по анализу процессов прогрессирующего разрушения, начинающихся с момента первого разрушения элементарного слоя вплоть до макроразрушения многослойных композитных элементов конструкций.

В докладе представлена методика численного анализа нелинейного динамического деформирования и прогрессирующего разрушения двухслойных металлопластиковых цилиндрических оболочек с учетом зависимости их жесткостных и прочностных характеристик от скорости деформаций. Кинематическая модель деформирования многослойного пакета основана на неклассической теории оболочек. Энергетически согласованная разрешающая система уравнений динамики металлопластиковых цилиндрических оболочек получена в результате минимизации функционала полной энергии оболочки как трехмерного тела. Процесс послойного прогрессирующего разрушения слоистых цилиндрических оболочек описывается в рамках модели деградации их жесткостных характеристик с учетом зависимостей прочностных характеристик композитных материалов от скоростей деформаций [1]. Численный метод решения сформулированной начально-краевой задачи основан на явной вариационно-разностной схеме [1, 2].

Верификация предлагаемой методики осуществлялась путем сравнения расчетных и экспериментальных данных [3] на задаче нестационарного деформирования двухслойных металлопластиковых цилиндрических оболочек под действием импульса давления, имитирующего подрыв в центре оболочки сферического заряда взрывчатого вещества.

Результаты расчетов динамической прочности двухслойных металлопластиковых цилиндрических оболочек по модели с учетом зависимости прочностных характеристик от скорости деформаций свидетельствуют о лучшем соответствии экспериментальным данным по сравнению с расчетами по модели с постоянными прочностными характеристиками.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (договор №14.Y26.31.0031).

1. Абросимов Н.А., Баженов В.Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. 400 с.

2. Абросимов Н.А., Елесин А.В., Лазарев Л.Н., Новосельцева Н.А. Численный анализ прочности стеклопластиковых цилиндрических оболочек различной структуры при импульсном нагружении. // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2013. Вып. 75(4). С. 288-295.

3. Федоренко А.Г., Сырунин М.А., Иванов А.Г. Критерии выбора композитных материалов для оболочечных конструкций, локализирующих взрыв (обзор) // ФГиВ. 2005. Т. 41, №5. С. 3-13.

## О СУЩЕСТВОВАНИИ АВТОМОДЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ ВОЗМУЩЕНИЯ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ ВЕСОМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ С ПОВЕРХНОСТНЫМ НАТЯЖЕНИЕМ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

А.Б. Айранетов  
НИМК ЦАГИ, г. Москва  
e-mail: [air-aero@mail.ru](mailto:air-aero@mail.ru)

В рамках классической постановки задачи малых деформаций  $\eta(x, t)$  поверхности весоной идеальной жидкости, описываемых волновым уравнением с решениями вида прогрессивных волн, продемонстрированы последствия учета в уравнении для  $\eta(x, t)$  таких факторов как поверхностное натяжение и вязкость. Показано существование неизвестных точных решений, автомодельных по переменной  $D^{-1}x^2/t$  (плоский случай) и  $D^{-1}(x^2+y^2)/t$  (центрально-симметричный) «колоколообразной» формы с неподвижной по  $x$  точкой максимума (типа теплового импульса, вязкого вихря, диффузии пятна примеси, др.), в которой параметр деформирования структуры  $D$  определяется тремя числами – Фруда, Вебера и Рейнольдса. Роль каждого из них продемонстрирована на решениях в случаях предельных значений их величин.

Например, при  $Fr \rightarrow \infty, Re \rightarrow \infty, D = 4We^{-1/2}$  и решение в этом случае имеет вид:

$$\eta = \frac{We^{1/2}}{t} e^{-\frac{We^{1/2} x^2 + y^2}{4t}}.$$

При  $Fr \rightarrow \infty$  и конечных  $Re, We$  колоколообразная форма приобретает на периферии волнообразную структуру в связи с появлением в решении гармонического сомножителя автомодельной переменной.

В общем случае конечных значений чисел  $Fr, We, Re$  решение в аналитически наглядном примере  $Re/We \ll 1$  представляет собой автомодельную структуру сходного типа с отличием в том, что «волнистость» поверхности на периферии становится движущейся со скоростью  $\sim Re^{-1}(We/Fr)^{1/2}$

В качестве иллюстрации существования объектов такого типа в природе приводятся картины скоростной видеосъемки структуры всплеска на невозмущенной поверхности воды, вызванного падением на нее водяной капли.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

Ю.В. Акимов, Н.Г. Быкова, И.Е. Забелинский, П.В. Козлов, В.Ю. Левашов  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [vy169@mail.ru](mailto:vy169@mail.ru)

В работе приведены результаты экспериментальных исследований эволюции излучения ударно нагретых газов для разных значений скоростей ударной волны и начальных давлений. Все представленные в работе данные получены на экспериментальном комплексе НИИ механики МГУ «Ударная труба». Входящие в состав комплекса ударные трубы позволяют достигать скоростей распространения ударной волны до 12 км/с. Для измерения скорости и давления УВ используются пьезодатчики PCB и DYTRAN. Ударные трубы оснащены безмасляными высоковакуумными системами откачки, что позволяет значительно снизить концентрацию примесей в исследуемом газе и существенно повышает достоверность получаемой экспериментальной информации. Абсолютные величины излучения за фронтом падающей ударной волны могут быть получены как в виде панорамных спектров (распределение мощности излучения по спектру), так и в виде временной эволюции излучения за ударной волной на ограниченном участке спектра или в отдельной атомарной линии. Временные эволюции излучения и поглощения регистрируются с помощью ФЭУ, в спектральном диапазоне 120 – 850 нм с временным разрешением до  $10^{-8}$  с. Для получения панорамных спектров используются стробируемые CCD приемники в спектральном диапазоне 120 – 1100 нм. Более подробная информация о схемах ударных труб и системе сбора данных представлена в работах [1,2].

Приведенные в работе экспериментальные данные показывают, что интенсивность и характер излучения зависят от скорости ударной волны. Пример временной эволюции излучения различных атомарных и молекулярных компонент газовых смесей для скоростей ударной волны от 4.5 км/с до 11.4 км/с и начальных давлений 0.25 Торр и 5 Торр представлен на рисунке. Представленные в работе данные могут служить основой при разработке и тестировании расчетно-теоретических моделей неравновесного излучения.

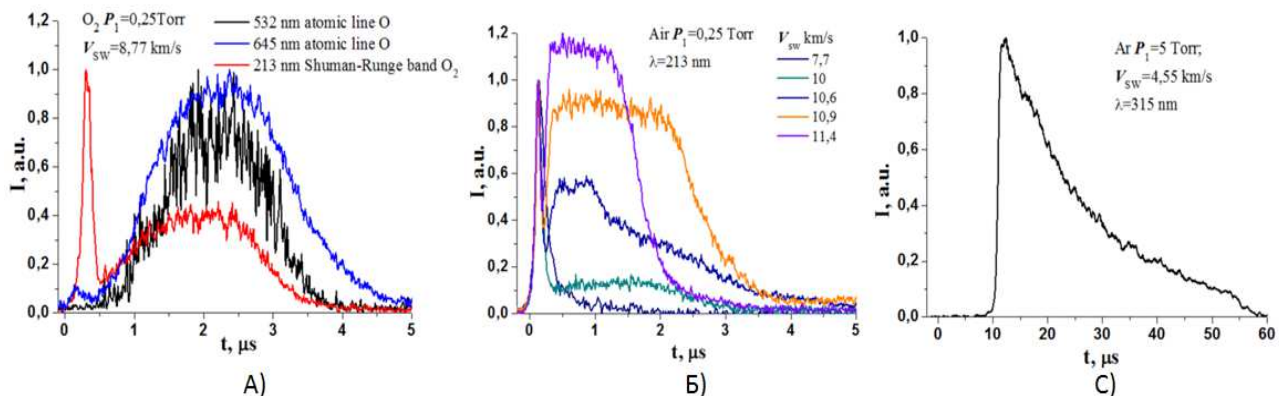


Рис. Временные зависимости излучения в кислороде (А), воздухе (Б) и аргоне (С) при разных скоростях ударной волны и начальных давлениях.

1. Kozlov P.V., Romanenko Y.V., Shatalov O.P. Radiation Intensity Measurement in Simulated Mar-tian Atmospheres on the Double Diaphragm Shock Tube // Proc. '4<sup>th</sup> Int. Workshop on Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry', Lausanne, Switzerland, 12–15 October 2010. (ESA SP-689, February 2011).

2. Stovbun S.V., Bykova N.G., Zabelinskii I.E., Tereza A.M., Shatalov O.P., Vlasov P.A. Evaluation of the Radiance of Shock-Heated Air in the 120–400-nm Spectral Range. In: Sasoh A., Aoki T., Katayama M. (eds) // 31<sup>st</sup> International Symposium on Shock Waves 1. ISSW 2017. Springer, Cham.

## АДАПТАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ФОРСУНКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

Д.С. Алевский, А.С. Сайченко  
АО «РЭП Холдинг», Санкт-Петербург  
e-mail: [reph@reph.ru](mailto:reph@reph.ru)

В работе рассматривается адаптация конструкции топливной форсунки камеры сгорания газотурбинного двигателя для ее печати на 3D принтере по металлу методом селективного лазерного спекания. Необходимость производства форсунки данным способом возникла из-за высокой стоимости её производства классическим методом, что обусловлено сложностью ее конструкции, включающей большое количество элементов, наличия элемента-отливки с внутренними каналами и необходимостью финального пошагового спаивания элементов.

Однако производство элементов методом селективного лазерного спекания имеет технологические ограничения, а именно, при наличии угла отвеса поверхности от вертикали более 45 градусов, система создает для данных поверхностей опорные конструкции, которые необходимо в последствие удалять механическим путем. Конструкция форсунки имеет сложный элемент – сильфон (рис. 1а), задачей которого является герметичное разделение двух полостей и компенсация относительных тепловых расширений элементов форсунки на величину до 1 мм в зависимости от режима работы камеры сгорания.

Изначальная конфигурация сильфона являлась невозпроизводимой на принтере из-за ее малой толщины и необходимости большого количества опорных конструкций. Решением данной проблемы стал переход к новой конструкции безсильфонной форсунки, а именно отказ от сильфона и перевод кольцевого канала «полость 2» в 10 спиральных каналов, работающих как пружинный компенсатор.

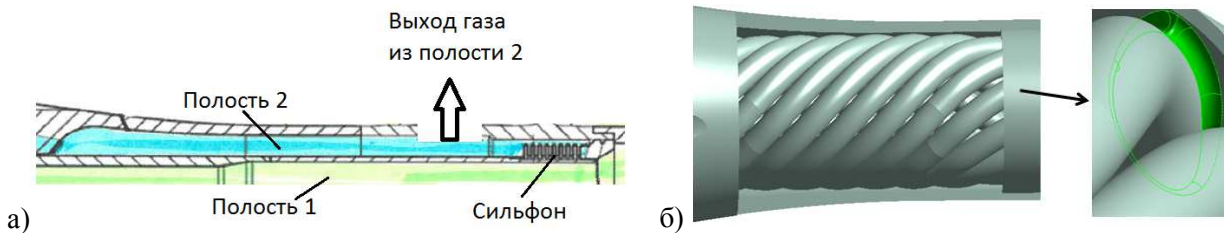


Рис. 1. Конструкция сильфонной (а) и безсильфонной (б) форсунки.

В работе представлен численный расчет на прочность разработанных спиральных каналов с помощью программного комплекса ANSYS 19.2. Для печати форсунки применяется материал ВЖ159 разработки ВИАМ. Определены поля действующих эквивалентных напряжений по Мизесу (рис. 2). Максимальные растягивающие напряжения в трубках составляют 413 Мпа. Локальные напряжения в галтели в области присоединения трубок составляют 618 Мпа, что меньше предела текучести  $\sigma_{0.2} = 745$  Мпа.

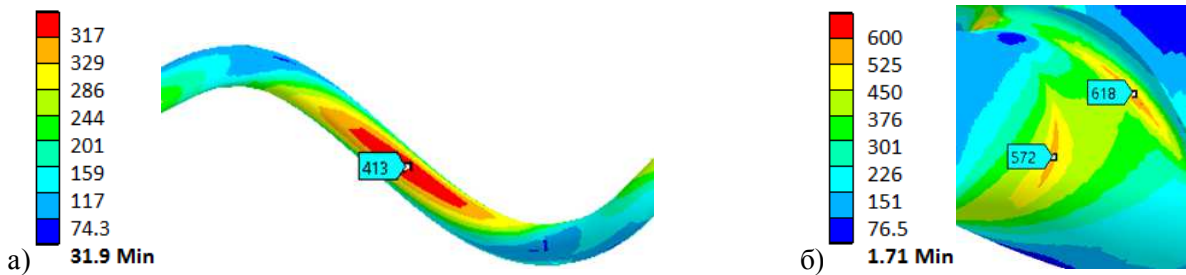


Рис. 2. Эквивалентные напряжения Мизеса в безсильфонной форсунке, Мпа:  
а – спиральный канал; б – область присоединения каналов.

Полученные значения напряжений удовлетворяют нормам прочности энергетического оборудования и позволяют перейти к дальнейшей стадии разработки – печати блока спиральных трубок для его дальнейшего испытания на стенде по исследованию малоциклового усталости. Результат испытаний позволит оценить верность подхода проектирования спиральных элементов и возможность применения метода селективного лазерного спекания для производства топливной форсунки камеры сгорания газотурбинного двигателя.

## ПОВЕДЕНИЕ ПУЗЫРЕЙ ГАЗА В РАСПЛАВЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

*М.В. Алексеев, С.И. Лежнин, П.Д. Лобанов, Н.А. Прибатурин, А.И. Светонос*  
Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
e-mail : [pribaturin@itp.nsc.ru](mailto:pribaturin@itp.nsc.ru)

В данной работе проведено комплексное экспериментальное исследование процесса истечения инертного газа в жидкий металл (свинец, сплав Розе) с определением параметров формирующихся пузырей газа. Эксперименты проведены в вертикальных трубах различного диаметра и с различным теплоносителем. Для получения более наглядной информации проведена визуализация процесса движения газовой фазы. Применение оригинальных методик измерений позволило определить параметры пузырей инертного газа в расплавленном металле (размер, частоту отрыва, отрывной диаметр, скорость подъема). Эксперименты проводились на гидродинамическом стенде, состоящем из вертикально расположенного термостатированного рабочего участка, системы подвода газа, регулирующих вентилей, датчиков регистрации давления, температуры и свободного уровня жидкости. В зависимости от задачи эксперимента использовались рабочие участки с внутренним диаметром 25 и 68 мм. Высота рабочего участка была всегда больше, чем высота столба находящегося в нем расплавленного металла. В качестве расплава металла в экспериментах использовался сплав Розе и свинец, в качестве газовой фазы – аргон. Температура, при которой в канале находится сплав Розе, 120-160 °С, свинца – 400 °С, температура аргона от -40 до +20 °С. Все эксперименты были выполнены при давлении в рабочем участке равном атмосферному давлению.

При проведении экспериментов изменялись интенсивность и длительность подачи газа, размер отверстий истечения; высота столба модельного жидкого металла в диапазоне 0,2 – 1,0 м. Избыточное давление газа по отношению к атмосферному давлению изменялось в диапазоне 120 – 200 кПа, что позволяло проводить исследования как в режиме истечения одиночных пузырей, так и в существенно нестационарном режиме при котором осуществлялся внезапный импульсный подвод газа в жидкость.

Получены следующие экспериментальные данные:

- частота генерации пузырей на отверстиях в ТЖМТ;
- скорость движения пузырей в ТЖМТ;
- длина вертикальных хорд пузырей при их всплытии в расплаве металла;
- гистограммы распределения пузырей по размерам;
- скорость «захолаживания» металла при истечении в него инертного газа в зависимости от расхода истекающего газа.

На основе полученных данных проведена оценка отрывного диаметра пузырей в жидком металле и его сопоставление с корреляциями, имеющимся в литературе. Показано качественное совпадение отрывного диаметра пузырей в жидком металле со значениями отрывного размера пузырей в воде.

Проведены также экспериментальные исследования динамических процессов, которые возникают при импульсном впрыске газа в расплавленный металл. Для этого режима определены характерные величины и частоты пульсаций давления в канале с жидким металлом, а также колебания свободного уровня металла.

Параллельно были выполнены расчетные исследования, в которых использовался системный теплогидравлический код HYDRA/IBRAE/LM и пакет вычислительной гидродинамики OpenFoam. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных по эволюции уровня жидкого металла при впрыске в него газа, формы пузыря и давления. Полученные результаты имеют важное значение для уточнения и обоснования модели межфазного взаимодействия жидкий металл – газовая фаза.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (гос. задание № III.22.7.3).

## РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО, ЧИСЛЕННОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

И.А. Амелюшкин

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский  
Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [Amelyushkin\\_Ivan@mail.ru](mailto:Amelyushkin_Ivan@mail.ru)

Моделирование взаимодействия дисперсных течений с твердым телом представляет интерес в широкой области практических приложений: противодействие обледенению, тепло и эрозионная защита летательных аппаратов в запыленных атмосферах, транспорт жидкости в микроканалах. В настоящей работе развиты математические модели и численные алгоритмы расчета взаимодействия переохлажденных капель и кристаллов сложной формы с рельефной поверхностью, покрытой жидкой пленкой, определены условия кристаллизации переохлажденной метастабильной жидкости в процессе движения по поверхности обтекаемого тела.

Получены новые экспериментальные результаты температурных зависимостей параметров кристаллизации переохлажденных метастабильных капель. Представлены оценки потока электромагнитного излучения на межфазной границе при движении фронта кристаллизации. Созданы программы молекулярного моделирования нестационарных вихревых течений и взаимодействия дисперсных потоков с телами различной степени гидрофобности с учетом реальных свойств газа и эмпирических моделей взаимодействия молекул с твердым телом. Получены результаты моделирования удара кристалла льда о покрытую жидкой пленкой поверхность путем решения трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса методом SPH (smoothed particles hydrodynamics). Получены выражения для коэффициентов взаимодействия кристаллов льда с покрытым жидкой пленкой твердым телом. На основании экспериментальных результатов рассеяния сфероидов (моделирующих тела сложной формы) построены математические модели стохастического движения частиц сложной формы в градиентном аэрозольном потоке.

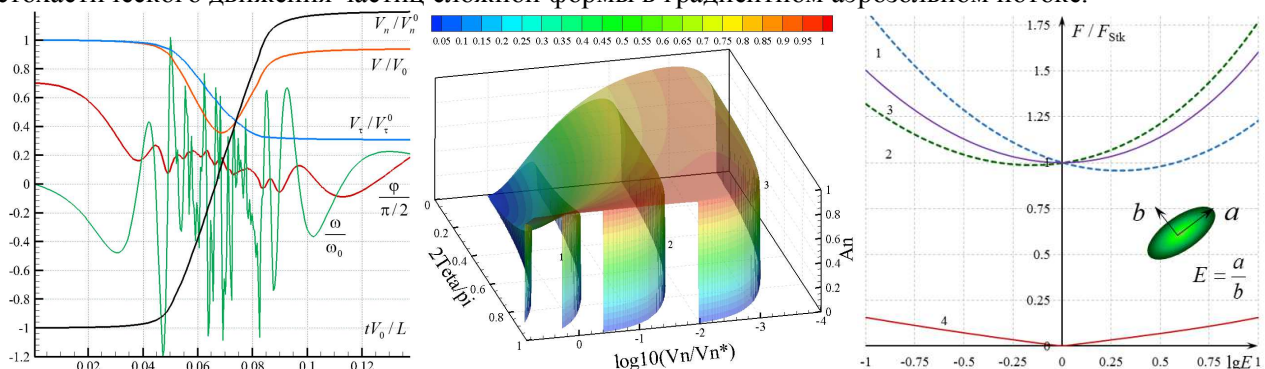


Рис. Коэффициенты изменения скорости кристаллов льда, их угловой скорости вращения и ориентации при ударе о покрытую жидкой пленкой поверхность твердого тела, в центре – параметрические зависимости коэффициентов восстановления нормальной скорости кристаллов льда о твердую поверхность; справа зависимость коэффициентов в аэродинамических силах 1 –  $f_{||}\epsilon$ , 2 –  $f_{\perp}\epsilon$ , 3 –  $f_{\Delta}\epsilon$ , 4 – коэффициент рассеивающей силы  $\phi\epsilon$ , отнесенной к силе Стокса, действующей на объемно эквивалентную сферу.

Работа выполнена в рамках проекта MUSIC-haic программы HORIZON 2020 ЕС при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (идентификатор проекта RFMEFI62818X0010) и при поддержке РФФИ (проект № 18-31-00485).

1. Amelyushkin I.A., Stasenko A.L. Interaction of supercooled droplets and nonspherical ice crystals with a solid body in a mixed cloud // CEAS Aeronautics Journal. December 2018, V. 9, Issue 4, P. 711–720.

2. Amelyushkin I.A. Mathematical models of two-phase flows' interaction with a solid body // Journal of Physics: Conf. Series. IOP Publishing. 2018. V. 1129. No 012003. P. 1–5.

3. Амелюшкин И.А., Стасенко А.Л. Моделирование взаимодействия кристаллов льда с поверхностью летательного аппарата: область орошения и коэффициенты восстановления скорости // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 2 (Принята к печати).

4. Amelyushkin I.A. Mathematical simulation, numerical and experimental investigation of nonspherical bodies' motion in nonuniform flows // Proceedings from HiSST. 26–28 November 2018. Moscow. P. 1–8.



## ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ХОЛОДНОЙ МИКРОСТРУИ ВОЗДУХА С ПРЕГРАДОЙ

*В.М. Анискин, Т.А. Коротаева, А.Н. Маслов*

Институт Теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск  
e-mail: [korta@itam.nsc.ru](mailto:korta@itam.nsc.ru)

Зачастую, на практике охлаждение технических систем осуществляется с использованием жидкостных, газовых или газо-жидкостных струй. Известно, что интенсивность теплообмена в системе струя-преграда зависит от режима течения в струе перед ее падением на преграду (число Рейнольдса, степень турбулентности), типа струй (осесимметричные, плоские), расстояния до преграды, а также угла взаимодействия с преградой и ее формы. Многие из перечисленных аспектов были рассмотрены при исследовании макроструй. Но возникновение тенденции к миниатюризации в последние два десятилетия привело к интенсивному развитию теплообменных систем с мини-, и микроразмерами. Целью настоящей работы является численное и экспериментальное моделирование процесса охлаждения преграды из тонкой пластины пластика, лежащей на толстой медной подложке осесимметричной сверхзвуковой микроструей воздуха.

Для экспериментального исследования тепловых потоков при натекании микроструи на преграду была изготовлена экспериментальная установка, к медной пластине (1) толщиной 15 мм и диаметром 105 мм, помещённой в теплоизолятор из вспененного бетона (2), снизу теплопроводящим клеем были прикреплены керамические нагревательные элементы (3). Сверху теплопроводящей пастой прикреплена пластина из полиэфирэфиркетона (РЕЕК) толщиной 500 мкм и диаметром 40 мм (4). Под поверхностью пластины были размещены вмонтированные в поверхность медной подложки 14 термопар, с помощью которых контролировалось распределение температуры. Подложка обеспечивала равномерный нагрев пластины вплоть до температуры 90°C. С помощью вертикальной подвижки сопло (5) помещалось на заданном расстоянии от поверхности пластины (4). Распределение температур на поверхности пластины (4) фиксировали с помощью тепловизионной камеры SC7300M (FLIR, USA) с пространственным разрешением 320 на 240 пикселей, температурным разрешением 0,01°C, в режиме 100 кадров в секунду. На Рис. можно видеть схему экспериментов и пример полученного тепловизионного изображения при натекании микроструи на нагретую преграду (диаметр сопла 300 мкм, расстояние 3 мм).

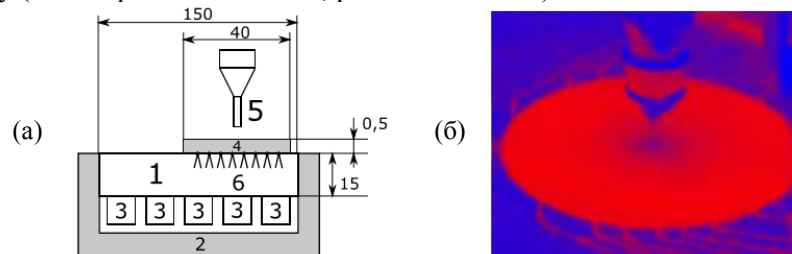


Рис. Экспериментальные исследования тепловых потоков при натекании микроструи на преграду: (а) – схема экспериментальной установки; (б) – пример тепловизионного изображения.

Рассматривались различные степени несчётности струи, истекающей в затопленное пространство. Численное моделирование проведено в постановке, максимально приближенной к схеме экспериментов. В рамках уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, решалась сопряженная задача охлаждения преграды струйкой воздуха для ламинарного режима истечения или турбулентного с использованием  $k-\omega$  SST-модели турбулентности.

В расчетах и экспериментах определены поля течения и коэффициенты теплопередачи преграды. Численное моделирование показало, что в рассматриваемых условиях наблюдается возникновение автоколебаний. Осредненные характеристики выявили существенно неравномерное охлаждение пластины при натекании струи на преграду, с максимумом на периферии струи в области разворота потока. Эксперименты показали, что, в виду значительной проницаемости пластика РЕЕК для инфракрасного излучения, применение тепловизионного метода исследования теплоотдачи именно для микроструй приводит к значительным погрешностям определения температуры поверхности.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 17-19-01157.

## ПОВРЕЖДЕННОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

*А.Р. Арутюнян, Р.А. Арутюнян, Р.Р. Саитова*  
Математико-механический факультет СПбГУ, Санкт-Петербург  
e-mail : [a.arutyunyan@spbu.ru](mailto:a.arutyunyan@spbu.ru), [rigastr@yandex.ru](mailto:rigastr@yandex.ru)

Проблема высокотемпературной ползучести и длительной прочности металлов востребована в таких ответственных областях современного машиностроения, как тепловые и атомные энергетические установки, авиационные и космические аппараты и др. В связи с этим до настоящего времени ведутся интенсивные исследования по этой проблеме. В частности, имеются многочисленные экспериментальные исследования по изменению пористости и плотности различных металлов и сплавов вследствие образования и развития микропор и микротрещин в условиях высокотемпературной ползучести. Результаты этих исследований позволяют рассматривать плотность в качестве интегральной меры накопления структурных микродефектов, а параметр поврежденности задается как отношение текущей величины плотности к начальной. С учетом этого параметра и закона сохранения массы для случая сжимаемого материала сформулированы взаимосвязанные кинетические уравнения для деформации ползучести и параметра поврежденности [1]. В случае чисто хрупкого разрушения получены аналитические решения этих уравнений и сформулирован критерий длительной прочности. Кривые длительной прочности согласно полученному критерию и по теории Качанова-Работнова [2, 3] приведены на рис. 1. Показано, что критерий Качанова-Работнова (кривая 2) является частным случаем полученного критерия. Согласно кривым длительной прочности теория Качанова-Работнова предсказывает завышенные значения времени до разрушения и накопление деформации ползучести в этом случае происходит более интенсивно по сравнению со случаем для сжимаемого материала. Рассмотрен случай вязко-хрупкого разрушения. Получено аналитическое решение, связывающее параметр поврежденности с величиной деформации. При этом деформация ползучести вычисляется приближенно. Соответствующий выбор коэффициентов приближенного решения позволяет описывать экспериментальные кривые ползучести.

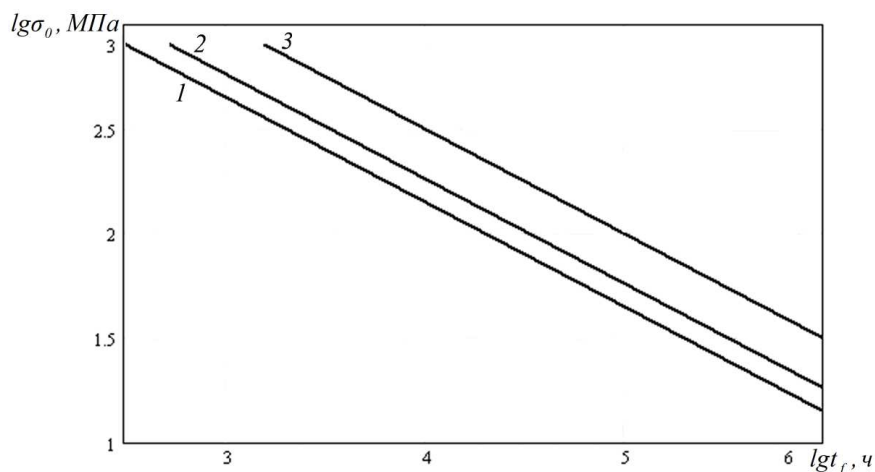


Рис. 1. Кривые длительной прочности согласно критерию, предложенному авторами для сжимаемого материала и по теории Качанова-Работнова.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-01-00146).

1. Арутюнян Р.А. Проблема высокотемпературной ползучести и длительной прочности в механике материалов // Доклады Академии Наук. 2017. Т. 475. № 4. С. 386-388.

2. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. 1958. № 8. С. 26-31.

3. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР. 1959. С. 5-7.

## НЕСТАЦИОНАРНАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО В ПЛАНЕ ШТАМПА И УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА С ПОЛОСТЬЮ

*А.М. Арутюнян<sup>1</sup>, Г.В. Федотенков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский Авиационный Институт, Москва

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

e-mail: [89057254188@mail.ru](mailto:89057254188@mail.ru)

Рассматривается плоская нестационарная задача о распространении объемных возмущений в однородном линейно упругом полупространстве  $z \geq 0$ , имеющем заглубленную полость произвольной геометрии и расположения с гладкой границей  $\Gamma$ . Предполагается, что массовые силы в полупространстве отсутствуют. В начальный момент времени в невозмущенное полупространство по произвольному, но заданному закону начинает вдавливаться абсолютно жесткий штамп с прямолинейным основанием. Решение задачи будем искать в прямоугольной декартовой системе координат  $Oxuz$ . Ось  $Ox$  направлена вдоль невозмущенной границы полупространства, а  $Oz$  – вглубь полупространства. Полупространство имеет заглубленную цилиндрическую полость бесконечной протяженности вдоль оси  $Oy$  с гладкой границей  $\Gamma$  произвольного расположения и геометрии. Обозначим  $\Omega$  полуплоскость с полостью, ограниченной контуром  $\Gamma$ . Зафиксируем произвольный момент времени  $T > 0$  и поставим задачу: определить перемещения и напряжения в среде при  $\tau \in [0, T]$ . При этом, т.к. скорость распространения возмущений в среде ограничена скоростью волн растяжения-сжатия, то фактически можно говорить об определении указанных функций лишь в ограниченной области, а именно в области, ограниченной фронтом волны растяжения-сжатия, распространяющегося от полости и от границы полупространства.

Движение упругого полупространства описывают уравнения Ламе в перемещениях. Также в постановку задачи включаются соотношения Коши и закон Гука. В начальный момент времени полупространство с полостью находится в состоянии покоя, что приводит к нулевым начальным условиям.

Для решения задачи используем динамическую теорему взаимности работ. Применение теоремы взаимности работ приводит к двумерным граничным интегральным уравнениям, ядрами которых являются функции влияния. Для решения полученной системы уравнений применяется прямой метод граничных элементов с дискретизацией по времени. Для получения решений внутри области используются обобщенные формулы Сомильяны.

В качестве фундаментальных решений используются функции влияния для упругого пространства с учетом плоской постановки задачи. Они определяют перемещения и напряжения в упругой плоскости от приложенной единичной мгновенной сосредоточенной силы. С использованием фундаментальных решений задача сводится к системе интегральных уравнений. Интегральные операторы разрешающей системы уравнений дискретизируются по пространственной переменной и по времени. В результате на каждом временном шаге задача сводится к решению системы алгебраических уравнений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-08-00438).

1. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир. 1975. 872 с.

2. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004. 472 с.

3. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. М.: Мир. 1987. 325 с.

## ДВУХСЛОЙНАЯ ТЕРМОКОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПОРИСТОМ СЛОЕ

А.А. Афанасьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [afanasyev@imec.msu.ru](mailto:afanasyev@imec.msu.ru)

Рассматривается неизотермическая задача о конвекции водного раствора соли в пористой среде. Предполагается, что в начальный момент времени горизонтальный пористый слой конечной толщины насыщен водой, причем в нем имеется горизонтальная граница раздела  $z=0$ , выше которой вода пресная  $c=c^+$  (при  $z \in [0, H^+]$ ), а ниже – соленая  $c=c^-$  (при  $z \in [H^-, 0]$ ) (Рис.- а, в). Здесь  $c$  – концентрация соли. Температура  $T$  с глубиной растет (Рис. – б) и ее значения (или потоки тепла) на верхней и нижней границах слоя поддерживаются постоянными. Таким образом, на течение жидкости в слое влияют как дестабилизирующий эффект, связанный с распределением температуры, так и стабилизирующий эффект, обусловленный тем, что ниже границы раздела плотность жидкости  $\rho$  выше (Рис. – г). В результате может развиваться двухслойная конвекция, когда образуются две различные системы конвективных валов выше и ниже границы раздела, а сама свободная граница может терять устойчивость.

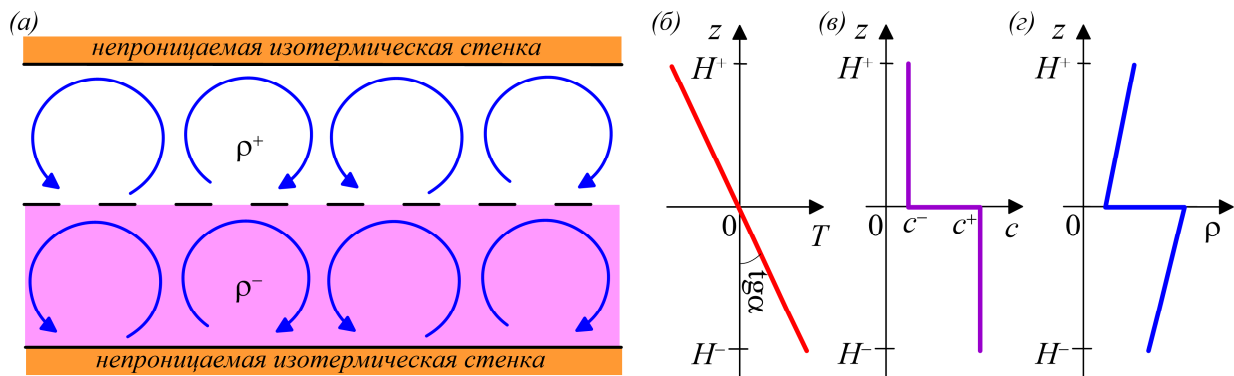


Рис. Схема задачи (а) и начальные распределения температуры  $T$ , концентрации  $c$  и плотности  $\rho$  (б-г).

В докладе аналитическими методами и в рамках численного моделирования фильтрации исследуются различные режимы течения и определяются соответствующие им параметры подобия. В линейном приближении показано, что устойчивость границы раздела определяется только тремя параметрами подобия. В явном виде получено достаточное условие ее устойчивости и обнаружено, что при увеличении числа Рэлея первыми могут терять устойчивость периодические во времени возмущения границы.

С учетом механической дисперсии примеси соли в пористой среде исследована нелинейная динамика системы. Ограничены области параметров задачи, соответствующие различным конечным состояниям системы: жидкость перемешалась полностью или не полностью. Показано, что между данными режимами отсутствует четкая граница: при одних и тех же начальных условиях и различных малых возмущениях слои могут как полностью перемешаться, так и система может прийти к новому устойчивому («размазанному») распределению концентрации  $c$ . Во втором случае, на начальном этапе эволюции развивается конвекция, которая быстро сама себя разрушает из-за перераспределения плотности жидкости, а система успокаивается до полного перемешивания слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (МД-3567.2018.1).



## КАК МЕТОДЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

*В.Б. Баранов<sup>1,2</sup>*

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

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

e-mail: [vladimir.b.baranov@gmail.com](mailto:vladimir.b.baranov@gmail.com)

Несмотря на то, что космическое пространство заполнено очень разреженным газом, для построения моделей физических явлений, встречающихся в космосе, часто используются методы гидроаэромеханики и магнитной гидродинамики. Это обусловлено, во-первых, тем, что обычно характерные масштабы этих явлений очень велики, а длины свободного пробега часто оказываются малыми по сравнению с ними. Во-вторых, космическое пространство заполнено в основном ионизованным газом, т.е. газом, который находится в состоянии плазмы. В последнем случае длины свободного пробега могут определяться не только парными кулоновскими столкновениями между заряженными частицами, но и так называемыми «коллективными» процессами, при которых длины свободного пробега существенно меньше длин свободного пробега в парных столкновениях, что дает возможность построения гидродинамических моделей. Активное развитие теоретических моделей тех явлений, которые встречаются в космическом пространстве, началось после того, как космические аппараты вышли в открытый космос, а приборы, устанавливаемые на них, смогли проводить прямые измерения гидродинамических параметров (скорости, плотности, температуры). Кроме того, появилась возможность исследования удаленных астрофизических явлений во всем диапазоне длин волн. Это, конечно, накладывает особую ответственность на ученых, занятых построением теоретических моделей, поскольку ценность модели определяется экспериментальным подтверждением ее выводов.

Результаты численной модели взаимодействия  
солнечного ветра и межзвездной среды  
(Baranov and Malama, JGR, 1993г.)

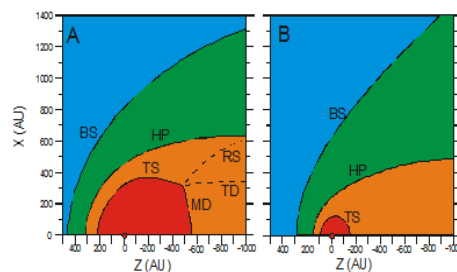


Рисунок 1, слева – не учитывает процесс резонансной перезарядки; справа – учитывает этот важный в проблеме эффект.

В настоящей лекции будут затронуты две проблемы, к которым автор имеет самое непосредственное отношение, а именно, взаимодействие солнечного ветра с межзвездной средой, окружающей солнечную систему, и с кометными атмосферами. Обе проблемы сводятся к газодинамическому или магнитогидродинамическому (МГД) взаимодействию двух сверхзвуковых потоков, в которых происходят химические реакции (процессы перезарядки, фотоионизации, ионизации электронным ударом и др.). Запуск космических аппаратов (КА) Voyager–1, Voyager–2, Pioneer–10, Pioneer–11 в середине 70-х годов прошлого столетия для изучения удаленных областей солнечной системы придал особую актуальность первой проблеме. Автору доклада вместе с сотрудниками и коллегами удалось построить пионерские модели с образованием двух ударных волн (в солнечном ветре и в межзвездной плазме) и тангенциального разрыва, разделяющего оба потока. В частности, в работе [1] впервые была предложена модель в ньютоновском приближении тонкого слоя, которая дала толчок к созданию реальной модели, учитывающей главный процесс резонансной перезарядки атомов H, проникающими из межзвездной среды в солнечный ветер, с протонами [2]. Многие физические явления, предсказанные в модели [2], были через много лет подтверждены экспериментами на КА. В частности, на Рис. 1 приведены данные расчета формы и положения сильных разрывов, полученные в этой работе. Аппараты Voyager–1 и Voyager–2 пересекли ударную

волну торможения солнечного ветра в 2004 и 2007 году на расстояниях 84 а.е. и 94 а.е., соответственно, что, с точностью ~ 3%, совпадает с предсказанным положением этой ударной волны (TS).

Для понимания процессов, которые происходят при взаимодействии солнечного ветра с кометными атмосферами, важным моментом были миссии космических аппаратов Вега-1, Вега-2, Giotto, Suissei и Sakigake к комете Галлея в марте 1986 года и аппарата Rosetta к комете Чурюмова-Герасименко (2014–2016 годы). Пионерская работа по созданию гидродинамической модели в этой проблеме принадлежит авторам работы [3]. Применительно к исследованию кометы Галлея в марте 1986 года качественная модель в [3] была численно решена в работе [4], результаты которой хорошо совпали с данными экспериментов на космических аппаратах. В дальнейшем авторами работ [5–7] была развита МГД модель взаимодействия солнечного ветра с атмосферами комет Галлея, Григга-Шеллерупа и Чурюмова-Герасименко во время прохождения этих комет через перигелий. В работе [8] результаты разработанной трехмерной МГД модели сравниваются с экспериментальными данными, полученными при исследовании кометы Чурюмова-Герасименко при помощи аппарата Rosetta.

Автор выражает благодарность гранту РФФИ №19-01-00302 за частичную финансовую поддержку доклада.

1. Баранов В.Б., Краснобаев К.В., Куликовский А.Г., ДАН СССР, т. 194, стр. 41, 1970.
2. Baranov V.B., Malama Yu.G., J. Geophys. Res., v. 98, pp. 15157 – 15163, 1993.
3. L. Biermann, B. Brosowski, and H.U. Schmidt, Solar Phys., v.1, p. 254, 1967.
4. Баранов В.Б., Лебедев М.Г., Письма в АЖ, т. 12, стр. 551, 1986.
5. Алексашов Д.Б., Баранов В.Б., Лебедев, Известия РАН, МЖГ, № 1, 2015.
6. Baranov V.B., Alexashov D.B., Lebedev M.G., MNRAS, v. 449, pp. 2268 – 2273, 2015.
7. Lebedev M.G., Baranov V.B., Alexashov D.B., Earth, Moon and Planets, v. 116, pp. 159 – 179, 2015.
8. Baranov V.B., Alexashov D.B., Lebedev M.G., MNRAS, v. 482, pp. 5642 – 5650, 2019.

## НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ТРАНСЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ

А.Н. Богданов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [bogdanov@imec.msu.ru](mailto:bogdanov@imec.msu.ru)

Основоположителем теоретических исследований течений в околосвуковом диапазоне скоростей принято считать С.А. Чаплыгина [1]. Впервые доложенные в 1896 и в 1902 году опубликованные результаты составили его докторскую диссертацию «О газовых струях». Существенным продвижением был выполненный Чаплыгиным необходимый учет сжимаемости газа. Намного опередившая свое время, эта работа не получила развитие ни в дальнейших трудах самого автора, ни его современников.

Следующими этапами стали учет нестационарности и вязких эффектов. Для нестационарного режима определяющее уравнение было выведено с использованием асимптотических методов В. Линем, Э. Рейсснером и С. Цянем [2] и также не стало развитием идей Чаплыгина

$$(K_\infty - (\gamma + 1)\phi_x)\phi_{xx} + \phi_{yy} - 2\phi_{xt} = 0, \quad K_\infty = \frac{1 - M_\infty^2}{\varepsilon^{2/3}}, \quad \varepsilon \ll 1,$$

$\phi$  – потенциал скорости,  $M_\infty$  – число Маха.

Уравнение Линя-Рейсснера-Цяня (ЛРЦ) стало основным при исследовании нестационарных трансзвуковых течений [3]. Однако круг рассмотренных задач был крайне ограничен, в монографии Дж. Коул, П. Кук [3] нестационарным течениям был посвящен лишь один параграф (8 страниц из 360 в монографии).

Обобщение модели пограничного слоя на предотрывные режимы (трехпалубная модель) было выполнено впервые для сверхзвукового течения [4]. Для подчеркивания отличия от обычных пограничных слоев для этой модели стало использоваться также наименование неклассического (с самоиндуцированным давлением) пограничного слоя. Модель была распространена на трансзвуковой режим [5], уравнение ЛРЦ вошло в модель для описания течения в невязкой области (верхней «палубе»).

Впоследствии выяснилось [6,7], что направление исследований пошло путем, уведящим от реальности – классическая модель была сингулярна и описывала характер течения лишь отчасти. В этой связи была предложена регуляризация модели [8], заключающаяся в сохранении (т.о. возникающего естественным образом) в уравнении ЛРЦ, при его выводе из полных уравнений для потенциала, сингулярного (содержащего малый параметр) члена  $\varepsilon\phi_{tt}$ . Сравнение результатов, даваемых классической и модифицированной моделями показало [8], что условия устойчивости/неустойчивости течения являются гораздо более сложными, чем это полагалось ранее. Для приложений это означает, в частности, что задача управления пограничным слоем для его, например, стабилизации, становится качественно более сложной.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-29-01092-офи\_м, 18-01-00793-а).

1. Юрьев И.М. Значение исследования С.А. Чаплыгина «О газовых струях» для газовой динамики. Изд-во ЦАГИ. 1969. 22 с.

2. Тзян Х.Ш., Лин Ц.Ц., Рейснер Е. О двумерном неустановившемся движении тонкого тела в сжимаемой жидкости // Газовая динамика (Сб. статей). Под ред. С.Г. Попова и С.В. Фальковича. М.: Изд-во иностр. лит. 1950. С. 183-196.

3. Коул Дж., Кук Л. Трансзвуковая аэродинамика. М.: Мир. 1989. 360 с.

4. Нейланд В.Я. Сверхзвуковое течение вязкого газа вблизи точки отрыва // III Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. 25.01 – 01.02.1968 г. Сб. аннотаций докладов. М.: Наука. 1968.

5. Рьжов О.С. О нестационарном пограничном слое с самоиндуцированным давлением при околосвуковых скоростях внешнего потока // Докл. АН СССР. 1977. Т.236. № 5. С. 1091-1094.

6. Богданов А.Н. Высшие приближения трансзвукового разложения в задачах нестационарных трансзвуковых течений // ПММ. 1997. Т. 61. Вып. 5. С. 798-811.

7. Богданов А.Н. Моделирование переходного режима работы трансзвукового сопла // Мат. моделирование. 1995. Т. 7. № 9. С. 117-126.

8. Богданов А.Н., Диесперов В.Н., Жук В.И. Неклассические трансзвуковые пограничные слои. К преодолению некоторых тупиковых ситуаций в аэродинамике больших скоростей // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2018. 58(2). С. 270-280.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕЙ ГЁРТЛЕРА

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

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск  
e-mail: [D.A.Mischenko@itam.nsc.ru](mailto:D.A.Mischenko@itam.nsc.ru)

В докладе представлены результаты двух экспериментов, направленных на исследование нового эффективного механизма управления развитием нестационарных гёртлеровских мод за счет трехмерной модификации пограничного слоя высокоамплитудными стационарными вихрями Гёртлера. Этот механизм ранее не исследовался ни теоретически, ни экспериментально. Эксперименты проведены в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН при скорости потока  $U_e = 9,18$  м/с. Термоанемометрические измерения выполнены в пограничном слое типа Блазиуса на вогнутой поверхности высокоточной экспериментальной модели (с радиусом закругления  $R = 8.37$  м) в условиях возбуждения полностью контролируемых нестационарных (в общем случае) возмущений. Исследования проведены для серии парных режимов, в которых низкоамплитудные (менее 1% от  $U_e$ ) нестационарные гёртлеровские моды развивались в условиях присутствия (режим I) и отсутствия (режим II) высокоамплитудных (более 20% от  $U_e$ ) квазистационарных (физически стационарных) вихрей Гёртлера.

