



НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова

Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике



ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ-МЕХАНИКОВ

***4–14 СЕНТЯБРЯ 2018
СОЧИ, «БУРЕВЕСТНИК» МГУ***

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

УДК 531/534

ББК 22.2

В 84

Ответственные редакторы:

А.А. Афанасьев, М.С. Макарова

Составители: А.И. Агеев, В.В. Веденеев, А.Г. Здитовец, О.О. Иванов,
Л.А. Климина, Б.И. Краснопольский, О.Г. Сутырин, В.В. Терауд, А.М. Чайка

В84 Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2018. Тезисы докладов (4 – 14 сентября 2018 г., Сочи, «Буревестник» МГУ). – М.: Издательство Московского университета, 2018. – 172 с.

ISBN 978-5-19-011313-6

Проведение Всероссийской конференции молодых учёных-механиков направлено на поддержание высокого уровня фундаментальных и прикладных исследований молодых ученых, сохранения и развития научных школ и преемственности поколений в ведущих научных коллективах и генерирования инновационных идей. Цель конференции – сделать молодых учёных более коммуникабельными, расширить их научный кругозор, наладить научные связи между учёными из различных университетов, институтов и профильных научных организаций страны. Тематика конференции охватывает все направления механики, в том числе такие направления как механика жидкости и газа, механика деформируемого твёрдого тела, теоретическая механика, мехатроника и робототехника. Данный сборник содержит тезисы докладов участников конференции.

Конференция проводится при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-31-10032-мол_г.

УДК 531/534

ББК 22.2

ISBN 978-5-19-011313-6

© Московский государственный
Университет имени
М.В.Ломоносова, 2018 г.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова,
Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике

НАУЧНЫЙ КОМИТЕТ

И.Г. Горячева – Сопредседатель Научного комитета (ИПмех РАН, Москва)

Ю.М. Окунев – Сопредседатель Научного комитета (МГУ, Москва)

Члены Научного комитета

В.Б. Баранов (ИПмех РАН, Москва); В.В. Голуб (ОИВТ РАН, Москва); Г.Н. Дудин (ЦАГИ, Жуковский, Моск. обл.); А.Н. Крайко (ЦИАМ, Москва); А.М. Кривцов (СПбПУ, Санкт-Петербург); А.И. Леонтьев (МГУ, Москва); И.И. Липатов (ЦАГИ, Жуковский, Моск. обл.); С.Я. Степанов (ВЦ РАН, Москва); Ю.М. Темис (ЦИАМ, Москва); Д.В. Трещев (МИАН, Москва)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Совет молодых ученых НИИ механики МГУ: А.А. Афанасьев (председатель Организационного комитета); М.С. Макарова (ученый секретарь Организационного комитета); А.М. Чайка (ответственный секретарь Организационного комитета); А.И. Агеев; В.В. Веденеев; А.Г. Здитовец; О.О. Иванов; Л.А. Климина; Б.И. Краснопольский; О.Г. Сутырин; В.В. Терауд

СОДЕРЖАНИЕ

В.Б. Баранов КАК МЕТОДЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА? ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ	13
В.В. Голуб ВЛИЯНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА УСКОРЕНИЕ ФРОНТА ПЛАМЕНИ	15
И.Г. Горячева МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ	16
Г.Н. Дудин ГИПЕРЗВУКОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ. РЕЖИМ СИЛЬНОГО ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	18
А.Н. Крайко СРАВНЕНИЕ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С МЕДЛЕННЫМ ГОРЕНИЕМ И ГОРЕНИЕМ В ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛНАХ	19
А.М. Кривцов МЕХАНИКА ДИСКРЕТНЫХ СРЕД И АНОМАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ	22
И.И. Липатов ИСТОРИЯ ТЕОРИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	23
Т.В. Сальникова, С.Я. Степанов ДВИЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В ОКРЕСТНОСТИ ТРЕУГОЛЬНЫХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ	24
Ю.М. Темис МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГТД	26
Д.В. Трещев ХАОС В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ	28
Ф.А. Абдухакимов ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛАТТЕРА КОНСТРУКЦИЙ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА	29
А.А. Абу Газал, В.И. Сурин ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВПЛОТЬ ДО РАЗРУШЕНИЯ	30
Ю.А. Агеева, С.П. Баутин ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ СИЛ ТЯЖЕСТИ И КОРИОЛИСА В ПРИМЕНЕНИИ К ТРОПИЧЕСКИМ ЦИКЛОНАМ	31
В.Ф. Копьев, С.А. Чернышев, Р.В. Акиншин, М.А. Юдин О НОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА В НЕВЯЗКОЙ, НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ	32
И.А. Амелюшкин, А.Л. Стасенко МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И УПРАВЛЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ	33
И.А. Амелюшкин ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ НОВЫХ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ	34
М.С. Астанина, М.А. Шеремет МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЧАСТИЧНО ПОРИСТОЙ ПОЛОСТИ В ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ	35
А.А. Афанасьев ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОИСТОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СОЛЁНОЙ ЖИДКОСТИ	36