Для введения в пограничный слой контролируемых возмущений использовался универсальный источник возмущений ВС-III, который представляет собой коренную модификацию хорошо известного источника ВС-II. Новая электронная и программная части источника были созданы с использованием 8-канального 16-разрядного ЦАП «Р-Технологии» и его штатного программного обеспечения, а механическая часть изготовлена с использованием оригинальной технологии с использованием высококачественной 3D печати. В экспериментах использовались два типа механических частей: с двумя поперечными потоку щелями (S1) и набором продольных потоку (шириной 0.9 и длиной 16 мм) щелей (S2). Под щелями находились узкие каналы в теле источника, через которые в пограничный слой вводились возмущения типа вдува/отсоса (относительно слабого) заданного поперечного масштаба и частоты.

Эксперименты показали, что стационарные вихри Гёртлера способны существенно подавлять скорости нарастания нестационарных гёртлеровских мод (рис. 1). Первые проявления эффекта подавления фиксируются, когда амплитуда управляющих возмущений превышает величину 5-10% от  $U_e$ . Эффект не зависит от амплитуды низкоамплитудных нестационарных гёртлеровских мод, но существенно зависит от фазовых соотношений управляющих и управляемых возмущений вдоль размаха модели (координата  $z$ ). Наибольшее подавление нестационарных мод неустойчивости Гёртлера зафиксировано в случае, когда возмущения обоих типов находятся «в фазе» (положения максимумов амплитуд совпадают) по  $z$ . В случае, когда положения максимумов их амплитуд сдвинуто по  $z$  на четверть длины волны, эффект управления полностью пропадает.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 17-71-10179).

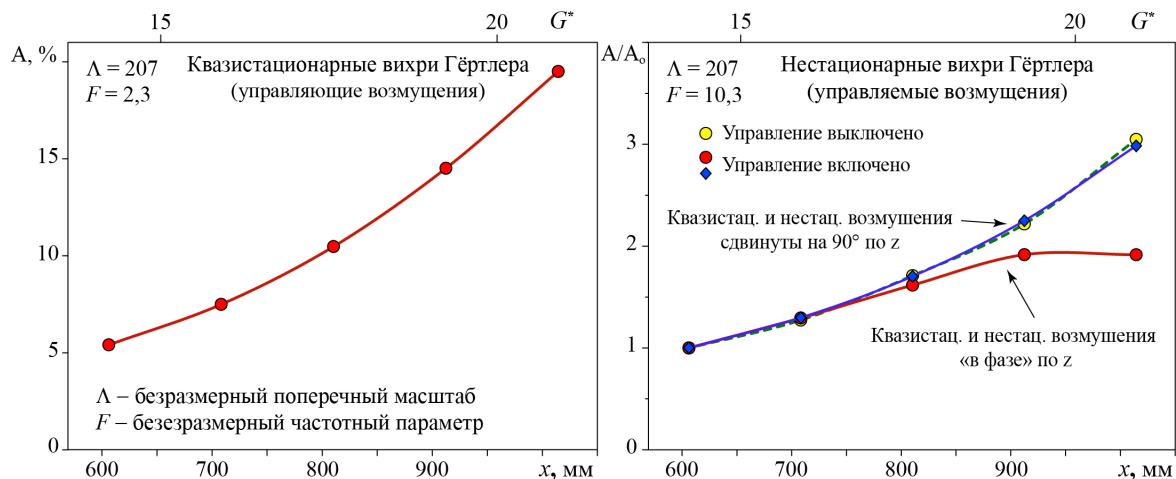


Рис. 1 Амплитуд управляющих (слева) и управляемых (справа) возмущений в зависимости от продольной координаты  $x$  и числа Гёртлера  $G^*$  (верхняя шкала).

## О МОДЕЛЯХ ФРАГМЕНТАЦИИ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ

М.Д. Брагин<sup>1,2</sup>, И.Г. Брыкина<sup>3</sup>, Л.А. Егорова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва

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

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

e-mail: [shantii@mail.ru](mailto:shantii@mail.ru)

Космические тела при входе в атмосферу испытывают значительные аэродинамические нагрузки, под действием которых большинство из них разрушается. В работе развиты два подхода к моделированию разрушения метеороидов в атмосфере. Первый предполагает разрушение на облако фрагментов, движущихся совместно с общей ударной волной. Второй предполагает независимое движение фрагментов со степенным распределением их по массам. Полученное распределение фрагментов по массам может использоваться на второй стадии движения облака фрагментов, когда фрагменты расходятся на достаточное расстояние, чтобы двигаться независимо, а также в модели мгновенного разрушения, когда первая стадия протекает очень быстро.

Разработанная модель облака фрагментов и паров, учитывающая изменение формы этого облака под действием сил давления и уменьшение его плотности из-за увеличения расстояния между фрагментами, сравнивается с имеющимися в литературе моделями, не учитывающими эти эффекты. Для всех моделей получены аналитические и численные решения уравнений физической теории метеоров (уравнений торможения и абляции) для моделирования уноса массы и энерговыделения Челябинского метеороида вдоль траектории. Выявлены преимущества развитой модели по сравнению с общепринятыми. Проведено сравнение с данными наблюдений. Показано хорошее согласование аналитического решения с численным.

Основываясь на экспериментальных данных по высокоскоростному удару твердых моделей, найдено вероятностное распределение фрагментов раздробленного тела по массам  $m$  в зависимости от массы максимального фрагмента. Получено выражение для кумулятивного числа фрагментов  $N_m$  с массой больше, чем  $m$ , согласующееся с результатами экспериментов. Построены кривые распределения по массам найденных метеоритов после пролета в атмосфере четырех болидов: Басикуну в Мавритании (2006), 2008 TC3 в Судане, Кошице в Словакии (2010), Челябинского (2013). Показано, что полученное выражение для  $N_m$  удовлетворительно описывает эти распределения для фрагментов с массой более нескольких десятков грамм.

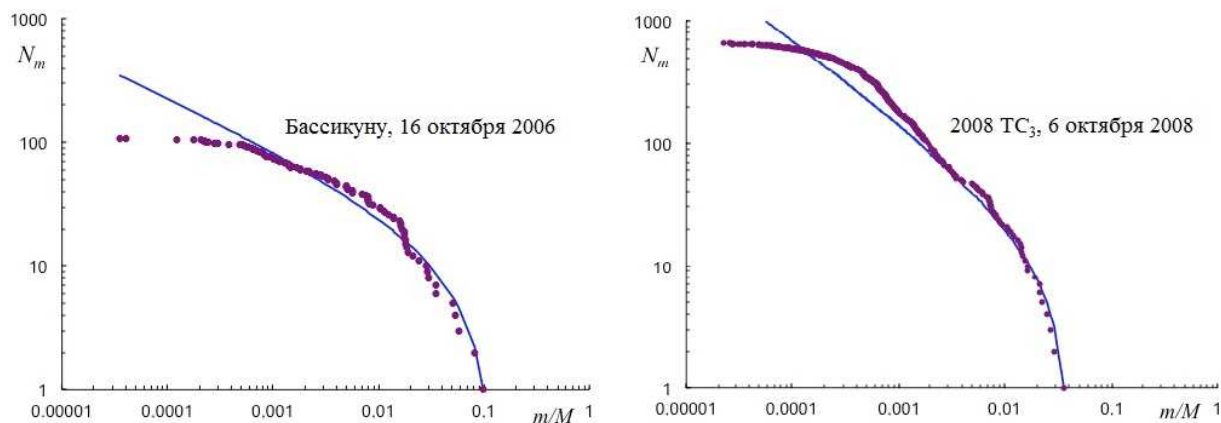


Рис. Сравнение кумулятивного распределения по массам метеоритов болидов Басикуну [1] и 2008 TC3 [2] (точки) с модельными кривыми;  $m/M$  – масса фрагмента, отнесенная к общей массе.

При использовании полученного распределения по массам, уравнения торможения и абляции решаются для каждого фрагмента массы  $m$ , унос массы раздробленного метеороида, энерговыделение и интенсивность свечения вдоль траектории определяются интегрально.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-01-00740.

1. Buhl S., Baermann M. The Bassikounou meteorite fall – Descriptive catalog of the recovered masses // [www.niger-meteorite-recon.de](http://www.niger-meteorite-recon.de)
2. Shaddad H., Jenniskens P., Numan D. The recovery of asteroid 2008 TC3 // Meteoritics & Planetary Science. 2010. V. 45. P. 1557–1589.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ УНОСА МАССЫ И ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА

И.Г. Брыкина

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [shantii@mail.ru](mailto:shantii@mail.ru)

Большие скорости входа космических тел в атмосферу Земли порождают процессы, не проявляющиеся при обтекании космических аппаратов. Под действием интенсивных тепловых потоков метеороид плавится, испаряется и теряет значительную часть своей массы. Под действием возрастающих по мере проникновения в более плотные слои атмосферы аэродинамических нагрузок большинство метеороидов разрушается. Моделирование в задачах метеорной физики осложняется еще и тем, что его надо проводить в условиях неопределенности начальных данных.

Для моделирования взаимодействия крупного метеороида с атмосферой разработана модель его разрушения на облако фрагментов, движущихся с общей ударной волной. Учитываются два взаимосвязанных процесса: деформация раздробленного метеороида под действием сил давления и уменьшение его плотности из-за увеличения промежутков между фрагментами, заполняемых парами. С учетом распределения давления по поверхности деформирующегося тела получено соотношение для скорости поперечного расширения облака фрагментов. Движение и абляция метеороида рассматриваются в рамках уравнений физической теории метеоров (ФТМ). Получены выражения для входящих в эти уравнения коэффициента сопротивления и коэффициента радиационной теплопередачи. Получено приближенное аналитическое решение уравнений ФТМ для изменения массы и кинетической энергии раздробленного метеороида вдоль траектории.

С использованием этого решения проведено моделирование уноса массы и энерговыделения Челябинского метеороида и его световой кривой, нормированной на максимальную яркость, до высоты 27 км. Исследуется влияние неопределенности начальных параметров метеороида при входе в атмосферу – массы, прочности и плотности – на характеристики его взаимодействия с атмосферой. Сравнение расчетной световой кривой со световыми кривыми, построенными по разным видеозаписям (пример сравнения приведен на рисунке) показало удовлетворительное согласование с наблюдательными данными. Воспроизведение наблюдательной кривой энерговыделения на единицу высоты [1] позволило оценить начальную массу метеороида.

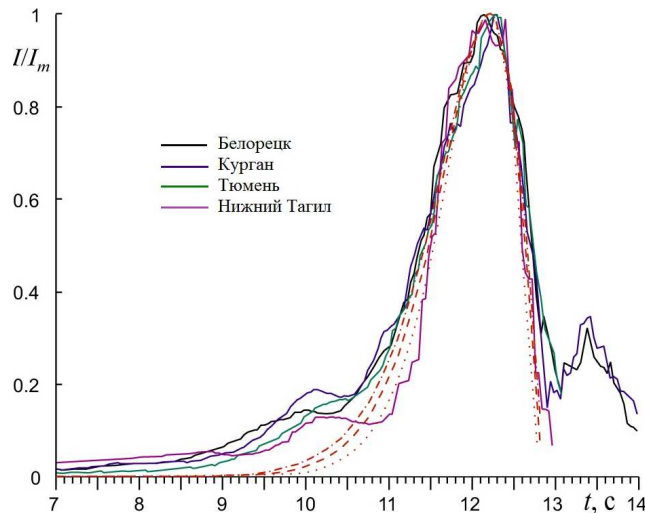


Рис. Сравнение расчетной световой кривой при прочности метеороида 0.5, 0.7 и 1 Мпа (штрих-пунктирная, штриховая и пунктирные линии) с наблюдательными световыми кривыми [2], полученными по видеозаписям в Белорещке, Кургане, Тюмени и Нижнем Тагиле. Время  $t$  в секундах после 3:20:20 UT 15.02.2013.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-01-00740.

1. Brown P.G., Assink J.D., Astiz L., et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature. 2013. V. 503. P. 238–241.
2. Borovička J., Spurný P., Brown P., et al. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013. V. 503. P. 235–237.

## УСТОЙЧИВОСТЬ ОДНОМЕРНОГО СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ С ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОЩАДИ

*Х.Ф. Валиев, А.Д. Егорян*  
ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва  
e-mail: [haris@ciam.ru](mailto:haris@ciam.ru)

Большие знакопеременные нагрузки, неизбежные при горении в нестационарных детонационных волнах (ДВ), существенно ограничивают применение воздушно-реактивных двигателей (ВРД) с пульсирующими и вращающимися ДВ (PDE и RDE) летательными аппаратами кратковременного жизненного цикла. С другой стороны, лишённые этого недостатка ВРД со стационарными ДВ возможны при условии, что стационарные течения в каналах таких ВРД устойчивы. Как было недавно установлено (А.Н. Крайко, 2019), одномерные стационарные течения с прямыми ДВ Чепмена – Жуге всегда неустойчивы.

Выполненный анализ устойчивости стационарных течений с пересжатыми ДВ и примыкающими к ним дозвуковыми потоками развивает подходы, применённые ранее для течений с замыкающим скачком уплотнения. Отличия – в работающих последовательно программах численного решения стационарных и нестационарных уравнений, описывающих в одномерном приближении исследуемые течения. Сначала для заданных формы канала, параметрах, определяющих режим течения, констант, характеризующих горючую смесь и продукты сгорания, и сечения стационарного положения пересжатой ДВ программа расчёта стационарного течения находит распределения параметров по всему каналу. Типичные каналы имеют сужающийся-расширяющийся входной участок со сверхзвуковым числом Маха  $M$  в минимальном сечении, а в расширяющейся части в сечении с  $M=M_1$  стоит пересжатая ДВ с заданным стационарным значением  $M_2 < 1$  за ней. Правее ДВ расширение переходит в небольшой цилиндрический участок, а затем в «сопло Лаваля» со стационарным числом Маха  $M = 1$  в его минимальном сечении.

В примыкающем к пересжатой ДВ дозвуковом потоке задаются разные начальные возмущения. Их эволюцию определяет программа численного решения уравнений одномерного нестационарного течения на отрезке канала с подвижной левой границей – пересжатой ДВ и неподвижной правой – сечением  $x = X$  в сверхзвуковом сопле. Используемая разностная схема – модифицированная схема С.К. Годунова повышенного порядка аппроксимации по времени и пространству. Расчёт ведётся на подвижной, равномерной на каждом временном слое разностной сетке. Движущаяся ДВ выделяется так, что её скорость  $D$ , координата  $x_1$  и все параметры за волной на каждом новом слое определяются тремя законами сохранения на разрыве, уравнением  $dx_1/dt = D$  и условием совместности для  $C^-$ -характеристики, приходящей на ДВ справа. Течение слева от ДВ невозмущённое стационарное, а его параметры – известные функции  $x_1$ . Проведённые расчёты, продемонстрировав работоспособность развитого подхода и созданных программ, выявили примеры устойчивых течений с пересжатыми ДВ в каналах переменной площади.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (17-01-00126 и 18-31-20059).

## РАСТЕКАНИЕ ЛАВЫ, КАК НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ, ВО ВРЕМЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ПО ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Е.А. Веденева

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [el\\_vedeneva@imec.msu.ru](mailto:el_vedeneva@imec.msu.ru)

Решается задача о растекании лавы как несжимаемой неньютоновской жидкости, подчиняющейся степенному закону, по плоской горизонтальной поверхности. Считается, что лава растекается от точечного источника, течение осесимметричное. В реальных лавовых потоках на подстилающей поверхности зачастую формируется подслой, содержащий значительную долю обломков остывшей породы, который при растекании лавы может играть роль гусеничного механизма. Чтобы смоделировать это явление на поверхности ставится условие частичного проскальзывания: скорость на поверхности считается степенной функцией трения. В приближении тонкого слоя задача сводится к решению одного нелинейного дифференциального уравнения в частных производных второго порядка с интегральным условием. Для степенной зависимости расхода лавы от времени найдено автомодельное решение этого уравнения, которое является решением нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка, один из коэффициентов которого зависит от интеграла от самого решения. Такое решение задачи аналогично [1–5], но учитывает и условие проскальзывания на подстилающей поверхности, и неньютоновские свойства жидкости. Автомодельное решение существует только при существенном ограничении на параметры задачи, поэтому также рассматривается и неавтомодельное решение.

На рис. приведено сравнение форм свободной поверхности лавового потока для различных значений параметров в законе проскальзывания. За счет проскальзывания лавовый поток может распространяться до полутора раз быстрее.

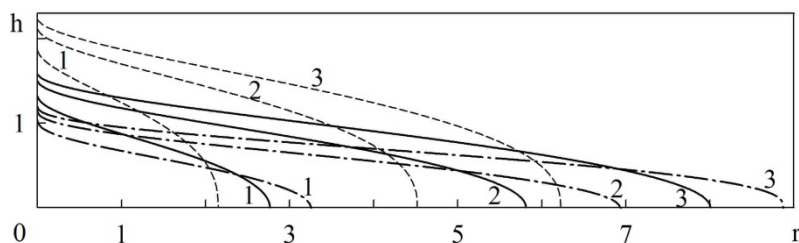


Рис. Формы свободной поверхности лавового потока в последовательные моменты времени – кривые 1–3. Решение без проскальзывания – пунктир, с проскальзыванием – сплошные кривые и штрих-пунктир.

1. Huppert H.E. The propagation of two-dimensional and axisymmetric viscous gravity currents over a rigid horizontal surface // J. Fluid Mech. 1982. V. 21. P. 43–58.
2. Balmforth N.J., Burbidge A.S., Craster R.V., Salzig J., Shen A. Viscoplastic models of isothermal lava domes // J. Fluid Mech. 2000. V. 403. P. 37–65.
3. Sayag R., Grae Worster M. Axisymmetric gravity currents of power-law fluids over a rigid horizontal surface // Journal of Fluid Mechanics. 2013. V. 716, R5. doi:10.1017/jfm.2012.545.
4. Агеев А.И., Осипцов А.Н. Автомодельные режимы растекания тонкого слоя жидкости вдоль супергидрофобной поверхности // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 3. С. 37–51.
5. Веденева Е.А. Растекание лавы во время вулканических извержений при условии частичного проскальзывания на подстилающей поверхности // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 2. С. 27–40.



## СВЕРХЗВУКОВОЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ. АСИМПТОТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ЗАКОНЫ ПОДОБИЯ

*И.И. Вигдорович*

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [vigdorovich@imec.msu.ru](mailto:vigdorovich@imec.msu.ru)

Доклад посвящен описанию течения в турбулентном пограничном слое на пластине при нулевом продольном градиенте давления в терминах законов подобия для основных гидродинамических и тепловых величин. Для течения несжимаемой жидкости такие законы подобия надежно установлены. К ним относятся закон стенки Прандтля, законы дефекта скорости и трения Кармана и аналогичные соотношения для температуры и теплового потока на стенке. В промежуточной пристеночной области пограничного слоя профили скорости и температуры удовлетворяют известному логарифмическому закону. Обобщение закона стенки для профиля скорости на случай турбулентного течения сжимаемого газа принадлежит Ван Дристу [1]. В своем анализе, однако, он, как и его последователи, просто использовал формулу пути смешения Прандтля. Поэтому этот результат нельзя считать в такой же степени обоснованным как соотношения для несжимаемой жидкости, которые, фактически, получены из первых принципов. Более того, известно, что формула Ван Дриста заметно хуже согласуется с экспериментальными данными, чем ее аналог для несжимаемого течения. Расхождения особенно существенны при наличии теплопередачи на стенке.

Цель настоящей работы – объяснить причину рассогласования формулы Ван Дриста с результатами измерений и вывести новые законы подобия для скорости и температуры, которые являются точными асимптотическими решениями уравнений Рейнольдса для сжимаемого газа. Тот факт, что рассматриваемое течение зависит от конечного числа определяющих параметров, позволяет сформулировать условия замыкания, связывающие турбулентное касательное напряжение и турбулентный поток тепла с градиентами усредненной скорости и энтальпии. Идея существования таких связей в случае, когда задача зависит от конечного числа параметров, впервые была сформулирована в [2] и затем для несжимаемых течений использовалась, например, в работах [3–6]. Замкнутые таким образом уравнения Рейнольдса решаются методом сращиваемых асимптотических разложений для различных характерных областей течения, в число которых входят: вязкий подслой, логарифмический подслой и внешняя область пограничного слоя. Малый параметр теории – число Маха, вычисленное по динамической скорости и энтальпии газа на стенке. Рассматриваются все возможные случаи теплопередачи на обтекаемой поверхности – охлаждаемая, теплоизолированная и нагреваемая стенка. Показано, что в вязком подслое пограничного слоя сжимаемого газа безразмерный профиль скорости такой же, как для несжимаемой жидкости, а профиль температуры – суперпозиция известного профиля для несжимаемой жидкости при нулевом кинетическом нагреве и профиля температуры, соответствующего частному случаю теплоизолированной пластины, когда кинетический нагрев не равен нулю. Решение задачи в логарифмическом подслое и асимптотическое сращивание с решением для вязкого подслоя дают связь между температурой и скоростью (интеграл Крокко) и законы стенки для скорости и температуры. Главный член асимптотики для профиля скорости соответствует известной формуле Ван Дриста. Однако полученное решение содержит дополнительные слагаемые порядка единицы, что объясняет расхождение формулы Ван Дриста с экспериментальными данными. Аналогичную структуру имеет закон стенки для температуры, который для сжимаемого течения сформулирован впервые. Кроме постоянной Кармана и турбулентного числа Прандтля в логарифмической области, известных для течения несжимаемой жидкости, полученные соотношения содержат три новые универсальные константы, которые не зависят от молекулярных свойств и отношения теплоемкостей газа. Сращивание решений для логарифмического подслоя и внешней области дает законы трения и теплообмена, выражения для коэффициентов восстановления и аналогии Рейнольдса, законы дефекта скорости и температуры для внешней области пограничного слоя.

1. Van Driest E.R. // J. Aeronaut. Sci. 1951. V. 18. P. 145-160.
2. Вигдорович И.И. // ДАН. 2003. Т. 392. № 3. С. 340-345.
3. Vigdorovich I.I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 84. No. 5. P. 653-659.
4. Вигдорович И.И. // ДАН. 2016. Т. 466. № 4. С. 412-417.
5. Vigdorovich I.I. // Physics of Fluids. 2016. V. 28. No. 8. P. 085102-1-7.
6. Вигдорович И.И. // Изв. РАН МЖГ. 2017. № 5. С. 38-52.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА

Ю.А. Виноградов, С.С. Попович, М.М. Стронгин  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail : [pss@imec.msu.ru](mailto:pss@imec.msu.ru)

Вследствие вязкой диссипации в пограничном слое сверхзвукового потока сжимаемого газа происходит стратификация температуры торможения. В результате температура во внутренней части пограничного слоя оказывается ниже, а во внешней части – выше, чем температура торможения в основном потоке [1]. Если тепловой поток через стенку отсутствует, то температура пристенного слоя газа будет равняться адиабатной температуре стенки.

Определение адиабатной температуры стенки является одной из главных проблем при исследовании теплообмена сверхзвуковых потоков, поскольку ее непосредственное измерение в эксперименте затруднено [2]. Внешние воздействия (градиент давления, проницаемость стенки, изменение числа Прандтля рабочего тела, форма и рельеф поверхности, скачки уплотнения и отрывные течения) могут приводить к перераспределению температуры торможения и, следовательно, к повышению аэродинамического нагрева в локализованной области или, напротив, к захлаживанию стенки – уменьшению адиабатной температуры стенки.

На рис. 1 показана схема проведения экспериментального исследования температурной стратификации в пограничном слое сверхзвукового потока. Исследования проводились на сверхзвуковом аэродинамическом стенде АР-2 [3] при числе Маха набегающего потока 2.2 и температуре торможения 293 К в турбулентном режиме течения – число Рейнольдса на срезе сопла  $Re_x \geq 2 \cdot 10^7$ . Задача исследования состояла в регистрации параметров аэротермодинамики (давление и температура в потоке, на стенке модели и в пограничном слое) в процессе запуска и работы аэродинамической установки.

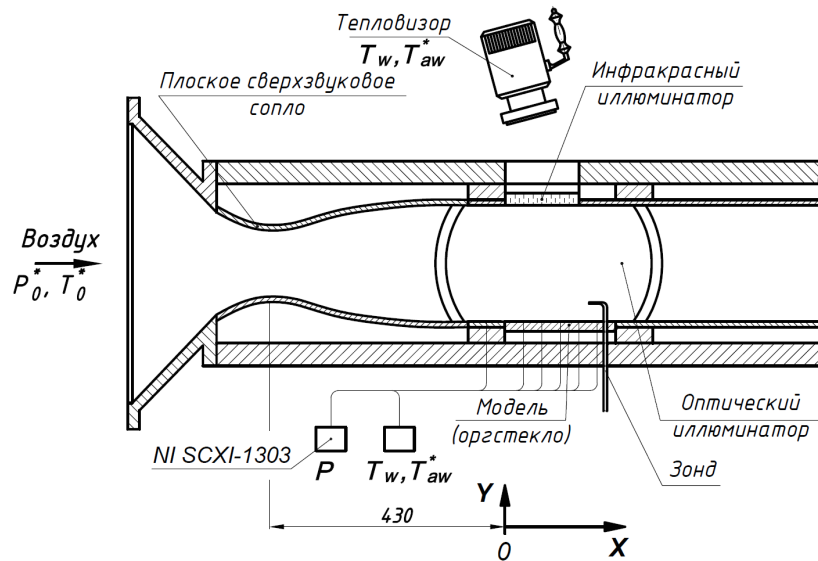


Рис. 1. Схема проведения экспериментального исследования температурной стратификации в пограничном слое сверхзвукового потока.

Работа выполняется при поддержке Российского научного фонда (проект №19-19-00234).

1. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор) // ТВТ. 2014. Т. 52. №2. С. 310-322.

2. Leontiev A.I., Popovich S.S., Vinogradov Y.A., Strongin M.M. Experimental research of heat transfer in supersonic separated compressible gas flow // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1129. No. 012022. pp. 1–4.

3. Попович С.С. Особенности автоматизации эксперимента и обработки результатов при исследовании теплообмена в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Программная инженерия. 2018. № 1. С. 35–45.

## УСТОЙЧИВОСТЬ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЭЛЕКТРОЛИТ/ВОЗДУХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Г.С. Ганченко<sup>1</sup>, Н.Ю. Ганченко<sup>2</sup>, Е.В. Горбачева<sup>2</sup>, Е.А. Демехин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов, Финансовый университет, Краснодар

<sup>2</sup>Кубанский государственный университет, Краснодар

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

e-mail: [ganchenko.ru@gmail.com](mailto:ganchenko.ru@gmail.com)

Изучение поведения микропленок электролита под действием внешнего электрического поля актуально для решения проблем микрофлюидики и проектирования микролабораторий для чипа. В частности, подобные схемы могут использоваться для решения задач медицинской и химической диагностики. Большинство подобных исследований связано с рассмотрением постоянного электрического поля, так как при этом можно создать направленный электроосмотический поток, который, впрочем, может быть неустойчивым [1,2]. Однако постоянное электрическое поле высокой напряженности может привести к возникновению нежелательных процессов, таких как химические реакции на электродах. Использование переменного электрического поля помогает избежать таких процессов, но механизм направленного транспорта электролита при этом меняется.

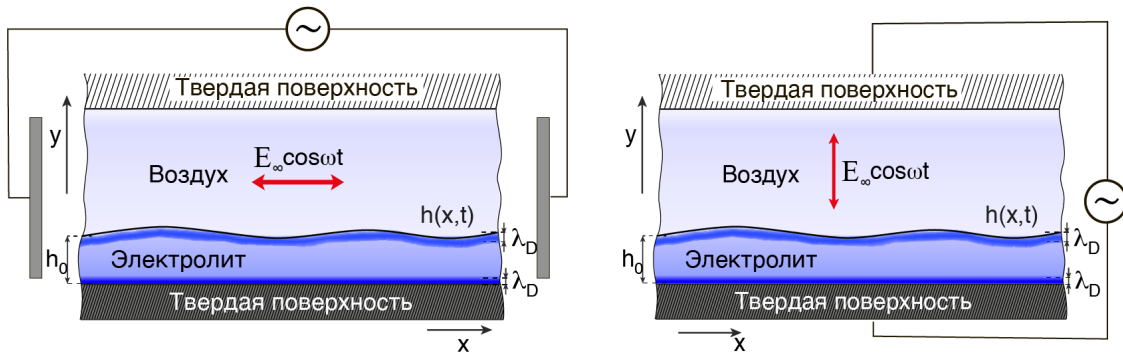


Рис. Схематическое изображение двух постановок.

В данной работе рассмотрено две постановки: для касательного и нормального электрических полей относительно невозмущенной границы раздела. Было обнаружено, что для первого случая качественно остаются два типа неустойчивости: коротковолновый и длинноволновый, обнаруженные относительно постоянного электрического поля [1]. Для случая нормального высокочастотного электрического поля обнаружено наличие неустойчивости типа Тонкса-Френкеля [3], которая изначально была получена для постоянного электрического поля. Такое поведение качественно описывается тем фактом, что при достаточно большой частоте внешнего поля гидродинамика перестает «чувствовать» электрические колебания и возникает монотонный дрейф. Подобную картину можно наблюдать в задачах вибрационной гидродинамики [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (МК-5302.2018.1) и РФФИ (18-58-15004-НЦНИ\_a).

1. Ganchenko G.S. et al. Electrokinetic instability of liquid micro- and nanofilms with a mobile charge // *Physics of Fluids*. 2015. Vol. 27, № 6. P. 062002.

2. Li H., Wong T.N., Nguyen N.T. Electrohydrodynamic and Shear-Stress Interfacial Instability of Two Streaming Viscous Liquid Inside a Microchannel for Tangential Electric Fields // *Micro and Nanosystems*. 2012. Vol. 4. P. 14–24.

3. Френкель Я.И. К теории Тонкса о разрыве поверхности жидкости постоянным электрическим полем в вакууме // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1936. Т. 6. № 4. С. 347–350

4. Юдович В.И. Вибродинамика и виброгеометрия механических систем со связями. Часть II // *Успехи механики*. 2006. Т. 4. № 3. С. 75–129.

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ И КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТА ОКОЛО ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Н.Ю. Ганченко<sup>1</sup>, Д.А. Оксюзьян<sup>2</sup>, М.Ю. Ретина<sup>3</sup>, Е.А. Демехин<sup>4,5</sup>

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

<sup>2</sup>Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

<sup>3</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

<sup>4</sup>Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов, Финансовый университет, Краснодар

<sup>5</sup>НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [nataly.ganchenko@gmail.com](mailto:nataly.ganchenko@gmail.com)

Исследование ионоselectивных поверхностей занимает особое место в микрофлюидике и электрогидродинамике. Подобные поверхности наиболее известны по использованию в процессах водоподготовки, электродиализа и регулирования pH в пищевой промышленности. Однако не менее перспективным является их использование для управления жидкостями в микромасштабах. Это связано с тем, что около таких поверхностей под действием внешнего электрического поля формируется большой заряд, который способствует более эффективному электроосмотическому транспорту жидкости. Сейчас активно проводятся исследования подобных систем. Основным результатом, полученным в этой области, является открытие электроконвективной неустойчивости [1]. С тех пор использование этой модели стало общепринятым, так как описывало большинство наблюдаемых экспериментально процессов. Однако с развитием экспериментальных исследований накапливалось всё больше вопросов, ответ на которые выходил за рамки модели [1], что требовало ее обобщения.

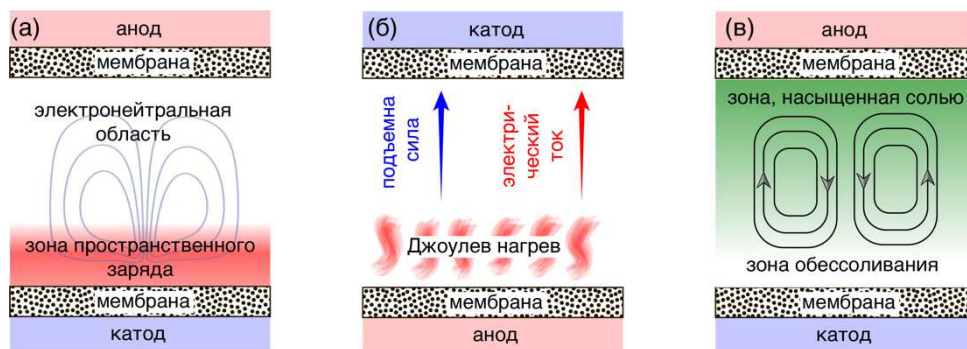


Рис. Схематическое изображение эффектов, учитываемых в модели: (а) электроконвекция, (б) термоэлектроконвекция, (в) концентрационная конвекция.

Данный доклад посвящен изучению влияния гравитационных эффектов на электроконвективную неустойчивость. Наши исследования показали, что учет Джоулева нагрева электролита может не только количественно повлиять на электроконвективную неустойчивость, но и привести к формированию нового типа неустойчивости — термоэлектроконвекции [2]. Дальнейшее обобщение этой модели заключается в учете влияния концентрации соли в электролите на его плотность [3], а также учет термодиффузии (эффект Соре) [4], который в макромасштабах считается второстепенным, но в микромасштабах может существенно повлиять на поведение электролита. Было обнаружено, что учет этих дополнительных эффектов приводит к их конкуренции со сценарием термоэлектроконвекции и, в зависимости от набора параметров, доминирует тот или иной режим.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (18-38-00611-мол\_а, 18-08-01158-а).

1. Rubinstein I., Zaltzman B. Electro-osmotically induced convection at a permselective membrane // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 62. № 2. P. 2238.

2. Kalaydin E.N. et al. Thermo-electrokinetic instability and salt superconcentration near permselective electric membranes // Phys. Rev. Fluids. 2017. Vol. 2. No 11. P. 917–925.

3. Karatay E. et al. Coupling between Buoyancy Forces and Electroconvective Instability near Ion-Selective Surfaces // Physical Review Letters. 2016. Vol. 116. No 19. P. 194501

4. Stout R.F., Khair A.S. Diffuse charge dynamics in ionic thermoelectrochemical systems // Phys. Rev. E. 2017. Vol. 96. No 2. P. 783-788.



## ПРАВИЛО ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ В ЗАДАЧЕ О СНИЖЕНИИ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ ПРИ ПОМОЩИ ЭНЕРГОВКЛАДА В НАБЕГАЮЩИЙ ПОТОК

П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [georgi@imec.msu.ru](mailto:georgi@imec.msu.ru)

Ранее показано (Георгиевский П.Ю., Левин В.А., МЖГ. 2003. (5): 152-165), что снижение волнового сопротивления тел при помощи организованного в локальной области набегающего потока энерговклада в первую очередь обусловлено формированием передних отрывных зон при взаимодействии высокотемпературного следа за областью энерговклада с ударным слоем. В соответствии с (Гувернюк С.В., Савинов К.Г. ДАН. 2007. 413(2): 188-192), форма изобарических отрывных зон определяется поперечным распределением локальных чисел Маха в следе, а давление внутри – полным давлением за прямым скачком в следе (не зависит от толщины следа).

В работе численно исследовано сверхзвуковое обтекание тел при наличии в набегающем потоке областей энерговклада эллипсоидальной формы. Сформулировано правило эквивалентности для снижения волнового сопротивления тел: произведение интенсивности энергоисточника на его продольный размер должно быть пропорционально числу Маха набегающего потока. Физически данное условие означает, что каждая жидкая частица за время движения через область энерговклада получает при разных скоростях набегающего потока примерно одинаковое количество тепла.

Показано, что выполнение правила обеспечивает сохранение отношения мощности энергоисточника к потоку энтальпии через поперечное сечение области энерговклада при изменении размера, удлинения, интенсивности энергоисточника и числа Маха набегающего потока. Кроме того, распределения в поперечном направлении плотности и относительного числа Маха в области дальнего высокотемпературного следа за областью энерговклада почти совпадают (на рисунке слева). При этом при различных числах Маха формируются примерно одинаковые передние отрывные зоны (на рисунке справа) и, соответственно, достигается примерно одинаковое снижение сопротивления. Качественно данный результат легко объяснить, если принять, что распределение давления по поверхности отрывной зоны определяется по известному «закону Ньютона».

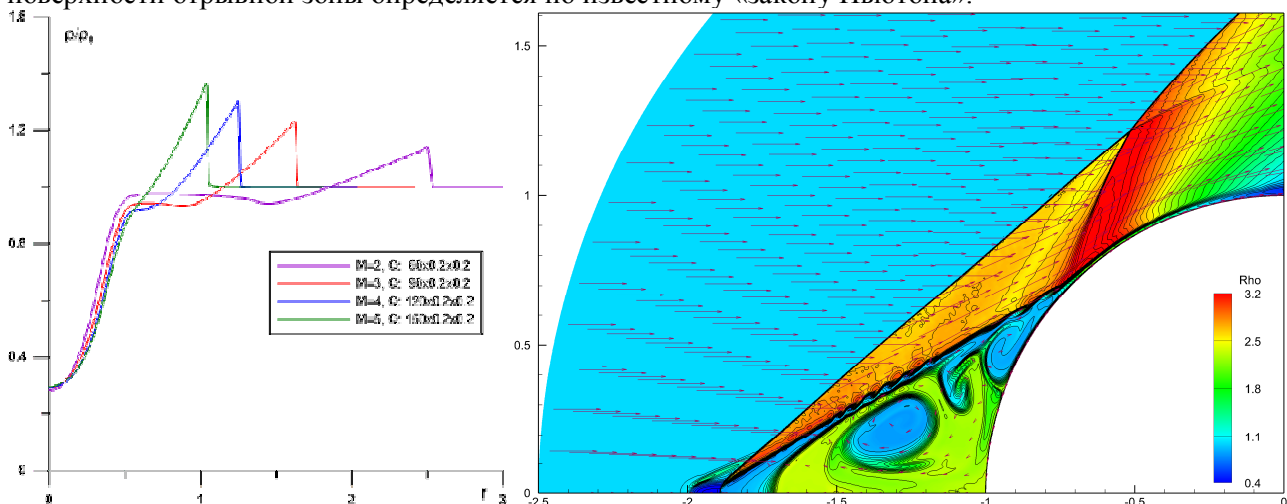


Рис. Распределения плотности поперек следа за областью энерговклада при различных числах Маха, формирование передней отрывной зоны при  $M=3$  (распределение плотности и поле скоростей).

При выполнении правила коэффициент эффективности снижения сопротивления (определяется как отношение сэкономленной и вложенной мощностей) пропорционален числу Маха набегающего потока в квадрате и отношению площадей миделевых сечений тела и области энерговклада. Для обтекания сферы снижение волнового сопротивления составило 35%, а коэффициент эффективности при числе Маха 5 превысил 1000 (при отношении радиусов тела и области энерговклада – 50).

Работа выполнена в соответствии с техническим заданием НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-29-01092, 18-01-00793).

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ

П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail : [sutyurin@imec.msu.ru](mailto:sutyurin@imec.msu.ru)

На основе уравнений Эйлера для равновесной смеси совершенных газов моделируется взаимодействие ударной волны с реагирующим эллипсоидальным пузырем газа в двумерной постановке. Окружающий пузырь воздух моделируется смесью кислорода и азота в соотношении 1 к 4, а пузырь заполнен стехиометрической пропано-кислородной смесью с добавлением азота и ксенона (1, 5, 5 и 15 частей соответственно), так что отношение плотностей смесей составляет 3.1. Рассмотрены различные числа Маха  $M$  падающей волны и отношения длин полуосей пузыря. Для численного моделирования применяется конечно-объемный метод типа С.К. Годунова второго порядка аппроксимации, включающий HLLC-решатель локальных задач о распаде разрыва. Горение пропана моделируется хорошо зарекомендовавшей себя одностадийной кинетикой Вестбука.

Описаны различные режимы воспламенения смеси и показана их существенная зависимость как от интенсивности падающей волны, так и от формы пузыря. При достаточно больших числах Маха падающей волны инициирование горения смеси происходит непосредственно при проникновении ударной волны в пузырь. Для более слабых скачков воспламенение может происходить вблизи трехударной конфигурации (рис. 1, слева), а для еще более слабых – в области фокусировки поперечных скачков (рис. 1, справа). В последнем случае для достижения достаточной для воспламенения интенсивности фокусировки скачков внутри пузыря необходимо существенное вытягивание формы пузыря вдоль направления распространения падающей волны.

Показано, что форма пузыря играет также важную роль, во многих случаях обеспечивая инициирование горения пузыря более слабой волной, или наоборот, отсутствие воспламенения по сравнению со сферическими пузырями.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова при частичной финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ (МК-3012.2019.1).

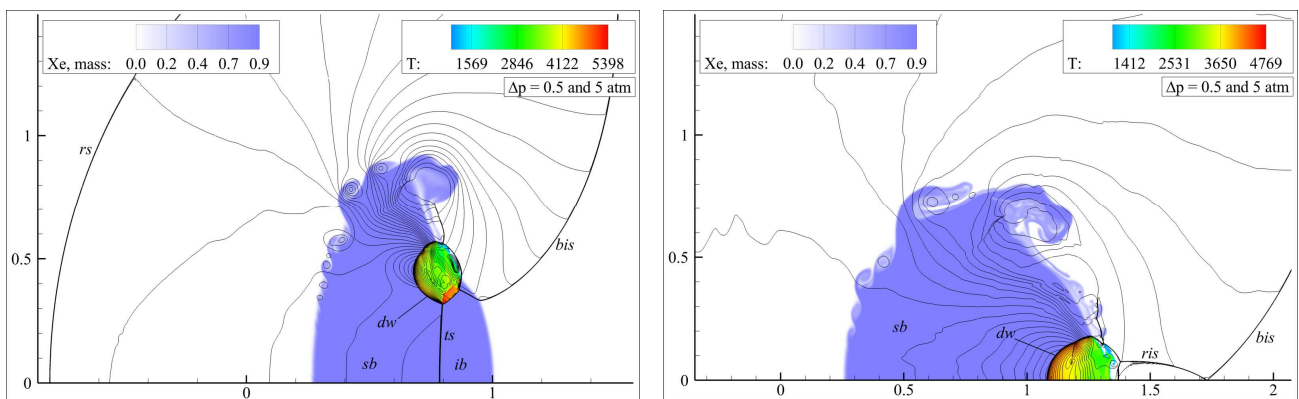


Рис. 1. Воспламенение горючей газовой смеси во время преломления падающей волны (слева,  $M = 2.5$ , круглый пузырь) или фокусировки поперечных скачков (справа,  $M = 2.1$ , вытянутый пузырь), двумерный плоский случай. Изолинии давления, массовая доля ксенона, цветом показана температура (только  $T > 1000K$ ). Нижняя граница рисунков – плоскость симметрии.  $bis$  – выпуклый участок падающей волны,  $ib$  и  $cb$  – исходная и ударно-сжатая части пузыря,  $rs$  – отраженная волна,  $ts$  – волна внутри пузыря,  $dw$  – детонационная волна.

## ДИНАМИКА ФОРМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ И СОПУТСТВУЮЩИХ МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАЗМЫКАНИИ ИЗНАЧАЛЬНО ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

А.П. Глинов, А.П. Головин, П.В. Козлов, К.В. Шалеев  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [krestytroitsk@mail.ru](mailto:krestytroitsk@mail.ru)

Проведены исследования электродугового разряда в воздушной среде атмосферного давления, как между соизмеримыми по размерам электродами, так и на массивных анодах, многократно превышающих по размерам катод. Основной акцент сделан на экспериментальном исследовании вертикальных дуг, инициируемых размыканием электродов [1], путем проведения высокоскоростной (с частотой  $f_{\text{рег}} = 1200 - 12000$  к/с) видеорегистрации разряда и синхронного снятия осциллограмм тока (I) и напряжения (U) дугового столба. Показано, что протекание электрического тока и течений межэлектродной среды существенно зависит от скорости (V) размыкания электродов и размеров и формы анодов (см. рисунок). Изучено влияние этой скорости на критические значения аксиального магнитного поля, с превышением которых возникает винтовая неустойчивость разряда [2].

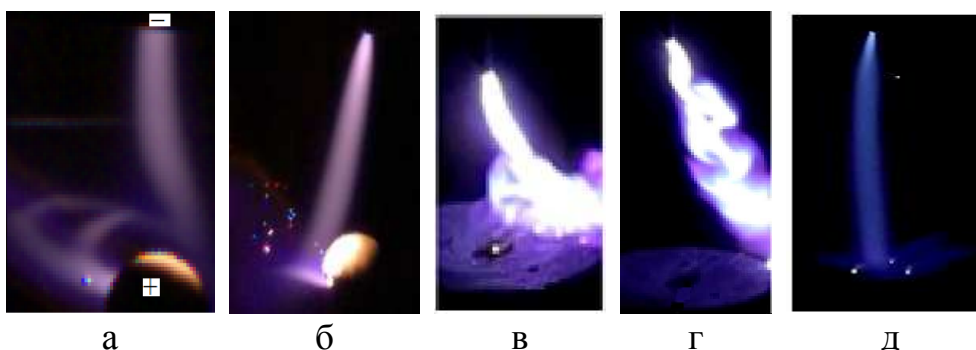


Рис. Видеокадры дугового разряда, инициируемого размыканием предварительно сомкнутых электродов: (а), (б) – один и тот же эксперимент, электроды идентичные графитовые стержни  $\varnothing 15$  мм; (в)-(д) – анод массивный (чаша  $\varnothing 150$  мм глубиной 10 мм), (в, г) – разные кадры одного эксперимента; межэлектродный зазор  $l_{\text{мэ}} \approx 37$  (а,б), 100 (в), 200 (г), 300 мм (д);  $I \approx 300$  (а, б), 600 (в, г), 700 А (д);  $U \approx 70$  (а, б), 200 (в-д); скорость раздвижки примерно постоянна (а, б, д) –  $V \approx 90$  (а, б), 250 (в), 360 (г), 330 мм/с (д).

На массивных анодах изучены протяженные (от 300 мм, см. рис. (д)) квазистационарные дуги и найдены условия их устойчивого горения. В дугах между соизмеримыми стержневыми электродами исследованы квазипериодические по времени режимы изменения формы токового канала вблизи анода, обусловленные взаимодействием катодной и анодной струй и эрозионными струями с поверхности разогретого анода (рис. (а, б)). Теоретическое рассмотрение течений электропроводной сплошной среды в переменном межэлектродном зазоре проводится на основе работ [3, 4] на примере упрощенных модельных задач: электромеханической задачи о стабильности межэлектродного зазора и обобщения задачи [3] с учетом влияния протекающих электрических токов на течения среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: грант № 18-29-21022.

1. Брон О.Б., Сушков Л.К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. Л.: Энергия 1975 г. 212 с.
2. Недоспасов А.В., Хаит В.Д. Основы физики процессов в устройствах с низкотемпературной плазмой. М.: Энергоатомиздат. 1991. 224 с.
3. Петров А.Г. Точное решение уравнений осесимметричного движения вязкой жидкости между параллельными плоскостями при их сближении и раздвижении // Известия РАН МЖГ. 2019. №1. С. 58-67.
4. Жуков М.Ф., Коротеев А.С. Теория термической электродуговой плазмы. Ч. 1,2. Н.: СО Наука. 1987. 576 с.

## РАБОЧИЕ РЕЖИМЫ ДВУХЗВЕННОГО МАЯТНИКА ПРИ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКЕ

*А.П. Голуб*

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [holub.imech@gmail.com](mailto:holub.imech@gmail.com)

Рассматривается система, представляющая собой упруго закреплённый двухзвенный маятник с вертикальной осью вращения в потоке среды. Первое звено маятника – тяжёлый стержень, который может вращаться вокруг неподвижной вертикальной оси, второе звено – тяжёлый стержень с жёстко закреплённой вдоль него лопастью. Второе звено шарнирно соединено с первым. В местах соединений установлены спиральные пружины (подробное описание приводится в [1]). Вся система помещена в поток среды, имеющий постоянную скорость. Для описания аэродинамического воздействия, используется квазистатическая модель [2].

Исследована динамика двухзвенного аэродинамического маятника в упругом закреплении. Изучаются предельные циклы, возникающие в системе при определённых значениях параметров. Проанализирована зависимость их амплитуды от жёсткости пружин.

Показано, что для количественного сравнения с экспериментом, в численном моделировании необходимо вносить точные размеры и массовые характеристики реальной модели маятника. Учет сопротивления элементов конструкции позволяет улучшить количественное соответствие экспериментальных данных и численного моделирования.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 17-08-01366, 18-01-00538).

1. Голуб А.П., Селюцкий Ю.Д. О влиянии жёсткости крепления на динамику двухзвенного аэродинамического маятника // Доклады Академии наук. 2018. Т 481. № 3. С. 254-257
2. Герценштейн С.Я., Досаев М.З., Некрасов И.В., Самсонов В.А. Двухзвенный флюгер в потоке воздуха // МГУ имени М.В. Ломоносова. Задача практикума по механике. 2004.



## СУЩЕСТВОВАНИЕ ЗАДАННОГО ДВИЖЕНИЯ РОБОТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИЛИНДРА В КАЧЕСТВЕ ОПОРЫ

Ю.Ф. Голубев<sup>1</sup>, Е.В. Мелкумова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва

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

e-mail: [elena\\_v\\_m@mail.ru](mailto:elena_v_m@mail.ru)

Исследуется задача об удержании прямого кругового цилиндра пальцами манипулятора [1]. Эта задача актуальна, например, при опрокидывании одного шагающего робота с цилиндрическим корпусом, тогда как другой помогает ему подняться. Каждый из пальцев робота имеет одну точку в контакте с цилиндром. Численно и аналитически получены возможные области расположения точек контакта на цилиндре, для которых существует решение задачи кинестатики при переносе цилиндра тремя пальцами.

Предполагается, что руки, пальцы и ноги робота совершают заданное движение относительно корпуса робота. В случае двух точек опоры модель дополняется введением момента трения вращения в точках контакта. Для трёх точек опоры ограничимся рассмотрением сухого трения. Результаты распространяются на случай скольжения точек опоры с трением Амонтона-Кулона. Уравнения дополняются неравенствами, отвечающими за попадание реакций в конусы трения.

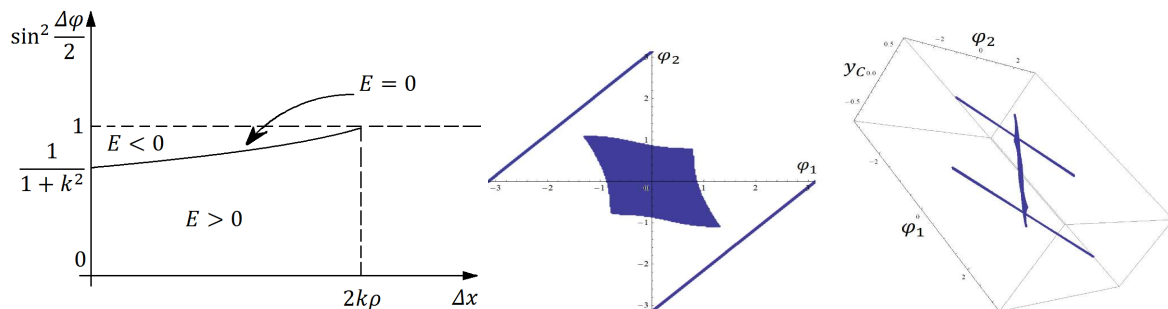


Рис. Области параметров, для которых задача о распределении реакций имеет решение.

Робот может удерживать объект с произвольной поверхностью, например цилиндр, одним пальцем с внутренней или внешней стороны, так, что центр масс поверхности располагается, соответственно под или над точкой контакта. При этом, наклон линии действия силы к нормали не должен превышать угла трения.

Схват может удерживать цилиндр двумя пальцами, расположенными на одном диаметре. И несколькими парами пальцев, расположенных по разные стороны от тонкой поверхности объекта в совпадающих точках.

Робот может удерживать горизонтальный цилиндр тремя пальцами, расположенными на внешней поверхности нижнего горизонтального полуцилиндра. Например, пусть одна из точек опоры и центр масс цилиндра расположены в вертикальной плоскости содержащей ось цилиндра, а две другие точки опоры в плоскости ортогональной оси цилиндра при этом центр масс цилиндра расположен внутри опорного треугольника. Аналогично, если схват держит цилиндр на его внутренней поверхности, то три точки опоры должны быть расположены на верхнем полуцилиндре. Также три точки опоры схвата могут быть расположены в вертикальной плоскости, содержащей ось цилиндра.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-01-00123 А).

1. Голубев Ю.Ф., Мелкумова Е.В. Условия статической устойчивости шагающего аппарата в горизонтальном цилиндре и на двух плоскостях // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 1999. № 2. С. 116–122.

## ПЕРЕНОС ХРУПКОГО ЦИЛИНДРА МАНИПУЛЯТОРОМ С ТРЁХПАЛЬЦЕВЫМ СХВАТОМ

Ю.Ф. Голубев<sup>1</sup>, Е.В. Мелкумова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва

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

e-mail: [elena\\_v\\_m@mail.ru](mailto:elena_v_m@mail.ru)

Исследуется задача об удержании хрупкого цилиндра пальцами манипулятора [1]. Эта задача актуальна, например, при опрокидывании одного шагающего робота с цилиндрическим корпусом, тогда как другой помогает ему подняться. Каждый из пальцев робота имеет одну точку в контакте с цилиндром. Численно и аналитически получены возможные области расположения точек контакта на цилиндре, для которых существует решение задачи кинестатики при переносе цилиндра тремя пальцами.

Предполагается, что руки, пальцы и ноги робота совершают заданное движение относительно корпуса робота. В случае двух точек опоры модель дополняется введением момента трения вращения в точках контакта. Для трёх точек опоры ограничимся рассмотрением сухого трения. Результаты распространяются на случай скольжения точек опоры с трением Амонтона-Кулона. Уравнения дополняются неравенствами, отвечающими за попадание реакций в конусы трения [2]. Хрупкость цилиндра означает ограничение на модуль нормальных составляющих реакций. На рисунке показаны оси, связанные с цилиндром, углы отклонения точек опоры от оси, связанной с цилиндром, угол наклона оси цилиндра к горизонту и случай трёх точек в опоре.

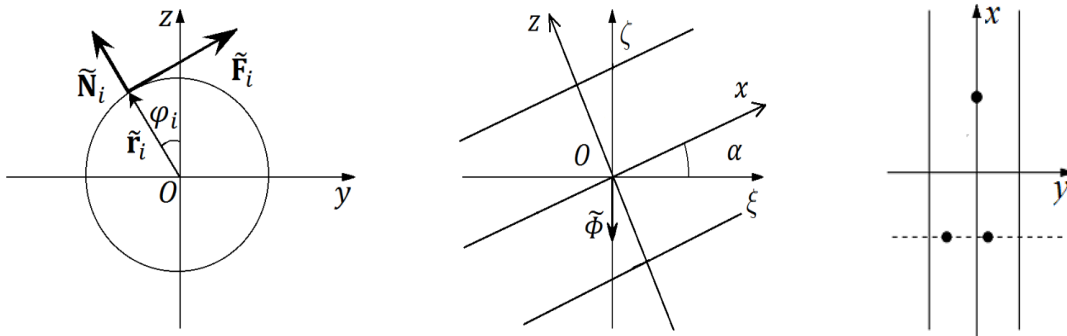


Рис. Хрупкий цилиндр.

Робот может удерживать горизонтальный цилиндр тремя пальцами, расположенными на внешней поверхности нижнего горизонтального полуцилиндра. Например, пусть одна из точек опоры и центр масс цилиндра расположены в вертикальной плоскости содержащей ось цилиндра, а две другие точки опоры в плоскости ортогональной оси цилиндра при этом центр масс цилиндра расположен внутри опорного треугольника. Аналогично, если схват держит цилиндр на его внутренней поверхности, то три точки опоры должны быть расположены на верхнем полуцилиндре. Также три точки опоры схвата могут быть расположены в вертикальной плоскости, содержащей ось цилиндра [3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-01-00123 А).

1. Голубев Ю.Ф. Основы теоретической механики. М.: МГУ, 2019. 728 с.

2. Голубев Ю.Ф., Мелкумова Е.В. Существование заданного движения робота при использовании трубы в качестве опоры. В сборнике VII Всероссийское совещание-семинар заведующих кафедрами и преподавателей теоретической механики, робототехники, мехатроники вузов Российской Федерации. Махачкала, 2016, С. 30-33.

3. Golubev Yu.F., Melkumova E.V. Two-legged Walking Robot Prescribed Motion On a Rough Cylinder // AIP Conference Proceedings, v. 1959, 2018, № 030009, PP. 030009-1-030009-8.

## ПЕРЕНОС ХРУПКОГО ЦИЛИНДРА МАНИПУЛЯТОРОМ С ДВУХПАЛЬЦЕВЫМ СХВАТОМ

Ю.Ф. Голубев<sup>1</sup>, Е.В. Мелкумова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва

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

e-mail: [elena\\_v\\_m@mail.ru](mailto:elena_v_m@mail.ru)

Исследуется задача об удержании хрупкого прямого кругового шероховатого цилиндра пальцами рук робота манипулятора [1]. Эта задача актуальна, например, при опрокидывании одного шагающего робота с цилиндрическим корпусом, тогда как другой помогает ему подняться. Каждый из пальцев имеет одну точку в контакте с цилиндром. Численно и аналитически получены возможные области расположения точек контакта на цилиндре, для которых существует решение задачи кинестатики при переносе цилиндра одним или двумя пальцами. Эта задача имеет аналогии задачам о равновесии многоногого шагающего робота на поверхности объекта цилиндрической формы или робота, опирающегося на произвольную поверхность, точки подвеса ног которого на корпусе расположены на поверхности цилиндра.

Шагающий робот состоит из корпуса, рук с  $m$  пальцами и ног, опирающихся на шероховатый цилиндр с коэффициентом  $k$  сухого трения, в  $n+m$  точках опоры. Предполагается, что руки, пальцы и ноги робота совершают заданное движение относительно корпуса робота. Для того чтобы заданное движение могло быть реализовано, реакции в точках опоры должны удовлетворять уравнениям кинестатики. В случае двух точек опоры модель дополняется введением момента трения вращения в точках контакта. Для трёх точек опоры ограничиваемся рассмотрением сухого трения. Результаты распространяются на случай скольжения точек опоры с трением Амонтона-Кулона. Уравнения кинестатики дополняются неравенствами, отвечающими за попадание реакций в соответствующие конусы трения [2]. Хрупкость цилиндра означает ограничение на модуль нормальных составляющих реакций.

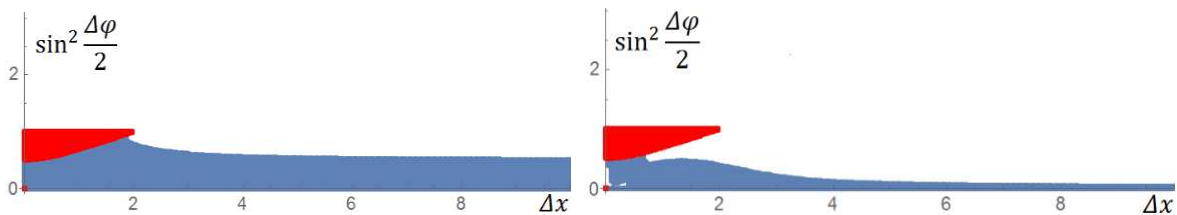


Рис. Симметричные вдоль оси шероховатого цилиндра конфигурации схвата робота.

Робот может удерживать хрупкий объект с произвольной поверхностью, например цилиндр, одним пальцем с внутренней или внешней стороны, так, что центр масс поверхности располагается, соответственно под или над точкой контакта. При этом наклон линии действия, например активной силы  $\mathbf{F}$ , к нормали не должен превышать угла трения. Схват может удерживать хрупкий цилиндр двумя пальцами, расположенными на одном диаметре.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-01-00123 А).

1. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. 312 с.

2. Golubev Yu.F., Melkumova E.V. Two-legged Walking Robot Prescribed Motion On a Rough Cylinder // AIP Conference Proceedings, v. 1959, 2018, № 030009, PP. 030009-1-030009-8.

## ОБ АВТОМОДЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ПЛАВЯЩЕЙСЯ ЧАСТИЦЫ

А.Н. Голубятников<sup>1,2</sup>, О.О. Иванов<sup>1</sup>

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

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

e-mail: [golubiat@mail.ru](mailto:golubiat@mail.ru)

Известно, что на точечный массовый источник мощности  $Q(t) < 0$  в потоке несжимаемой идеальной жидкости, движущейся с относительной скоростью  $v(x, t)$ , действует ускоряющая сила  $F = -Qv$ , по существу связанная с теорией точки переменной массы (схема такого обтекания приведена на Рис.). В работе акад. Л. И. Седова [1] этот эффект был положен в основу эффекта снижения сопротивления тела, движущегося в вязкой жидкости. В рамках модели идеальной теплопроводной жидкости с учётом плавления шара задача была исследована в [2]. В работе [3] было проведено сравнение реактивной силы, действующей на шар, и силы вязкого трения. Обнаружено, что при достаточно большой относительной разности между температурой расплава и температурой плавления (для металлов порядка 1,1 в рамках шкалы Кельвина) преобладает реактивная сила. Случайное поведение плавающей броуновской частицы исследовалось в работе [4]. При этом получено решение стохастического дифференциального уравнения движения шара, вычислены средние квадраты скорости и закона движения, выведено уравнение Фоккера-Планка.

В настоящей работе в рамках автомодельной постановки, не зависящей от начальных данных, дано более детальное решение задачи о движении плавающей сферической частицы в собственном вязком теплопроводном расплаве. Используется линейное приближение Стокса. Вычислена сила, действующая на плавающий шар, которая сводится к учету присоединенной массы, а также силы Стокса и реактивной силы. Особенностью автомодельного линейного режима является вполне определенная скорость плавления шара, зависящая от разности температур и физико-химических свойств твердого тела и его расплава.

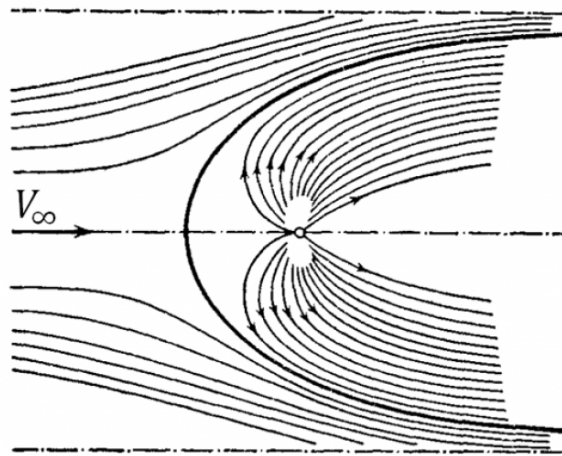


Рис. Схема обтекания источника потоком несжимаемой жидкости.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №17-01-00037.

1. Седов Л.И. Об обтекании идеальной жидкости тела с встречной струей // Доклады АН СССР, 1972. Т. 206. № 1. С. 41 – 42.
2. Голубятников А.Н. О взаимодействии плавающих частиц и моделировании гравитации // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4(3). С. 728–729.
3. Иванов О.О. К движению плавающей частицы // Вестник Московского университета. Сер. 1, Математика, Механика. 2018, №6. С. 74–78.
4. Ivanov O. O., Golubiatnikov A. N. On Brownian motion of melting particle // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Т. 1129. №. 1. С. 012013.

## ДОСТИЖЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТЕЧЕНИЯХ СМЕСИ ГАЗ-ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ

*Н.В. Горохова*

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [GorokhovaNV@imec.msu.ru](mailto:GorokhovaNV@imec.msu.ru)

Вулканические молнии часто наблюдаются при крупных взрывных извержениях. Они возникают в результате электризации частиц пепла при достижении некоторой критической напряжённости электрического поля. Одной из основных причин электризации частиц является их трение и столкновение.

В работе построена модель течения бинарной смеси газа и заряженных частиц с учётом взаимодействия и электризации частиц. Для описания движения частиц используется подход Лагранжа: частицы движутся под действием гидродинамических, электростатических сил и силы тяжести. Предполагается, что движение частиц не влияет на течение несущей среды, поэтому используются известные стационарные решения для различных течений газа. При столкновении частиц друг с другом меняются их заряды и скорости. Для определения скоростей после удара рассматривается модель нецентрального абсолютно упругого удара без учёта трения и вращения частиц. Заряд, передаваемый при ударе, зависит от упругих и электрических свойств материала частиц, их размеров и скоростей.

В исследовании рассматриваются однородный поток газа, поток в виде струи конечной ширины и течение Кельвина – поток с критическими точками. Варьируются количество частиц и параметры их распределения: общая концентрация и доля крупных частиц. Получено, что максимальный накопленный частицами заряд выражается степенной функцией от общей концентрации частиц. Показатель степени 0,23 является константой и не зависит от доли крупных частиц, числа частиц и выбранного течения. Максимальная напряжённость поля, создаваемого заряженными частицами растёт с увеличением числа частиц по степенному закону, показатель степени увеличивается с ростом неоднородности течения. Для всех рассмотренных течений получены оценки количества частиц, при которых напряжённость достигает критических значений самостоятельного разряда или молнии.

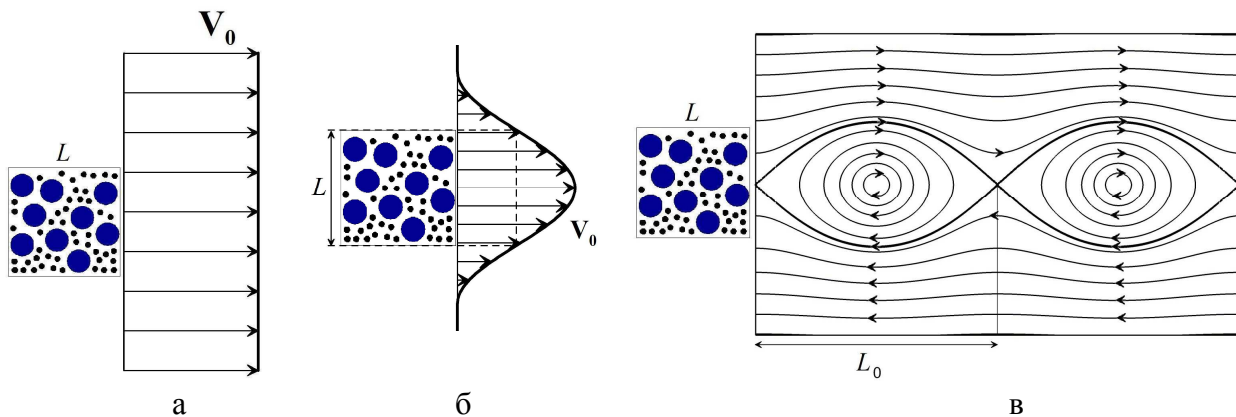


Рис. Рассматриваемые течения смеси:

а – однородный поток, б – поток в виде струи конечной ширины, в – течение Кельвина.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-00028 А.

1. Soo S.L. Dynamics of charged suspensions // International reviews in aerosol physics and chemistry. Vol. 2. Pergamon Press, Oxford. 1971. P. 61–149.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика – Том 7. Теория упругости. М: Наука. 1987.
3. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М: Наука. 1965.
4. Науки о земле, т. 21. Справочник физических констант горных пород. Под ред. С. Кларка. М: Мир. 1969.



## ОБ ОТРЫВНЫХ РЕЖИМАХ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ УДЛИНЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ ПОД УГЛОМ АТАКИ

С.В. Гувернюк<sup>1</sup>, А.Г. Кузьмин<sup>2</sup>, М.М. Симоненко<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>СпбГУ, Санкт-Петербург

e-mail: [sim1950@mail.ru](mailto:sim1950@mail.ru)

Исследования структуры и свойств сверхзвукового обтекания осесимметричных тел представляют интерес в связи с вопросами совершенствования методов проектирования объектов аэрокосмической техники. Экспериментальные и численные исследования сверхзвукового обтекания удлиненного осесимметричного тела с кольцевой ступенькой [1] показали, что при определенных значениях угла атаки и протяженности тела на подветренной стороне перед ступенькой возникает локальная область с аномальным повышением давления до величины, превышающей давление на наветренной стороне этой же ступеньки. Такой характер поведения давления связан с отрывом потока на боковой поверхности тела, сопровождающегося поверхностным оттоком газа от плоскости симметрии в противоположных поперечных направлениях, что приводит к уменьшению толщины пограничного слоя на подветренной стороне поверхности тела. В результате внешний высоконапорный сверхзвуковой поток получает возможность проникать к подветренной поверхности тела и взаимодействовать со ступенькой в условиях, подобных условиям невязкого взаимодействия.

В настоящей работе поставлена задача исследования возможного аналогичного режима сверхзвукового обтекания удлиненного тела под углом атаки без кольцевой ступеньки. Модельное гладкое тело представляет собой круглый цилиндрический корпус с конической головной частью (рис. 1). Диаметр корпуса составляет 30 мм, а длина 260 мм. Угол полураствора конического наконечника равен  $20^\circ$ . Параметры набегающего потока принимались такими же, как в экспериментах [1]. Результирующее течение описывалось уравнениями Рейнольдса с двухпараметрической дифференциальной моделью турбулентности  $k-\omega$  SST. Решения строились методом установления с помощью вычислительной программы ANSYS CFX-15.

Отрыв потока на подветренной стороне тела удобно идентифицировать по смене знака поперечных компонент напряжения трения. На рис. 1 показана подветренная сторона тела в плане при угле атаки  $\alpha = 11.3^\circ$ . Красным цветом визуализированы области положительных, синим – отрицательных значений  $z$ -компоненты напряжения трения. Первичный отрыв потока зарождается на расстоянии 34.0 мм от точки излома образующей тела. Вниз по течению линия отрыва смещается к срединной плоскости симметрии, при этом на подветренной стороне на расстоянии около 121 мм от точки излома образующей тела происходит присоединение оторвавшегося потока, и затем возникает вторичный отрыв. По мере увеличения угла атаки  $\alpha$  указанные первичный и вторичный отрывы смещаются в сторону головной части тела. При этом вблизи подветренной поверхности тела вдоль плоскости симметрии формируется узко локализованный сверхзвуковой поток, полное давление в котором сопоставимо с величиной полного давления в набегающем потоке.



Рис. 1 Области положительных и отрицательных значений  $z$ -компоненты напряжения трения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-01-00242), расчеты проводились на платформе Ресурсного Центра «Вычислительный центр СпбГУ» (<http://cc.spbu.ru>).

1. Simonenko M.M., Guvernyuk S.V., Kuzmin A.G. // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2027. Article ID 030023.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ОКОЛО РЕШЕТОК СТЕРЖНЕЙ

С.В. Гувернюк<sup>1</sup>, Ф.А. Максимов<sup>1,2</sup>

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

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

e-mail: [f\\_a\\_maximov@mail.ru](mailto:f_a_maximov@mail.ru)

Рассматривается задача об обтекании регулярной системы цилиндров, образующих плоскую решетку поперек равномерного сверхзвукового потока вязкого газа.  $D$  – диаметр цилиндров,  $H$  – период решетки,  $M$  – число Маха набегающего потока совершенного газа с отношением теплоемкостей  $\gamma$ ,  $Re$  – число Рейнольдса, вычисленное по диаметру элемента решетки. В [1] при исследовании обтекания решетки конечного размера из 10 цилиндров с периодом  $H=5$  в зависимости от  $M$  обнаружен режим взаимодействия, сопровождающийся возбуждением автоколебаний в ближнем следе и распространением ярко выраженной вихревой дорожки в сверхзвуковой части дальнего следа. При перестройке между качественно различными режимами течения образуются области двузначности решения, а режим течения определяется не только текущим значением числа Маха, но и предысторией установления течения. Фактически в определенных диапазонах параметров решение носит гистерезисный характер.

В настоящей работе представлена оценка области гистерезиса и течения с вихревой дорожкой по результатам расчетов для решеток  $H=4, 5$  и  $6$  ( $\gamma=1.4$ ,  $Re=10^5$ ), выполненных для одного периода бесконечной решетки. Для всех трех вариантов  $H$  обнаружена область по  $M$ , когда образуется вихревая дорожка. На рис. 1а приведены примеры двузначного решения для решетки  $H=6$  при  $M=2.3$  и  $2.6$ . Наблюдается три качественно различных режима течения. Представлено распределение модуля градиента плотности, что позволяет визуализировать ударные волны, контактные разрывы и локализованные вихревые области. Тактика проведения расчетов включала задание в качестве начальных условий мгновенного поля течения, полученного на предыдущем шаге по параметру  $M$ , после чего расчет продолжался до установления стационарного или периодического по времени решения, а затем делался очередной шаг приращения параметра  $M$ . Верхняя картина течения из пары при одном значении  $M$  на рис. 1а получена при увеличении  $M$ , нижняя – при уменьшении  $M$  ( $H=6$ ). На рис. 1б приведен коэффициент сопротивления  $C_x$  элемента решетки при  $H=4, 5$  и  $6$ . Линия со светлыми маркерами, соответствует сценарию с последовательным увеличением  $M$ , линия с темными маркерами – сценарию с уменьшением  $M$ . В соответствии с тремя качественно различными схемами течения реализуются три уровня значений  $C_x$ , переходы между которыми характеризуются интервалами двузначности решения. При  $H=4$  режим течения с вихревой дорожкой образуется только при увеличении  $M$ .

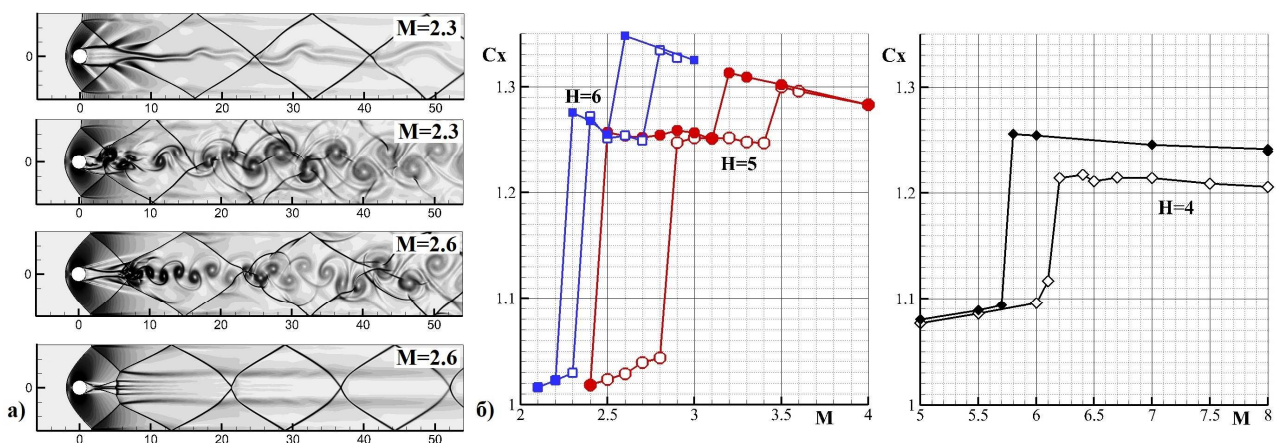


Рис. Режимы течения (а) и коэффициент сопротивления от  $M$  (б).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-01-00242) и частично в рамках государственного задания ИАП РАН.

1. Гувернюк С.В., Максимов Ф.А. Гистерезис по числу Маха при обтекании решетки из цилиндрических стержней. В сб.: Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сб. труд. 8-й Всеросс. научн. конф. с межд. участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. 2019. С. 127-133.

## ДВУМЕРНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОЙ ДИФФУЗИИ ДЛЯ СЛОЯ

С.А. Давыдов<sup>1</sup>, А.В. Земсков<sup>1,2</sup>, Д.В. Тарлаковский<sup>2,1</sup>

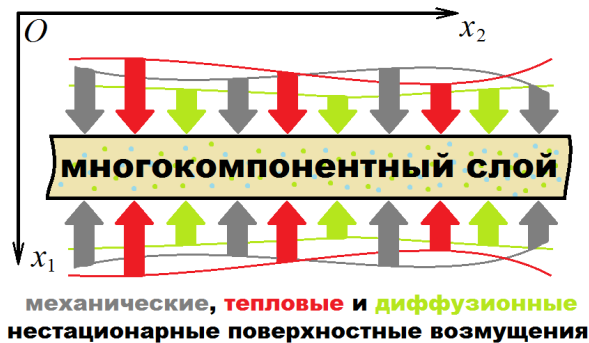
<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

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

e-mail: [xenon\\_93@inbox.ru](mailto:xenon_93@inbox.ru)

Создание новых многокомпонентных материалов для решения современных инженерных задач – актуальное направление разработок в области технологии конструкционных материалов. Не менее важным аспектом является моделирование поведения этих материалов при комбинировании различных факторов внешнего воздействия, таких как механическое, тепловое и диффузионное. Постановка и решение математических нестационарных задач связанной термоупругой диффузии позволяет провести анализ получаемых результатов и рассмотреть большее число вариантов воздействия при минимизации финансовых затрат.

Актуальность направления исследования подтверждается наличием множества работ [1-3] различных научных центров, расположенных по всему миру. Наибольшие как интерес, так и трудность представляют одномерные и двумерные нестационарные связанные задачи термомехано-диффузии. Причём двумерные задачи актуальнее и точнее описывают реальные процессы, так как равномерное распределение внешних воздействий, описываемое одномерными задачами, в природе встречается крайне редко.



В данной работе рассматривается двумерная нестационарная задача термоупругой диффузии для однородного многокомпонентного полупространства. Для описания возмущений среды, распространяющихся с конечной скоростью, используется локально-равновесная модель связанной термоупругой диффузии, включающей уравнения движения упругой среды, теплопереноса и массопереноса. Начальные условия приняты нулевыми.

Решение задачи представляется в виде свёрток функций Грина и граничных условий. Для нахождения функций Грина используются преобразование Лапласа по времени и разложение в ряды Фурье по координатам [3,4]. В результате преобразований задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений, а её решение представляется в виде рациональных дробей относительно параметра преобразования Лапласа. Их оригиналы находятся с помощью известных теорем и таблиц операционного исчисления. Обращение синус-, косинус-преобразований выполняется численно с использованием квадратурных формул Чебышева. Таким образом для этой задачи отпадает необходимость в разработке алгоритмов численного обращения преобразования Лапласа. Такой подход позволяет свести к минимуму использование численных алгоритмов и даёт возможность провести анализ полученных функций Грина.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-31-00437.

1. Князева А.Г. Введение в термодинамику необратимых процессов. Лекции о моделях. Томск: Изд-во «Иван Федоров», 2014.

2. Aouadi M., Lazzari B., Nibbi R. A theory of thermoelasticity with diffusion under Green–Naghdi models // ZAMM J. Appl. Math. Mech. – 2014. – Vol. 94, Is. 10. – P. 837-852.

3. Kumar R., Chawla V. A study of Green's functions for three-dimensional problem in thermoelastic diffusion media. Afr. J. Math. Comput. Sci. Res. – 2014. – Vol. 7(7). – P. 68-78.

4. Davydov S.A., Zemskov A.V. Unsteady one-dimensional perturbations in multicomponent thermoelastic layer with cross-diffusion effect // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1129. – 012009.

5. Вестяк А.В., Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Нестационарная одномерная задача термоупругой диффузии для однородных многокомпонентных сред с плоскими границами // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2018. – Т. 160, Кн. 1. – С. 183-195.



## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРОТЕЗОВ

*Л.А. Дегадникова, А.В. Осинцев*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва  
e-mail: [lidiyadega@gmail.com](mailto:lidiyadega@gmail.com)

Использование когерентно-оптических методов позволяет успешно решать задачи исследования деформирования протезов и костных тканей в ортопедической стоматологии [1-3].

Целью работы являлось исследование деформирования металлокерамических протезов, изготовленных различными способами, а также влияние этапов изготовления на степень деформирования в рамках одного способа изготовления. Данные исследования осуществлялись методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии [1].

В качестве объекта исследования были выбраны три варианта мостовидных протезов, изготовленных по различным технологиям.

Для моделирования зубного ряда нижней челюсти использовался гипсовый слепок. С данного слепка снимались координаты центров зубов для последующего изготовления из алюминиевого сплава Д16Т модели оттисковой ложки на нижнюю челюсть с установленными культиями зубов (рис. 1.). Три варианта мостовидных протезов, изготовленных по разным технологиям, представлены на рис. 2.

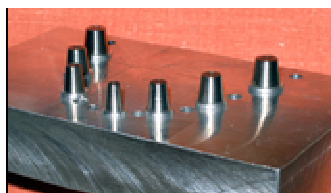


Рис. 1. Модель оттисковой ложки с установленными культиями зубов.

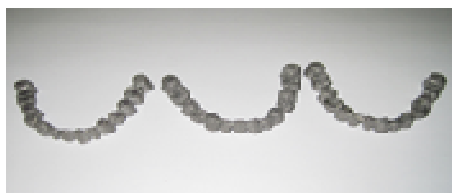


Рис. 2. Модели мостовидных протезов.

Для оценки влияния технологии изготовления мостовидных протезов на степень их деформирования, была изготовлена модель зубного ряда нижней челюсти из пластмассы холодного отверждения, причем расположение опорных зубов точно совпадало с геометрией модели оттисковой ложки нижней челюсти. Использовалась стержневая модель опорных зубов, его корневая часть представляла собой податливую консольнозашемленную балочку, на свободном конце которой имелась модель культи опорного зуба, под мостовидный протез. На рис. 3. показана модель-регистратор нижних опорных зубов с установленным на них мостовидным протезом, а на рис. 4. представлена типичная картина интерференционных полос, характеризующая деформирование мостовидного протеза.



Рис. 3. Модель-регистратор с мостовидным протезом.

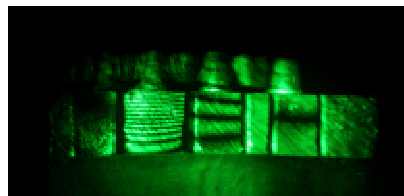


Рис. 4. Картина интерференционных полос характеризующая деформирование протеза.

1. Ostrovsky Y. I., Shchepinov V. P., Yakovlev V. V. // Holographic interferometric deformation measurement methods.- М.: Nauka, 1988.
2. Larkin A.I., Osintsev A.V., et. al. // Laser Physics. 2010. V.20. P.1481-1485.
3. Larkin A.I., Osintsev A.V., et. al. // Computational Vision and Medical Image Processing, Thematic Conference on Computational Vision and Medical Image Processing. Olhao, Algarve, 2012, P.97-100.

## КВАНТОВО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ГИДРОДИНАМИКЕ

Н.В. Дерендяев, Д.Н. Дерендяев

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского  
e-mail: [derendyaevdm@mail.ru](mailto:derendyaevdm@mail.ru)

В работе построено представление Лэкса уравнений баротропных движений идеальной сжимаемой жидкости. На основе этого представления предложена квантово-гидродинамическая аналогия; аналогом квантовомеханического состояния – функции  $\Psi$ , является функция лагранжевых координат частиц жидкости. Далее, по аналогии с квантовой механикой, действие оператора  $\hat{L}$ , входящего в представление Лэкса уравнений гидромеханики, на функцию  $\Psi$ , дает состояние  $\hat{L}\Psi$ , которое также зависит только от лагранжевых координат частиц жидкости и, следовательно, является индивидуальным законом сохранения гидромеханики.

В рамках предложенного подхода построены новые законы сохранения, которые записываются как действие степеней оператора  $\hat{L}$  на некоторый индивидуальный закон сохранения, в который входит коэффициент растяжения вихревой линии.

Кроме индивидуальных законов сохранения квантово-гидродинамическая аналогия позволяет построить серию интегральных законов сохранения, которые записываются в виде квантово-механических средних от оператора  $\hat{L}$ , т.е. в виде

$$\int \Psi^* \hat{L}^n \Psi \rho d^3 \vec{r} = const, n = 1, 2, \dots,$$

где  $\Psi$  – функция лагранжевых координат частиц жидкости,  $\hat{L} = -i(\frac{rot \vec{v}}{\rho}, \nabla)$ ,  $\vec{v}$  – поле скоростей жидкости,  $\rho$  – распределение ее плотности.

1. N. V. Derendyaev. Quantum – Hydrodynamics Analogy// Doklady Physics. Vol. 59, №7, 2014. pp. 318-320.

## НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ГИДРОДИНАМИКЕ СКОРОСТНЫХ НАДВОДНЫХ СИСТЕМ

*В.А. Ерошин, А.В. Бойко*  
НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: mailband@mail.ru

Идея качения по воде на колесах вот уже почти полторы сотни лет бродит в умах изобретателей, мечтателей и любителей острых ощущений (Рис.1). Многочисленные случаи качения по воде на багги, снегоходах и мотоциклах заставляют нас вернуться к изучению этого вопроса, а возможно, и подумать о его практическом использовании.

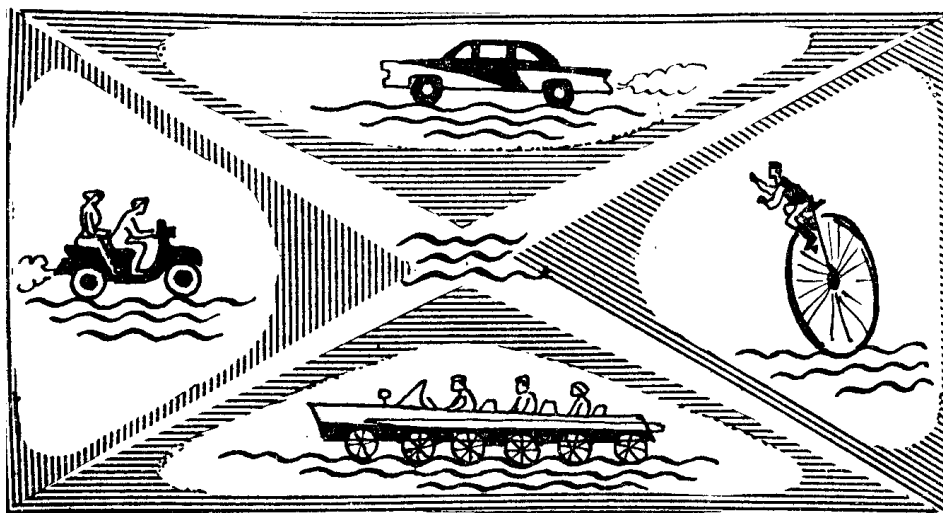


Рис.1

Суда на колесах обладают рядом преимуществ. Прежде всего, это высокая скорость качения по воде. Скорость глиссеров и судов на подводных крыльях составляет примерно 60-70 км/час, судов на воздушной подушке – 100-110 км/ч. А на колесах по спокойной воде можно катиться со скоростью 100-200 км/час и, возможно, быстрее (правда при малых скоростях они будут двигаться как водоизмещающие суда, но это отдельный вопрос выхода на «скоростной режим»). Такие суда будут востребованы при чрезвычайных ситуациях (например, наводнениях), при проведении розыскных и спасательных работ, а также при оказании скорой и неотложной медицинской помощи в отдаленных районах страны. Таким образом имеются многочисленные случаи качения по воде на колесах, а общей теории этого вопроса пока нет, хотя первые шаги были сделаны еще в 1965 г. [1]. В докладе рассматривается качение тел по спокойной поверхности воды. Описаны условия качения колесных систем с грунтозацепами, проведено моделирование этого явления, получены зависимости осадки и несущей способности колес от числа Фруда для ряда значений безразмерной массы системы, а также дана оценка положения границы области устойчивого качения [2].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-08-00807.

1. Егоров И.Т. Гидродинамические особенности процесса качения тел по поверхности воды. // Докл. XV научно-техн.конф. по теории корабля и гидромех.судна. Апрель 1965. Крыловские чтения. Вып.64. с.170-176.

2. Ерошин В.А., Бойко А.В., Прокофьев В.В. Гидродинамика качения тел по свободной поверхности воды. Изд-во НИИ Механики МГУ. Отчет № 5421. 2018. 42 с.

## ИСТЕЧЕНИЕ ИДЕАЛЬНОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ НАСАДКИ

А.Х. Закиров

Ташкентский Архитектурно-строительный институт, Ташкент  
e-mail: [asqar\\_z@mail.ru](mailto:asqar_z@mail.ru)

Актуальность теоретического исследования истечения жидкости из сосудов при отсутствии внешних сил и вихрей вызвана практическим приложением, где основными вопросами являются определение скорости истечения, формы струи и коэффициента истечения. Методами теории аналитических функций исследованы широкий круг задач гидродинамики [1]. В работе [2] показана возможность применения этой теории к струйным течениям идеальной сжимаемой жидкости.

Решение задач гидродинамики в случае осесимметричных задач о стационарных потенциальных течениях, когда отсутствуют внешние силы, а процесс политропический, сводится к решению систем квазилинейных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial(\rho ru)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho rv)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial v}{\partial x} = 0,$$

где  $u, v$  – проекции скорости.

Рассматривается установившееся течение идеальной сжимаемой жидкости из конической насадки, присоединенной к отверстию. Течение осесимметричное, потенциальное, процесс баротропный, а внешние и поверхностные силы отсутствуют. Струя сжимаемой жидкости, выходящая из насадки, образует свободную поверхность с неизвестной границей.

Введем систему координат  $z = x + ir$  с началом в точке  $O$ , ось  $x$  направим по оси симметрии течения. В силу осевой симметрии, достаточно изучить течение в произвольно выбранной меридиональной полуплоскости. Комплексный потенциал описывает некоторый плоский потенциальный поток идеальной жидкости и представляет собой полосу шириной  $\frac{q}{2\pi}$ . Конформное отображение области комплексного потенциала на верхнюю полуплоскость  $\zeta = \xi + i\eta$  осуществляется аналитической функцией [2].

Используем метод Н.Е. Жуковского, для этого введем в рассмотрение аналитическую функцию

$$\omega = \ln \frac{V_0}{V} = \ln \frac{V_0}{V} + i\theta,$$

где  $V_0$  – модуль скорости на свободной поверхности,  $\theta$  – угол наклона скорости.

Функции  $\omega$  и  $W$  выражаются через параметрическую переменную  $\zeta$ , изменяющуюся в верхней полуплоскости, и вместо функции  $z(\zeta)$  можно искать функции Жуковского. Используем интегральную формулу Шварца для верхней полуплоскости, позволяющую определить аналитическую функцию  $\omega(\zeta)$  и сопряженную комплексную скорость  $\bar{V}$  [3].

Используем приближенного метода расчета решения осесимметричных струйных задач для идеальной жидкости и газа [2]. Связь между физической плоскостью и плоскостью годографа устанавливает формула:

$$dW = d\varphi + i \frac{d\psi}{\bar{p}} = \bar{p} \bar{V} (dx + idr), \quad \text{где } \bar{p} = r \frac{\rho}{\rho_1}.$$

Находим граничные значения функции отображения меридиального сечения областей ( $\zeta$ ) на области течения.

Теперь остается найти функцию отображения  $z(\zeta)$  меридиальной плоскости области течения на верхнюю полуплоскость ( $\zeta$ ). Для этого находим распределение скоростей на каждом отрезке границы верхней полуплоскости и, получим значения функции  $z(\zeta)$  на действительной оси ( $\zeta$ ). Интегрируя полученные выражения, находим уравнение свободной поверхности.

1. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука, 1979.

2. Хамидов А.А. Плоские и осесимметричные задачи о струйном течении идеальной сжимаемой жидкости. / Издательство «Фан», Ташкент, 1978.

3. Закиров А.Х. Задача об истечении жидкости из цилиндрической насадки // Совместный выпуск журналов «Вычислительные технологии» Института Вычислительных технологий СО РАН и «Вестник» Восточно-Казахстанского Технического университета, Алматы, 2013.

## УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВОБОДНОВИСЯЩИХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ЗОН В СВЕРХЗВУКОВЫХ НЕРАВНОМЕРНЫХ ИЗОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКАХ

*В.И. Запругаев<sup>1</sup>, Н.П. Киселев<sup>1</sup>, А.В. Савин<sup>2</sup>, П.Г. Смирнов<sup>2</sup>, Е.И. Соколов<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики Сибирского отделения РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Балтийский государственный технический университет ВОЕНМЕХ им Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Санкт – Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

e-mail: [falcon\\_falcon@list.ru](mailto:falcon_falcon@list.ru)

Приведены результаты теоретического исследования возможности формирования свободновисящих циркуляционных зон (СЦЗ) в сверхзвуковых неравномерных изоэнергетических потоках – осесимметричных струях, истекающих в затопленное пространство на режимах недорасширения в сопле. Это приводит к формированию в струе диска Маха (ДМ) – сильного скачка, ортогонального оси недорасширенной струи. Приосевое решение для функции тока в гиперзвуковом приближении [1] позволяет описать влияние параметров потока перед ДМ на возможность возникновения СЦЗ. Показано, что для реализации СЦЗ в ускоряющихся сверхзвуковых потоках необходим достаточно сильный энтропийный след перед скачком уплотнения. Обзор работ по теме [2] показывает, что создание энтропийного следа возможно путём внедрения конструктивных элементов в сверхзвуковой поток (дополнительных низконапорных струй [3], центральных тел [4], игл и т.п.). Проведенный авторами вычислительный эксперимент показал, что существует возможность создания достаточно интенсивного энтропийного следа и образования СЦЗ в ускоряющемся сверхзвуковом потоке без внедрения каких – либо конструктивных элементов. Это достигается путём формирования т. н. сопловых скачков (рис. 1а), за счет взаимодействия которых и формируется распределение полного давления перед ДМ, приводящее к формированию СЦЗ (рис. 1б). Предложено и обосновано замыкающее условие постоянства статического давления в СЦЗ, во всех рассмотренных случаях соответствующее реализации СЦЗ за ДМ сильно недорасширенных струй.

Кроме того, в докладе приводятся результаты физического эксперимента, в котором проводилось исследование недорасширенной струи воздуха, истекающей из сопла, изображенного на рис. 1а. Сравнение результатов физического и вычислительного эксперимента позволяет сделать выводы о справедливости разработанной ранее математической модели формирования СЦЗ.

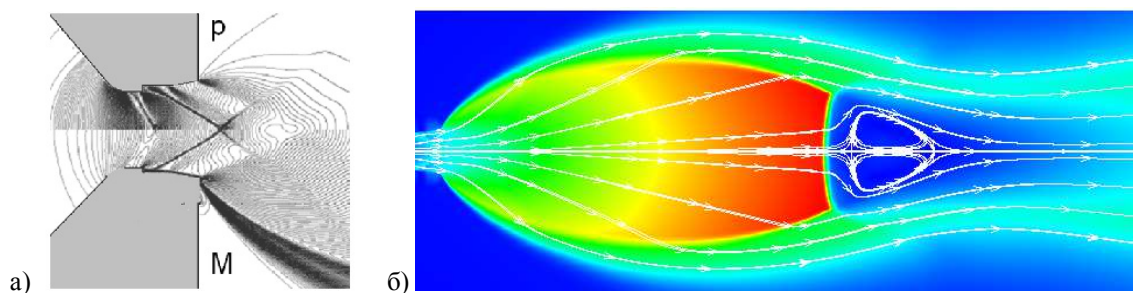


Рис. 1.

1. Соколов Е.И. Течение в ударном слое перед преградой, перпендикулярной оси сверхзвуковой недорасширенной струи // Изв. АН. СССР. МЖГ. 1977. №4. С. 51-58

2. Савин, А.В., Соколов, Е.И. Анализ условий формирования свободновисящих циркуляционных зон в сверхзвуковых недорасширенных струях // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ 2016), 25 – 31 мая 2016г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2016. С. 189-191

3. Глотов Г.Ф. Локальные дозвуковые зоны в сверхзвуковых струйных течениях // Изв. РАН. МЖГ. 1998. № 1. С. 143-150

4. Савин А.В., Соколов Е.И., Федосенко Н.Б. Циркуляционные зоны в сверхзвуковой недорасширенной струе, истекающей из сопла с цилиндрическим центральным телом конечной длины // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 1. С. 41-48.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТОМЕХАНОДИФФУЗИЯ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ПЬЕЗОМАГНИТНЫХ СРЕДАХ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Н.А. Зверев<sup>1</sup>, А.В. Земсков<sup>1,2</sup>

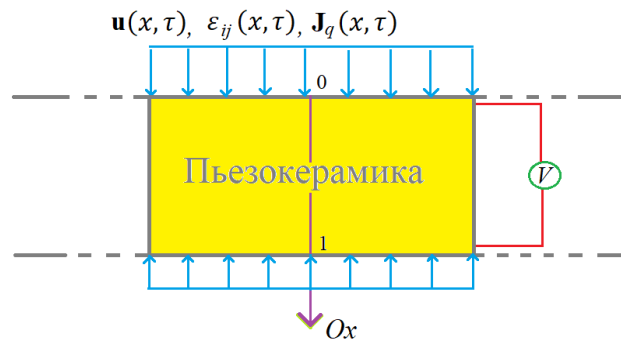
<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

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

e-mail: [nikolayzverev1995@gmail.com](mailto:nikolayzverev1995@gmail.com)

Рассматривается одномерная нестационарная задача, состоящая в определении напряженно-деформированного состояния тонкого однородного многокомпонентного пьезоэлектрического слоя, являющегося сплошной деформируемой средой и находящегося под действием равномерно распределенных по всей его границе поверхностных возмущений, которыми являются механические перемещения, напряженность электрического поля, а также диффузионный поток. При рассмотрении переноса вещества учитываются релаксационные эффекты, которые характеризуются конечными скоростями распространения диффузионных возмущений.

Математическая постановка задачи включает в себя линейные дифференциальные уравнения движения и массопереноса, а также линеаризованные уравнения Максвелла [1-4]. Замыкают постановку начально-краевые условия. Задача решается в прямоугольной декартовой системе координат.



$\mathbf{u}(x, \tau)$  - вектор механических перемещений;  $\mathbf{J}_q(x, \tau)$  - диффузионные потоки внутри слоя;  
 $\varepsilon_{ij}(x, \tau)$  - компоненты тензора деформаций.

Рис. Иллюстрация к постановке задачи.

В рассмотренной задаче предполагается, что обратные пьезоэлектрический, пьезомагнитный и диффузионно-электрический эффекты слабо выражены, благодаря чему удастся задачу механо-диффузии решить отдельно от задачи электромагнетизма. Для решения последней задачи используется метод функций Грина, для нахождения которых применяется интегральное преобразование Лапласа по времени и разложение в тригонометрические ряды Фурье по синусам и по косинусам. Оригиналы функций влияния находятся аналитически с помощью таблиц операционного исчисления и вычетов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №17-08-00663).

1. Tarlakovskii D.V., Vestyak V.A., Zemskov A.V. Dynamic Processes in Thermoellectromagnetoelastic and Thermoelastodiffusive Media // Encyclopedia of thermal stress, volume 2, C-D, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, Springer reference. 2014. – pp. 1064 – 1071.

2. Zverev N.A., Zemskov A.V., Tarlakovskii D.V. One-dimensional problem of piezoelectric electromagnetic diffusion for a layer // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – No 1129. – 012040.

3. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Постановка одномерной задачи термоэлектромагнитоупругой диффузии // Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. - М.: ООО «ТРП», 2018. – с. 157-163.

4. Бардзокас Д.И., Зобнин А.И., Сеник Н.А., Фильштинский М.Л. Математическое моделирование в задачах механики связанных полей. Т.1: Введение в теорию пьезоэлектричества. – М.: КомКнига. – 2005. – 312 с.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ КАНАЛА ЗА ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ИОНИЗАЦИИ ПЛАЗМЕННЫМ ЛИСТОМ

И.А. Знаменская, И.В. Мурсенкова, Ю. Ляо, А.Ю. Кузнецов, Н.Н. Сысоев  
Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [murs\\_i@physics.msu.ru](mailto:murs_i@physics.msu.ru)

Исследование процессов, происходящих при быстром локальном выделении энергии, является фундаментальной проблемой газовой динамики и имеет прикладное значение при разработке методов управления высокоскоростными течениями [1, 2]. Энерговклад в пристеночную область течения газа, реализованный при помощи поверхностных разрядов (плазменных актуаторов), может использоваться для воздействия на область ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое, на положение зон отрыва и скачков уплотнения вблизи обтекаемой поверхности. Поверхностный скользящий разряд наносекундной длительности (плазменный лист), образующий плазменный слой толщиной  $\sim 0.5$  мм [3], обеспечивает значительный удельный энерговклад в среду, позволяя воздействовать на газодинамические течения. В области протекания тока разряда происходит быстрое изменение состояния газа, в том числе быстрый нагрев, что приводит к образованию и движению газодинамических разрывов [3,4]. Экспериментальная реализация импульсного высокопоточного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых неоднородных потоках предполагает получение новых данных о характеристиках разряда для анализа его воздействия на пограничный слой и о динамике движения разрывов после разряда.

Исследовались режимы развития разряда в неоднородных сверхзвуковых потоках в ударной трубе с разрядной камерой (канал прямоугольного сечения  $24 \times 48$  мм<sup>2</sup>). Эксперименты проводились в потоках воздуха за плоскими ударными волнами с числами Маха 2.4-3.5 (числа Маха потока 1.16-1.47, плотность 0.02-0.20 кг/м<sup>3</sup>). Тонкий диэлектрический клин длиной 49 мм, высотой 24 мм с углом  $9^\circ$  располагался в разрядной камере под нулевым углом атаки к набегающему потоку внутри разрядной области протяженностью 100 мм (рис. 1). После дифракции плоской ударной волны на клине формируется вихревая зона пониженной плотности за его донной частью. Скользящие разряды инициировались на верхней и нижней стенках разрядной камеры на разных стадиях течения в интервале 100-800 мкс после дифракции. Длительность тока разряда составляла  $\sim 300$  нс.



Рис. 1 Схема течения около клина.

Проанализированы пространственное распределение и спектральный состав излучения, ток разряда в потоках. Показано, что в неоднородном пограничном слое потока с вихревой зоной поверхностный разряд развивается в виде канала шириной 1-3 мм, расположенного в области пониженной плотности за клином (рис. 1). Из этой области распространяется взрывная волна, интенсивность которой зависит геометрии и величины локального поверхностного энерговклада. Исследована динамика ударных волн при различных условиях инициирования разряда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-08-00661.

1. Георгиевский П.Ю., Левин В.А. Режимы сверхзвукового обтекания тел в условиях энерговклада различной геометрической конфигурации в набегающий поток. // ТВТ. 2010. Т. 48, № 1 (доп.). С. 77.
2. Benard N., Moreau E. Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control. // Exp. Fluids, 2014. V. 55. 1846.
3. Mursenkova I.V., Znamenskaya I.A. and Lutsky A.E. Influence of shock waves from plasma actuators on transonic and supersonic airflow // J. Phys. D: Appl. Phys., 2018. V. 51. No 10. 105201.
4. Мурсенкова И.В., Ляо Ю., Иванов И.Э., Сысоев Н.Н. Характеристики наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха, обтекающем тонкий клин. // Вестник МГУ, Сер. 3. Физика. Астрономия, 2019. № 3 (в печати).



## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СТРУКТУРЫ УДАРНОГО СЛОЯ ОКОЛО РОМБОВИДНОГО КРЫЛА С КОНИЧЕСКИМ СОПРЯЖЕНИЕМ КОНСОЛЕЙ ПРИ ЕГО НЕСИММЕТРИЧНОМ ОБТЕКАНИИ

М.А. Зубин, Ф.А. Максимов, Н.А. Остапенко  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова  
e-mail: [ostap@imec.msu.ru](mailto:ostap@imec.msu.ru)

Представлены результаты численного исследования структуры течения в ударном слое около ромбовидного крыла со скруглением поперечного контура в окрестности плоскости симметрии при обтекании со скольжением на режимах со сверхзвуковыми передними кромками. Для устранения излома поверхности крыла по центральной хорде использован круговой конус с полукругом раскрытия  $\delta$ , вписанный между плоскими консолями крыла. Расчеты обтекания ромбовидного крыла проводились в рамках теории идеального газа при числах Маха невозмущенного потока  $M=3$  и  $6$  с углами раскрытия  $\gamma=240^\circ$  и при вершине консолей  $\beta=45^\circ$ .

В [1] было обнаружено, что при обтекании со скольжением V-образного крыла с углом раскрытия, большим  $\pi$ , когда реализуются режимы с дозвуковым течением на сфере в окрестности центральной хорды, наблюдается срыв потока с наветренной консоли и образование вихря на подветренной консоли. В [2] с применением различных экспериментальных методов было подтверждено существование таких режимов.

Для крыла с плавным сопряжением его консолей структура течения в окрестности плоскости симметрии качественно отличается от структуры течения при  $\delta=0$ . В окрестности скругления поперечного контура крыла реализуется разгон потока до сверхзвуковых скоростей на сфере с образованием ударной волны, нормально падающей на подветренную консоль перед системой критических точек вниз по течению. Результаты расчетов для  $M=3$  и  $6$ ,  $\alpha=4, 10^\circ, 9=10, 12.5, 15$  и  $17.5^\circ$  и различных значений  $\delta$  показали, что за падающей ударной волной на подветренной консоли крыла реализуются различные структуры, содержащие особенности течения, располагающиеся от плоскости симметрии вниз по течению. Среди них: I - вихревая особенность Ферри над точкой стекания седлового типа, точка растекания и узел линий тока; II - узел, точка растекания и узел линий тока; III - узел линий тока; IV – только одна вихревая особенность Ферри над точкой стекания седлового типа. Показано, что для течений со структурами, в которых отсутствует точка растекания на подветренной консоли, существуют такие значения  $\delta$ , при которых интенсивность падающей ударной волны на подветренную консоль не достаточна для образования отрыва турбулентного пограничного слоя в реальном течении. Таким образом, введение конического сопряжения консолей является эффективным средством управления структурой течения на подветренной консоли, ликвидирующим условия, порождающие линию присоединения с интенсивным растеканием потока, в окрестности которой в реальном течении могут реализоваться высокие тепловые потоки.

Показано, что при обтекании ромбовидного крыла со скругленным поперечным контуром, когда отсутствуют точки ветвления как на головной ударной волне, так и на скачке уплотнения, падающем на подветренную консоль, существование вихревых особенностей Ферри, определяется также двумя критериями, как и в конических течениях с ударными волнами, содержащими точки ветвления [3]. Первый - это величина максимальной производной распределения энтропийной функции  $S'_h$  по нормали  $h$  к поверхности крыла в градиентном потоке за ударной волной, образующейся перед вихревой структурой. Вторым критерием по-прежнему [3] является необходимый уровень величины числа  $Mn$  скорости, нормальной к скачку уплотнения (в данном случае в точке ударной волны, соответствующей  $\max S'_h$ ).

Установлено, что максимальная производная энтропийной функции  $\max S'_h$  является монотонной функцией угла  $\delta$  и убывает с ростом  $\delta$ , что позволяет принять ее в качестве параметра, характеризующего интенсивность эквивалентного контактного разрыва.

Продемонстрировано, что концепция, опирающаяся на предложенные новые два критерия, позволяет объяснить эволюцию всех наблюдаемых в расчетах структур течения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект №18-01-00182).

1. Максимов Ф.А., Остапенко Н.А. // Докл. РАН. 2016. Т. 469. № 6. С. 680-685.
2. Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А. // Докл. РАН. 2017. Т. 477. № 4. С. 410-414.
3. Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А. // Докл. РАН. 2014. Т. 434, № 3, С. 282-288.

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ГОМОГЕННОГО ГОРЕНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*В.Н. Зудов, П.К. Третьяков, А.В. Тупикин*

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск  
e-mail: [zudov@itam.nsc.ru](mailto:zudov@itam.nsc.ru)

Приведены результаты экспериментального исследования воздействия сфокусированного импульсно-периодического излучения  $\text{CO}_2$ -лазера на газодинамическую структуру в сверхзвуковой струе. Излучение  $\text{CO}_2$ -лазера распространялось поперек потока и фокусировалось линзой на оси сверхзвуковой струи. Для регистрации структуры течения применялась теневая схема со щелью и плоским ножом, расположенным вдоль потока. Изображение фиксировалась скоростной камерой со временем экспозиции 1.5 мкс и частотой кадров 1000 1/с. Экспериментально исследован процесс взаимодействия плазмы, созданной оптическим разрядом, с прямым скачком уплотнения и наклонной ударной волной в сверхзвуковой струе. Разработана и апробирована методика оптических измерений для регистрации структуры течения при взаимодействии сверхзвукового потока с импульсно-периодическим тепловым источником.

В потоке визуализирована инициированная импульсно-периодическим лазером плазма для того, чтобы выявить и определить период плазменного развития, а также движение начального фронта ударной волны. Показано, что при поперечном вводе лазерного излучения в поток образуется периодическая структура теплового следа, с формированием нестационарной ударной волны от зоны энерговыделения. При малых частотах следования импульсов лазерного излучения взаимодействие теплового пятна с потоком происходит в импульсном режиме. Показано, что только при малых дозвуковых скоростях потока и в неподвижной атмосфере образуются эллиптические нестационарные ударные волны. Экспериментально показан процесс нестационарного воспламенения оптическим разрядом метано-воздушной смеси при дозвуковом истечении в неподвижную атмосферу. На Рис. показан во времени процесс воспламенения метановоздушной смеси в дозвуковом потоке. На Рис.а представлен начальный этап формирования эллиптической ударной волны вокруг плазмоида. Видно, что ударная волна еще не имеет эллиптическую форму, а только повторяет форму плазмоида. С увеличением времени ударная волна имеет правильную эллиптическую форму, которая через некоторое время становится сферической (Рис.). Результаты оптической визуализации свидетельствуют о горения в следе за областью оптического разряда, Рис.б.

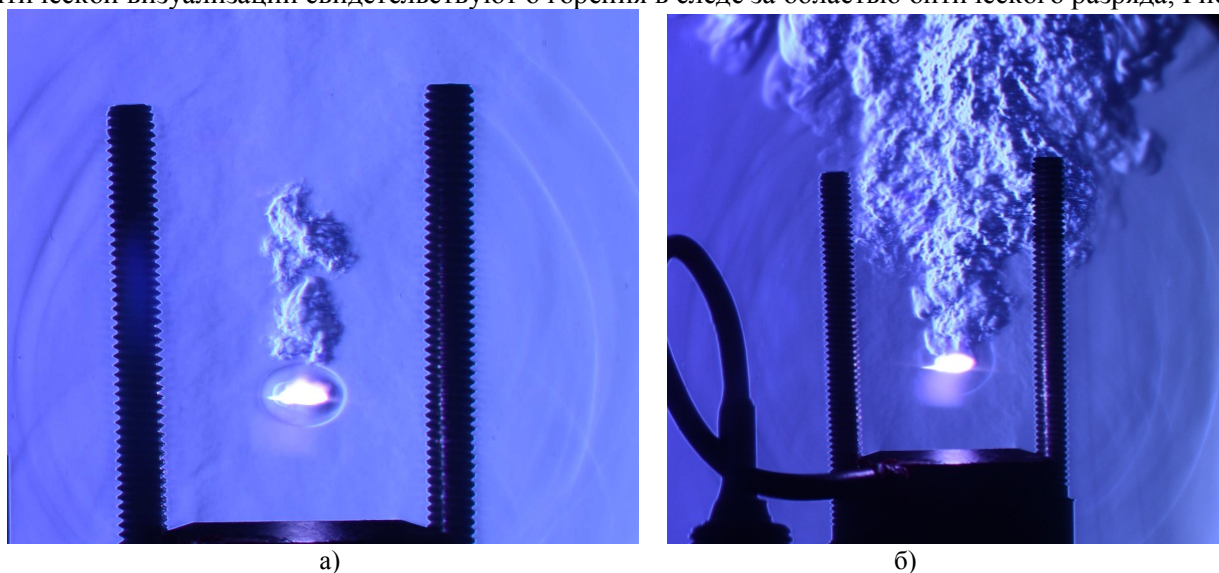


Рис. Инициирование воспламенения метана в дозвуковом потоке.

Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 19-08-00304.

1. Зудов В.Н., Третьяков П.К. Взаимодействие оптического разряда с ударной волной // Журнал технической физики. Год 2018. Т 88. Вып. 3. С. 350–357.

## ПРЕОДОЛЕНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

Я.В. Калинин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

<sup>2</sup>Университет Иннополис, Иннополис

e-mail: [jkv83@mail.ru](mailto:jkv83@mail.ru)

Рассматриваются и исследуются способы управления движением шагающего робота с ортогональными движителями при преодолении препятствий. Мобильные роботы с шагающими движителями обладают главным достоинством: возможностью бесконтактного преодоления препятствий [1-4]. В 70-80-е годы прошлого столетия профессором Н.В. Умновым [1] был предложен вид траектории переноса шагающего движителя в абсолютном движении (Рис.). Такой вид предложенной траектории объяснялся необходимостью организовывать взаимодействие стоп движителей с опорной поверхностью без проскальзывания по ней независимо от ее профиля. Но при наличии информации о профиле опорной поверхности (от развитой информационно-измерительной системы робота) и на основе выбираемых показателей качества движения, например, минимума тепловых потерь в приводных двигателях, минимума среднеквадратического ускорения стопы, минимума пройденного пути и др., можно изменять законы движения стопы. По сочетаниям показателей могут быть определены границы парето-оптимальных режимов движения для комплексного показателя качества. Сформулирована задача согласованного управления приводами горизонтального и вертикального перемещения для реализации режима движения, обеспечивающего оптимальность по заданному критерию.

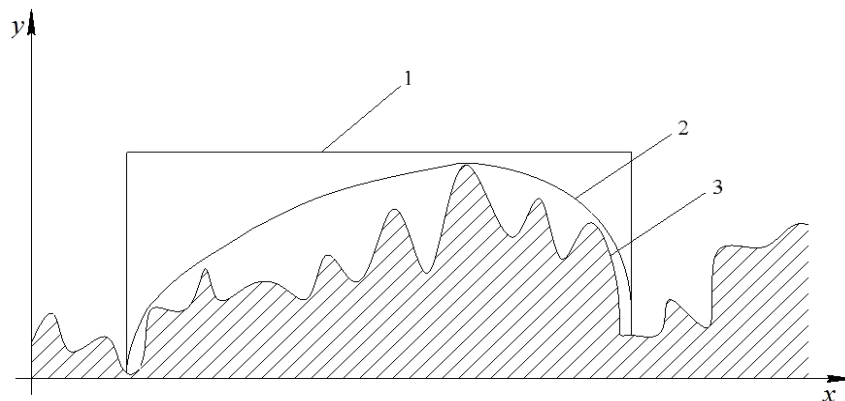


Рис. Траектория переноса стопы движителя: 1 – абсолютная траектория по Н.В. Умнову; 2 – возможная траектория; 3 – профиль опорной поверхности.

Сформулирован интегральный показатель, характеризующий качество законов переноса стопы ортогонального движителя в горизонтальном и вертикальном движениях с точки зрения минимума тепловых потерь в приводных двигателях. Приводится методика решения поставленной задачи и результаты моделирования, которые показывают наличие управлений, обеспечивающих значительное снижение потерь энергии по сравнению с базовым вариантом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ проект №18-71-10069.

1. Артоболевский И.И., Умнов Н.В. Некоторые проблемы создания шагающих машин // Вестник АН СССР. 1969 №2. С. 44.

2. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата // М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1984. – 312 с.

3. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В. и др. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. Т. 1. №1. С. 6-14.

4. Павловский В.Е. О разработках шагающих машин // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. №101. С. 1-32.

## ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ УТЕЧЕК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГЛАВНОМ РАЗЪЕМЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1000

*В.С. Каширин, А.В. Осинцев*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва  
e-mail: [yskashirin@gmail.com](mailto:yskashirin@gmail.com)

Разъемные соединения реактора имеют уплотнительные устройства, обеспечивающие герметичность. Актуальна проблема герметичности первого контура реакторной установки, где находится активная зона и теплоноситель. Нельзя исключать вероятность нарушения герметичности и протечки радиоактивного теплоносителя в окружающую среду, что приведет к радиационному заражению. Нарушение герметичности возникает за счет следующих факторов: наличия шероховатости контактирующих поверхностей, дефектов изготовления, внутреннего давления, силовых и температурных деформаций [1]. Для оценки величины утечек применялся метод расчета утечек сквозь зазор [2], возникающий при контакте двух шероховатых поверхностей.

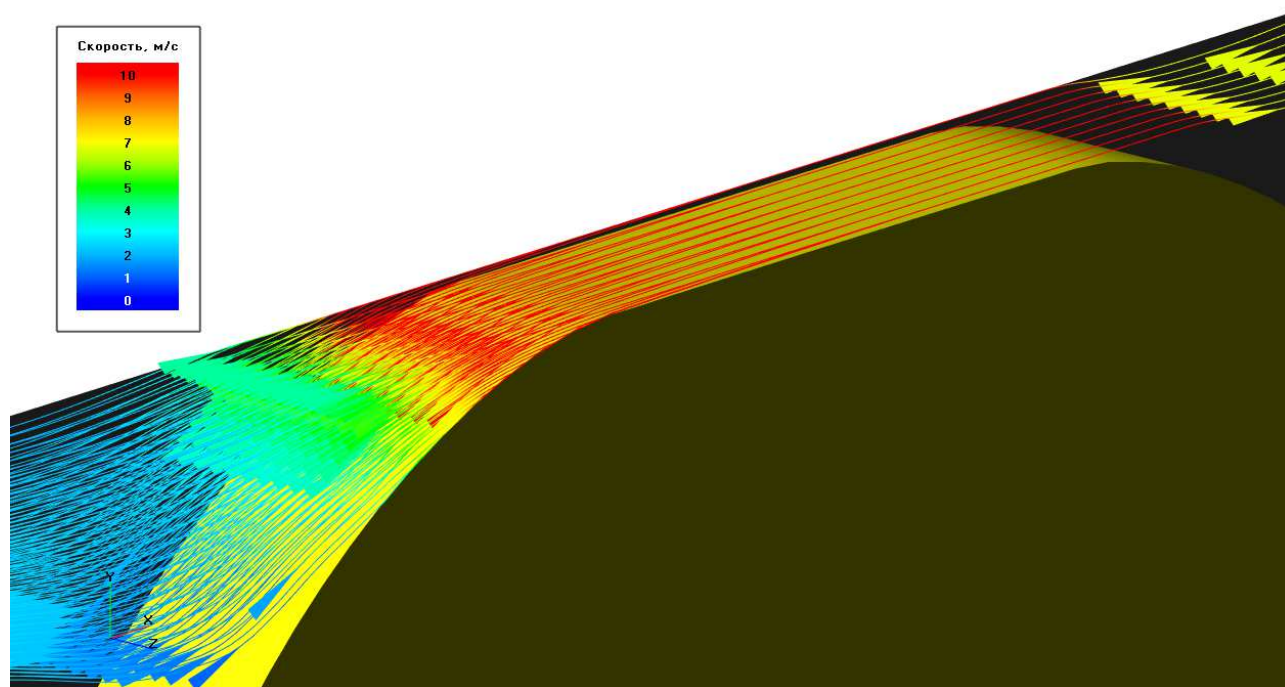


Рис. Утечка теплоносителя сквозь уплотнительный узел реакторной установки ВВЭР-1000.

1. В.Г. Русанов. Уплотнительные устройства разъемных соединений в реакторных установках. М: «Академкнига» 2004. С. 9-11.
2. В.Л. Попов. Механика контактного взаимодействия. От трибологии до динамики землетрясений. М.: Физмалит, 2013. С 352 с.



## ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

В.Д. Котелкин<sup>1</sup>, Л.И. Лобковский<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: [kotelkin@mech.math.msu.su](mailto:kotelkin@mech.math.msu.su)

Исходя из кинематики Евразийской и Северо-Американской плит в меловой период, Scotese C.R. [1], пришел к выводу о существовании крупного Канадского бассейна, т.е. к «океаническому» прошлому Арктики. Поверхностные реконструкции российских авторов [2], наоборот, говорят о «континентальной» деструкции в Арктическом регионе.

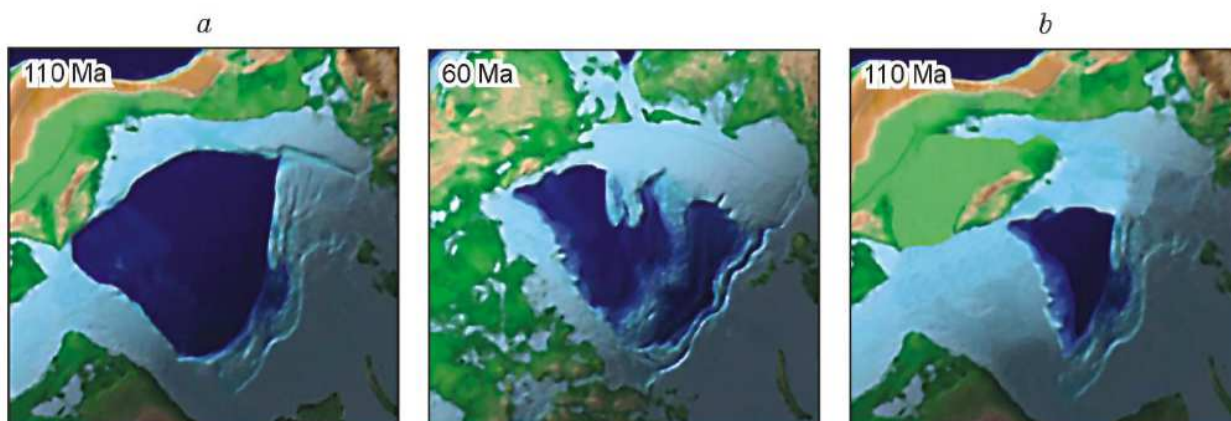


Рис. Меловые реконструкции Северного Ледовитого океана:  
(а) - реконструкция по [Scotese, 2011]; (б) реконструкция [Казмин и др., 2014].

Мы провели численное моделирование глубинной геодинамики в рамках более общей модели термохимической мантийной конвекции [3]. Региональное моделирование является некорректной задачей, успех решения которой определяется правильным выбором условий регуляризации [3]. Установлено, что ведущую роль в эволюции континентальных окраин играет субдукция океанической литосферы, вследствие которой под континентом развивается вторичное течение с обратной циркуляцией. Обратная ячейка растет, её передний фронт, представляющий восходящий горячий поток, движется под континент, оставляя на поверхности магматические и рифтогенные следы. Результаты моделирования согласуются с данными сейсмотомографии по Азиатско-Тихоокеанскому региону [4]. В частности, они объясняют причины растяжения континентальной литосферы и возникновения рифтовых зон на востоке Азии, включая Байкальскую рифтовую зону и рифты Китая. Расширение конвективной ячейки в тыльную сторону объясняет откат зон субдукции (roll-back) в сторону океана и образование окраинных бассейнов.

Согласно нашему эксперименту субконтинентальная ячейка функционирует около 50 млн. лет, а океаническая плита вдвигается под континент на 2000 км. Эти значения, а также характер поверхностных движений и извержений, соответствуют орогеническим фазам, называемым главной геологической периодичностью. Другими словами эта схема эволюции окраин является типичной.

Применение новой схемы субконтинентальной геодинамики к эволюции Арктического региона позволяет устранить противоречия, связанные с растяжением региона, и объяснить характер магматизма [2]. Результаты моделирования подтверждают реконструкции Арктического региона, выполненные российскими геологами.

1. Scotese C.R. Paleogeographic Reconstructions of the Circum-Arctic Region since the Late Jurassic // Search and Discovery Article #30193. 2011. PALEOMAP Project, Arlington, TX.

2. Казмин Ю.Б., Лобковский Л.И., Кононов М.В. Геодинамическая модель развития Американо-Арктического бассейна Арктики // Арктика: экология и экономика. 2014 № 4. С. 14-27.

3. Котелкин В.Д., Лобковский Л.И. Регуляризация геодинамических задач с помощью геологических данных // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 3. С. 15-25.

4. Zhao D. Tomography and Dynamics of Western-Pacific Subduction Zones // Monogr. Environ. Earth Planets. 2012. V. 1. No. 1. P. 1-70.

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В МОДЕЛЯХ ОБРАЗОВАНИЯ МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Г.Ю. Котова<sup>1</sup>, К.В. Краснобаев<sup>1,2</sup>

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

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

e-mail: [kvk-kras@list.ru](mailto:kvk-kras@list.ru)

Исследования с помощью космических аппаратов «Spitzer», «Herschel», «Planck» выявили существование сотен расширяющихся областей НП, окруженных молодыми звездными объектами [1-4]. Эти объекты часто располагаются в уплотнениях, процессы возникновения и эволюции которых определяют темп звездообразования.

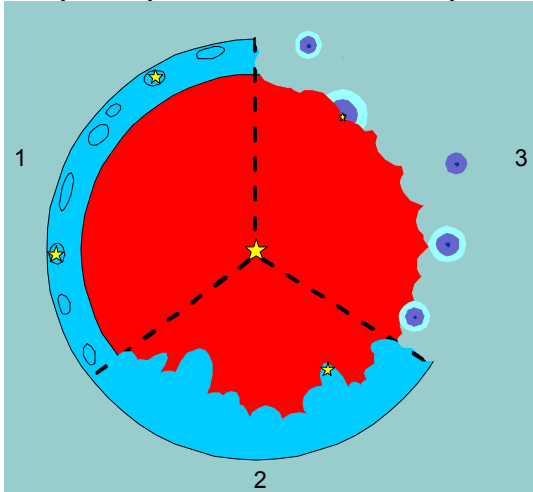


Рис. Схема процессов, приводящих к образованию молодых звездных объектов.

Происхождение неоднородностей объясняется развитием гравитационной неустойчивости или неустойчивости ионизационно-ударного фронта, а также проникновением в область НП хаотически распределенных возмущений из межзвездной среды (соответственно области 1-3 на схеме). Трудность идентифицировать тот или иной сценарий заключается в том, что образуются структуры, морфологически мало отличающиеся между собой. Кроме того, наблюдаемые «столбики», «пальцы», «глобулы» располагаются преимущественно в окрестности внутренней – обращенной к центральной звезде – границе плотного слоя нейтрального газа, возникающего вследствие расширения области НП. В то же время взаимодействие уплотнений с внешней границей слоя исследовано значительно меньше. Поэтому в настоящей работе рассматривается одно из проявлений такого взаимодействия, которое заключается в формировании кумулятивных струй при проникновении уплотнения

(облака, сгустка) в ускоренно движущийся слой. Проводятся расчеты двумерных неустановившихся движений идеального совершенного газа в постоянном поле тяжести в присутствии локальной неоднородности, анализируются условия формирования кумулятивных струй. Взаимодействие газового облака с ускоренно движущимся слоем исследуется как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях столкновения, устанавливается зависимость структуры движения от величины ускорения, от плотностей газа в слое и в облаке.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-01-00184).

1. Churchwell E. et al. The bubbling Galactic disk. II. The inner 20° // *The Astrophysical Journal*. 2007. V. 670. P. 428-441.
2. Deharveng L. et al. A gallery of bubbles. The nature of the bubbles observed by Spitzer and what ATLASGAL tells us about the surrounding neutral material // *Astronomy & Astrophysics*. 2010. V. 523. P. 1-35.
3. Anderson L. D. et al. The dust properties of bubble HII regions as seen by Herschel // *Astronomy & Astrophysics*. 2012. V. 542. P. 1-27.
4. Aghanim N. et al. Planck intermediate results XXXIV. The magnetic field structure in the Rosette Nebula // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. V. 586. P. 1-16.



## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИССОЦИИРОВАННОГО ВОЗДУХА С ПОВЕРХНОСТЬЮ $\beta$ -КРИСТОБАЛИТА: КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*А.А. Крупнов, М.Ю. Погосбекия*

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [kroupnov@relline.ru](mailto:kroupnov@relline.ru), [pogosbekian@imec.msu.ru](mailto:pogosbekian@imec.msu.ru)

Гетерогенные процессы играют ключевую роль при определении тепловых потоков к поверхности многоразовых космических аппаратов при их входе в атмосферу. Выявление механизмов этих процессов и определение их основных кинетических характеристик имеют решающее значение для эффективного конструирования современных теплозащитных систем. Актуальность исследований свойств теплозащитных покрытий возрастает в связи с разработкой новых материалов для перспективных гиперзвуковых многоразовых летательных аппаратов, нуждающихся в эффективной тепловой защите при температурах поверхности около 2000 К. Кроме того, все более насущными становятся вопросы снижения тепловых нагрузок на поверхность космических аппаратов, предназначенных для спуска в атмосферу Марса с последующим возвращением на Землю. Основной вклад в теплопередачу при полете многоразовых летательных аппаратов с гиперзвуковой скоростью в атмосфере вносят гетерогенные каталитические реакции с участием образующихся в ударной волне высокоэнергетических частиц. Ключевым шагом любого гетерогенно-каталитического механизма является адсорбция, которая имеет существенные последствия для всей цепи реакций, ведущей к рекомбинации.

Разработана модель взаимодействия диссоциированного воздуха с поверхностью теплозащитного материала  $\text{SiO}_2$  ( $\beta$ -кристобалит). Для описания гетерогенных процессов использовался кластерный подход, в котором поверхность (111) кристалла  $\text{SiO}_2$  моделировалась различными кластерами, передающими стехиометрию кристалла и валентные состояния, лежащие на поверхности  $\text{SiO}_2$  атомы кремния и кислорода (рис.1).

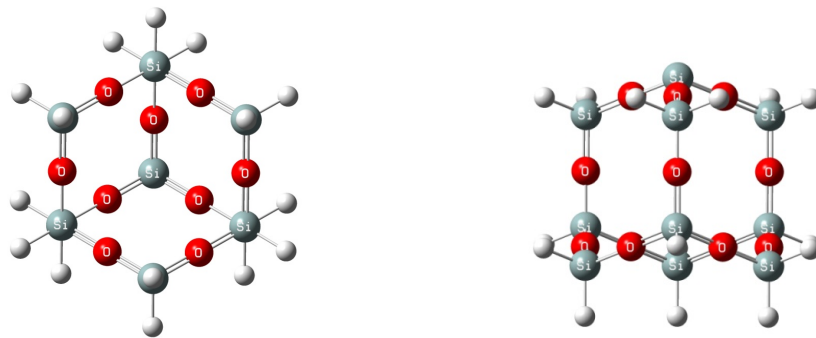


Рис. 1. Элементарная ячейка поверхности (111)  $\beta$ -кристобалита. Внутренние свободные валентности замкнуты атомами водорода.

В процессе моделирования рассматривались три места адсорбции. Рассчитаны поверхности потенциальной энергии процессов адсорбции и гетерогенной рекомбинации, определяющие потенциалы, необходимые для проведения молекулярно-динамических расчетов. Для рассматриваемых центров адсорбции определены энергии адсорбции атомов N, O и молекул  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , NO. Показано, что химическая адсорбция реализуется только на одном центре адсорбции S1, в то время как на остальных центрах адсорбции S2 и S3 осуществляется физическая адсорбция, определяемая вандерваальсовым взаимодействием. Показано, что проникновение атомов кислорода и азота внутрь кристаллической структуры приводит к дезактивации активного центра S1 в результате связывания валентного электрона атома кремния первого слоя. Для процессов ударной (Или-Райдилла) и ассоциативной (Ленгмюра-Хиншельвуда) рекомбинации, приводящей к образованию молекул  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , NO, ON, рассчитаны тепловые эффекты реакций для различных активных центров.

Работа проведена в соответствии с планом научных исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00741А. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

## ВЕРИФИКАЦИЯ УРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ДИССОЦИАЦИИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИХ И МОЛЕКУЛЯРНО- ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

А.А. Крупнов, А.Л. Сергиевская, М.Ю. Погосбекян

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [kroupnov@relline.ru](mailto:kroupnov@relline.ru), [sergievska@yandex.ru](mailto:sergievska@yandex.ru), [pogosebekian@imec.msu.ru](mailto:pogosebekian@imec.msu.ru)

При сильных ударных волнах в разреженных газах в условиях термической неравновесности химические процессы, такие как реакции диссоциации и обмена, происходят в условиях незавершенной колебательной релаксации. В связи с этим коэффициенты скорости этих процессов являются функциями как поступательно-вращательной, так и колебательной температур. В этой работе объектом исследований являются физико-математические модели химической реакции диссоциации молекул в термически неравновесных условиях. Целью работы является сравнительное исследование моделей физико-химических процессов на примере диссоциации молекул азота и кислорода. Для сравнения были выбраны хорошо известные и часто применяемые теоретические модели диссоциации, представляющие процесс в одностепенном, двухстепенном и уровнемом приближениях. В работе представлено детальное описание теоретических моделей, позволяющих рассчитать целевые функции моделей диссоциации молекул  $N_2$  и  $O_2$  в термически неравновесных условиях как в двухстепенном, так и в уровнемом приближениях.

Для проведения обоснованного и достоверного сравнения кроме теоретических моделей привлечены результаты динамики столкновений  $N_2-N$ ,  $O_2-O$  полученные методом квазиклассических траекторий, а также данные физического эксперимента на ударных трубах. Молекулярно-динамическое моделирование проводилось с использованием вычислительного комплекса "MD Trajectory". Поверхности потенциальной энергии для рассматриваемых молекулярных систем получены на основе квантово-механических расчетов. Вычислительные эксперименты с теоретическими моделями проводились в среде "Интернет-Каталога" моделей физико-химических процессов.

На основе проведенного сравнения (рис.1) было предложено новое функциональное, зависящее от поступательной температуры, выражение для эмпирического параметра уровнемой модели Мэрроуна-Тринора. Использование модифицированной модели позволяет хорошо описать результаты траекторных расчетов на широком диапазоне поступательных температур от 2000 до 10000К.

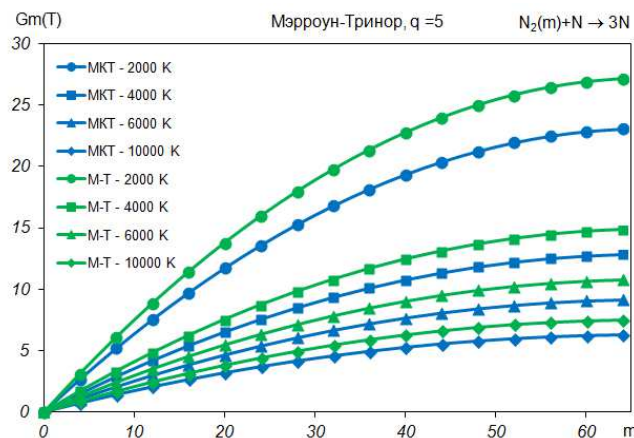


Рис.1. Уровневый фактор  $G_m(T)$  для процесса диссоциации  $N_2(m) + N \rightarrow 3N$  как функция колебательного состояния  $m$  молекулы  $N_2$  при поступательных температурах  $T = 2000, 4000, 6000$  и  $10000$ К. Сравнение МКТ расчетов с уровнемой моделью Мэрроуна-Тринора (М-Т) для  $q=5$ .

Работа проведена в соответствии с планом научных исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00741А. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

## КОНВЕКТИВНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И УЛЬТРАЗВУК. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ

М.О. Кучинский, И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, О.О. Фатталов  
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
e-mail: [duspsp@yandex.ru](mailto:duspsp@yandex.ru)

В связи с ростом требований к характеристикам терморегуляции и взрывозащиты электронных устройств в последнее время наблюдается повышение интереса к проблеме охлаждения различной микроэлектроники в ограниченных объемах. В настоящее время наиболее распространенными являются методы воздушного охлаждения. Более эффективным способом охлаждения или терморегуляции является погружение нагревательных элементов в специальные жидкости такие, как масла с высокой химической устойчивостью и особыми диэлектрическими свойствами, а также жидкости с взвешенными в них частицами с характерным размером 0.1 – 100 нм (нанодисперсии, наноземли или наножидкости) и т.п. [1]. Однако, в этом случае существует серьезный недостаток, обусловленный невозможностью локального охлаждения наиболее чувствительных к перегреву тепловыделяющих компонентов.

Одним из способов локализованного повышения эффективности теплоотдачи вблизи компактных источников тепла может выступать акустическое течение, создаваемое непосредственно вблизи источника тепловыделения. Поэтому основное внимание в рамках проведенного исследования уделяется изучению особенностей охлаждения нагретых пластин в условиях высокочастотного акустического течения в замкнутой полости. Целью работы является экспериментальная проверка влияния УЗ-излучения на характеристики теплообмена вблизи поверхности теплообменника.

В рамках настоящего исследования выполнена визуализация конвективного течения как в присутствии ультразвукового излучателя, так и без него. Для визуализации применялись как светорассеивающие частицы, так и флуоресцирующий краситель Родамин-Б. Кроме того, были выполнены температурные измерения в жидкости на этапе развития конвективного течения вблизи круглой пластины диаметром 35 мм. Датчик температуры располагался в плоскости лазерного ножа, проходящего вдоль диаметра теплообменника. В ходе выполнения натурных экспериментов было показано влияние УЗ-излучения на структуру конвективного течения, а также на поведение температуры жидкости вблизи поверхности нагревателя. Важным результатом является обнаружение качественной зависимости характера теплоотдачи от положения УЗ-излучателя и геометрии полости.

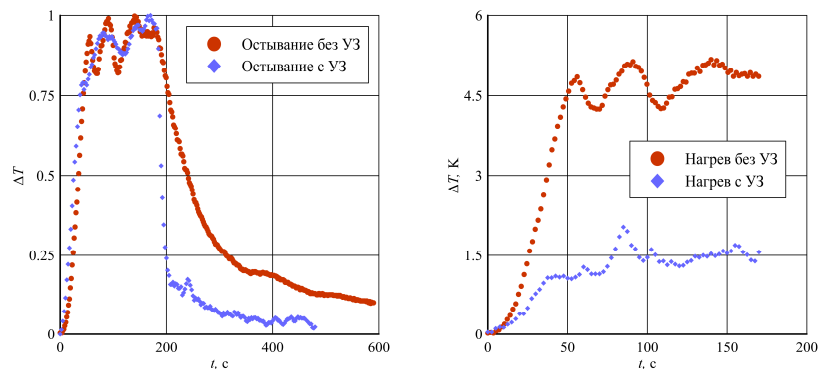


Рис. 1. Изменение температуры жидкости вблизи круглой пластины без УЗ-излучения и в присутствии акустического течения: а – остывание, б – нагрев.

Согласно наблюдениям, интенсивность теплоотдачи в жидкости существенно зависит от присутствия в полости акустического течения, которое способно повысить эффективность охлаждения примерно на 40-50% в интервале перепадов температуры от 3 до 50°C.

Исследование выполнено при поддержке Правительства Пермского края (грант С-26/788), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00165 мол\_а.

1. Chen Y., Sun S., Lai Y., Ma C. Influence of ultrasound to convective heat transfer with fouling of cooling water // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 100. P. 340-347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.144>

## РАСЧЕТ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАССЕТНОГО СНАРЯДА ПОВЫШЕННОЙ ДАЛЬНОСТИ С УСТРОЙСТВОМ ДОРАЗГОНА НА ТРАЕКТОРИИ

Б.Э. Кэрт<sup>1</sup>, А.В. Панченко<sup>1</sup>, Ю.В. Генкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>АО «НПО «Прибор», Москва

e-mail: [kert@mail.ru](mailto:kert@mail.ru)

Одной из доминирующих тенденций в развитии полевой артиллерии основных сил и ее боеприпасов является увеличение дальности стрельбы. Это обусловлено взглядами на современную военную операцию, как на процесс, протекающий на большом пространстве. Согласно концепции Airland Battle-2000, отраженной в военных доктринах США и НАТО, глубина зоны боевого воздействия дивизии – 70 км [1, 2], что превышает таковую для отечественной, равную 25-30 км [3].

Особенно актуально увеличение дальности кассетных боеприпасов, традиционно имеющих более чем вдвое меньшую дальность, чем осколочно-фугасные, в силу недостаточной прочности конструкции. Поэтому рациональным способом увеличения дальнобойности отечественного кассетного снаряда может послужить снабжение его прямоточным воздушно-реактивным двигателем.

Для расчета баллистического функционирования снаряда, по созданной конструктивной схеме, представленной на рисунке, были сделаны допущения основной задачи внешней баллистики для активного снаряда [4, 5].

Уравнение движения центра масс реактивного снаряда с РПД получается из теоремы об изменении количества движения системы переменного состава с твердой оболочкой [6], с соответствующим РПД заданием реактивной силы [7, 8].

Модель двигателя в целом соответствует модели [9].

Модель реализована в ППП «Матмех» [10].

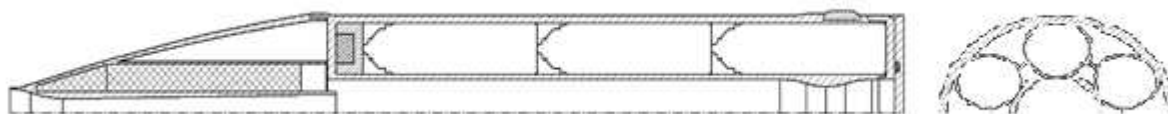


Рис. Конструктивная схема перспективного снаряда.

1. Douglas W.S. Airland Battle Doctrine // Center For Naval Analyses. 1988. 45 p.
2. Army Field Manual. FM 100-5. Operations. 1993.
3. Руссков В.Ф. Основы проектирования кассетных артиллерийских боеприпасов: учебное пособие // Балт. гос. техн. ун-т. СПб. 2013. 218 с.
4. Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика: Учебник для студентов вузов // М.: Изд-во Машиностроение. 2005. 608 с.
5. Чурбанов. Е.В. Краткий курс баллистики // СПб.: Балт. гос. техн. ун-т. 2006. 291 с.
6. Космодемьянский А.А.. Курс теоретической механики Ч. II // М.: Просвещение. 1965. 400 с.
7. Б.С. Стечкин и др. Теория реактивных двигателей. Рабочий процесс и характеристики // М.: Гос. изд. оборон. пром. 1958. 533 с.
8. Абрамович. Г.Н. Прикладная газовая динамика. Ч. 1 // М.: Наука. 1991. 600 с.
9. Б.В. Орлов и др. Основы проектирования ракетно-прямоточных двигателей для беспилотных летательных аппаратов // М.: Машиностроение. 1967. 424 с.
10. Б.Э. Кэрт, В.И. Козлов, Н.А. Макаровец. Математическое моделирование и экспериментальная отработка систем разделения реактивных снарядов: Учебное пособие для вузов // М.: Издательство Юрайт. 2019. 240 с.



## БАЛЛИСТИКА ВСКРЫТИЯ КАССЕТНОГО БОЕПРИПАСА С АДАПТАЦИЕЙ ПЯТНА РАЗБРОСА БОЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ К ФОРМЕ ЦЕЛИ

*Б.Э. Кэрт<sup>1</sup>, В.О. Кравцов<sup>1</sup>, Ю.В. Генкин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>АО «НПО «Прибор», Москва

e-mail: [kvo.spb@mail.ru](mailto:kvo.spb@mail.ru)

В работе рассматривается вопрос реализации схемы вскрытия кассетной головной части (КГЧ), обеспечивающей возможность адаптации пятна разброса боевых элементов (БЭ) к форме цели. В ранних работах по данной тематике авторами предложена перспективная КГЧ с пиродинамической блочной (пакетной) схемой вскрытия [1,2,3]. КГЧ представляет из себя блок жестко-скрепленных труб с расположенными в них БЭ, выбрасываемыми в атмосферу набором вышибных зарядов. Изменение последовательности включения вышибных зарядов позволяет влиять на процесс вскрытия и форму пятна разброса БЭ и, следовательно, на эффективность поражения площадных целей за счет адаптации формы пятна разброса к форме цели.

В процессе пиродинамического отстрела БЭ от корпуса два физических эффекта способствуют более эффективному разбросу БЭ, чем в случае существующей КГЧ. Во-первых, БЭ отстреливаются от корпуса достаточно большой массы, так что приобретают сравнительно большую относительную скорость, а во-вторых, за счет изменения пространственного положения корпуса в процессе отстрела эта скорость может быть направлена по различным, в том числе регулируемым моментами отстрелов, направлениям. Все это должно повышать эффективность действия КГЧ.

В [1,2] сформулирована математическая модель пиродинамики вскрытия КГЧ указанной схемы на траектории, программно реализованная в составе ППП «Матмех», которая учитывает динамику совместного движения БЭ по пусковым направляющим трубам КГЧ, сопряженную с внутрибаллистическими протекающими процессами горения, перетока зерен, теплообмена, а также сложное пространственное движение отделившихся БЭ и корпуса на траектории в атмосфере. На основе полученных траекторных параметров может быть осуществлена визуализация пространственного положения корпуса КГЧ в процессе отделения от нее БЭ, что для последующих численных экспериментов позволяет подбирать и корректировать время срабатывания вышибных зарядов с целью достижения выгодного пятна разброса.

Дополнительно разработано программное обеспечение (ПО), иллюстрирующее принципиальную возможность существенного увеличения рассеивания БЭ по дальности, а также формирования конфигурации пятна разброса, адаптированного к площадной вытянутой цели типа колонна на марше. В указанное ПО входит модуль оценки эффективности действия при заданном могуществе действия БЭ, на основе которого авторы делают вывод о возможности значительного увеличения наносимого ущерба характерным целям.

На данный момент рассматриваются механизмы увеличения пятна разброса по фронту за счет следующих факторов: различного пространственного ориентирования кассеты в момент выхода БЭ из пусковых труб; принудительного увеличения угловой скорости КГЧ к моменту вскрытия; создания динамической асимметрии путем осевого сдвига пусковых труб; углового смещения пусковых труб; использования БЭ на основе гибкой связки, предложенных в [4], с асимметрией блока стабилизатора.

1. Б.Э.Кэрт, В.И.Козлов, Н.А.Макаровец. Математическое моделирование и экспериментальная отработка систем разделения реактивных снарядов / Под ред. Н.А. Макаровца. – Тула, Санкт-Петербург: ФГУП «ГНПП «Сплав», 2006. – 652 с.

2. Разделение неуправляемых снарядов систем залпового огня /РАРАН; Б.Э. Кэрт, В.И. Козлов, Н.А. Макаровец; под ред. Н.А. Макаровца; редкол. серии: В.В.Панов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 2008. 438 с.: ил. (Справ. б-ка разработчика-исследователя).

3. Кэрт Б.Э., Козлов В.И., Князева И.В., Кравцов В.О. Разработка 3D-моделей перспективных конструктивных схем разделяющихся головных частей для РСЗО // Фундаментальные основы баллистического проектирования: VI ВНТК. Сб. материалов / Под. ред. Б.Э. Кэрта; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2018. – С. 231-234.

4. Б.Э. Кэрт, В.О. Кравцов. О стабилизации боеприпаса с помощью гибкой связки / Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – М.: НТЦ «Информтехника», 2014. – Вып. 9-10 (75-76). – С. 122-125.

## СОВМЕСТНЫЙ РАСЧЕТ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Д.В. Лебедев, М.В. Липатников, А.Г. Кузьменко*  
АО РЭП Холдинг, Санкт-Петербург  
e-mail: [reph@reph.ru](mailto:reph@reph.ru)

В рамках данной работы выполнен совместный газодинамический анализ работы топливной форсунки в режиме диффузионного горения с учетом теплопереноса и излучения. Целью данного исследования являлось получение температурного состояния форсунки для оптимизации конструкции в сторону повышения надежности и увеличения ресурса.

Анализ выполнен с помощью программного комплекса Fluent ANSYS 19.2. Топливо – природный газ. Окислитель – атмосферный воздух. Геометрия и сеточная модель созданы в Workbench с помощью DesignModeler и Mech. С целью уменьшения числа элементов и повышения качества сетки, геометрия была разбита на подобласти для построения по возможности структурированной сетки, а также преобразование полученной тетраэдральной сетки в полигональную. Общее число элементов модели составило более 10 млн. ячеек. Модель горения – Species Model – Chemistry, Partially Premixed Combustion, Flamelet Generated Manifold, Non Adiabatic. Модель радиации – Discrete Ordinates. Модель турбулентности – Realizable k-epsilon.

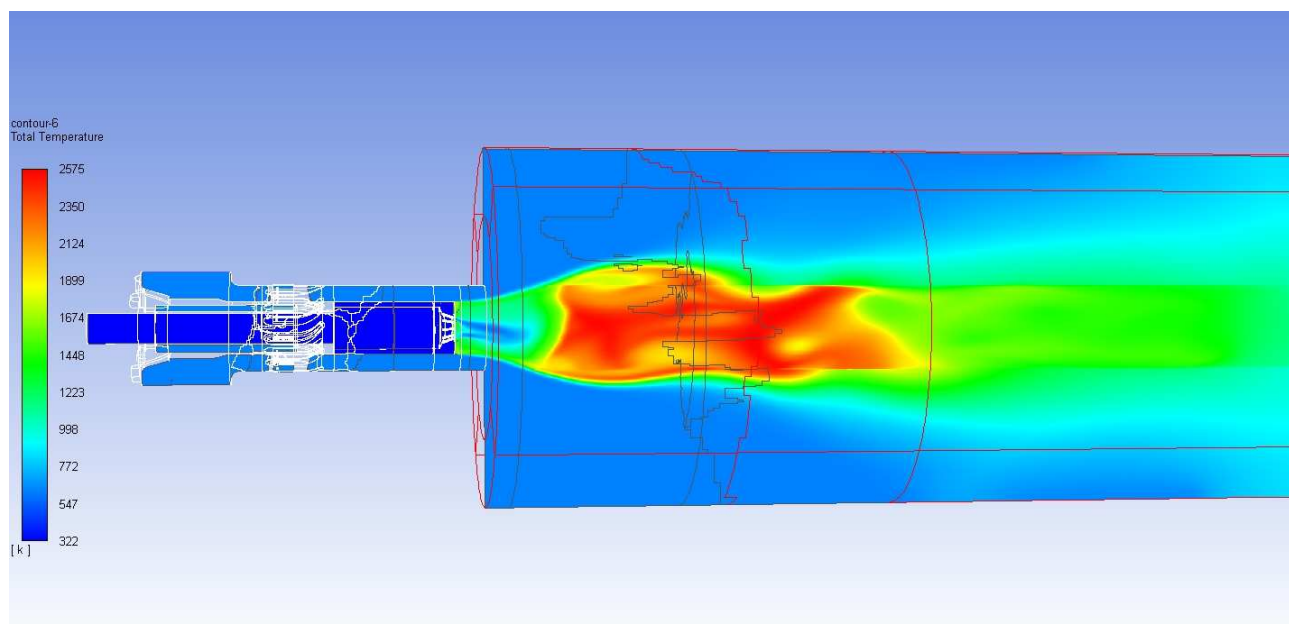


Рис. Продольный разрез. Поле температур (К).

Моделирование выполнялось для центральной форсунки камеры сгорания на режиме диффузионного горения. Данный режим характеризуется, для данной конструкции горелки, наибольшими температурными градиентами рабочих сред, и как следствие влечет максимальное снижение ресурсных показателей конструкции. Основной задачей прямого моделирования процесса горения, в данной работе, являлось выявление зон с критическими значениями температур в результате теплового воздействия зоны горения на элементы форсунки с учетом излучения факела.

Результаты выполненного анализа в виде распределения температурного поля были верифицированы на основе экспериментальных данных полученных при термометрировании форсунки в составе газотурбинного двигателя. Анализ результатов моделирования позволил выявить элементы конструкции форсунки с максимальными градиентами температур, что позволило сформировать направления в конструктивных изменениях форсунки с целью снижения температурных градиентов.

1. ANSYS tutorial. WS04 – Can combustor – FGM Diffusion.



## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ БАФТИНГА

А.М. Липанов<sup>1</sup>, И.И. Липатов<sup>2</sup>, С.А. Карсканов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ИПМ имени М.В. Келдыша, Москва

<sup>2</sup> ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

<sup>3</sup> Институт механики УрО РАН, Ижевск

В работе рассказывается о методе и результатах численного решения системы уравнений механики вязкого газа, в которых явно учитывается время пробега молекул газа между их соударениями, что особенно важно при решении аэродинамических задач. Решается двумерная задача обтекания под углом атаки профиля NASA 0012 при условиях трансзвукового полёта самолёта. Задача решается по явной разностной схеме. Интегрирование по времени осуществляется со 2-ым порядком точности, расчёты пространственных частных производных выполняются с 6-ым порядком точности. Вся область интегрирования разделена на две части: 1-ую, примыкающую к обтекаемому профилю и охватывающую отрывную зону и 2-ую, распространяющуюся на остальную часть области интегрирования. В 1-ой подобласти используется разностная сетка с минимальным пространственным шагом. Во 2-ой подобласти шаги интегрирования по пространству линейно возрастают, начиная от минимального значения. Общее число пространственных шагов в области интегрирования составило  $18.6 \cdot 10^6$ . Величины пространственных шагов получены в результате исследований вычислений на асимптотическую сходимость. Результаты наших расчётов сопоставлены с экспериментальными данными французских и английских коллег. Соответствие между теоретическими и экспериментальными данными хорошее. Показано, что при угле атаки в 7 – 8 градусов на подветренной стороне обтекаемого крыла в отрывной области в окрестности расположения скачка уплотнения наблюдаются особенно интенсивные пульсации давления. Здесь колебания давления по амплитуде превышают более, чем в 2 раза его среднее значение, и имеют частоту около 130 Гц. Получены поля гидромеханических параметров для различных расчётных случаев, а также величины коэффициентов подъёмной силы и лобового сопротивления в зависимости от времени и параметров решаемой задачи.

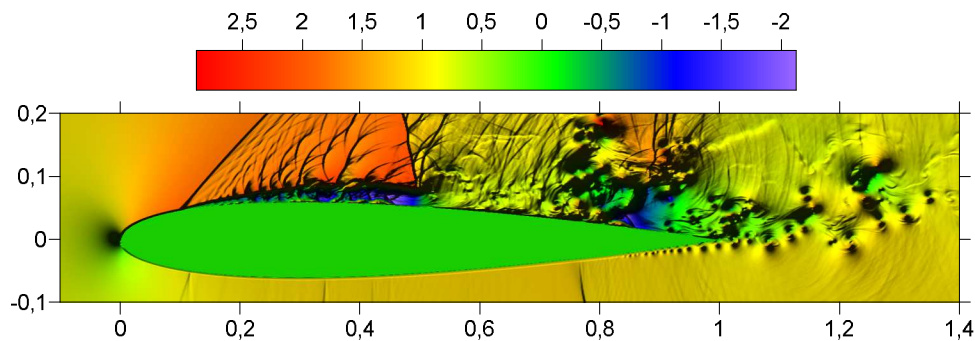


Рис. Поля гидромеханических параметров при обтекании профиля NASA 0012 под углом атаки  $\alpha = 8^\circ$  при числах набегающего потока  $M = 0.7$  и  $Re = 2.63 \cdot 10^6$ .

## **ПРОЦЕССЫ ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЧЕНИЯ В ЛАМИНАРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ВНЕШНИМ ТРАНСЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ**

*И.И. Липатов, И.Н. Устинов*  
ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский  
e-mail: [lipatov@tsagi.ru](mailto:lipatov@tsagi.ru)

Для описания самоиндуцированного отрыва ламинарного пограничного ранее были созданы математические модели, основанные на применении асимптотических методов для описания сверхзвуковых и дозвуковых режимов. В то же время описание трансзвуковых режимов оставалось неизученным, несмотря на ряд работ, в которых рассматривались отдельные режимы.

Определенный прогресс мог быть достигнут на основе результатов, использующих модифицированный метод Хохлова, ранее примененный для решения задач нелинейной акустики, в том числе для описания нелинейных волновых пучков. Руденко и Карабутов применили этот метод для решения нелинейных нестационарных задач газовой динамики при околосзвуковых скоростях обтекания тонких тел. Отмеченные выше работы позволяют описать самоиндуцированный отрыв ламинарного пограничного слоя при трансзвуковых скоростях обтекания. Ранее для описания возмущенного трансзвукового течения использовалось уравнение Кармана-Гудерлея. Подход, развитый Руденко и Карабутовым позволил получить решения уравнения Линя-Рейснера-Тзяна, что расширяет возможности описания процессов вязко-невязкого взаимодействия при трансзвуковых скоростях на некоторый диапазон изменения числа Маха. В настоящем докладе представлены результаты исследования процессов взаимодействия течения в ламинарном пограничном слое с внешним трансзвуковым потоком.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ЕГО ПРОДОЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ ЖИДКОСТЬЮ

*П.Д. Лобанов, В.Г. Меледин, Н.А. Прибатулин, А.И. Светоносов, И.В. Щетихин*  
Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
e-mail: [lobanov@itp.nsc.ru](mailto:lobanov@itp.nsc.ru)

Вибрация конструкций под воздействием потоков является негативным фактором, который может вызывать аварийные ситуации в контурах перспективного энергетического оборудования. Применение тяжелых жидкометаллических теплоносителей (эвтектический сплав свинец-висмут, свинец) для охлаждения тепловыделяющих элементов реакторных установок с замкнутым топливным циклом приводит к усугублению этой проблемы, т.к. плотность расплава теплоносителя сравнима с плотностью материалов элементов конструкции. Поэтому необходимо производить подробное исследование данной проблемы с помощью численных и экспериментальных методов. В связи с этим, последнее время появился ряд работ, в которых производилось расчетное исследование течений ТЖМТ в элементах реакторных установок [1, 2]. Для верификации и валидации расчетных кодов требуется проведение экспериментальных исследований движения жидкометаллического теплоносителя в различных конструкциях. Целью данной работы является проведение исследования инициированной потоком вибрации продольно обтекаемого стержня в кольцевом канале.

Работы проведены в кольцевом канале. Диаметр внутренней трубки 12 мм, внешней трубы – 26 мм. Был разработан входной участок для предотвращения воздействия входного потока жидкости на центральный стержень. Для установления потока применялась выравнивающая решетка. Была проведена предварительная оценка работоспособности рабочего участка с помощью методов вычислительной гидродинамики CFD. Предложен новый метод измерения перемещения стержня, с помощью емкостного датчика. Проведена апробация датчика в прозрачной трубе с помощью оптического метода. В результате, получены данные о влиянии расхода жидкости на возникновение вибрации консольно- и шарнирно закрепленных стержней разной длины. Таким образом, составлена база данных об амплитудно-частотных характеристиках колебаний стержней в широком диапазоне входных условий. Данные могут быть применены для верификации и валидации расчетных кодов. На основе созданной экспериментальной базы в дальнейшем будут проведены исследования течения ТЖМТ (эвтектических сплав свинец-висмут) в экспериментальной модели ТВС.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, гос. Задание № III.22.7.3.

1. Merzari E., Fischer P., Yuan H., Van Tichelen K., Keijers S., De Ridder J., Degroote J., Vierendeels J., Doolaard, H., Gopala V.R., Roelofs F. Benchmark exercise for fluid flow simulations in a liquid metal fast reactor fuel assembly // Nuclear Engineering and Design. 2016. V. 298. P. 218–228.

2. De Santis D., Shams A., Analysis of flow induced vibrations and static deformations of fuel rods considering the effects of wire spacers and working fluids // Journal of Fluids and Structures. 2019. V. 84. P. 440–465.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФРАГМЕНТОВ МЕТЕОРНОГО ТЕЛА

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

<sup>1</sup>Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

<sup>2</sup>Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [lukashenko-vt@yandex.ru](mailto:lukashenko-vt@yandex.ru)

При полете в атмосфере метеорное тело постепенно разрушается под действием увеличивающегося скоростного напора и теплового нагрева. В результате из единого тела может образовываться достаточно сложная система фрагментов. В большинстве случаев метеорное тело и его фрагменты представляются телами малого удлинения, приближенно соответствующими сфере, и вращением тел пренебрегают [1]. В реальности могут образовываться формы, создающие при повороте на угол атаки значительную боковую силу, которая оказывает влияние на дальнейший полет фрагментов метеорного тела.

Для оценки возможных значений коэффициента аэродинамического сопротивления помимо сферы часто используются формы прямоугольного бруса и плиты [2]. Прямоугольная форма в отличие от сферической, кроме различающихся коэффициентов сопротивления и подъемной силы, обладает моментом тангажа, т.е. в зависимости от угла атаки для данной формы образуется момент тангажа, приводящий к вращению данной формы при полете в атмосфере.

В работе [3] авторами был разработан и реализован метод решения сопряженной задачи с учетом относительного перемещения тел. В представленном докладе приводится исследование момента тангажа форм малого удлинения, используемых для моделирования фрагментов метеорного тела, моделирование сопряженной задачи с учетом вращения и оценка влияния возможного вращения фрагментов несферической формы на скорость разлета. Для тестирования алгоритма выполнены расчеты обтекания тела сегментально-конической формы с углом обратного конуса  $7.5^\circ$ . Результаты расчетов количественно и качественно хорошо согласуются с известными данными [4].

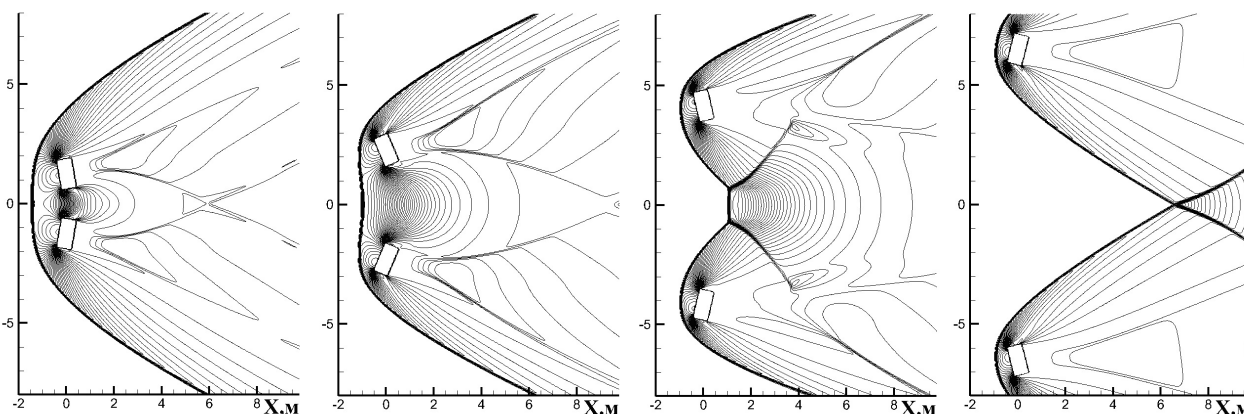


Рис. Картины изолиний давления при разлете двух тел прямоугольной формы.

Проведены расчеты динамики тел прямоугольной формы с учетом возможности вращения тела. Показано, что более вероятным является полет удлиненного тела с ориентацией большой стороны тела поперек потока, при этом реализуется максимальная сила торможения. Проведены расчеты разлета двух одинаковых тел прямоугольной формы с различным удлинением (см. рис). Обнаружено, что из-за вращения возникает дополнительная боковая сила, которая приводит к значительному росту скорости разлета – до трех раз для сделанных расчетов.

1. Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И. Аэродинамика болидов // М.: Наука. Физматлит, 1995.
2. Ждан И.А., Стулов В.П., Стулов П.В., Турчак Л.И. Коэффициенты сопротивления тел метеорных форм // Астрономический вестник. 2007. Т. 41. № 6. С. 544–547.
3. Лукашенко В.Т., Максимов Ф.А. Математическая модель разлета осколков метеорного тела после разрушения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Вып. 9(69). С. 1–14.
4. Петров К.П. Аэродинамика тел простейших форм // М.: изд-во «Факториал», 1998.

## ТЕПЛООБМЕН В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

В.Г. Луцик, М.С. Макарова, А.И. Решмин  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: mariia.makarova@gmail.com

Течение в каналах переменного сечения характеризуется наличием значительного продольного градиента давления, который оказывает существенное влияние на турбулентное течение, приводя в пределе при течении в конфузоре с большим отрицательным градиентом давления к ламинаризации пограничного слоя, а при течении в диффузоре с большим положительным градиентом давления – к отрыву пограничного слоя. Однако даже при небольших углах сужения или раскрытия канала продольный градиент давления оказывает заметное влияние на характеристики течения и теплообмена [1, 2], что необходимо учитывать в проектных разработках реальных каналов.

Численное исследование турбулентного течения проведено с использованием уравнений неразрывности и движения в приближении узкого канала и трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности [3]. Плоский канал переменного сечения выбран из условий постоянства числа Рейнольдса  $Re$ , чтобы исключить его из числа переменных параметров. Расчеты проведены для течения воздуха в диффузоре и конфузоре с углами раскрытия (сужения)  $\alpha = \pm 4^\circ$  длиной  $x = 50$  см при числе  $Re = 20000$ .

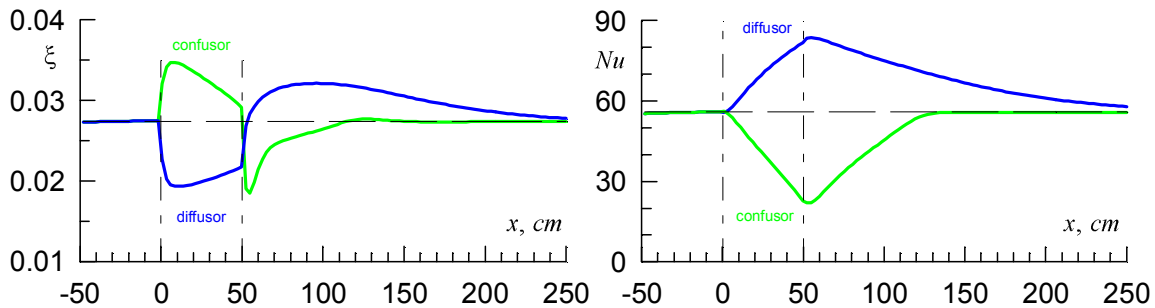


Рис. 1. Изменение коэффициента сопротивления  $\xi$  и числа Нуссельта  $Nu$  по длине канала.

В диффузоре коэффициент трения  $\xi$  (рис.1а) уменьшается за счет положительного градиента давления, а число Нуссельта  $Nu$  (рис. 1б) возрастают за счет турбулизации течения (рис. 2). В конфузоре  $\xi$  возрастает (рис. 1а) за счет отрицательного градиента давления, а  $Nu$  уменьшается (рис. 1б) за счет ламинаризации потока (рис. 2). На участках канала постоянного сечения ( $x > 50$  см), следующих за диффузором и конфузуром, интенсивность турбулентности изменяется немонотонно (рис. 2), что сказывается на изменении величин  $\xi$  и  $Nu$ , затягивая их выход на режим развитого течения.

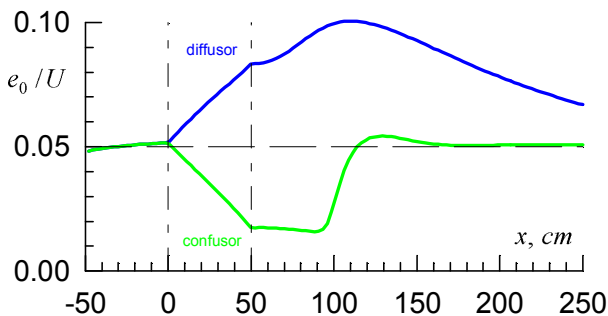


Рис. 2. Изменение интенсивности  $e_0/U$  турбулентности на оси канала по длине.

Работа поддержана РФФИ (№17-08-00115) и Советом по грантам Президента РФ (№СП-3993.2018.1).

1. Луцик В.Г., Решмин А.И. Интенсификация теплообмена в плоском безотрывном диффузоре // ТВТ. 2018. Т.56. № 4. С. 586–593.
2. Луцик В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И. Ламинаризация потока при течении с теплообменом в плоском канале с конфузуром // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 1. С. 68-77.
3. Луцик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 3. С. 13-25.

## ЛАМИНАРНЫЙ И ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ СО ВДУВОМ ГАЗА В СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК

*В.Г. Луцкич, М.С. Макарова*

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: mariia.makarova@gmail.com

Проведено численное исследование сжимаемого пограничного слоя на проницаемой пластине с вдувом для больших и малых чисел Прандтля. Задача была решена для случая ламинарного и турбулентного пограничных слоев. Для газов с числом  $Pr < 1$  при значениях температуры вдуваемого газа  $T_j$  ниже температуры адиабатной непроницаемой стенки проведенные расчеты подтвердили полученное в работах для турбулентного [1,3] и ламинарного [2] пограничного слоя на проницаемой пластине в сверхзвуковом потоке при вдуве воздуха существование области температур проницаемой стенки ниже температуры вдуваемого газа  $T_j$ . Для случая  $Pr > 1$  температура стенки, наоборот, оказалась выше температуры  $T_j$ .

Для газов с числом  $Pr < 1$  в работе введена величина критической температуры теплоизолированной проницаемой стенки  $T_{wcr}$ , которая определяется при равенстве минимума зависимости температуры стенки по длине и температуры теплоизолированной проницаемой стенки при критическом вдуве.

В предположении, что величина минимума температуры проницаемой стенки практически не зависит от интенсивности вдува, для величины критической температуры теплоизолированной проницаемой стенки получена критериальная зависимость  $K$  от чисел Прандтля  $Pr$  и Маха  $M$ :

$$K = \frac{T_{wcr} - T_e}{T_e^* - T_e} Pr^{-0.7},$$

где  $T_e$  – термодинамическая температура, а  $T_e^* = T_e(1 + 0.5(\gamma - 1)M^2)$  – температура торможения газа набегающего потока.

Для чисел Маха  $M \rightarrow \infty$  при  $K=1$  получена предельная зависимость, которая может быть использована при оценке величины критической температуры теплоизолированной проницаемой стенки  $T_{wcr}$  для чисел Прандтля  $Pr > 0.3$ :

$$\frac{T_{wcr}}{T_e^*} = \frac{T_e}{T_e^*} + \left(1 - \frac{T_e}{T_e^*}\right) Pr^{0.7} = Pr^{0.7} + \frac{1 - Pr^{0.7}}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2} \rightarrow Pr^{0.7}$$

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00234).

1. Leontiev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S. The temperature recovery factor in a boundary layer on a permeable plate // High Temperature, 2017. Vol.55. no. 2. pp. 246–252.

2. Leont'ev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S. Features of Heat Transfer on a Permeable Surface in a Compressible-Gas Flow // Doklady Physics, 2018. Vol. 63. no. 9. pp. 371-374.

3. Alexandr Leontiev, Andrei Saveliev, Boris Kichatov, Alexey Kiverin, Alexey Korshunov, Vladimir Sudakov. Effect of gaseous coolant temperature on the transpiration cooling for porous wall in the supersonic flow // Int. J. Heat. Mass. Transfer, 2019. V.142. 118433. 9 pp.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СХЕМ МАККОРМАКА В ЗАДАЧАХ СОВРЕМЕННОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

А.Н. Максимов<sup>1,2</sup>, П.Ю. Георгиевский<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

e-mail: [andmax@imec.msu.ru](mailto:andmax@imec.msu.ru)

Для классической схемы МакКормака [1] второго порядка аппроксимации, как и любой схемы порядка выше первого (теорема С.К. Годунова), свойственна проблема возникновения нефизических осцилляций в окрестностях разрывов функций и их производных (явления Гиббса). Для обеспечения сквозного расчета течений с газодинамическими разрывами Дж. Борисом и Д. Буком был разработан метод коррекции потоков FCT [2]. Схемы типа FCT существенно подавляют осцилляции, но при этом не являются монотонными. Конечно-разностная схема, удовлетворяющая условию невозрастания полной вариации TVD (из которого следует сохранение монотонности), предложена Дэвисом [3].

В настоящей работе выполнено тестирование авторских реализаций схемы МакКормака в вариантах FCT и TVD для различных жестких газодинамических задач ([4] и других), на которых проверяется функциональность современных численных схем. В качестве одномерных тестов использовались задачи Сода (об ударной трубе), Но (о натекании газа на стенку), о разлете газа, о встречном взаимодействии взрывной и ударной волн, Шу-Ошера и другие. Двумерный вариант тестировался на различных случаях двумерной задачи Римана, а также задачах об имплозии, о сильном распределенном взрыве с противодавлением, Но (о течении газа к оси симметрии), о течении в канале с уступом и других. Некоторые примеры решений показаны на рисунке.

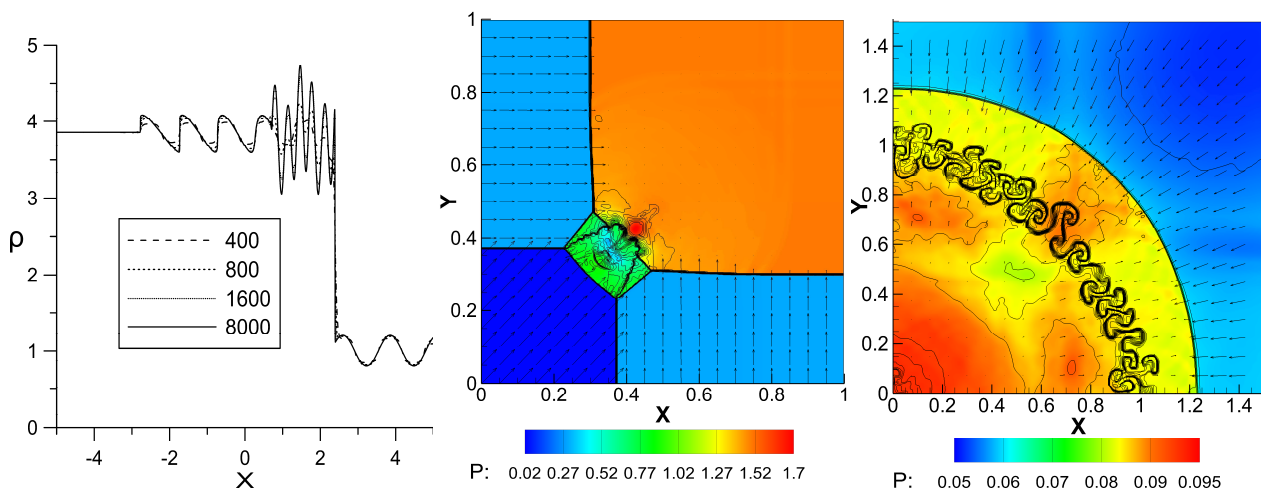


Рис. Примеры решения задач: Шу-Ошера (о движении ударной волны по переменному фону), одной из задач Римана (случай 4 ударных волн), о распределенном взрыве с противодавлением (поздняя стадия).

Установлено, что FCT и TVD варианты схемы МакКормака обеспечивают при соответствующей настройке (выборе сетки и ограничений на шаг по времени) результаты сопоставимые по качеству с более современными схемами высоких порядков аппроксимации. Несомненным достоинством тестируемых схем является их простота и высокая производительность.

Работа выполнена в соответствии с индивидуальным планом аспиранта и техническим заданием НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-01-00793-а).

1. MacCormack R.W. The Effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // AIAA Paper 1969. № 69-354.
2. Boris J.P., Book D.L. Flux-corrected transport I: SHASTA a fluid algorithm that works // J. Comp. Phys. 1973. 11. P. 38-69.
3. Davis S.F. TVD finite difference schemes and artificial viscosity // ICASE Report 1984. N 84-20.
4. R. Liska, B. Wendroff, Comparison of several difference schemes on 1D and 2D test problems for the Euler equations // SIAM Journal on Scientific Computing 25(3), 2003, P. 995-1017.

## ВОЛНЫ ДЕТОНАЦИИ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

*В.В. Марков<sup>1,2,4</sup>, В.А. Левин<sup>1,2,3</sup>, И.С. Мануйлович<sup>1,2</sup>*

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

<sup>2</sup> ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

<sup>3</sup> Математический институт имени В.А. Стеклова РАН, Москва

e-mail: [markov@mi.ras.ru](mailto:markov@mi.ras.ru)

В докладе представлены результаты теоретических исследований многомерных волн газовой детонации, связанных с решением проблем, возникающих при реализации детонации в устройствах, предназначенных для высокоскоростного сжигания горючих газовых смесей. В частности, обсуждаются различные подходы к инициированию детонации, среди которых: прямое инициирование посредством внешнего энергоподвода взрывом ВВ или электрическим разрядом. Взрывное воздействие приводит к формированию ударных волн, которые вызывают процесс интенсивного химического превращения смеси и трансформацию химической энергии в тепловую и кинетическую энергию продуктов самоподдерживающейся волны детонации. Прямое инициирование происходит, например, и при взаимодействии горючей смеси с препятствием, когда оно находится в сверхзвуковом потоке или движется со сверхзвуковой скоростью в покоящейся газе. В этих случаях, как и при взрыве, волна детонации является результатом трансформации ударной волны, источником которой, в отличие от энергии взрыва, является кинетическая энергия смеси в ее движении относительно препятствия. Механизм инициирования детонации за счет кинетической энергии горючей смеси имеет место и при кумуляции потока при определенной геометрии области движения смеси. В докладе представлены примеры численного решения соответствующих задач, иллюстрирующие описанные процессы. Кроме того, представлены решения задач о стабилизации, а точнее, о локализации волны детонации в камере сгорания некоторых конструкций детонационного реактивного двигателя, как в режиме пульсирующей, так и вращающейся детонации. Расчеты проводились на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов» с использованием оригинального программного вычислительного комплекса с современным интерфейсом, фактически являющемся виртуальной экспериментальной установкой, в котором могут быть реализованы математические модели и вычислительные алгоритмы различной степени сложности.

Работа поддержана грантом Министерства Образования и Науки РФ (договор №14.G39.31.0001 от 13.02.2017г.) и грантами РФФИ (№ 16-29-01092 и № 18-01-00883).

## РОЛЬ ЭФФЕКТА ГИГАНТСКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В ПРОЦЕССЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОРНАДО ИЗ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА

С.А. Маслов<sup>1,2</sup>, В.Л. Натяганов<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail: [sergm90@mail.ru](mailto:sergm90@mail.ru), [tenzor-home@yandex.ru](mailto:tenzor-home@yandex.ru)

Анализируется совокупное влияние на процесс формирования торнадо сильных возмущений атмосферного электрического поля (АЭП) под грозовым облаком [1] и эффекта гигантской диэлектрической проницаемости (ЭГДП) облака как суспензии микрокапель воды с тонким поверхностным двойным электрическим слоем. ЭГДП можно теоретически объяснить на основе обобщения задачи В.Г. Левича об электрокапиллярном дрейфе (в электрическом поле) хорошо проводящей капли с двойным слоем в другой жидкости, которое учитывает наличие магнитного поля и электровихревого течения внутри и вне капли. Генерация магнитного поля приводит к превращению двойного слоя в тройной электромагнитный слой (ТЭМС) с антипараллельными конвективными токами и ортогональным магнитным полем. При этом эффективная диэлектрическая проницаемость суспензии пропорциональна отношению радиуса капель к толщине ТЭМС, что для тонкого слоя обеспечивает ее большие значения и, соответственно, объясняет ЭГДП.

Воздействие ЭГДП на стадии перезарядки грозового облака с дипольного на трипольное и возмущений АЭП приводит к понижению электрогидродинамического давления под центром облака. Это благоприятствует образованию воронок торнадо и сопутствующих явлений [2] типа «воротника» или «рогов дьявола». ЭГДП также проявляется вблизи подстилающей морской поверхности, где концентрация микрокапель воды достаточно высокая за счет брызгообразования и обрушения волн. Падение электрогидродинамического давления может приводить к образованию каскада из брызг и пены над неустойчивым холмом приподнятой воды, движущимся вслед за облаком. Нередко каскад формируется задолго до касания воронки с подстилающей поверхностью. Об этом факте знали еще М.В. Ломоносов и А. Пуанкаре и писал Д.В. Наливкин [3], а в [1] представлена простейшая модель явления без учета ЭГДП.



Рис. Торнадо из трех воронок с «воротником» в основании центральной, г. Пула, Хорватия, 2013 (а); каскад под торцом воронки смерча [3] на Рейне (б).

1. Натяганов В.Л., Маслов С.А. Ломоносов и загадки природного электричества. Часть 4. Электромагнитные механизмы формирования торнадоподобного смерча // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 2014. № 2. С. 31-37.

2. Маслов С.А., Натяганов В.Л. Влияние зарядовой структуры грозовых облаков на формирование торнадоподобных вихрей // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 16-20.

3. Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука. 1969.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТУРБУЛЕНТНОЙ АНАЛОГИИ И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА К ИССЛЕДОВАНИЮ ТОРНАДО И УРАГАНОВ

С.А. Маслов<sup>1,2</sup>, В.Л. Натяганов<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail: [sergm90@mail.ru](mailto:sergm90@mail.ru), [tenzor-home@yandex.ru](mailto:tenzor-home@yandex.ru)

Исследована аналогия между уравнениями электродинамики и системой уравнений турбулентного течения идеальной несжимаемой среды. Система уравнений для турбулентного потока состоит из уравнений неразрывности, движения и турбулентных напряжений Рейнольдса [1], где гидродинамические характеристики раскладываются на средние и пульсационные составляющие. Показано, что для однородной и изотропной турбулентности связь между комбинациями некоторых гидродинамических характеристик среды имеет вид системы уравнений Максвелла, для которых также выполняется аналог закона Ома. В применении к тайфунам и торнадо этот результат означает возможность переноса турбулентных пульсаций в виде поперечных волн. Если учесть малую зарядовую плотность турбулентной среды за счет наличия гидратированных ионов и заряженных микрокапель, то система, аналогичная уравнениям Максвелла с законом Ома, будет также описывать пространственный перенос флуктуаций заряда, который может усиливать влияние электромагнитных факторов как на этапе формирования [2], так и в развитой стадии [3] тайфунов и торнадо.

На основе уравнений турбулентного движения и методики вейвлет-анализа [4] рассмотрен пульсационный механизм усиления завихренности в торнадо и тайфунах. Проведен анализ частотно-временной эволюции флуктуаций гидродинамических характеристик для следующих типичных случаев атмосферных вихрей: торнадо с широкой воронкой в Канзасе (США, 07.05.2002), сравнительно узкого смерча в Южной Дакоте (США, 24.06.2003), тайфунов Айрин (США, 08.2011) и Андреа (США, 06.2013). Вклад турбулентных пульсаций в генерацию азимутальной скорости может составлять до 25 – 35% от вклада растяжения вихревых линий. При этом для тайфунов и расплывчатых торнадо число Рейнольдса выше и, соответственно, влияние турбулентности на азимутальную скорость гораздо более сильное, чем в случае плотных смерчей.

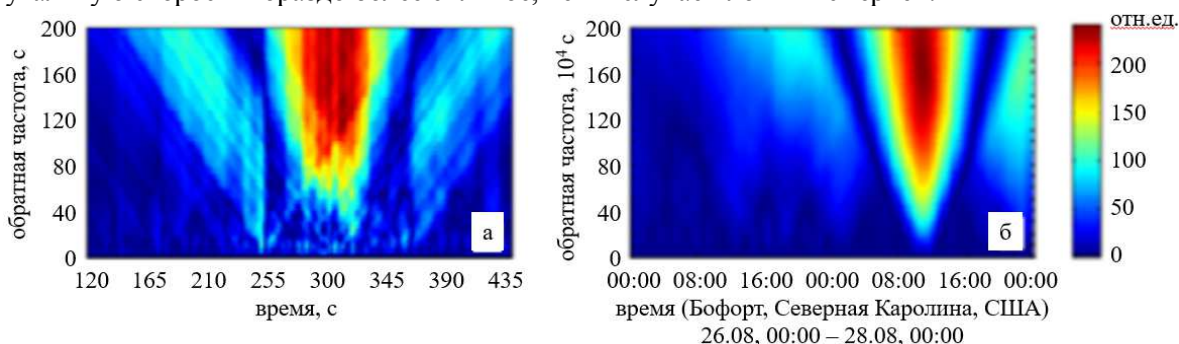


Рис. Вейвлет-спектры флуктуаций атмосферного давления для торнадо в Канзасе (а) и тайфуна Айрин (б).

1. Трошкин О.В. О распространении малых возмущений в идеальной турбулентной среде // Доклады АН СССР. 1983. Т. 273. № 3. С. 549-553.

2. Натяганов В.Л., Маслов С.А. Ломоносов и загадки природного электричества. Часть 4. Электромагнитные механизмы формирования торнадоподобного смерча // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 2014. № 2. С. 31-37.

3. Электровихревые течения / Под ред. Э.В. Щербинина. Рига: Зинатне, 1985.

4. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: РХД, 2004.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ НАТЕКАНИИ МИКРОСТРУИ НА НАГРЕВАЕМУЮ ПРЕГРАДУ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ РОДАМИНА

*Н.А. Маслов, В.М. Анискин, Т.А. Коротаева, Е.О. Цибульская*  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, Новосибирск  
e-mail: [nmaslov@itam.nsc.ru](mailto:nmaslov@itam.nsc.ru)

Изучение течений жидкости и газа на микромасштабах в настоящее время обладает большим потенциалом в связи с глобальной миниатюризацией устройств в различных областях техники. В частности, применение микроструй представляет интерес в различных теплообменных системах с мини-, микроразмерами и может значительно упростить задачи локального охлаждения.

В данной работе исследовалось распределение коэффициента теплоотдачи по поверхности нагреваемой пластины при натекании сверхзвуковой осесимметричной микроструи газа. Эксперименты, проведенные ранее с использованием тепловизионного метода визуализации и пластины из полиэфирэфиркетона, показали несоответствие с численным моделированием. Предполагаемая причина данного расхождения связана с большой проницаемостью пластика для инфракрасного излучения, из-за чего измеряемая температура оказывается усреднённой в слое толщиной, равной глубине проникновения инфракрасного излучения в пластик.

Следующей предложенной методикой является использование флуоресценции родамина Б для определения температуры поверхности. Данный метод визуализации основан на изменении интенсивности флуоресценции родамина при изменении его температуры (интенсивность флуоресценции линейно падает при повышении температуры). Родамин был разведен в полиуретановом лаке и нанесен на пластину из нержавеющей стали с толщиной 10 мкм так, что глубина проникновения возбуждающего излучения, а соответственно и слоя, по которому усредняется измеряемая температура, составляла порядка нескольких микрометров. Поверхность лака равномерно освещалась синим светодиодом, а изображение флуоресцирующей поверхности регистрировалось с использованием CMOS камеры. Были проведены эксперименты с не нагретой пластиной и при нескольких температурах нагрева. Для каждой температуры подложки был рассмотрен диапазон давлений от 1.1 до 1.9 атм в области дозвукового течения и до нерасчетности  $n = 4$  в области сверхзвукового течения. Характерное распределение температуры в цветовых градиентах на поверхности пластины представлено на рисунке ниже.

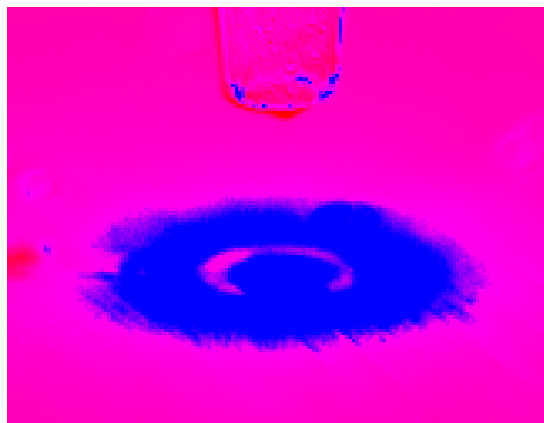


Рис. Распределение температуры на поверхности пластины. Сопло с диаметром 300 мкм, расстояние от сопла 0,9 мм,  $n = 4$ , температура пластины 55°C.

Данная модификация позволила значительно увеличить разрешающую способность метода для определения температуры на поверхности пластины в сравнении с тепловизионным методом. Сравнение с численным моделированием показало хорошее совпадение данных на большей части поверхности пластины, за исключением области непосредственного натекания струи на стенку и разворота потока, где наблюдается сложное периодическое вихревое движение.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 17-19-01157).



## РАЗРАБОТКА АМФИБИЙНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ КРУГЛОГОДИЧНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ

*Ю.Ю. Мерзликін*

Научно-исследовательский Московский комплекс  
Центрального аэрогидродинамического института им. Н.Е. Жуковского, Москва  
e-mail: ymerzlikin@gmail.com

Ускоренное развитие воздушных судов амфибийного и безаэродромного базирования является для нашей страны насущной необходимостью и соответствует целям обеспечения экономической и национальной безопасности. Их применение позволит существенно расширить транспортную доступность регионов, в том числе активно осваиваемых территорий Сибири, Арктики, Дальнего Востока. Разрабатываемый экраноплан с шасси на воздушной подушке, призван обеспечить круглогодичное движение по стратегически важным направлениям – магистральным рекам, в том числе с использованием взлетно-посадочных полос с различными типами покрытия.

Работа над новым проектом началась с аналитических исследований эксплуатационных характеристик амфибийных летательных аппаратов. В результате для регулярной работы на внутренних водоемах был выбран экраноплан типа А с шасси на воздушной подушке – прототипом которого можно считать пассажирский экраноплан «Ракета-2». В процессе работы были сформированы аэрогидродинамические компоновки линейки судов вместимостью 20, 50 и 100 пассажиров, а также двухместного учебно-тренировочного ЛА.

В рамках научно-исследовательской работы ФГУП «ЦАГИ» была создана модель амфибийного ЛА с шасси на воздушной подушке (ЛА с ШВП) в основе моделирования которой принимался критерий Фруда, а также геометрические, весовые и энергетические параметры. Модель ЛА с ШВП выполнена с нагнетателем воздушной подушки (ВП) для создания избыточного давления под фюзеляжем. Шасси состоит из двух надувных баллонов, расположенных вдоль длины фюзеляжа, носового ограждения в виде фартука и кормового отклоняемого щитка. Также модель оснащена отклоняемыми органами управления ЛА (закрылки, интерцепторы, под крыльевые щитки, руль высоты и рули направления). Использовано крыло малого удлинения с поплавками на концах консолей, имеющими гидродинамические обводы и выполняющими роль шайб.

Экспериментальные исследования по определению аэродинамических характеристик ЛА с ШВП были проведены в АДТ Т-5 НИМК ЦАГИ при скорости потока 30 м/с с варьируемыми параметрами:

по углу атаки и рыскания, высоте над экраном, моделирующим поверхность ( $\bar{h} = \frac{h}{b}$  - высота над экраном в долях хорды крыла  $b$ ), вдаль ( $\bar{h} = \infty$ ) и вблизи от экрана поверхность ( $\bar{h} = 0,17 \div 0,6$ ) с работающим и неработающим нагнетателем ВП, с выпущенным и поджатым кормовым щитком ШВП при различных углах отклонения рулей высоты (от  $-20^\circ$  до  $+20^\circ$ ) и направления ( $+10^\circ/+10^\circ$  и  $+20^\circ/+20^\circ$ ), с убранными и выпущенными закрылками, а также с выпущенными интерцепторами и с выпущенными под крыльевыми щитками.

В опытовом бассейне НИМК ЦАГИ проведены экспериментальные исследования и получены аэрогидродинамические характеристики модели амфибийного ЛА с ШВП на взлетно-посадочных режимах с варьированием центровки на ровной и взволнованной водной поверхности, а также исследования на остойчивость (способность аппарата противостоять внешним силам, вызывающим крен, возвращаясь в исходное состояние равновесия) экраноплана со статической воздушной подушкой на воде.

Предусматривается, что проектируемая машина сможет осуществлять взлет–посадку со льда, торосов, мелководья, элементарно подготовленных грунтовых площадок и будет использоваться как для грузо- и пассажирских перевозок, так и в медицинских целях и при спасательных операциях. Воздушное судно в основном исполнении рассчитано на 20 пассажиромест, как наиболее востребованное на сегодняшний день в удаленных регионах Российской Федерации.



## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОТРОПНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЭЛАСТОМЕРОВ

*Д.И. Меркулов, Д.А. Пелевина*

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: merkulovdima@mail.ru

Значительное количество научных работ посвящено изучению реологических свойств намагничивающихся эластомеров. В работе [1] экспериментально изучены крутильные колебания образцов из феррогеля, и показано, что эти колебания более интенсивно затухают в присутствии поперечного магнитного поля. Вязкоупругие свойства и остаточные деформации цилиндрических образцов из намагничивающихся эластомеров в продольном магнитном поле исследованы в [2].

В данной работе, в отличие от [1] и [2], крутильные деформации цилиндрических тел из намагничивающихся эластомеров исследуются с учетом релаксации напряжений в магнитном поле. В статическом и динамическом экспериментах исследованы вязкоупругие свойства намагничивающихся эластомеров в однородном магнитном поле. Показано, что деформации образца из чистого силикона подчиняются модели Кельвина – Фойгта. А для описания деформаций образца с ферромагнитными частицами (для которого обнаружена релаксация напряжений) использована известная из литературы четырехпараметрическая модель. В статическом эксперименте обнаружена релаксация напряжений образца с феррочастицами в магнитном поле. Из статического и динамического экспериментов определены зависимости коэффициентов вязкости и модулей сдвига в четырехпараметрической модели от напряженности магнитного поля.

Также исследованы реологические свойства анизотропных намагничивающихся эластомеров в зависимости от напряженности и направления приложенного магнитного поля. Рассмотрены два случая: анизотропия параллельна и перпендикулярна вектору напряженности магнитного поля. Обнаружено различие в реологических свойствах для данных двух случаев при одинаковом составе образцов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проектов № 18-31-00066 мол\_а (Экспериментальное исследование реологических свойств намагничивающихся эластомеров) и № 18-501-12011 ННИО\_а.

1. S. Abramchuk, E. Kramarenko, D. Grishin, G. Stepanov, L.V. Nikitin, G. Filipcsei, A.R. Khokhlov, M. Zrinyi. Novel highly elastic magnetic materials for dampers and seals: part II. Material Behaviour Magnetic field // Polym. Adv. Technol. 2007. V. 18. pp. 513–518.

2. D.I. Merkulov, A.V. Muravlev, E.D. Martynova, D.A. Pelevina, V.A. Turkov, V.A. Naletova. Research of viscoelastic properties of magnetizable elastomers // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2019. V. 470. pp. 81–84.

## ПАРОГАЗОВАЯ КАВИТАЦИЯ В ГИДРОФОБНОЙ ЖИДКОСТИ

А.А. Монахов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [monahov06@mail.ru](mailto:monahov06@mail.ru)

Представлены результаты экспериментального исследования течения жидкости в зазоре между вращающимися эксцентричными цилиндрами. Такие условия часто встречаются в различных технических устройствах (затворы, подшипники). Течение характеризуется областями повышенного давления перед линией минимального зазора и пониженного давления за этой линией. Поскольку в жидкости практически всегда есть растворенный газ, то понижение локального давления ниже давления растворенного газа, приводит к образованию газовой кавитации в виде дискретных газовых пузырьков. Дискретность объясняется наличием шероховатости на поверхности цилиндров. Она модулирует случайным образом величину зазора между цилиндрами и, соответственно, падение давления. Возникший первый кавитационный пузырек имеет на своей границе раздела с жидкостью поверхностный заряд, который препятствует объединению с последующими пузырьками. Обзор работ по газовой кавитации дан в [1]. При понижении давления ниже паров насыщения, возникает паровая кавитация. Число работ здесь значительно меньше. Для чистоты эксперимента необходимо полностью удалить растворенный газ. Как показано в [2], уменьшение зазора между цилиндрами приводит к смещению точки минимального давления вниз по потоку и росту его падения. При скольжении цилиндров между собой с минимальным зазором, возникает падение давления до точки кипения воды ( $17_{\text{mm Hg}}$ ), которая в небольших количествах присутствует в гидрофобной жидкости. В области кавитации возникает парогазовая смесь растворенного газа и паров воды. После остановки скольжения, пропадает растягивающее напряжение и давление возрастает до атмосферного. Это приводит к конденсации паров воды в микрокапли микронного размера и формированию трехфазного кавитационного пузырька. В отличие от газового пузырька, здесь на границе раздела газ – жидкость размещаются микрокапли воды, приобретая положительный заряд, а вся оболочка кавитационного пузырька отрицательный. Таким образом, трехфазный кавитационный пузырек имеет свое собственное электрическое поле и реагирует на присутствие соседних пузырьков. Под действием отрицательного поля соседнего пузырька происходит перемещение положительно заряженной микрокапли воды по границе раздела газ – жидкость. На рис. представлена динамика взаимного влияния двух пузырьков. Левый пузырек перемещается относительно правого со скоростью 0.03 мм/с. Интервал между кадрами 0.6с. Двойной стрелкой показано взаимное расположение положительно заряженных областей на каждом кавитационной пузырьке. За счет своего поля пузырьки могут как взаимно отталкиваться, так и объединяться с явлением электролюминесценции.

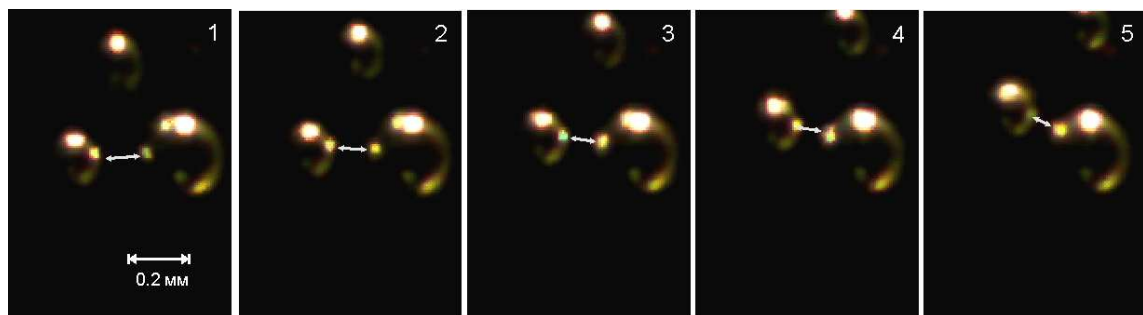


Рис. Взаимное влияние электрических полей пузырьков на положение положительно заряженную микрокаплю воды.

Таким образом, показано возможность образования трехфазного кавитационного пузырька с собственным электрическим полем.

1. Monakhov A. A., Chernyavski V. M., Shtemler Yu, Bounds of cavitation inception in a creeping flow between eccentric cylinders rotating with a small minimum gap. //Phys. Fluids **25**, 093102 (2013).
2. Монахов А.А., Котелкин В.Д. Гидродинамика течения жидкости в зазоре между цилиндром и движущейся стенкой.// Известия РАН МЖГ, №3, 2017.

## РЕЗОНАНСНЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ БИНАРНОЙ СМЕСИ

*И.В. Моршнева*

Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ЮФУ, Ростов-на-Дону  
e-mail: [ivmorshneva@sfedu.ru](mailto:ivmorshneva@sfedu.ru)

Рассматривается задача о возникновении конвективных режимов в горизонтальном бесконечном слое двухкомпонентной смеси, состоящей из не реагирующих компонент. Предполагается, что границы слоя свободные, плоские и на них отсутствуют касательные напряжения. Значения температуры и концентрации примеси на границах считаются фиксированными. Расход жидкости через поперечное сечение предполагается равным нулю. Перекрестные эффекты - термодиффузия и диффузионная теплопроводность - не учитываются. Возникающие в слое бинарной смеси движения описываются уравнениями конвекции смеси в приближении Обербека-Буссинеска в форме, полученной Шапошниковым И.Г. [1].

Уравнения движения имеют стационарное (основное) решение, соответствующее покоящейся смеси, в предположении, что градиенты температуры и концентрации постоянны и вертикальны. Рассматриваются плоские возмущения, периодические по горизонтальной переменной. Уравнения для возмущений инвариантны относительно круговой симметрии.

Известно, что в отличие от чистой среды, основной стационарный режим смеси может оказаться неустойчивым относительно колебательных возмущений [2]. Данная работа посвящена изучению конвективных режимов, которые возникают в окрестности точки пересечения двух нейтральных кривых колебательной потери устойчивости основного режима. Точке пересечения нейтральных кривых (точке пересечения бифуркаций) в силу симметрии отвечает четыре независимых нейтральных моды. Когда параметры системы изменяются в малой окрестности точки пересечения бифуркаций, становится возможным сильное взаимодействие мод, которое описывается нелинейной системой амплитудных уравнений на центральном многообразии. Впервые системы амплитудных уравнений для задачи Куэтта-Тейлора, обладающей цилиндрической симметрией, были построены в работах В.И. Юдовича [3], Chossat P., Demay Y., Iooss G. [4]. Вид амплитудных систем зависит от соотношений между волновыми числами, а также между частотами. Впервые все возможные резонансные системы для задач с цилиндрической симметрией были получены В.И. Юдовичем и С.Н. Овчинниковой [5].

В данной работе построены резонансные амплитудные системы для рассматриваемой задачи конвекции смеси, обладающей круговой симметрией. Найдены резонансные режимы этих систем на инвариантных подпространствах. Показано, что в условиях общего положения возможно возникновение периодических решений типа бегущих волн и их нелинейных суперпозиций, а также возникновение квазипериодических решений. Получены явные выражения для асимптотик возникающих решений и для величин, определяющих характер их ветвления и устойчивость. Проведен сравнительный анализ резонансных режимов, полученных для каждой из амплитудных систем.

1. Шапошников И.Г. К теории конвективных явлений в бинарной смеси // ПММ. 1953. Т.17, № 5. С. 604.
2. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости // Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва "Наука". 1972. 392 с.
- 3 Юдович В.И. Переходы и возникновение хаоса в течениях жидкости // Аннот. докладов 6-го Всесоюз. съезда по теор. и прикл. механике. Ташкент: ФАН. 1986. С. 661.
4. Chossat P., Demay Y., Iooss G. Interaction de modes azimutaux dans le probleme de Couette-Taylor // Arch. Rational. Mech. Anal. 1987. V. 99. P. 213.
5. Yudovich V. I., Ovchinnikova S. N. Resonances in the intersections of bifurcation in the Couette-Taylor problem // Patterns and Waves. Saint Petersburg. 2003. P. 55.

## УДАРНЫЕ КОНТУРА МАКСИМАЛЬНОЙ ТЯГИ

*А.Р. Мустаев, Н.А. Остапенко*

Научно-исследовательский институт механики МГУ, Москва  
email: [sentry-cod4@mail.ru](mailto:sentry-cod4@mail.ru), [ostap@imec.msu.ru](mailto:ostap@imec.msu.ru)

Аналитически и численно поставлены и решены плоские задачи о контуре и сопле максимальной тяги с ударными волнами в сверхзвуковом потоке.

Постулируется, что оптимизируемый контур, соединяющий две заданные точки А и С, причем  $X_A < X_C$  и  $Y_A < Y_C$ , состоит из двух отрезков. Первый из них прямолинейный разворачивает однородный сверхзвуковой поток, имеющий место при  $X=X_A$  и  $Y<Y_A$ , в волне разрежения Прандтля-Майера с центром в точке А на некоторый, заранее неизвестный угол  $\theta$ , разгоняя его до значительных сверхзвуковых скоростей. Второй – в общем случае криволинейный, с неизвестной формой, следует за первым с изломом в точке сопряжения В,  $X_A < X_B < X_C$ , где образуется ударная волна, повышающая давление на этом отрезке контура.

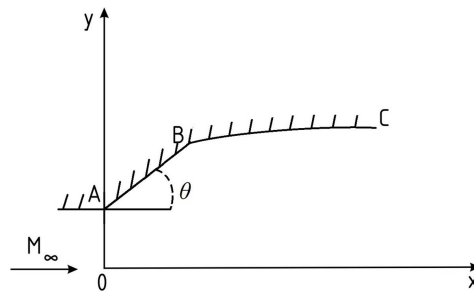


Рис. 1. Оптимизируемый плоский контур.

Первая из рассмотренных задач носит модельный характер и относится к оптимальному профилированию хвостовой части тела с плоской нижней (или верхней) поверхностью, не возмущающей сверхзвуковой поток. В некоторой точке А указанная поверхность терпит излом, за которым контур тела должен прийти в некоторую точку С. В соответствии с высказанным постулатом ищется такой контур, соединяющий точки А и С, который в своей точке излома генерирует ударную волну и доставляет максимум функционалу тяги. Взаимодействие сверхзвукового потока за волной Прандтля-Майера со стенкой на участке ВС моделируется по формуле Ньютона. Показано, что экстремаль состоит из двух отрезков прямых, причем второй составляет с первым угол  $\theta/2$ . Точное решение соответствующей оптимизационной задачи в классе отрезков прямых значительно расширяет область существования "ударных" контуров.

Вторая задача относится к построению плоского сверхзвукового сопла максимальной тяги с заданными координатами входа ( $X_A = 0, Y_A > 0$  – критическое сечение сопла, в котором задано число Маха  $M=1.01$ ) и выхода ( $X_C, Y_C$ ). Для определения начальной формы экстремали на отрезке  $[X_B, X_C]$  течение моделируется потоком от сверхзвукового источника со звуковой линией, проходящей через точку А. Взаимодействие потока от источника со стенкой сопла на отрезке  $[X_B, X_C]$  моделируется по формуле Ньютона. Показано, что каждый луч, выходящий из центра источника под некоторым углом  $\varphi \leq \theta$ , составляет в точке пересечения с элементарным отрезком экстремали угол  $\varphi/2$ . Следовательно, криволинейный отрезок экстремали является параболой, в фокусе которой располагается центр источника. С целью уточнения начального оптимального контура ударного сопла для расчета давления на криволинейной стенке на отрезке  $[X_B, X_C]$  использована формула Ньютона-Буземана.

С использованием построенного вычислительного кода, в котором использован метод сквозного счета, проведены параметрические расчеты течения в сверхзвуковой части сопла, состоящего из конического с углом  $\theta$  и криволинейного участков, и его тяги, которая сравнивается с тягой эквивалентного конического сопла. Установлено, что в зависимости от определяющих параметров задачи тяга оптимального сопла, состоящего из прямолинейного отрезка и сопрягающегося с ним криволинейного отрезка, может превышать на несколько процентов тягу эквивалентного сопла с прямолинейной стенкой.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00182).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКИХ ДОЗВУКОВЫХ МИКРОСТРУЙ

К.А. Мухин<sup>1,2</sup>, В.М. Анискин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск

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

e-mail: [muhinkos@mail.ru](mailto:muhinkos@mail.ru)

Целью экспериментального исследования является получение данных о структуре и характеристиках плоских дозвуковых микроструй и сравнение полученных параметров с известными данными для макроструй.

В экспериментах исследовались микроструи, истекающие из плоского сопла высотой 83,3 мкм и шириной 3823 мкм. Максимальная скорость газа на срезе сопла составляла 31 м/с, что соответствовало максимально возможному расходу 500 мл/мин. Диапазон чисел Рейнольдса варьировался от 24 до 154. Дозвуковая струя истекала в атмосферу, боковые стенки у струи отсутствовали. Рабочим газом являлся воздух комнатной температуры.

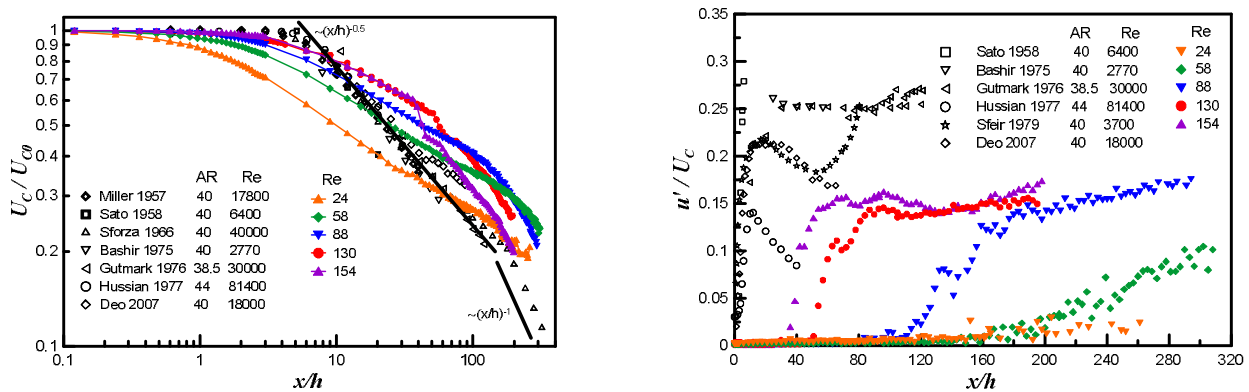


Рис. 1. Распределение скорости (слева) и уровня турбулентности (справа) вдоль осевой линии струй.

Зависимость скорости микроструй вдоль осевой линии показана на рис. 1, слева. Здесь  $U_c$  – скорость газа вдоль осевой линии струи,  $U_{c0}$  – максимальная скорость газа на срезе сопла. Там же приведены экспериментальные данные для турбулентных макроструй [1-5] при различных числах Рейнольдса.

На рис. 1, справа приведены распределения уровня турбулентности вдоль осевой линии микроструй и макроструй. Видно, что уровень турбулентности макроструй на срезе сопла значительно превышает уровень турбулентности микроструй, он резко растет и на 10-20 калибрах достигает максимального значения. Для микроструй уровень турбулентности вначале практически нулевой. Однако затем с увеличением расстояния от сопла уровень турбулентности возрастает, что связано с турбулизацией течения.

В работе определены темпы падения скорости дозвуковых микроструй и выполнено сравнение с турбулентными макроструями, а также определен характер расширения ламинарных микроструй, который оказался существенно ниже, чем турбулентных макроструй.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-31-00272 и частичной поддержке гранта РФФИ 17-19-01157.

1. Sato, H. The stability and transition of a two-dimensional jet // J. Fluid Mech. 1960. 7. P. 53–80.
2. Bashir J., Uberoi M. S. Experiments on turbulent structure and heat transfer in a two - dimensional jet // Physics of Fluids. 1975. 18(4). P. 405-410.
3. Gutmark, E., Wagnanski, I. The planar turbulent jet // J. Fluid Mech. 1976. 73(3). P. 465–495.
4. Hussain, A. K. M. F., Clark, A. R. Upstream influence on the near field of a planar turbulent jet // Phys. Fluids. 1977. 20(9). P. 1416-1426.
5. Deo R. C., Nathan G. J., Mi J. Comparison of turbulent jets issuing from rectangular nozzles with and without sidewalls // Experimental Thermal and Fluid Science. 2007. 32. P. 596–606.



## ФОКУСИРОВКА ЭНЕРГИИ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ

*Р.И. Нигматулин*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: [nigmar@ocean.ru](mailto:nigmar@ocean.ru)

Изложены экспериментальные и теоретические основы так называемого пузырькового термояда.

В эксперименте при температуре около  $0^\circ\text{C}$  в центре цилиндрической колбы с дейтерированным ацетоном при резонансной частоте 20 кГц и сфокусированном акустическом воздействии создается кавитационный сферический кластер диаметром  $\sim 10^{-2}$  м из сферических пузырьков. Под действием акустического поля эти пузырьки совершают объемные осцилляции с острым коллапсом в стадии сжатия. Около 50 акустических осцилляций кластер сохраняет окосферическую форму. В стадиях коллапсов кластер излучает с частотой  $\sim 2000\text{ с}^{-1}$  импульсы быстрых нейтронов (2,5 МэВ). Производительность нейтронов  $\sim 10^6\text{ с}^{-1}$ . Параллельно с этой же производительностью идет образование ядер трития, что соответствует термоядерной реакции  $\text{D} + \text{D}$ .

Численное исследование показало, что в центральных пузырьках кластера с паром достаточно большой молекулярной массы в стадии коллапса образуются сходящиеся к центрам пузырьков сферические ударные (микроударные) волны, которые фокусируют энергию в центрах пузырьков. Во время отражения этих ударных волн от этих центров образуются экстремальные сферические (нано-сферические) зоны. Эти зоны имеют размер  $\sim 10^{-7}$  м, температуру  $\sim 10^8\text{ K}$ , плотность  $\sim 10^4\text{ кг/м}^3$  в течение  $\sim 10^{-12}$  с. За это время в такой нано-сферической зоне образуется  $\sim 10$  термоядерных нейтронов и ядер трития.

Парадоксально, но именно кластерная (а не стримерная) кавитация и достаточно высокая молекулярная масса пара (что обеспечивает в паре низкую скорость звука) D-ацетона  $\text{C}_3\text{D}_6\text{O}$  (молекулярная масса  $M=64$ , показатель адиабаты  $\gamma=1,125$ ) по сравнению, например, с паром дейтерированной воды  $\text{D}_2\text{O}$  в условиях наших экспериментов являются необходимыми условиями образования сходящихся сферических микроударных волн. Именно эти волны создают достаточную для термоядерных актов фокусировку энергии в нано-сферических зонах около центров пузырьков.

Аномальная фокусировка приводит к образованию наноалмазов в пузырьках в бензоле и толуоле при воздействии на них ударными волнами большой амплитуды ( $\sim 100$  бар).

Показано, что более подходящими для реализации сильного сжатия среды в коллапсирующем паровом пузырьке посредством сходящихся ударных волн являются жидкости с большой молекулярной массой и малым показателем адиабаты пара. По этим параметрам детерированный ацетон  $\text{C}_3\text{D}_6\text{O}$  существенно превосходит воду, а бензол несколько предпочтительнее ацетона. Радикально более предпочтительней, чем бензол, является тетрадекан  $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$  ( $M=198$ ,  $\gamma=1.0265$ ). Расчеты показали также, что ударные волны в пузырьках в тетрадекане могут образовываться при намного более высоких температурах жидкости, чем в случаях ацетона и бензола, для которых температура жидкости должна была быть около  $0^\circ\text{C}$ .

Возможность сверхсжатия содержимого пузырька в тетрадекане при высоких температурах около  $400^\circ\text{C}$  является определенным преимуществом, если рассматривать рассматриваемое явление как перспективу получения энергии за счет термоядерной реакции в центре пузырьков. Большое значение имеет большая устойчивость сферически симметричной фокусировки в пузырьках с паром с большей молекулярной массой.

Последние исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (№17-11-01135).

## НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРИРОДУ ПРОДОЛЬНЫХ ВИХРЕЙ В ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ

*Н.В. Никитин, В.О. Пиманов*

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [nvnikitin@mail.ru](mailto:nvnikitin@mail.ru)

Вытянутые вдоль основного потока области концентрированной продольной завихренности (продольные вихри) часто встречаются в турбулентных течениях с градиентом скорости. Связанные с ними поперечные движения вызывают характерную поперечную модуляцию (полосчатые структуры) в распределении продольной скорости. Считается, что с циклическим возникновением и разрушением полосчатых структур в пристенных течениях связан цикл самоподдержания турбулентности. Причины возникновения продольных вихрей в турбулентных течениях изучались во множестве работ. Установлено, в частности, что пульсации, вырастающие на фоне полосчатых структур, поддерживают вихри. Предложено несколько моделей нелинейной обратной связи, обеспечивающей такую поддержку. Консенсуса в этом вопросе, однако, до сих пор не достигнуто. В большинстве работ считается, что турбулентные пульсации возникают в результате неустойчивости модулированного распределения продольной скорости, при этом влиянием продольных вихрей, вызывающих такую модуляцию, пренебрегается. В настоящей работе показывается, в частности, что наличие продольных вихрей существенным образом определяет форму неустойчивых возмущений, что обеспечивает обратную связь, необходимую для поддержания всего цикла образования и разрушения пристенных структур.

Путем численного решения уравнений Навье-Стокса воспроизведены пространственно-локализованные решения, моделирующие так называемые турбулентные порывы («паффы»), возникающие в трубах при переходных значениях числа Рейнольдса. Следуя итерационной процедуре [1] получено неустойчивое предельное решение на сепаратрисе, разделяющей в фазовом пространстве области притяжения ламинарного (течения Пуазейля) и турбулентного решений. Это решение наследует ряд качественных признаков турбулентного решения, но оказывается гораздо более простым, что позволяет провести исчерпывающее его изучение. В этом решении удалось выявить, в частности, механизм поддержания полосчатых структур и продольных вихрей, порождающих эти структуры [2]. Суть этого механизма состоит в том, что продольные вихри так деформируют пульсационное поле, что нелинейное взаимодействие пульсаций дает положительный вклад в генерацию продольных вихрей. Таким образом, обеспечивается обратная связь.

Проведен численный анализ турбулентных течений в трубах квадратного сечения [3]. Показано, что в основе образования продольных вихрей, порождающих вторичные течения Прандтля 2-го рода, может лежать аналогичный механизм. Исследованы решения уравнений Навье-Стокса, моделирующие развитые турбулентные течения в плоском канале. Полученные результаты свидетельствуют, что обнаруженный механизм поддержания продольных вихрей является вероятным механизмом образования пристенных полосчатых структур в развитых турбулентных течениях.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке гранта РФФИ № 18-71-10075.

1. Avila M., Mellibovsky F., Roland N., Hof B. Streamwise-localized solutions at the onset of turbulence in pipe flow // *Phys. Rev. Lett.* 2013. 110. 224502.

2. Никитин Н.В., Пиманов В.О. О поддержании колебаний в локализованных турбулентных структурах в трубах // *Изв. РАН. МЖГ.* 2018. №1. С. 68–76.

3. Никитин Н.В., Пиманов В.О., Попеленская Н.В. К вопросу об образовании вторичных течений Прандтля 2-ого рода // *ДАН.* 2019. Т. 484. № 4. С. 1–5.

## ВИБРАТОР ЛАНДАУ-ЛИФШИЦА, ГЕНЕРИРУЮЩИЙ КОЛЕБАНИЯ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЧЕНИЯХ ГАЗА И ЖИДКОСТИ

В.М. Овсянников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московская государственная академия водного транспорта – филиал ГУМРФ, Москва

<sup>2</sup>Ноябрьский институт нефти и газа - филиал ТИУ, Ноябрьск

e-mail: [OvsyannikovVM@yandex.ru](mailto:OvsyannikovVM@yandex.ru)

Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшиц [1] методом Лайтхилла акустической аналогии вывели неоднородное волновое уравнение, правая неоднородная часть которого была получена за счет сохранения конвективных членов уравнения движения. Неоднородные члены волнового уравнения ответственны за генерацию периодических волн в течении сжимаемого газа. Входящие в них суммы были вычислены и выражены через якобианы второго порядка вектора скорости. Волновое уравнение

$$c_0^{-2} \partial^2 p / \partial t^2 - \partial p^2 / \partial x^2 - \partial^2 p / \partial y^2 - \partial^2 p / \partial z^2 = -\rho_0 J,$$

где  $J = [\partial(u, v) / \partial(x, y) + \partial(v, w) / \partial(y, z) + \partial(w, u) / \partial(z, x)]$

Для плоского вращательного движения было получено, что якобиан второго порядка равен квадрату угловой скорости вращения. Интенсивность генерируемых автоколебаний при вращательных движениях

$$I[\text{Вт/м}^2] = [\rho_0 W^2 / (16 \pi^2 c_0 r^2)] \{[(2+1)J]^2\}$$

Здесь  $W$  – объем, в котором сумма якобианов  $J$  имеет большое абсолютное значение;  $r$  – радиус-вектор точки наблюдения. В скобках множитель содержит коэффициент 2, отражающий вклад в интенсивность конвективных членов уравнения движения [1], и коэффициент 1, отражающий вклад в интенсивность членов второго порядка малости уравнения неразрывности Эйлера [2].

Были проведены расчеты автоколебаний, возникающих при потенциальном обтекании тел и при вращательных течениях.

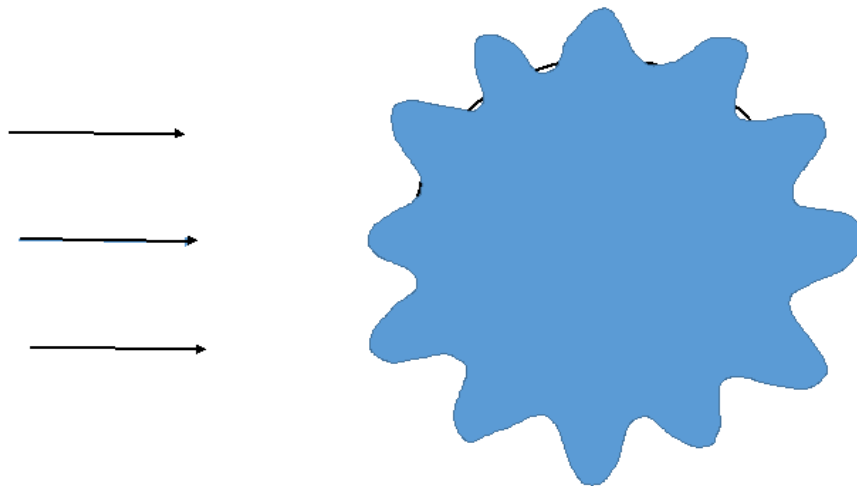


Рис. 1. Система стоячих волн, образующихся на поверхности цилиндра, обтекаемого потенциальным потоком.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

2. Овсянников В.М. Сопоставление дополнительных слагаемых второго порядка малости для конечно-разностных уравнений Эйлера и малых добавок в регуляризованных уравнениях гидродинамики // ЖВМиМФ. 2017. Т. 57. № 5. С. 876-880. DOI 10.7868/S004446691705009X.

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ВОЛНОЛЕТЫ НА ПЛОСКИХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ

*Н.А. Остапенко, С.С. Страдомский*  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
email: [ostap@imec.msu.ru](mailto:ostap@imec.msu.ru), [sergei.stradomsky@yandex.ru](mailto:sergei.stradomsky@yandex.ru)

Поставлена и решена задача о форме волнолета максимального аэродинамического качества, построенного на плоской ударной волне и имеющего плоскость симметрии, при двух изопериметрических условиях: заданы удельный объем волнолета и коэффициент подъемной силы. Верхняя поверхность волнолета 1 (рис. 1) направлена по набегающему потоку и не возмущает его. Нижняя поверхность волнолета 2 – цилиндрическая поверхность, образующие которой составляют угол  $\alpha$  с невозмущенным потоком. Передняя кромка волнолета 4 – кривая, расположенная в плоскости ударной волны 3, составляющей угол  $\theta$  с направлением набегающего потока. Кроме давления в модели взаимодействия потока с поверхностями волнолета присутствует локальный коэффициент трения. Экстремаль – распределение длины хорды волнолета по оси  $z$  – находится с использованием метода локальных вариаций, адаптированного к вариационной задаче с двумя изопериметрическими условиями. Показано, что при специально нормированных коэффициентах подъемной силы  $C_y$  и силы сопротивления  $C_x$  задача сводится к поиску минимума нормированного функционала  $C_x$ , зависящего от четырех определяющих параметров:  $\alpha$ ,  $M$  – числа Маха,  $C$  – тангенса угла наклона донного среза к оси  $z$  и  $m$  – параметра, характеризующего состояние пограничного слоя.

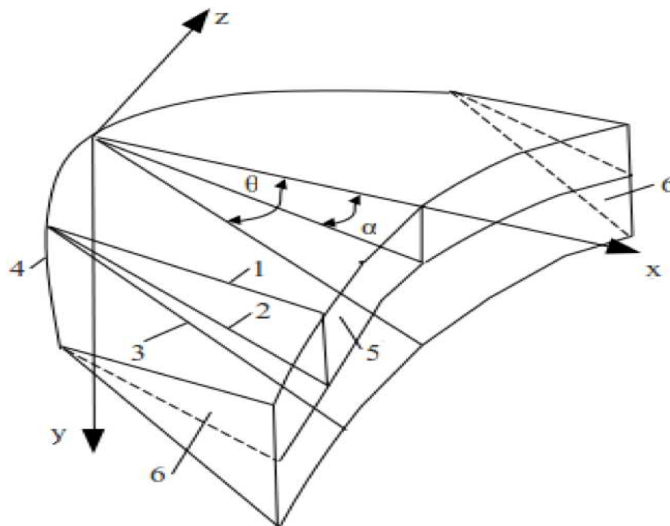


Рис. 1. Волнолет, построенный на плоской ударной волне.

Установлено многообразие форм оптимальных волнолетов в плане в зависимости от коэффициента подъемной силы, удельного объема, угла скоса донного среза и ограничения на величину теплового потока на передней кромке.

Определено влияние определяющих параметров, таких как  $\alpha$ ,  $M$  на оптимальную форму волнолета. Показано, что экстремаль не зависит от числа Рейнольдса, а только от параметра  $m$ , характеризующего состояние пограничного слоя. В качестве начального контура волнолета в плане принимался контур, состоящий из отрезков прямых, который ни при каких сочетаниях определяющих параметров не является экстремалью.

Показано, что максимальное аэродинамическое качество достигается у волнолетов с отрицательным углом стреловидности донного среза. При ограничении величины теплового потока на передней кромке в составе экстремали могут существовать две дуги краевого экстремума. Подтверждено установленное ранее влияние масштаба волнолета на его аэродинамическое качество. Показано, что переход от оптимальной формы волнолета с боковыми шайбами, препятствующими стеканию газа с боковых кромок, к форме без боковых шайб происходит скачком.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00182).

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАВИТАЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ**

*С.А. Очеретяный, И.И. Козлов, В.В. Прокофьев*  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: prokof@imec.msu.ru

Изучаются кавитационные автоколебания, возникающие при течении жидкости в магистрали с двумя сопротивлениями: первое сопротивление кавитатор, за которым образована искусственная вентилируемая каверна со средним давлением большим атмосферного, через второе сопротивление (сопло) происходит истечение жидкости и газа в атмосферу. При достаточно больших поддувах газа и небольших объемах каверны возникают автоколебательные режимы с сильными пульсациями давления, как в каверне, так и в подводящих системах. Экспериментальные исследования были проведены на плоской струйной установке. Вода в установку поступала через бак-демпфер, где пульсации давления выравнивались с помощью воздушной подушки, измерения проводились при условии, что клапан, регулирующий подачу воздуха в рабочую часть установки, находится в критическом режиме. Таким образом, пульсации имели место только в некоторой ограниченной области.

Показано, что возникающие при автоколебаниях различные частотные моды связаны с характером распространения волн вдоль границы каверны. Причем, возникновение мод, зависит не только от характеристик течения, но и от свойств напорного трубопровода и объема каверны (при одинаковых геометрии и гидравлических условиях течения наблюдалось до 4-х частотных мод автоколебаний).

При увеличении поддува газа, при достаточно высоком среднем давлении в каверне получены режимы прерывистого истечения жидкости из сопла. Ставится вопрос о возможности использования режима автоколебаний для создания на выходе пульсирующих струй. Прямыми измерениями показано, что при ударе возникающей при эксперименте пульсирующей струи о препятствие возникает давление, значительно превосходящее максимальное давление, как в каверне, так и в форкамере. С помощью одномерной модели проведены расчеты нестационарного истечения порции жидкости, образующейся в развитом режиме автоколебаний, через сужающееся сопло в атмосферу. Получены зависимости скорости и других параметров истекающей жидкости от формы сопла, параметров каверны, от величины поддува воздуха и давления напора жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00040.



## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОМЕХАНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ПОМОЩИ РАБОТНИКАМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*А.В. Подопросветов*  
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва  
e-mail: [llecxis@gmail.com](mailto:llecxis@gmail.com)

Исследование направлено на создание системы управления экзоскелетом для повышения производительности рабочего. В данной работе приведен модельный эксперимент по выявлению целевых действий человека во время работы на производстве, чтобы определять целевые моменты времени включения и выключения полезных функций экзоскелета.

Существует множество подходов для выявления и восстановления действий человека. Их можно разделить на две категории: методы распознавания движений, основанные на компьютерном зрении, и методы на основе инерциальных датчиков, например [1]. В условиях производства инерциальные датчики позволяют получить более полную информацию о действиях человека, так как не зависят от окружающей среды.

Существует много методов выявления векторов признаков из получаемых данных для их последующей классификации. Например, «случайный лес», метод опорных векторов, многослойный перцептрон.

Множество исследований было проведено для определения движений в повседневной жизни. Однако основным результатом проделанной в рамках данного исследования работы является система, позволяющая классифицировать существенно отличающиеся друг от друга движения рабочего в условиях производства на основе инерциальной информации, получаемой с датчиков (акселерометра, гироскопа и магнитометра) в реальном времени.

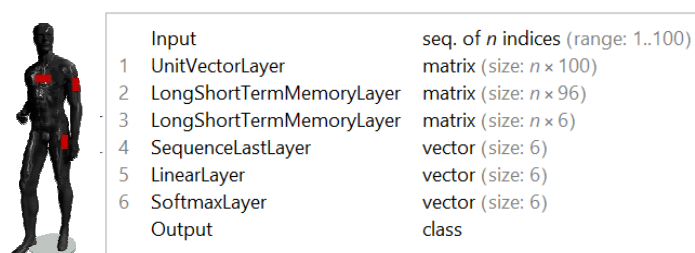


Рис. 1 а) Схематично показаны места крепления датчиков; б) Изображена архитектура нейронной сети.

Для сбора инерциальных данных был разработан комплекс программно-аппаратных средств сбора информации в реальном времени. Данные с датчиков считываются с частотой 100 Hz. Для сегментирования используется подход «скользящего окна», который подходит для систем реального времени. В качестве предобработки сигналов проводится фильтрация порядка 3 для удаления шума. Была собрана база из шестисот примеров с каждого из трех участников, всего тысяча восемьсот примеров.

Была собрана нейронная сеть типа LSTM в пакете математического моделирования Wolfram Mathematica. Описание архитектуры нейронной сети показано на рис. 1б. Все размерности тензоров переходов в нейронной сети выбраны с учетом получаемых инерциальных данных. Обучение нейронной сети производилось стандартным методом «обратного распространения ошибки», с методом подбора параметров ADAM (adaptive moment estimation).

По результатам обучения на данных удалось добиться среднего значения в 88,6% ожидаемых предсказаний. При совмещении всех полученных выборок средний результат предсказаний улучшился до 91,6%, в данном случае проверка проводилась на испытуемых в реальном времени.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №18-71-10112).

1. L. Cheng, Y. Guan, K. Zhu, and Y. Li. Recognition of human activities using machine learning methods with wearable sensors // Computing and Communication Workshop and Conference. 2017. pp. 1–7.

## О МЕХАНИЗМЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГАЗОВУЮ СМЕСЬ С НЕРАВНОВЕСНЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ

*В.А. Полянский, И.Л. Панкратьева*

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [ilpan@imec.msu.ru](mailto:ilpan@imec.msu.ru)

Характерная особенность слабопроводящих сред, изучаемых в электрогидродинамике, связана с возможностью проникновения в среду сильных внешних электрических полей. При этом возникает возможность при наличии в среде нескомпенсированного объемного электрического заряда воздействовать на поведение среды приложенным полем за счет объемных кулоновских сил. Объемный заряд в среде (электризация среды) может возникать вследствие несколько различных причин [1]. Наиболее распространенная из них – электризация при контакте двух сред на границах раздела. Накопление заряда в объеме среды может происходить также вследствие непосредственной ионизации молекул среды сильным электрическим полем. В частности, с этим явлением может быть связано наблюдающееся в эксперименте движение жидкости в сильном неоднородном электрическом поле (эффект Сумото).

В работе исследуется возможность образования нескомпенсированного заряда в сильных электрических полях при наличии объемных электрохимических процессов в условиях, когда в области течения источник заряженных частиц является неоднородным, например, за счет неоднородности температуры или неоднородности концентраций нейтральных части, участвующих в процессах ионизации.

Рассматривается двумерное течение в плоском канале многокомпонентной жидкой среды или газовой смеси, содержащей заряженные частицы двух сортов: с положительным и отрицательным знаком заряда. Учитывается диффузия и дрейф в электрическом поле каждого сорта частиц с зарядом, объемные реакции ионизации и рекомбинации, а также поверхностные электрохимические процессы с рождением и поглощением заряженных частиц. Считается, что заряженные частицы составляют малую примесь в несущей среде электрически нейтральных частиц и в отсутствие приложенных полей не влияют на течение. Движение среды в целом описывается обычными уравнениями сохранения импульса и энергии для вязкой несжимаемой жидкости, в которых добавлена объемная кулоновская сила. Обсуждается механизм и условия образования в электрическом поле объемного заряда за счет неоднородности источника заряженных частиц. Предложенную модель электризации среды и, как следствие, появления объемных кулоновских сил, можно использовать для объяснения экспериментально наблюдаемого воздействия поля на процессы горения в слабоионизованных высокотемпературных газовых смесях.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант 19-01-00056.

1. I.L. Pankrat'eva, V.A. Polyanskii. Basic mechanisms of electrification of weakly conductive multicomponent media // Fluid Dynamics. 2017. V. 52. No. 5. pp. 610–616.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОЙ ТРУБКИ

А.Б. Порошина<sup>1,2</sup>

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

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

e-mail: [poroshina@imec.msu.ru](mailto:poroshina@imec.msu.ru)

Важной особенностью течения биологических жидкостей в кровеносных сосудах является возможность колебательного характера протекания. По этой причине флаттер эластичных трубок с протекающей внутри жидкостью интенсивно исследуется в течение нескольких десятилетий [1, 2]. Более того, известно, что кровь в небольших сосудах может проявлять существенно неньютоновские свойства, что ранее не исследовалось.

Экспериментальное исследование в данной работе проводилось на наиболее часто используемой для такого рода экспериментов установке, имеющей принципиальную схему «Starling resistor». Установка состоит из тонкостенной эластичной трубки длины  $L$  (трубки Пенроуза), натянутой между двумя жёсткими трубками длины  $L_1$  и  $L_2$  (рис. 1) и протекающей внутри жидкости.

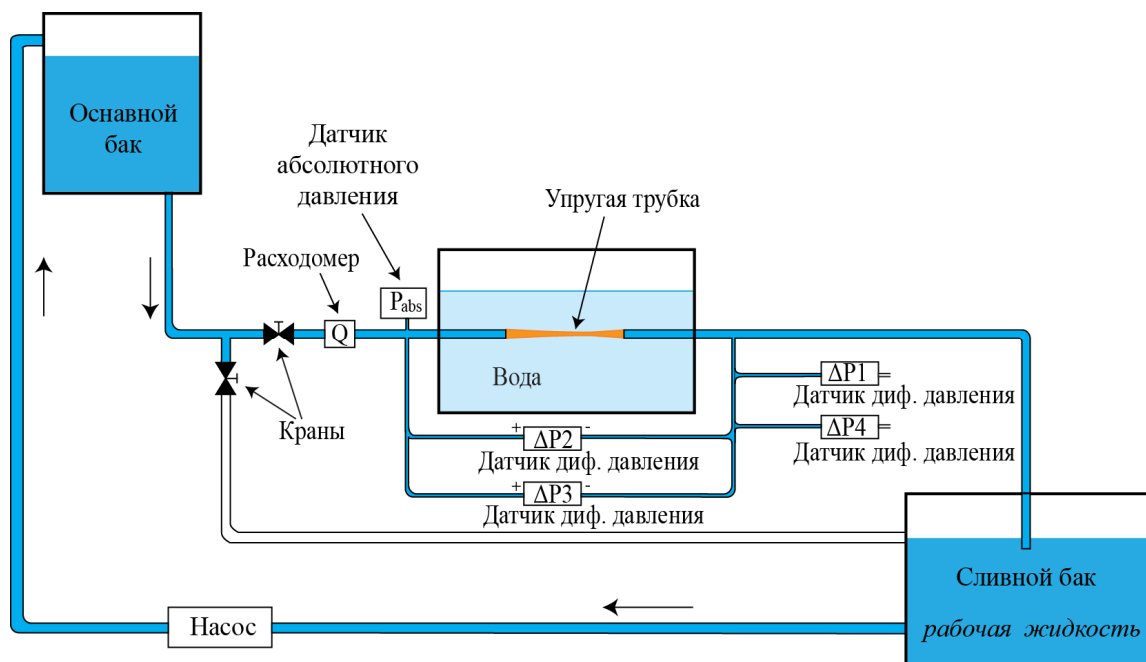


Рис. 1 Схема установки.

Теоретически было установлено, что локальная неустойчивость упругой трубки с протекающей внутри неньютоновской жидкостью возможна только для псевдопластических жидкостей с показателем степенной среды  $n < 0.611$  [3]. Для проведения эксперимента псевдопластическая жидкость подбиралась таким образом, чтобы отвечать теоретическим значениям возникновения абсолютной неустойчивости  $n < 1/3$ , при которой неустойчивость будет наблюдаема.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с ранее полученными теоретическими данными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 18-29-10020 и № 18-31-00407).

1. Grotberg, J.B., Jensen, O.E. Biofluid mechanics in flexible tubes // Ann. Rev. Fluid Mech. 2004. V. 36. P. 121-147.

2. Heil, M., Hazel, A.L. Fluid-Structure Interaction in Internal Physiological Flows // Ann. Rev. Fluid Mech. 2011. V. 43. P. 141-162.

3. Веденеев В.В., Порошина А.Б. Устойчивость упругой трубки, содержащей текущую неньютоновскую жидкость и имеющей локально ослабленный участок // Труды Математического института им. В.А. Стеклова РАН. 2018. Т. 300. С. 42-64.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ НА ДИАГРАММЕ МААСА ДЛЯ АТТРАКТОРОВ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

*М.И. Провидухина<sup>1</sup>, И.Н. Сибгатуллин<sup>2</sup>, Д.А. Рязанов<sup>1</sup>*

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

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: [itimasha@gmail.com](mailto:itimasha@gmail.com)

В 1997 году Леонардо Маасом была опубликована фундаментальная работа, сформировавшая целое направление в современной гидродинамике вращающейся или стратифицированной жидкости [1]. Геометрический анализ внутренних гравитационных или инерционных волн в замкнутой геометрии показал, что общим положением для геометрии с наклонными по отношению к силе тяжести или оси вращения границами является существование замкнутых геометрических структур, притягивающих пучки волн после многочисленных отражений от стенок. Наиболее простой геометрией общего положения, учитывающей наличие наклонных стенок оказалась трапеция с одной наклонной стенкой [2-5]. В этом случае задача для идеальной жидкости может быть параметризована двумя числами — геометрическим параметром  $d$ , при изменении которого форма контейнера изменяется от треугольника до прямоугольника, и вторым параметром, связанным с частотой внешнего воздействия и таким образом с углом распространения пучков волн. В [1] была построена диаграмма сходимости лучей к волновому аттрактору с помощью показателей Ляпунова. Теоретически аккумуляция энергии на волновых аттракторах бесконечно растет со временем, но в природе и лабораторных экспериментах она уравнивается диссипацией и диффузией. Поэтому с практической точки зрения диаграмма Мааса не может в полной мере характеризовать реальную динамику жидкости. Описание взаимосвязи сходимости, кинетической энергии и диссипации позволило бы выявить реальную роль аккумуляции волновой энергии на аттракторах. В докладе будет представлена зависимость кинетической энергии от двух параметров на диаграмме Мааса. В настоящее время проводится исследование масштабного эффекта зависимости распределения энергии при разных числах Рейнольдса

Работа выполняется по государственному заданию Министерства образования и науки России 0149-2019-0004 при поддержке соглашения с Минобрнауки N 14.616.21.0075, (идентификатор - RFMEFI61617X007).

1. Maas L.R.M., Benielli D., Sommeria J., Lam F.P.A. Observations of an internal wave attractor in a confined stably stratified fluid // *Nature*, 1997; 388:557-561.

2. Сибгатуллин И.Н., Ерманык Е.В. Аттракторы внутренних и инерционных волн // *Прикладная механика и теоретическая физика* (принято в печать), 2019.

3. I. Sibgatullin, E. Ermanyuk, L. Maas, X. Xu and T. Dauxois. Direct Numerical Simulation of Three-Dimensional Inertial Wave Attractors, 2017 // *Ivannikov ISPRAS Open Conference (ISPRAS)*, Moscow, 2017, pp. 137-143. doi: 10.1109/ISPRAS.2017.00029.

4. Brouzet C., Sibgatullin I., Scolan H., Ermanyuk E. and Dauxois T. Internal wave attractors examined using laboratory experiments and 3D numerical simulations // *Journal of Fluid Mechanics*, 793, 109-131. doi:10.1017/jfm.2016.119, 2016.

5. М. Провидухина, И. Сибгатуллин. Применение спектральных методов обработки данных к результатам численного моделирования аттракторов внутренних волн // *Труды Института системного программирования РАН (электронный журнал)*, 28(1):275–282, 2016.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЯМОТОЧНОГО ВОЛНОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ И ВОЛНОДВИЖИТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭНЕРГИЮ КАЧКИ СУДНА

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

Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [vlad.prokof@yandex.ru](mailto:vlad.prokof@yandex.ru)

Волновая энергетика моря весьма велика – запасы энергии волнения мирового океана оцениваются в 2,7 млрд. кВт, что составляет около 30% потребляемой в мире энергии. Препятствием к применению волновых движителей (ВД) является нестабильность параметров реальных морских волн и, с другой стороны, сильная зависимость эффекта от параметров самого судна и волнового движителя. Обычные ВД имеют подвижные рабочие элементы и используют для создания тяги качку судна. В НИИ Механики МГУ был предложен совершенно новый принцип «прямоточного волнового движителя» (ПВД) не имеющего подвижных элементов и никак не связанный с качкой самого судна. Используется эффект нелинейного взаимодействия (опрокидывания) волн с затопленной наклонной пластиной.

Путем сравнительных испытаний определена эффективность работы ВД различных типов. Показано, что использование в качестве ВД жесткого качающегося профиля с упругими связями значительно (на 1/3) повышает эффективность ВД по сравнению с пластиной той же площади в плане. Среднее положение между пластиной и профилем занимает ВД типа подводный парус. Однако парус имеет более широкий диапазон рабочих частот. Например, при увеличении частоты волн, когда эффект с жестким профилем пропадает, с парусом еще сохраняется значительная скорость движения судна против волн. Применение кормового стабилизатора приводит к увеличению эффективности ВД: для подпружиненной пластины, гибкого плавника, прямоточного ВД скорость увеличивается в 1,4-2 раза, а для качающегося профиля всего на 10%. Для паруса эффективность применения стабилизатора сильно зависит от частоты волн – максимум скорости в зависимости от частоты вообще не изменяется, но при наличии стабилизатора вся характеристика сдвигается в сторону низких частот. Прямоточный ВД, в условиях сильной килевой качки по эффективности уступает остальным рассмотренным типам ВД, но в области высоких частот, где качка судна уменьшается, видно его преимущество. Показано, что скорость судна с ВД типа жесткий подпружиненный профиль пропорциональна произведению размаха качки на частоту. В отличие от ПВД, для ВД, использующих качку судна, влияние глубины погружения на эффективность быстро уменьшается.

## ПЛОСКОПОЛЯРИЗОВАННОЕ МАХОВСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЫСТРЫХ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН

*Е.А. Пушкарь*

Мосполитех, Москва

e-mail: [eugenepushkar@mail.ru](mailto:eugenepushkar@mail.ru)

При исследовании наклонного взаимодействия магнитогиродинамических (МГД) ударных волн [1] было обнаружено, что имеются области определяющих параметров, в которых, как и в газовой динамике, регулярное взаимодействие ударных волн не существует. Когда параметры приближаются к критическим, в частности, при увеличении угла  $\theta$  между ударными волнами  $S1$  и  $S1'$ , течение за ними становится негиперболическим (дозвуковым) в системе координат, движущейся с точкой пересечения  $S1$  и  $S1'$ , поэтому состояние среды и магнитное поле вниз по потоку могут влиять на взаимодействие, приводя к распаду регулярного решения. Можно предположить, что осуществляется более сложное течение [2], подобное маховскому взаимодействию в газовой динамике.

В рамках МГД модели исследована картина нерегулярного взаимодействия маховского типа двух быстрых МГД ударных волн, распространяющихся в проводящей среде с замороженным магнитным полем, которая содержит маховскую ударную волну  $SM$ , движущуюся между исходными разрывами и соединяющую их точки ветвления. В магнитной гидродинамике течение в окрестности точек ветвления содержит, помимо маховского скачка, до пяти волн, их качественный состав не может быть предсказан заранее. Отсутствует система координат, в которой течение было бы стационарным, однако течение автомодельно в переменных  $x/t$ ,  $y/t$  в системе координат, движущейся с воображаемой линией пересечения фронтов  $S1$  и  $S1'$ .

Разработаны методы нахождения нерегулярного решения. Численное моделирование рассматриваемого течения выполнено с помощью специального пакета программ, который позволяет получить точное решение задачи на компьютере, используя оригинальный МГД Riemann solver в окрестности точек ветвления и стыкуя эти решения на  $SM$ . Найдены области существования нерегулярного решения в пространстве определяющих параметров, его связь с регулярным решением, и характер перестройки при непрерывном изменении параметров.

Скорость и наклон маховского скачка существенно зависят от вектора напряженности магнитного поля в начальном состоянии, при этом волновая картина течения особенно чувствительна к наклону магнитного поля. Найдены определяющие параметры, при которых имеют место перестройки волновой картины, сопровождающиеся скачкообразным изменением параметров среды и магнитного поля во всем течении или его части [2].

На основе численного моделирования создана база данных для рассмотренного течения, которая может быть использована в конкретных приложениях, например, для анализа явлений в солнечном ветре или ближнем космосе в окрестности околоземной головной ударной волны  $Sb$ . В частности, падение межпланетной ударной волны может приводить на разных флангах  $Sb$  к качественно разным картинам взаимодействия: регулярному взаимодействию на одном фланге и маховскому на другом, что может регистрироваться на космических аппаратах [3].

1. Бармин А.А., Пушкарь Е.А. Пересечение ударных волн в магнитной гидродинамике // Известия АН СССР, МЖГ. 1991. Т. 26. № 3. С. 132-143.

2. Бармин А.А., Пушкарь Е.А. Нерегулярное взаимодействие ударных волн в магнитной гидродинамике // Известия РАН, МЖГ. 1993. Т. 28. № 4. С. 184-198.

3. Přech L., Němeček Z., Šafránková J. Response of magnetospheric boundaries to the interplanetary shock: Themis contribution // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35, P. L17S02.



## О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ ЗА СЧЕТ ЛАМИНАРИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБЕ

А.И. Решмин, В.В. Трифонов, В.Г. Луцик, М.С. Макарова  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [trifonovvl@mail.ru](mailto:trifonovvl@mail.ru)

Потери давления из-за трения при турбулентном режиме течения связаны с ростом потребления энергии на прокачку газа или жидкости по трубам и, как следствие, с возрастанием эксплуатационных расходов. В случае ламинаризации (реламинаризации) течения, т.е. при переходе с турбулентного режима течения к ламинарному, потери из-за трения могут быть существенно снижены. Так, например, для течения с числом Рейнольдса 25000 эти потери будут уменьшены на порядок.

Для анализа возможности достижения ламинаризации течения в трубах проведено численное исследование развития течения с разными входными профилями скорости, которые можно создать с помощью специальных устройств. Рассмотрены три варианта входных устройств с неоднородным профилем скорости и мелкомасштабной турбулентностью на входе. Исследование показало возможность ламинаризации течения в трубах при числах Рейнольдса  $Re > 10000$ .

Для расчета неравновесных турбулентных течений использовалась трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности [1] с уравнениями переноса для трех параметров: энергии турбулентности  $E = 0.5 \sum \langle u_i'^2 \rangle$ , напряжения сдвига  $\tau = -\langle u'v' \rangle$  и параметра  $\omega = E/L^2$ , содержащего масштаб турбулентности  $L$ . Результаты расчета ламинаризации течения сопоставлялись с экспериментальными данными, имеющимися в литературе.

При проведении численного исследования рассмотрено три варианта входных устройств:

- 1 – с U-образным профилем скорости,
- 2 – с  $\Lambda$ -образным профилем скорости,
- 3 – с параболическим профилем скорости.

Во всех вариантах расчетов интенсивность турбулентности на входе, определенная по местной скорости  $u$ , принималась равной  $e_0 = \sqrt{E_0}/u = 0.01$  ( $E_0$  – энергия турбулентности), а масштаб турбулентности –  $L_0/R = 0.05$  ( $R$  – характерный радиус канала). Достижение режима ламинаризации в расчетах определялось по изменению по длине трубы относительной скорости  $u/U$  и интенсивности турбулентности  $e$  на оси трубы, а также по изменению коэффициента сопротивления  $\xi$ . В расчетах отслеживалось изменение по длине трубы максимальной величины генерации турбулентности  $P_m = (\rho \tau \partial u / \partial r)_m$ . Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае ламинаризации генерация турбулентности подавляется и максимум ее смещается от стенки к оси трубы. При отсутствии ламинаризации течения максимум генерации турбулентности возрастает с выходом на режим развитого турбулентного течения, и положение максимума генерации  $r_m/R$  остается в пристеночной области.

Для трех рассмотренных вариантов входных устройств получены числа Рейнольдса ламинаризации  $Re^* = 16000, 12000$  и  $10000$ . Дальнейшее повышение числа Рейнольдса ламинаризации может быть получено при уменьшении интенсивности и масштаба турбулентности на входе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№17-08-00115) и Советом по грантам Президента РФ (№СП-3993.2018.1).

1. Луцик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1978. № 3. С. 13–25.

## ТЕПЛООБМЕН И ТЕРМОХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУЙ ДИССОЦИИРОВАННОГО ВОЗДУХА С ПОВЕРХНОСТЬЮ МОДЕЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КЕРАМИКИ: РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЧ-ПЛАЗМОТРОНЕ

*В.И. Сахаров<sup>1</sup>, Б.Е. Жестков<sup>2</sup>, И.В. Сенюев<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup>ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

e-mail: [sakharov@imec.msu.ru](mailto:sakharov@imec.msu.ru)

С помощью расчетно-экспериментальной методики определена каталитическая активность образцов из сверх высокотемпературной керамики на основе диборида гафния  $\text{HfB}_2$ .

В ЦАГИ на гиперзвуковой аэродинамической трубе ВАТ-104, оснащенной высокочастотным индукционным подогревателем газов, проведены исследования обтекания и нагрева керамических дисков при температурах поверхности до 3000 К.

Одновременно для условий экспериментов на АДТ ВАТ-104 в рамках уравнений Навье-Стокса и упрощенных уравнений Максвелла (для расчета переменного электромагнитного поля в подогревателе) с помощью разработанной в НИИ механики МГУ технологии численного моделирования течений высокотемпературного газа [1, 2] было проведено численное моделирование течения в подогревателе, сверхзвуковом сопле установки и обтекания дисков из ультра высокотемпературной керамики химически неравновесной воздушной плазмой.

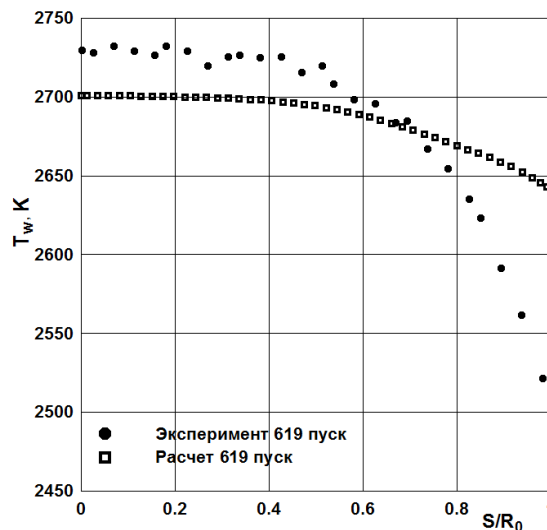


Рис. 1. Сравнение распределений температур по наветренной стороне диска в эксперименте и расчете.

На рис. 1 приведено сравнение экспериментально измеренных и рассчитанных значений температур на наветренной поверхности керамического диска для одного из пусков. Различие расчетных и экспериментальных данных не превышает 1 % в центральной его части, увеличиваясь к периферии до 6%. Различие в измеренных и рассчитанных значениях температуры на периферии модели можно объяснить диффузным отражением от неровностей зеркала, через которое пирометр фиксирует излучение в эксперименте. Сопоставлением расчётных и экспериментальных значений тепловых потоков к поверхности диска определена каталитическая активность керамического материала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 17-01-00054 и 18-08-00020) с использованием ресурсов Суперкомпьютерного комплекса МГУ.

1. Afonina N.E., Gromov V.G., Sakharov V.I. HIGHTEMP technique of high temperature gas flows numerical simulations // Proc. 5th Europ. Symp. on Aerothermodyn. Spase Vehicles. Cologne, Germany. 2004. SP 563. Noordwijk: ESTEC. 2004. pp. 323-328

2. Сахаров В.И. Численное моделирование термически и химически неравновесных течений и теплообмена в недорасширенных струях индукционного плазмотрона // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 6. С. 157-168.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ КОМПАКТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ И РАЗМЕРОВ

*И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, М.О. Кучинский, М.М. Гончаров*  
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь  
e-mail: [ivan-sboev@yandex.ru](mailto:ivan-sboev@yandex.ru)

Задача об интенсификации теплообмена от компактных источников тепла в последнее время приобрела значительную актуальность в связи с необходимостью повышения эффективности охлаждения микроэлектронных устройств с различной конфигурацией и расположением тепловыделяющих элементов. В последнее время все чаще внимание исследователей направлено на проблему так называемого иммерсионного охлаждения – остывание электронных компонентов, погруженных в жидкость с низкой температурой кипения. Однако, не менее важным является понимание общих закономерностей и сценариев перераспределения тепла от компактных источников различной геометрической формы. Помимо этого, существует большое разнообразие природных явлений, в которых подробное изучение закономерностей развития конвективного течения и обусловленных этим механизмов теплообмена невозможно без детального рассмотрения характера развития течения при различной конфигурации локализованных температурных градиентов.

В рамках настоящего исследования проведены численные расчеты (рис.1.а,в) и выполнена визуализация конвективного течения (рис.1.б,г) вблизи компактного источника тепла в форме круга, квадрата и равностороннего треугольника. На лабораторном стенде, описание которого приведено в работе [1], выполнены температурные измерения в жидкости на этапе развития конвективного течения. Важным результатом выполненных натурных экспериментов является подтверждение зависимости структуры течения жидкости вблизи теплообменника от его формы и размеров. Согласно наблюдениям, она главным образом определяется наличием в конфигурации локализованной области подогрева участков с наибольшим градиентом температуры, которыми в данном случае являются вершины многоугольника.

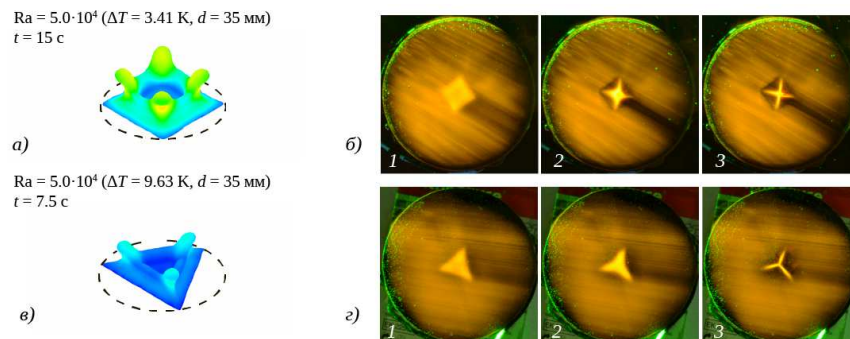


Рис. 1 Мгновенная изотермическая поверхность и эволюция поля концентрации флуоресцирующего красителя над квадратным (а - расчет, б – натурный эксперимент) и треугольным (в, г) нагревателями. После появления конвективного течения температурный пограничный слой начинает деформироваться вблизи вершин теплообменника (область наибольших температурных градиентов).

В ходе экспериментального исследования удалось наблюдать предсказанные численной моделью конвективные структуры. Таким образом, была выполнена верификация модифицированной численной модели и более детально исследованы различные сценарии развития течения, зависящие от выбора площади тепловыделяющей поверхности источника и представляющие собой различные режимы разделения пограничного слоя на этапе формирования конвективного факела.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00165 мол\_а.

1. Sboev I.O., Rybkin K.A., Goncharov M.M. Experimental and numerical study of convective flow structure above heated horizontal plates of different sizes // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2018. Vol. 1129. № 1. P. 012030. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1129/1/012030>

## УСТОЙЧИВОСТЬ АТТРАКТОРОВ ВНУТРЕННИХ И ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН

*И.Н. Сибгатуллин<sup>2</sup>, М.И. Провидухина<sup>1</sup>, Д.А. Рязанов<sup>1</sup>, К.А. Ватутин<sup>1</sup>*

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

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: [sibgat@ocean.ru](mailto:sibgat@ocean.ru)

Наблюдаемые в экспериментах аттракторы внутренних и инерционных волн являются результатом баланса неограниченной кумуляции волновой энергии вдоль определенных путей и вязкости. Лео Маасом была предложена теория волновых аттракторов как геометрических структур в идеальной жидкости и для простейших модельных уравнений построены параметризации, позволяющие исследовать области существования аттракторов с сильной сходимостью. В экспериментах, как натуральных, так и численных, амплитуда волн на аттракторах может на порядок превышать амплитуду внешнего возмущения, и, таким образом, аттракторы являются естественной областью возникновения неустойчивостей даже для умеренных надкритичностей. Мы уточняем схемы сходимости к волновым аттракторам для простейших геометрий, рассматривая вязкие жидкости. Оказалось, что, несмотря на схожесть дисперсионного соотношения для внутренних и инерционных волн и одинаковые диаграммы сходимости, реальные течения обладают существенно различными свойствами и энергетическими характеристиками. В сравнении с внутренними волнами характер неустойчивости для инерционных волн существенно различается при изменении граничных условий: в частности, появляются режимы с существенным вкладом стоячих волн. В геофизических и астрофизических приложениях частота внешнего возмущения может определяться спектром конечной ширины, поэтому с практической точки зрения важно изучить воздействия с близкими частотами. Оказалось, что замена монохроматического воздействия на бигармоническое может привести к другим режимам возникновения и развития неустойчивости. Мы впервые описали структуру трехмерных аттракторов и описание неустойчивости в осесимметричных геометриях и при локализованных источниках возмущений.

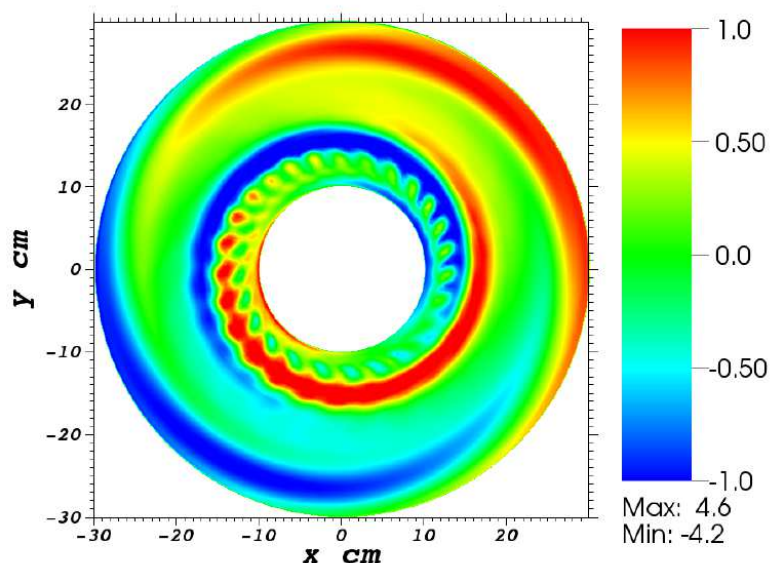


Рис.1 Развитие неустойчивости аттрактора инерционных волн в азимутальном сечении при приливном воздействии.

Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки России 0149-2019-0004 при поддержке соглашения с Минобрнауки № 14.616.21.0075 (идентификатор RFMEF161617X007).

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПУЗЫРЕМ ГАЗА ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ВБЛИЗИ ТВЕРДОЙ СТЕНКИ

О.Г. Сутырин<sup>1</sup>, Р.Р. Хабибуллин<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

e-mail: [r.hab2011@yandex.ru](mailto:r.hab2011@yandex.ru)

На основе уравнений Эйлера численно исследуется двумерная плоская задача о взаимодействии ударной волны в воздухе с пузырем газа повышенной плотности вблизи твердой непроницаемой стенки, расположенной перпендикулярно к направлению распространения волны. Рассмотрены различные значения числа Маха  $M$  падающей волны, плотности  $\rho$  газа в пузыре и расстояния  $L$  между центром пузыря и твердой стенкой. Применяется конечно-разностный метод Маккормака с монотонизацией Жмакина-Фурсенко на равномерной квадратной расчетной сетке.

Описан процесс преломления и фокусировки ударной волны – отражения поперечных скачков уплотнения от плоскости симметрии течения и от стенки (рис. 1). Обнаружено, что в зависимости от определяющих параметров задачи реализуются качественно различные режимы течения, в которых фокусировка волны на плоскости симметрии происходит до или после начала отражения волны от стенки.

Определена зависимость пикового значения давления, достигаемого на стенке, от числа Маха падающей волны, плотности газа в пузыре и начального расстояния от пузыря до стенки. Для ряда случаев обнаружена немонотонность зависимости пикового давления от плотности газа в пузыре: с ростом плотности максимум давления сначала возрастает, а затем убывает (рис. 2). Зависимость пикового давления от числа Маха волны существенно нелинейна, а от расстояния между пузырем и стенкой также немонотонна.

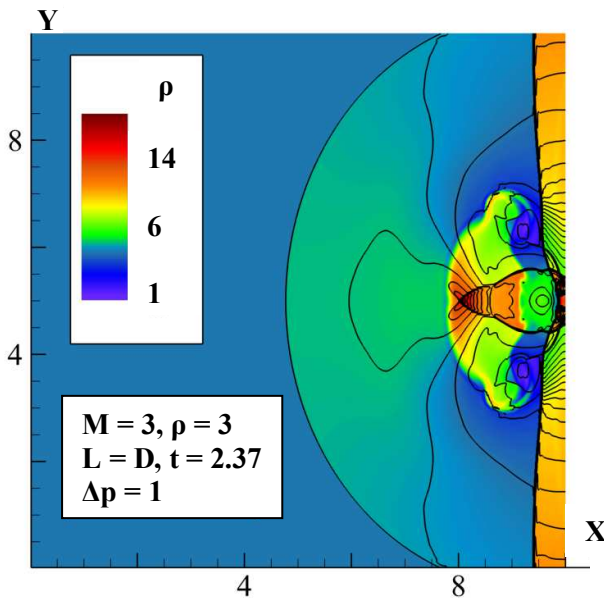


Рис. 1. Момент максимального давления на стенке при отражении ударной волны. Поле плотности и изолинии давления при  $M = 3$ ,  $\rho = 3$ ,  $L = D$ .

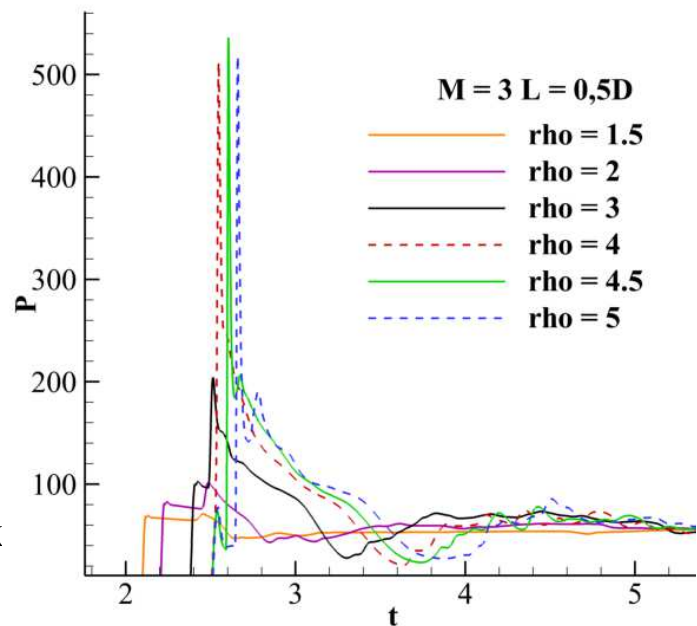


Рис. 2. Зависимость давления на стенке от времени для различных значений плотности газа в пузыре при  $M = 3$ ,  $L = 0,5D$ .



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТРУЙ, ИСТЕКАЮЩИХ ИЗ ПЛОСКИХ МИКРОСОПЕЛ С РАЗЛИЧНЫМ СООТНОШЕНИЕМ СТОРОН

И.В. Тимофеев<sup>1</sup>, В.М. Анискин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физический факультет НГУ, Новосибирск

<sup>2</sup>ИТПМ СО РАН им. С.А. Христиановича, Новосибирск

e-mail: [ivan.timofeev.koi@gmail.com](mailto:ivan.timofeev.koi@gmail.com)

В связи со значительными прикладными возможностями микроскопических газовых и жидкостных устройств возникает интерес к изучению течения газа на микромасштабах. Касается это как течения газа в микроканалах, так и истечения газа из отверстий микронных размеров. В зависимости от давления на выходе отверстия, струя может быть как дозвуковой, так и сверхзвуковой. Дозвуковые и сверхзвуковые микроструи могут применяться в управлении макротечениями, для уменьшения шума, а также в струйных системах охлаждения. Сверхзвуковые струи малых размеров нашли также применение в реактивных системах ориентации спутников с массой менее 10 кг, так называемых наноспутниках [1-3].

Объектом исследования являются сверхзвуковые микроструи, истекающие из плоских сопел микронного размера с различным соотношением сторон (AR). В работе рассматривались сверхзвуковые микроструи, истекающие в окружающее затопленное пространство из плоских сопел с AR 2 и 4.

В качестве рабочего газа использовался сжатый воздух. Давление газа в форкамере сопла изменялось в диапазоне от 2 до 10 атм. Была выполнена визуализация течения микроструй, проведены измерения с помощью микротрубки Пито. Микротрубка Пито закреплялась на державке, перемещаемой в пространстве с помощью микроманипулятора. Положение датчика контролировалось под микроскопом.

По полученным данным была определена длина сверхзвукового участка сверхзвуковых микроструй (рис. 1). Кривыми 4 и 5 обозначены обобщающие зависимости для сверхзвуковых турбулентных струй макроразмера.

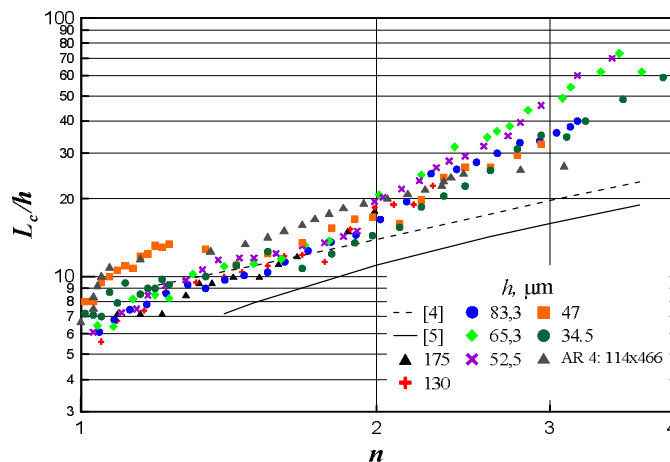


Рис. 1. Дальность плоских микроструй.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ (грант №17-19-01157).

1. Agasid E., Burton R., Goktug Karacalioglu A., Carlino R. et al. Small Spacecraft Technology State of the Art. NASA Technical Memorandum // NASA/TP-2015-216648/REV1
2. Juergen M. Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of Existing Hardware and Emerging Technologies // AIAA 97-3058. 19 p.
3. Scharlemann C., Tajmar M., Propulsion for Nanosatellites // Conference: The 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11-15, 2015. 11 p.
4. Shirie J.W., Seubold J.G., Length of Supersonic Core in High-Speed Jets // AIAA J. 1967. V. 5. N. 11. pp. 2062-2064.
5. Погорелов В.И. Параметры, определяющие дальность сверхзвуковой газовой струи // ЖТФ. 1977. Т. 47. В. 2. С. 444-445.



## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕТОНАЦИОННОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Ю.В. Туник, В.О. Майоров

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва  
e-mail: [vyacheslav7794@gmail.com](mailto:vyacheslav7794@gmail.com)

В настоящее время детонационное горение рассматривается как альтернатива обычному горению на силовых установках гиперзвуковых летательных аппаратов. Использование детонационного горения относится к ряду инновационных технологий. В связи с этим представляют интерес исследования, в которых проводится сравнительный анализ термодинамической эффективности детонации и обычного горения. Однако однозначного ответа на этот вопрос до сих пор нет даже в условиях идеального процесса, то есть без потерь кинетической энергии тепла и потока в пограничных слоях на стенках камеры сгорания. Цель данного исследования – уточнить выводы об энергетической эффективности детонационного и обычного горения в ограниченной и прямооточной камере сгорания. Исследования проводятся на основе модели совершенного невязкого газа.

В отличие от предшествующих работ (см., например, [1-4]) энергетическая эффективность детонационного горения в камере сгорания исследуется на основе точного решения задачи о распространении бесконечно тонкой детонации Чепмена-Жуге в трубе от торцевой стенки. Учитывается неоднородность параметров в волне разрежения, следующей за детонационным фронтом (рис. 1). В сверхзвуковом потоке сравнение детонационного и обычного горения проводится с учетом изменения тепловыделения (рис. 2) при вынужденном торможении потока для того, чтобы обеспечить стационарный режим горения во втором случае. Кроме того, рассматриваются условия, моделирующие пересжатое или недосжатое истечение продуктов горения в окружающую среду.

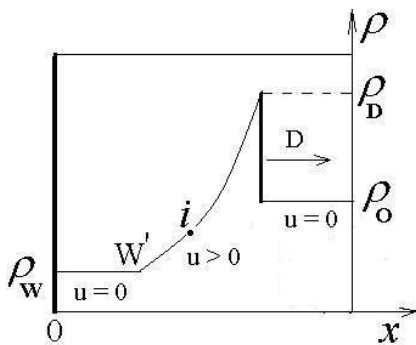


Рис. 1.

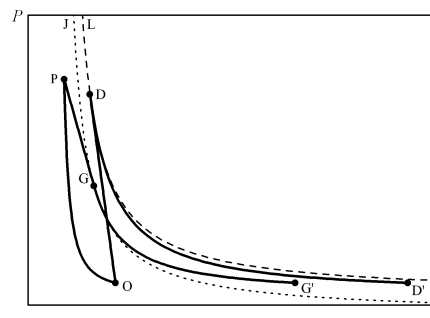


Рис. 2.

Рис. 1. Распределение плотности за детонационным фронтом в камере сгорания.

Рис. 2. Детонационная (штрих) и дефлаграционная адиабата (пунктир) в плоскости V-p.

В отличие от [1] показано, что в камере сгорания эффективность детонации, определяемая по работе сил давления в процессе адиабатического расширения продуктов горения, может быть ниже, чем при обычном горении, в частности, в случае водородных смесей. В общем случае результат сравнения зависит от удельной теплоты сгорания смеси и соотношения показателей адиабаты исходной смеси и продуктов горения. Абсолютное преимущество детонации Чепмена-Жуге проявляется только при обязательном использовании кинетической энергии продуктов детонации. При минимальном торможении сверхзвукового потока, обеспечивающем стационарное горение стехиометрической смеси водорода с кислородом, детонация Чепмена-Жуге оказывается более эффективной, чем нормальное горение.

1. Я.Б. Зельдович // Журнал технической физики. 1940. Т 10, № 17. С. 1453–1461.
2. W. Yuhui, M. Fuhua, Y. Vigor // Journal of propulsion and power 2003. V. 9. № 4. С. 556-567.
3. E. Wintenberger, J.M. Austin, M. Cooper and et. Al. // Journal of propulsion and power. 2004. V. 20. № 4. С. 765–767.
4. K. Alhussan, M. Assad, O. Penazkov // Applied. Thermal Engineering. 2016. № 107. С. 339-344.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ

Ю.В. Туник

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [tunik@imec.msu.ru](mailto:tunik@imec.msu.ru)

Изучается вопрос о возможности стабилизации детонационного горения водородовоздушных смесей, поступающих с высокой сверхзвуковой скоростью в осесимметричное сопло Лаваля.

В основе математического моделирования течения с детонационным горением водородовоздушной смеси - нестационарные двумерные уравнения невязкого многокомпонентного газа с химическими превращениями. Для описания процессов горения водородовоздушных смесей используется детальная кинетическая модель [1], которая включает 9 компонент, участвующих в 33 неравновесных обратимых реакциях. Теплоемкость и энтальпия смеси рассчитываются по приведенной энергии Гиббса газовых компонент [2].

Численное моделирование проводится на базе конечно-разностной схемы С.К. Годунова [3] и ее модификации [4], повышающей порядок аппроксимации гладких решений до второго по пространственным переменным.

В рамках принятых моделей газодинамики и кинетики горения показана возможность стабилизации детонационного горения водородовоздушных смесей на высотах до 40 км при числе Маха набегающего потока от 7 до 9. Определена конфигурация осесимметричных конвергентно-дивергентных сопел, обеспечивающих инициирование детонационного горения водорода в условиях высотной атмосферы. Необходимое сужение конвергентной части предварительно оценивается по одномерной теории. Форма сопла определяется с учетом опыта расчетов детонационного горения на малых высотах [5]. Эффект уплотнения поступающей смеси усиливается использованием центрального тела, состоящего из направленного навстречу потоку конуса, продолженного цилиндром с увеличенным радиусом (рис. 1).

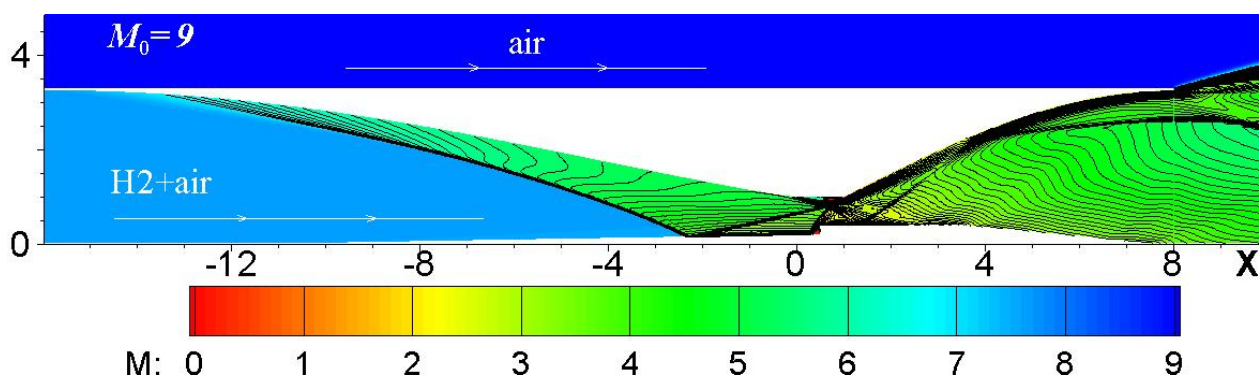


Рис. 1. Линии постоянного числа Маха в стационарном потоке с детонационным горением стехиометрической водородовоздушной смеси на высоте 40 км.

1. Азатян В.В., Андрианова З.С., Борисов А.А., Иванова А.Н. Основные реакции, определяющие тепловыделение в процессе горения водорода с кислородом // Кинетика и катализ. 2012. Т. 53. № 6. С. 683–689.

2. Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. Т.1. Кн.2. М.: Наука. 1978. 327с.

3. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400с.

4. Туник Ю. В. Численное решение тестовых задач на основе модифицированной схемы С.К. Годунова // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2018. Т. 58. № 10. С. 1629–1641.

5. Зубин М.А., Туник Ю.В. О стабилизации детонационного горения водорода в сопле Лаваля // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16, № 3. С. 1–8.

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ИЗ БАСЕЙНА РАСПЛАВА ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ В РЕАКТОРЕ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

*Э.В. Усов, И.А. Климонов, В.И. Чухно, Н.А. Прибатурин*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного  
развития атомной энергетики РАН, Новосибирский филиал, Новосибирск, Москва  
e-mail: [usovev@igmail.com](mailto:usovev@igmail.com)

Во время тяжелой аварии в РУ, когда материал активной зоны реактора плавится и перемещается, в нижней части реактора может образовываться бассейн расплава. Бассейн нагревается радиоактивным распадом продуктов деления, содержащихся в расплаве. Повышение температуры в бассейне активизирует выход продуктов деления (ПД) и приводит к выходу ПД бассейна.

Проблеме выхода продуктов деления под оболочку твэла посвящено большое количество зарубежных [1,2] и отечественных публикаций, в частности, решением этой задачи занималась группа сотрудников ИБРАЭ РАН [3]. Сборник статей [3] описывает основные модели кода MFPR для геометрии неповрежденного топлива для газообразных ПД и химически активных элементов и представляет результаты валидации отдельных моделей на основе экспериментов с разделенными эффектами и более общей валидации на основе интегральных экспериментов.

Следует отметить, что подавляющее большинство работ посвящено изучению оксидного топлива для легководных реакторов. Практически отсутствуют данные по выходу ПД из бассейна расплава топлива (как и по формированию такого бассейна) для конфигурации быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем.

Разработка подходов для анализа выхода ПД из расплава быстрых реакторов является актуальной, так как количество вышедших ПД определяет радиационную обстановку в разрушенном реакторе и дальнейший выход ПД в окружающую среду. Целью настоящей работы является анализ существующих подходов и разработка на основе анализа методов для расчета выхода ПД из расплава в быстром реакторе. В работе представлено описание разработанных моделей и результаты расчетов выхода ПД из расплава топлива, выполненных с использованием этих моделей.

Рассматриваются два типа ПД: летучие и нелетучие. Летучие продукты деления (прежде всего благородные газы) выходят из расплавленного топлива и формирующегося бассейна расплава, в то время как менее летучие продукты остаются в конденсированном состоянии в расплаве из-за низкого давления насыщенных паров. Выход благородных газов и летучих продуктов деления в большей степени определяется тем, как двигаются пузыри в расплаве. Актиноидные оксиды и редкоземельные оксиды растворимы в твердом и жидком  $UO_2$ . Такие материалы, как Sr и Ba, растворимы в жидкой фазе и способны образовывать эвтектические сплавы. Выделение этих материалов из бассейна расплава определяется конвективным переносом вместе с расплавом к поверхности раздела и выходом за счет испарения с этой поверхности вследствие высокой температуры расплава (~3120 K).

Работа выполнена в рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения» в рамках проектного направления «Прорыв».

1. Rest J., Zawadzki S.A. FASTGRASS: A Mechanistic Model for the Prediction of Xe, I, Cs, Te, Ba and Sr release from Nuclear Fuel under Normal and Severe-Accident Conditions. NUREG/CR-5840, TI92 040783. 1994.

2. Heames T.J., Williams D.A., Bixler N.E., Grimley A.J., Wheatley C.J., Johns N.A., Domogala P., Dickson L.W., Alexander C.A., Osborn-Lee I., Zawadzki S., Rest J., Mason A., Lee R.Y. VICTORIA: A Mechanistic Model of Radionuclide Behavior in the Reactor Coolant System under Severe Accident Conditions. NUREG/CR-5545. 1992.

3. Модели выхода продуктов деления из облученного топлива. Труды ИБРАЭ // Под общей редакцией Л. А. Большова. Выпуск 5.

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА ОБТЕКАНИЕ ТЕЛ ГИПЕРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*В.П. Фомичев, М.А. Ядренкин*

Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск  
e-mail: [fomichev@itam.nsc.ru](mailto:fomichev@itam.nsc.ru), [yadrenkin@itam.nsc.ru](mailto:yadrenkin@itam.nsc.ru)

Протекание электрического тока около обтекаемого тела в магнитном поле приводит к магнитогидродинамическому (МГД) взаимодействию разряда с потоком газа. При гиперзвуковом движении тел в воздухе с большими скоростями при торможении потока на поверхности тела может возникать термическая ионизация потока. Создавая в этой области потока магнитное поле можно реализовать МГД-взаимодействие с потоком. Для исследования возможности МГД-воздействия на гиперзвуковой поток в лабораторных исследованиях необходима внешняя ионизация газа. Ионизация потока может быть получена электрическим разрядом. В работе рассматривается МГД-взаимодействие электрических разрядов в высокоскоростном потоке воздуха с магнитным полем для управления обтеканием тестовых моделей, пластины и клина. Для ионизации потока были использованы высоковольтные импульсный и высокочастотный разряды. Такие разряды с использованием магнитного поля могут изменять ударно-волновую картину обтекания тел гиперзвуковым потоком. Экспериментальные исследования МГД-взаимодействия в гиперзвуковом потоке воздуха с числом Маха  $M = 6$  были выполнены при обтекании пластины и клина, на поверхности которых зажигался электрический разряд и при обтекании клина, перед которым в потоке зажигался импульсный разряд.

Ток разряда между электродами, расположенными заподлицо на поверхности пластины и грани клина на некотором расстоянии от передней кромки, был направлен поперёк потока и магнитного поля так, что сила, определяемая произведение величины тока на величину магнитной индукции, была направлена навстречу набегающему потоку. Эксперименты показали, что, изменяя величину тока разряда и величину магнитной индукции при неизменной скорости потока, можно реализовать слабое или сильное МГД-воздействие на поток. Эффективность МГД-воздействия определялась числом Стюарта  $S$ . При относительно слабом воздействии,  $S \approx 0.05$ , меняется угол наклона присоединённого скачка уплотнения, генерируемого передней кромкой модели. Увеличение  $S$  до 0.15 приводит к трансформации присоединённого косога скачка уплотнения в головной скачок перед моделью. Дальнейшее увеличение  $S$  до 0.2–0.25 приводит к образованию отошедшего скачка уплотнения перед передней кромкой тела. При этом область, занятая током разряда, выходит за пределы пластины. Таким образом, электрический разряд в потоке в магнитном поле может быть использован для изменения волновой картины обтекания пластины в гиперзвуковом потоке.

Ионизация потока высокочастотным электрическим разрядом с частотой 1 МГц между электродами создавала на поверхности пластины электропроводную область потока, движущуюся поперёк магнитного поля. В результате МГД-взаимодействия возникало торможение потока, и на области торможения генерировался висячий косога скачок уплотнения. Угол наклона скачка увеличивался с увеличением магнитной индукции.

Ионизация потока перед клином электрическим импульсным разрядом приводила к уменьшению числа Маха набегающего потока. Это приводило к генерации присоединённого к передней кромке клина скачка уплотнения с изменённой формой скачка уплотнения, которая перемещалась с потоком над поверхностью грани клина.

Всё это показывает, что использование электрического разряда для реализации МГД-взаимодействия в высокоскоростном потоке может существенно изменять волновую структуру потока над обтекаемой поверхностью пластины и клина.

## ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Д.Р. Халитова<sup>1</sup>, А.А. Афанасьев<sup>1,2</sup>

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

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

e-mail: [d.r.khalitova@gmail.com](mailto:d.r.khalitova@gmail.com)

Физических причин, заставляющих флюиды совершать достаточно интенсивные многократные движения, не так уж и много. Одной из них является свободная конвекция. Если перенос тепла в жидкостях происходит под градиентом температуры, то возникает тепловая конвекция, при которой более нагретые и менее плотные слои жидкости всплывают вверх, а более холодные опускаются.

Уже давно была изучена тепловая конвекция в насыщенных пористых средах и определено критическое число Рэлея в бесконечном пористом слое с непроницаемыми границами заданной температуры ( $Ra_{cr} = 4\pi^2$ ), при превышении которого теряется устойчивость [1]. Однако, конвекция может осложняться наличием различных масштабов порового пространства. Например, пористая среда может содержать высокопроницаемые трещины или каналы, между которыми располагаются низкопроницаемые пористые блоки. Такие среды называют трещиновато-пористыми. Для их изучения используется модель двойной пористости [2], в которой эта среда рассматривается в виде двух взаимопроницающих континуумов (пористых сред) – трещин и блоков, между которыми происходит тепломассообмен жидкостью.

В данной работе исследовано развитие тепловой конвекции в трещиновато-пористой среде в приближение Буссинеска. В аналитическом виде получено дисперсионное соотношение, определяющее границу устойчивости, а также сформулировано достаточное условие теплового равновесия. Показано, что устойчивость системы определяется четырьмя безразмерными параметрами задачи. Аналитическими методами исследования удалось продемонстрировать, что трещиноватость снижает критическое число Рэлея. Подробно проведен анализ границы устойчивости, который позволил численно провести расчёты развития конвекции в линейном случае. С помощью пакета MUFITS [3] удалось рассчитать процесс дестабилизации в различных случаях: из-за потери устойчивости в трещинах, блоках (рис.), а также при совмещении двух взаимопроницающих континуумов, находящихся в тепловом равновесии. Численные расчёты подтвердили аналитические результаты.

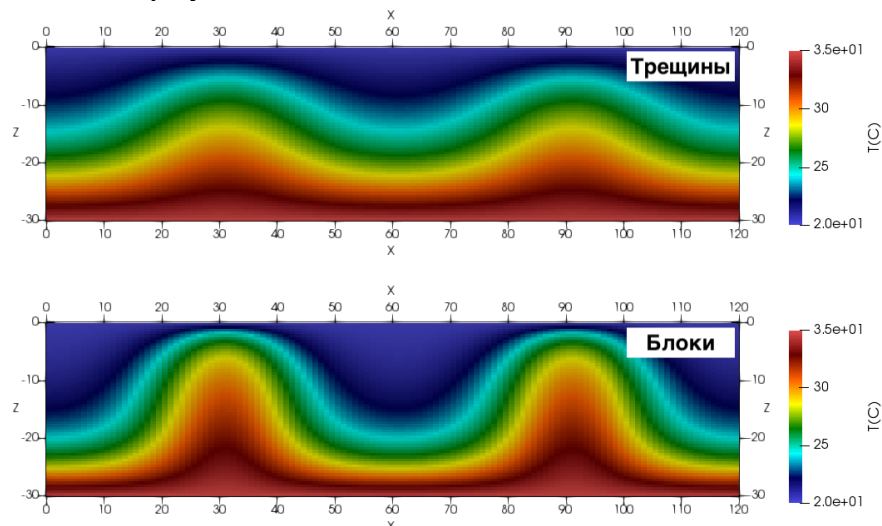


Рис. Распределение температуры ( $T$ ) в трещинах и блоках при развитии конвекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (МД-3567.2018.1).

1. Donald. A. Nield, Adrian Bejan. Convection in Porous Media Third Edition – 2006 Springer Science+Business Media, Inc.

2. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // ПММ. 1960. Т. 24. Вып. 5. С.852–864.

3. Afanasyev A.A., 2013. MUFITS Reservoir Simulation Software - <http://www.mufits.imec.msu.ru>.



## ОСРЕДНЁННАЯ АСИМПТОТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

С.А. Халявин<sup>1</sup>, А.А. Афанасьев<sup>1,2</sup>

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

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

e-mail: [semen14091996@gmail.com](mailto:semen14091996@gmail.com)

В настоящей работе рассмотрено классическое решение в теории фильтрации задачи Баклея-Левретта, обобщённое на случай двухфазных течений в трещиновато-пористой среде. В этом случае несмешивающееся вытеснение жидкостей в пористой среде осложняется отсутствием локального капиллярного равновесия между поровыми пространствами различного масштаба, а решение задачи в случае общего положения не автомодельное. Фильтрационные течения могут осложняться наличием

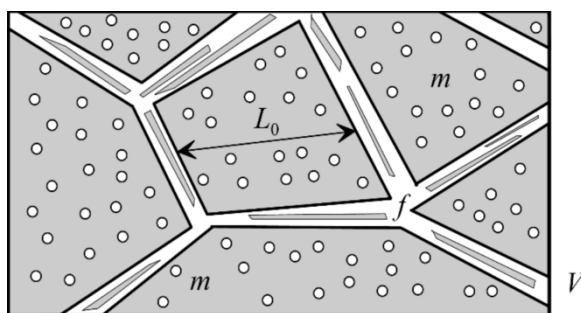


Рис. Пример трещиновато-пористой среды.

наоборот, – высокую пористость и малую проницаемость [1–4]. В этом случае течение жидкости в основном происходит по трещинам, тогда как больший ее объем находится в блоках. В настоящей работе для общности исследования данных предположений о  $f$  и  $m$  не делается, а существенным для дальнейшего изложения является только наличие двух различных масштабов порового пространства.

В настоящей работе более подробно, по сравнению с [2,5,6], рассмотрены случаи при конечных значениях параметров, более подробно описан переходный процесс от одного предельного случая к другому, а также определены критерии подобия, описывающие на больших временах стремление параметров течения к равновесной асимптотике.

различных масштабов порового пространства.

Для прогнозирования фильтрации в трещиновато-пористых средах часто используют модели двойной пористости. В этих моделях трещиновато-пористая среда рассматривается в виде двух взаимопроникающих континуумов (пористых сред) – трещин,  $f$ , и блоков,  $m$ , между которыми происходит массообмен жидкостью (Рис.). В практических приложениях часто рассматривается предельный случай, когда  $f$  имеет малую пористость и высокую проницаемость, а  $m$ ,

1. Warren J.E., Root P.J. The behavior of naturally fractured reservoirs // SPE J. 1963. V. 3. N 3. P. 245–255.
2. de Swaan A. Theory of waterflooding in fractured reservoirs // SPE J. 1978. V. 18. P. 117–122.
3. Firoozabadi A., Kent L.T. Sixth SPE comparative solution project: dual-porosity simulators // J. Pet. Tech. 1989. V. 43. N 6. P. 710–764.
4. Afanasyev A. Reservoir simulation with MUFITS code: Extension for double porosity reservoirs and flows in horizontal wells // Energy Proc. 2017. V. 125. P. 596–603.
5. Douglas J.Jr., Paes-Leme P.J., Hensley J.L. A limit form of the equations for miscible displacement in a fractured reservoir // Transp. Porous Media. 1991. V. 6. P. 549–565.
6. Kazemi H., Gillman J.R., Eisharkawy A.M. Analytical and numerical solution of oil recovery from fractured reservoirs with empirical transfer functions // SPE Res. Eng. 1992. V. 7. N 2. P. 219–227.



## МЕХАНИКА МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ НА УРОВНЕ МОЛЕКУЛ, КЛЕТОК, ТКАНЕЙ И ОРГАНОВ

*А.К. Цатурян*

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [tsat@imec.msu.ru](mailto:tsat@imec.msu.ru)

Основное механическое свойство мышечной ткани – способность развивать активные напряжения и деформации в результате механохимических реакций, происходящих в специализированных органеллах мышечной клетки – саркомерах. Эти реакции, представляют собой механическое взаимодействие сократительных белков, актина и миозина, сопровождающееся гидролизом аденозинтрифосфорной кислоты, АТФ. Расщепление АТФ является источником энергии для совершения макроскопической механической работы, складывающейся из нанометровых перемещений молекул под действием пиконьютоновых сил. Сокращение и расслабление мышц регулируется изменением концентрации ионов кальция в мышечной клетке, их связыванием с регуляторными белками саркомеров и перераспределением между различными внутри- и внеклеточными фазами. Межфазный перенос  $Ca^{2+}$ , в свою очередь, зависит от разности электрического потенциала на клеточной мембране. Возникновение и распространение волн электрического потенциала в мышце происходит в результате поступления электрических сигналов от нервных клеток или внутрисердечных водителей ритма.

Мышечную ткань можно рассматривать как несжимаемую, трансверсально изотропную сплошную многофазную среду, в которой связь между напряжениями и деформациями зависит от дополнительных скалярных переменных, имеющих физико-химическую природу и описывающих актин-миозиновое взаимодействие, динамику межфазного переноса ионов кальция, их связывание с регуляторными белками саркомеров, а также динамику ионных токов через клеточные мембраны и распространение электрического потенциала.

Соответствующие модели после надлежащего выбора определяющих параметров позволяют описать многие экспериментальные данные, полученные в экспериментах на одиночных клетках и небольших образцах ткани скелетных и сердечных мышц, включая эксперименты, в которых движения сократительных и регуляторных белков регистрировали с помощью рентгеновской дифракции на синхротронных источниках излучения.

Несмотря на то, что определяющие соотношения дополнены существенным количеством дополнительных кинетических уравнений для внутренних параметров, модель достаточно проста с вычислительной точки зрения, чтобы ставить и решать пространственные задачи о работе целого мышечного органа – левого желудочка сердца – с учетом его реальной геометрии и сложного распределения ориентации мышечных волокон в стенке желудочка. Сопрягая такую детальную модель левого желудочка с простой моделью течения крови в системе кровообращения, удастся описать основные насосные характеристики желудочка в норме и при некоторых заболеваниях.

Поддержано грантом РФФИ № 17-00-00066.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ЗАКАЧКЕ НАГРЕТОГО РАСТВОРА СОЛИ В ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ

А.А. Чернова<sup>1</sup>, А.А. Афанасьев<sup>1,2</sup>

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

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

e-mail: [anya\\_chernova\\_2504@mail.ru](mailto:anya_chernova_2504@mail.ru)

На глубинах 1–2 км над вулканическим очагом образуются линзы концентрированного раствора соли, из которых формируются порфиновые месторождения. Образование линзы, в случае если нагретый раствор быстро поднимается по узкому высокопроницаемому вулканическому каналу, сопровождается выпадением на скелет породы осадка в виде твердой фазы соли. В результате канал перекрывается, а нагретый раствор растекается в горизонтальном направлении на глубинах 1–2 км (Рис. а). Таким образом, происходит внедрение, т.е. закачка, нагретого раствора соли из канала вулкана в окружающие породы, насыщенные более холодной и пресной водой. На качественном уровне, пренебрегая неоднородностями проницаемой геологической среды и трехмерным характером течения, данный процесс описывается решением одномерной задачи о распаде произвольного разрыва. С одной стороны от разрыва находится нагретый раствор соли, а с другой – холодная пресная вода. Физически решение данной задачи можно интерпретировать как закачку солёной тёплой воды в полубесконечный пласт, насыщенный холодной пресной водой (Рис. б).

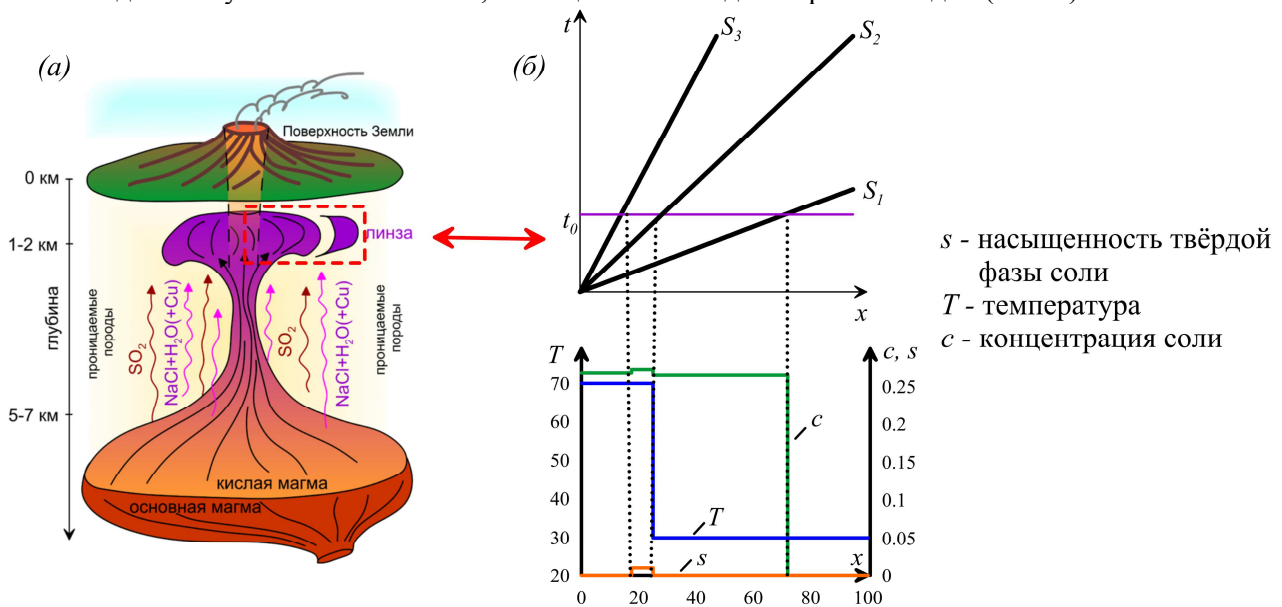


Рис. Интерпретация задачи (а), волновая картина задачи и ее решение при  $t = t_0$  (б).

Исследованы частные случаи решения автомодельной задачи Римана в полупространстве. В первом случае учитывается возможность выпадения в пористой среде осадка в виде твёрдой фазы соли, отсутствие водяного пара и сопутствующее снижение проницаемости. В предположении несжимаемого течения предложен геометрический метод решения задачи на плоскости. Показано, что решение может содержать до трёх сильных разрывов ( $S$ ), а волны Римана невозможны. Обнаружено, что возможны решения двух различных типов.

Во втором случае рассмотрена закачка водяного пара в холодный водонасыщенный пласт. Показано, что возможны решения двух различных типов, одно из которых может содержать волну Римана.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИИ механики МГУ (AAAA-A19-119012990117-9).

1. Afanasyev A., Blundy J., Melnik O., Sparks S. Formation of magmatic brine lenses via focused fluid-flow beneath volcanoes // Earth Planet. Sci. Lett. 2018. V.486. P.119–128.

2. Афанасьев А.А., Чернова А.А. О решении задачи Римана, описывающей закачку нагретого раствора соли в водонасыщенный пласт // Изв. РАН. МЖГ. 2019. В печати.

## ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ОБОБЩЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ЛЕЙТА ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ВОЛНОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Ю.А. Чиркунов

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск  
e-mail: [chr101@mail.ru](mailto:chr101@mail.ru)

Для обобщения модели Лейта феноменологической теории волновой турбулентности в средах с нестационарной вязкостью с помощью предложенного автором алгоритма [1] получены базовые модели, обладающие нетривиальными симметриями [2, 3]. Для каждой модели найдены все инвариантные подмодели. В явном виде найдены некоторые инвариантные решения, описывающие инвариантные подмодели. Указан физический смысл полученных решений. В частности, с помощью этих решений описаны турбулентные процессы, для которых существуют турбулентные волны, как с фиксированными волновыми числами, так и с переменными волновыми числами, которые были названы «деструктивными волнами». Эти волны, обладающие очень большой кинетической энергией, были использованы [3] для обоснования возникновения известных "rogue waves" или, как их еще называют, "freak waves".

На примере инвариантного решения ранга 1 показано, что поиск инвариантных решений ранга 1 можно свести к решению интегральных уравнений. Для этого решения исследованы турбулентные процессы, для которых в начальный момент времени при фиксированном значении волнового числа заданы либо энергия турбулентности, и скорость ее изменения, либо энергия турбулентности, и ее градиент. При определенных условиях установлены существование и единственность решений краевых задач, описывающих эти процессы.

Механическая значимость полученных решений заключается в следующем: 1) эти решения описывают нелинейные процессы волновой турбулентности в средах с нестационарной вязкостью, 2) эти решения могут быть использованы в качестве тестовых решений в численных расчетах, выполняемых при изучении процессов волновой турбулентности в средах с нестационарной вязкостью, 3) эти решения позволяют оценить степень адекватности полученных математических моделей реальным физическим процессам после проведения экспериментов, соответствующих этим решениям, и оценки полученных отклонений. Приведение рассмотренных задач с начальными условиями к интегральным уравнениям удобно для исследования их решений на устойчивость и для их численного решения.

1. Yu. A. Chirkunov. Generalized Equivalence Transformations and group classification of systems of differential equations // J. Appl. Mech. Techn. Phys. 2012. V. 53. No 2. P. 147–155.

2. Yu. A. Chirkunov. Submodels of the generalization of the Leith's model of the phenomenological theory of turbulence and of the model of nonlinear diffusion in the inhomogeneous media without absorption // J. Phys. A: Math. Theor. 2015. 395501. V. 48, No. 39. 22 pp.

3. Yu. A. Chirkunov. Invariant submodels and exact solutions of the generalization of the Leith model of the wave turbulence // Acta Mechanica. 2018. V. 229. Issue 10. P. 4045–4056.

## ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ГИДРОАКУСТИКИ ХОХЛОВА-ЗАБОЛОЦКОЙ-КУЗНЕЦОВА

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

<sup>1</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск

<sup>2</sup>Тюменский государственный университет, Тюмень

e-mail: [chr101@mail.ru](mailto:chr101@mail.ru)

Трехмерная модель Хохлова-Заболотской-Кузнецова (ХЗК) нелинейной гидроакустики с диссипацией описывается нелинейным дифференциальным уравнением 3-его порядка. Получено, что это уравнение допускает бесконечную группу Ли преобразований. Исследованы существенно различные инвариантные решения ранга 0 и 1, которые найдены либо явно, либо их поиск сводится к решению нелинейных интегро-дифференциальных уравнений. Также рассмотрены некоторые инвариантные решения ранга 2 и 3. Например, получены решения, которые мы назвали «Ультразвуковым ножом» и «Ультразвуковым разрушителем». Подмодель «Ультразвуковой нож» обладает следующим свойством: в каждый фиксированный момент времени вблизи некоторой плоскости давление неограниченно возрастает и на этой плоскости становится бесконечным. Это решение описывает мощный плоский ультразвуковой пучок, способный поразить со скоростью звука подводные или плавающие объекты. За установками, генерирующими такие ультразвуковые пучки – будущее, т.к. никакое физическое тело не может двигаться под водой со скоростью звука. Сопротивление воды этого не позволит. Учитывая проверенную на практике высокую адекватность модели (ХЗК) реальным процессам, полученное решение можно будет использовать в качестве теста при расчетах, связанных с созданием таких установок. Это решение также можно использовать в медицине в качестве теста при ультразвуковой диагностике и при подготовке к неинвазивным хирургическим операциям с помощью ультразвука. Подмодель «Ультразвуковой разрушитель» содержит счетное количество «Ультразвуковых ножей».

С помощью инвариантных решений исследовано распространение интенсивных акустических волн (одномерных, осесимметричных и плоских), для которых акустическое давление, скорость и ускорение его изменения заданы в начальный момент времени в фиксированной точке. При некоторых условиях установлено существование и единственность решений краевых задач, описывающих эти волновые процессы.

Полученные результаты могут быть использованы для расчета параметрических антенн сонаров на подводных лодках и морских судах, а также для расчета ультразвуковых полей в неинвазивной ультразвуковой хирургии с использованием высокоинтенсивных фокусированных пучков и при ультразвуковой диагностике в медицине.

1. Chirkunov Yu.A., Belmetsev N.F. Invariant submodels and exact solutions of Khohlov-Zabolotskaya-Kuznetsov model of nonlinear hydroacoustics with dissipation // Int. J. Non-Linear Mech. 2017. V.95. P.216–223.

## ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЛИ ГАЗА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ НАЛИЧИИ ИСТОЧНИКА ИЛИ ПОГЛОЩЕНИЯ

Ю.А. Чиркунов, Ю.Л. Сколубович

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск  
e-mail: [chr101@mail.ru](mailto:chr101@mail.ru)

Исследуется общая трехмерная нелинейная диффузионная модель пористой среды с нестационарным источником или поглощением. С помощью предложенного в [1] алгоритма найдены девять базовых моделей исходной модели пористой среды с нестационарным источником или поглощением, имеющие различные симметричные свойства [2]. Для модели, допускающей самую широкую группу Ли преобразований (девятнадцатипараметрическую), получены все инвариантные подмодели. Для всех ее инвариантных подмоделей ранга 0 найдены описывающие их инвариантные решения. В частности, получены решения, которые мы назвали «слоистый круговой пирог», «слоистый спиральный пирог», «слоистый плоский пирог» и «слоистый сферический пирог».

«Слоистый круговой пирог» описывает движение жидкости или газа в пористой среде, для которого в каждый фиксированный момент времени во всех точках каждой окружности из семейства концентрических окружностей давление одно и то же. «Слоистый спиральный пирог» описывает движение жидкости или газа в пористой среде, для которого в каждый фиксированный момент времени во всех точках каждой логарифмической спирали из полученного семейства логарифмических спиралей давление одинаковое. Решение «слоистый сферический пирог» описывает движение жидкости или газа в пористой среде, для которого в каждый фиксированный момент времени во всех точках каждой сферы из семейства концентрических сфер давление одно и то же. Набор решений «слоистый круговой пирог», «слоистый спиральный пирог» и «слоистый сферический пирог» содержит решения, описывающие распределение давления в пористой среде после точечного взрыва или точечного гидравлического удара, а также решения, описывающие стратифицированное по отношению к давлению движение жидкости или газа в пористой среде с очень высоким давлением на бесконечности в присутствии очень сильного поглощения в точке.

Решение «слоистый плоский пирог», описывает движение жидкости или газа в пористой среде, для которого в каждый фиксированный момент времени во всех точках каждой плоскости из семейства параллельных плоскостей давление одно и то же. Набор решений «слоистый плоский пирог» содержит решения, описывающие движение жидкости или газа в пористой среде с очень высоким давлением вблизи неподвижной плоскости в присутствии очень сильного поглощения на бесконечности, а также решения, описывающие движение жидкости или газа в пористой среде с очень высоким давлением на бесконечности в присутствии очень сильного поглощения на фиксированной плоскости.

Полученные результаты могут быть использованы для изучения процессов, связанных с подземным потоком жидкости или газа, с фильтрацией воды, а также со сланцевой добычей нефти и газа.

1. Yu. A. Chirkunov. Generalized Equivalence Transformations and group classification of systems of differential equations. J. Appl. Mech. Techn. Phys. 2012. V.53. No 2. P.147–155.

2. Yu. A. Chirkunov, Yu. L. Skolubovich. Nonlinear three-dimensional diffusion models of porous medium in the presence of non-stationary source or absorption and some exact solutions. Int. J. Non-Linear Mech. 2018. V.106. P.29–37.



## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ПРИ ОБТЕКАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО РЕЛЬЕФА НА СТЕНКЕ КАНАЛА

А.Ю. Чулюнин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: [chulyu-n@mail.ru](mailto:chulyu-n@mail.ru)

Исследование механизмов взаимодействия турбулентного потока вязкой несжимаемой жидкости с луночными рельефами остается актуальным вопросом современной механики. В зависимости от отношения максимальной глубины  $H$  и диаметра пятна  $D$  принято различать мелкие ( $H/D < 0.25$ ) и глубокие ( $H/D > 0.25$ ) лунки. Мелкие лунки характеризуются стационарным характером обтекания, при котором в основном наблюдается симметричная вихревая картина. В глубоких лунках стационарные схемы течения оказываются неустойчивыми, наблюдается формирование нестационарного течения с аperiodическим чередованием «левостороннего» и «правостороннего» несимметричных режимов [1]. В последнее время все больше работ посвящено исследованию характеристик овално-траншейных лунок с цилиндрической вставкой. В работе [2] показано, что суммарная теплоотдача от участка с длинной овалной траншеей более чем в три раза превышает теплоотдачу от участка со сферической лункой при одинаковой площади пятна. Однако в этой и подобных работах исследуются лунки небольшой глубины и, как следствие, со стационарными структурами.

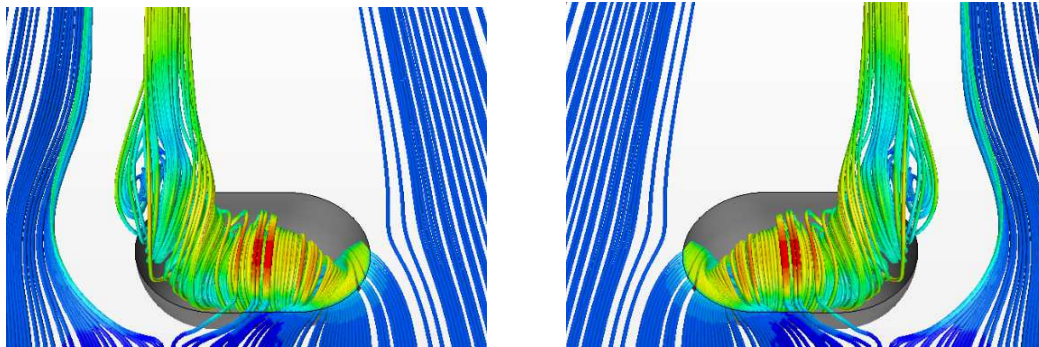


Рис. 1. Структура обтекания овално-траншейной лунки ( $L/D=0.5$ ). Слева – левый несимметричный режим, справа – правый несимметричный режим.

В работе на базе численного моделирования исследуется структура течения в канале с нанесенными на его дно глубокими овално-траншейными лунками. Длина цилиндрической вставки варьируется от  $0.5$  до  $3 D$ . Для дискретизации расчетной области применялась неструктурированная сетка многогранного типа со сгущением в окрестности лунки и в ее следе. Высота первой ячейки слоя выбиралась таким образом, чтобы безразмерный параметр  $y^+ < 1$ , что объясняется требованиями применяемых подходов к моделированию турбулентности (URANS и DES). Число Рейнольдса вычисленное по скорости набегающего потока и диаметру начального пятна лунки равняется  $Re = 5 \cdot 10^4$ . Проведенные расчеты показали, что структура течения в лунках небольшого удлинения ( $L/D < 1.5$ ) сходна со сферической. Наблюдается чередование двух несимметричных режимов: ядро вихря пересекает продольную ось симметрии лунки под углом  $\pm 45$  (рис.1). Увеличение размеров цилиндрического участка лунки ( $L/D \geq 1.5$ ) приводит к существенной перестройке течения: переключательный режим сменяется на симметричный, имеющий сложную вихревую структуру. При этом осредненные поля, полученные с помощью методов URANS и DES, хорошо согласуются между собой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-01-00242.

1. V. Voskoboinick, N. Kornev, J. Turnow. Study of Near Wall Coherent Flow Structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // Flow Turbulence Combust, 2013, Volume 90, Issue 4, pp 709–722.

2. Isaev S. A., Schelchkov A. V., Leontiev A. I., Gortyshov Yu. F., Baranov P. A., and Popov I. A. Tornado-like heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area. Int. J. Heat Mass Transf. 2017. Vol. 109. pp. 40–62.

## ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ТРЕХМЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

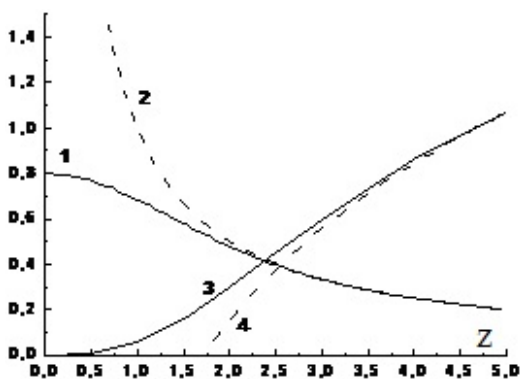
В.И. Шалаев

Факультет аэромеханики и летательной техники Московского физико-технического института, Жуковский  
e-mail: [vi.shalaev@yandex.ru](mailto:vi.shalaev@yandex.ru)

Особенности, возникающие в решениях уравнений нестационарного и трехмерного пограничных слоев, являются признаком возникновения областей больших градиентов в реальных течениях. Их исследование и построение адекватных моделей структур течения является актуальной, как для математической физики, так и для численного моделирования аэродинамических приложений. Структура отрыва потока хорошо изучена для различных режимов, чего нельзя сказать о других типах особенностей. Сингулярности логарифмического типа во внешней части пограничного слоя впервые были обнаружены К. Стюартсоном. Дж. Вильмсом были сформулированы необходимые условия для образования особенностей в пограничных слоях, но достаточные условия, типы сингулярностей и структура течения исследованы не были.

Особенности могут быть обусловлены разрывом краевых условий или столкновением двух семейств субхарактеристик (линий тока) – это есть необходимое условие. Ситуация второго типа характерна для наветренной плоскости симметрии (плоскости стекания) тел под углом атаки. Для автомодельного течения на конусе течение определяется одним параметром  $k$  – безразмерным градиентом давления в плоскости стекания. В плоскости растекания и для малых углов атаки ( $k \leq k_c$ ) в плоскости стекания было обнаружено два решения. Численного решения не существует в этой плоскости при умеренных углах атаки ( $k_c \leq k < 2/3$ ), но при больших углах атаки вплоть до отрыва пограничного слоя ( $2/3 \leq k < 1$ ) было найдено много решений; при  $k \geq 1$  сходящееся автомодельное решение уравнений пограничного слоя отсутствует и этот диапазон соответствует отрыву пограничного слоя. Решения полных уравнений пограничного слоя с начальными условиями в плоскости растекания зафиксировали нарушение условий симметрии в плоскости стекания, скачок скорости через эту плоскость в диапазоне углов атаки, когда решение отсутствовало. Подобные результаты были получены для течения около крыла.

Объяснение полученных результатов было найдено на основе аналитических решений уравнений для внешней части пограничного слоя с начальными условиями в подветренной плоскости симметрии тонкого кругового конуса, и несколько более сложные – для произвольных конусов [1]. Это позволило определить достаточные условия возникновения особенностей. В наветренной плоскости симметрии была обнаружена особенность логарифмического типа при  $k = 1/3$  и степенного типа при  $k > 1/3$ . Показано, что особенности могут возникать в пристеночной области пограничного слоя, что объясняет зависимость критического значения  $k_c = k_c(M_\infty, Pr, h_w)$  от чисел Маха  $M_\infty$ , Прандтля  $Pr$  и температуры стенки  $h_w$  [2]. На основе уравнений Навье-Стокса построена асимптотическая структура течения при больших числах Рейнольдса, причем выяснилось, что вязко-невязкое взаимодействие не позволяет устранить особенность, рядом с плоскостью симметрии существует область, которая описывается параболизированными уравнениями Навье-Стокса. Для различных асимптотических областей были получены аналитические решения. Она также объяснила численные результаты на основе параболизированных уравнений Навье-Стокса. На рисунке приведены асимптотические решения уравнений Навье-Стокса (сплошные кривые) и пограничного слоя для  $k = 1/3$  (3, 4) и  $2/3$  (1, 2) описанные результаты для окрестности плоскости стекания конических тел.



1. V.I. Shalaev. Singularities of 3D laminar boundary layer equations and flow structure in their vicinity on conical bodies // AIP Conference Proceedings. 2016. 1770. P. 030055-1–030055-14. DOI: 10.1063/1.4963997.

2. V.I. Shalaev. New type of singularity in the near-wall region of 3D boundary layer over the runoff plane and the flow structure in its vicinity // EUCASS-2017 Proceedings. 2017. DOI: 10.13009/EUCASS2017-82.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО УЗЛА НЕРВЮРЫ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

Н.Г. Шаронов<sup>1</sup>, А.В. Ивченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

<sup>2</sup> ТМПК - Волгоград, Волгоград

e-mail: [sharonov@vstu.ru](mailto:sharonov@vstu.ru)

Для улучшения аэродинамических свойств летательных аппаратов за счет изменения геометрии крыла в зависимости от режима полета находят применение технологии адаптивного крыла [1]. Основой предлагаемой конструкции каркаса адаптивного крыла является мехатронный узел, который призван обеспечить заданный угол между элементами в структуре адаптивного крыла, согласованное управление которыми позволяет изменять геометрию крыла. Мехатронный узел представляет собой шарнирно связанные сотообразные конструкции [2], вписанные в контур крыла и оснащенные приводом.

Разработан проект и реализовано прототипирование (рис. 1) мехатронного узла нервюры с изменяемой геометрией крыла летательного аппарата, обеспечивающего плавное изменение геометрии профиля. Разработана модель управляемого двигателем макета адаптивной части крыла летательного аппарата. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния модели элементов макета мехатронного узла нервюры с изменяемой геометрией.

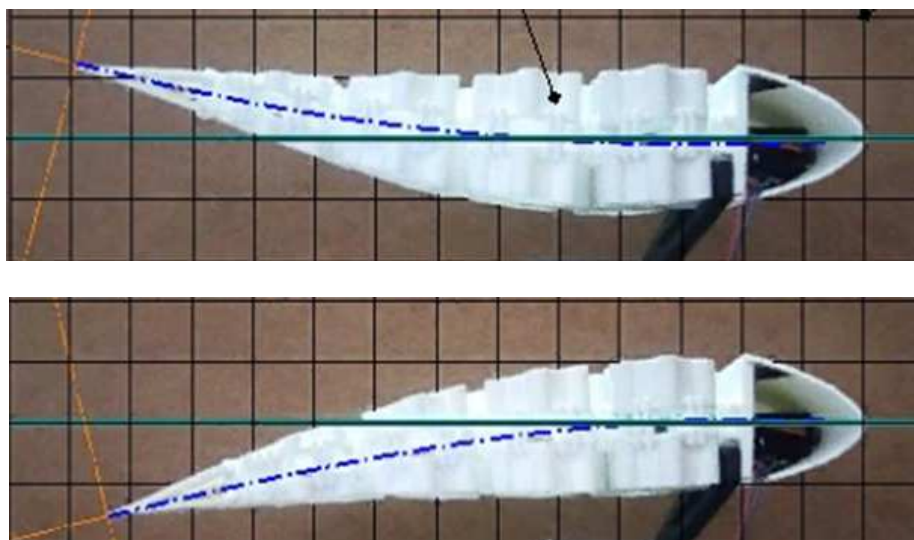


Рис. 1

Представлены результаты исследования и лабораторных испытаний управляемого движения макета адаптивной части крыла с нервюрой изменяемой геометрии. Рассматриваются методы повышения эффективности конструкции и методов управления мехатронным узлом макета адаптивной части крыла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (Проект № 43226, заявка С1Н50596 в целях реализации планов мероприятий НТИ «Аэронет» в рамках реализации инновационного проекта «Разработка мехатронного узла адаптивного крыла»).

1. Мехатронный узел и каркас адаптивного крыла / А.В. Ивченко, Н.Г. Шаронов // Прогресс транспортных средств и систем – 2018; ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. С. 176–177.

2. Ивченко А.В. Мехатронный узел и каркас адаптивного крыла / Изобретательство, №7, 2018, С. 34–38.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ И МАКЕТА ПОВОРОТНО-ЛИНЕЙНОГО ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ

*Н.Г. Шаронов, Г. Ю. Прокудин*

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград  
e-mail: [sharonov@vstu.ru](mailto:sharonov@vstu.ru)

Рассматривается модульный мобильный робот, каждый из движителей которого состоит из нескольких идентичных по конструкции механизмов шагания [1], представляющих собой ортогонально расположенные в перпендикулярной раме корпуса плоскости приводы линейных перемещений: привод вертикального перемещения и привод горизонтального перемещения [2]. Приводы горизонтального перемещения закреплены на поворотной направляющей в перпендикулярной оси вращения движителя плоскости. В зависимости от взаимного расположения горизонтальных направляющих и их количества можно синтезировать движители с различными свойствами [3, 4].

Проведено моделирование и разработана конструкция действующего макета поворотного-линейного шагающего движителя, обеспечивающая физическое моделирование согласованного управления приводами модульного мобильного робота произвольной конфигурации.

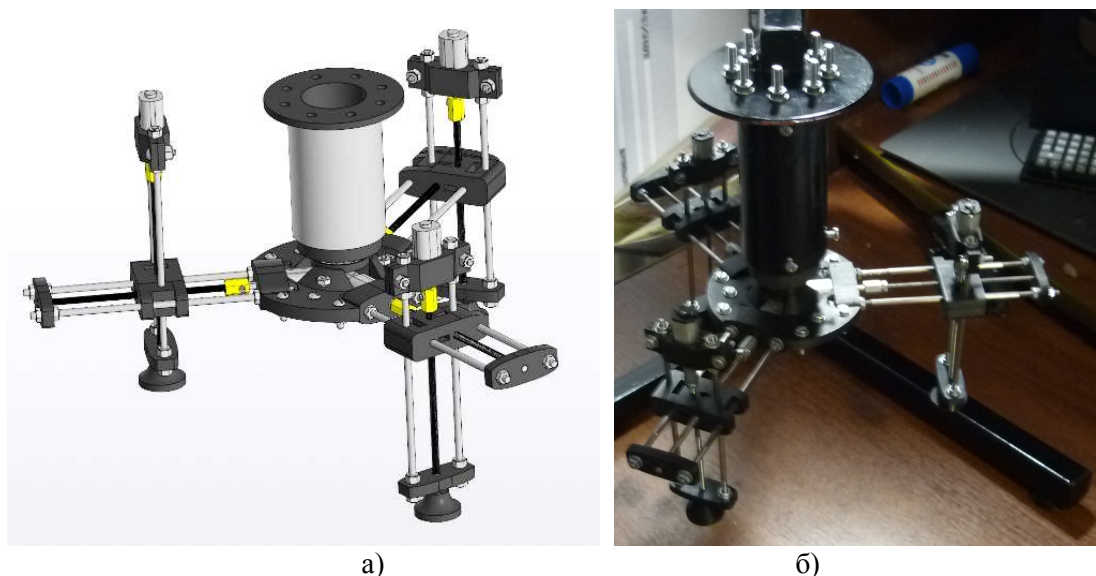


Рис. 1. Модель (а) и макет (а) поворотного-линейного шагающего движителя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, проект № 18-71-10069.

1. Development of Rotary Type Movers Discretely Interacting with Supporting Surface and Problems of Control Their Movement / Е.С. Брискин и др. // ROMANSY 21: Springer, 2016. P. 351–359.
2. П. м. 159369 РФ, МПК В62D57/032. Шагающее транспортное средство / Е.С. Брискин и др.; ВолгГТУ. 2016.
3. Реконфигурируемый транспортный комплекс со сдвоенными шагающими движителями / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, С.С. Фоменко // Известия ВолгГТУ / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. № 24 (127). С. 10–15.
4. Исследование режимов работы приводов дискретно взаимодействующих с поверхностью движителей мобильных роботов / Н.Г. Шаронов // Всероссийская конференция молодых учёных-механиков YSM–2018: тез. докл. / НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике. Москва, 2018. С. 160.



## ТРЕХМЕРНЫЕ КВАЗИКОНФОРМНЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ

Ю.Д. Шевелев

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва  
e-mail: [shevelev@icad.org.ru](mailto:shevelev@icad.org.ru)

В течение многих лет не прекращались попытки распространить методы двумерных конформных отображений на трехмерный случай. Конформные отображения используются для расчета и визуализации гармонических векторных полей в гидродинамике, теории упругости, фильтрации, электромагнетизма и др. Двумерные конформные отображения являются мощным и элегантным инструментом решения многих математических и физических задач. В общем виде для трехмерных задач свойства плоских конформных отображений не обобщаются. Известно, что конформными отображениями трехмерных областей являются преобразования движения, подобия, ортогональные преобразования и инверсии. Однако, если отказаться от некоторых ограничений, то свойства двумерных конформных отображений можно обобщить и на трехмерный случай [1].

Для установившегося безвихревого течения идеальной несжимаемой жидкости наряду с потенциалом скоростей вводятся две функции тока. Эти преобразования положены в основу гармонических по М.А. Лаврентьеву отображений [2,3]. С другой стороны, эти условия можно рассматривать как обобщение условий Коши-Римана в трехмерном случае [2]. При этом обобщенные трехмерные условия Коши-Римана для гармонических отображений сводятся при определенных условиях к условиям Коши-Римана для двух функций комплексного переменного. Приведены обобщенные условия, из которых следуют трехмерные квазиконформные отображения.

Рассматривается случай осесимметрического течения с точки зрения теории трехмерных квазиконформных отображений. Квазиконформные отображения осесимметрических 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. Построены гармонические полиномы произвольной степени и подобраны сопряженные к ней функции. Найдены аналоги степеней комплексного переменного [3].

Аналог трехмерных квазиконформных отображений получен при последовательном использовании двух обычных функций комплексного переменного. Построенные отображения можно представить в виде последовательности двумерных конформных отображений. Решение трехмерных задач получаются как суперпозиция двумерных отображений. Приводятся примеры построения сеток с помощью теории квазиконформных отображений. Лучшим доказательством приведенных результатов является их визуализация [1].

Осесимметрические отображения обобщаются на трехмерный случай. Решение получается в явном виде для потенциала скоростей и одной из функций тока. Потенциал скоростей получается из произвольного двумерного конформного отображения преобразованием, в котором в качестве переменной используется действительная часть первого конформного отображения, которое задает одну из функций тока.

Отдельно рассматриваются пространственные (осесимметрические) течения идеальной несжимаемой жидкости. Изучается обратная задача, которая состоит в определении свойств течения неизвестной формы по характеристикам поля течения. Используется система координат, связанная с линиями тока течения. Рассматриваются различные случаи задания интенсивности источников и стоков на оси симметрии, которые приводят к различным формам течений. В зависимости от мощности источников, их расположения реализуется качественно различный характер формирования, расщепления и взаимодействия пространственных (осесимметрических) особых точек. Изучаются поля течений, которые топологически отличаются друг от друга. Особые точки появляются и взаимодействуют друг с другом. Узел появляется вместе с седловой точкой. Комбинации узлов, седловых точек приводят к различным формам течения.

Работа выполнена в рамках госзаказа.

1. Шевелев Ю.Д. //Применение трехмерных квазиконформных отображений для построения сеток // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2018, Т. 58, № 8.
2. Янушаускас А.И. Трехмерные аналоги конформных отображений, Н., «Наука». 1973.
3. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели, М., «Наука». 1973.

Научное издание

# ***СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ***

**Тезисы докладов XIX Всероссийской школы-семинара,  
посвященной 60-летию Научно-исследовательского института механики  
МГУ имени М.В. Ломоносова**

(5 – 15 сентября, 2019 г.; Сочи, «Буревестник» МГУ)

Публикуется в авторской редакции с оригинал-макета,  
подготовленного в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова.

---

Подписано в печать 01.08.2019  
Печать офсетная

Формат 60x84 1/8  
Усл. печ. л. 20

Бумага офсетная №1  
Тираж 110 экз.

---

Издательство Московского университета  
119191, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15  
(ул. Академика Хохлова, д. 11)

Отпечатано на ризографе НИИ механики МГУ  
119192, Москва, Мичуринский пр., д. 1