А.А. Афанасьев РАСЧЁТ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ MUFITS	37
В.Г. Белова, В.А. Степанов, А.Ю. Чирков ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ СТРУЙ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В МЕЖТУРБИННОМ КАНАЛЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТРДД	38
В.О. Бондарев, В.В. Веденеев ОДНОМОДОВЫЙ ФЛАТТЕР УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ НАЛИЧИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ	39
К.С. Бормотин, Вин Аунг, Ю.А. Сверкунов МЕТОД РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНОГО МНОГОТОЧЕЧНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПАНЕЛИ В РЕЖИМЕ ПОЛЗУЧЕСТИ	40
В.Ф. Копьев, Г.А. Фараносов, С.А. Чернышев, О.П. Бычков РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЛНАМИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЯХ	41
Х.Ф. Валиев ИСТЕЧЕНИЕ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА ИЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЛИ СФЕРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА В ПУСТОТУ	42
И.А. Варьян, Е.Е. Масталыгина, Н.Н. Колесникова, А.А. Попов МЕХАНИКА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАТУРАЛЬНОГО КАУЧУКА	43
Р.Д. Вахитова, Е.И. Могилевский, Е.Б. Николаев СТЕКАНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ	44
Р.Д. Вахитова, Е.И. Могилевский, Е.Б. Николаев БЕЗВОЛНОВОЕ СТЕКАНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ	45
Я.А. Вахтерова, Г.В. Федотенков ОБРАТНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА О РЕКОНСТРУКЦИИ НАГРУЗКИ ДЛЯ МОДЕЛИ БАЛКИ ТИМОШЕНКО	46
М.И. Вдовин, Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕНЫ НА ПОВЕРХНОСТИВОДЫ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА И ТЕПЛАВ ПОГРАНИЧНОМ ВОЗДУШНОМ СЛОЕ	47
М.И. Вдовин, Д.А. Сергеев, О.С. Ермакова, А.А. Кандауров, Ю.И. Троицкая ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ОБТЕКАНИЯ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ	48
М.И. Вдовин, Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА И ТЕПЛА В СТАБИЛЬНО СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ПОГРАНИЧНОМ ВОЗДУШНОМ СЛОЕ НАД ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	49
В.В. Веденеев, Ю.С. Зайко ОБ АБСОЛЮТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ	50
А.А. Вяткин, В.Г. Козлов, Р.Р. Сабилов ОСРЕДНЕННАЯ ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ, ВОЗБУЖДАЕМАЯ ИНЕРЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ В ТОЛСТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ВРАЩЕНИИ	51
Г.С. Ганченко, Н.Ю. Ганченко, А.И. Манрикян НОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕХОДА К РЕЖИМАМ СВЕРХПРЕДЕЛЬНЫХ ТОКОВ В УМЕРЕННО КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ ОКОЛО НЕИДЕАЛЬНЫХ ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	52
Г.С. Ганченко, Е.В. Горбачева ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДВУХСЛОЙНОГО МИКРОТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ КАСАТЕЛЬНОГО И НОРМАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ	53

Н.Ю. Ганченко, Г.С. Ганченко СРАВНЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-БЕНАРА И ТЕРМОЭЛЕКТРОКОНВЕКЦИИ В МИКРОКАНАЛЕ МЕЖДУ ИОНОСЕЛЕКТИВНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ	54
Н.Ю. Ганченко, Д.А. Оксюзьян, М.Ю. Репина КОНКУРЕНЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ, ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТА ОКОЛО ИДЕАЛЬНЫХ ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ МЕМБРАН	55
М.А. Гарбуз ВЕТРОДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ПЛАВАТЕЛЬНЫХ СУДОВ	56
М.А. Гарбуз ПРИМЕНЕНИЕ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ В НАВИГАЦИИ СУДОВ	57
А.К. Гильфанов, Т.Ш. Зарипов МЕТОД МОМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ	58
А.П. Голуб ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ И ВЛИЯНИЕ УПРУГОГО КРЕПЛЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ДВУХЗВЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МАЯТНИКА	59
И.В. Голубкина, А.Н. Осипцов, А.И. Агеев СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН В ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА АДИАБАТИЧЕСКОЙ СТЕНКЕ	60
М.М. Гончаров, А.Н. Кондрашов ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЗАДАЧЕ О КОНВЕКЦИИ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ЧАСТИЧНО НАГРЕТЫМИ ЦИЛИНДРАМИ	61
М.М. Гончаров, А.Н. Кондрашов К ВОПРОСУ О ДЕТЕКТИРОВАНИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	62
Н.В. Горохова МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ СМЕСИ ГАЗ - ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ЭЛЕКТРИЗАЦИИ	63
Н.В. Горохова МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ	64
Н.В. Горохова РАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НА ПЛОСКОСТИ (В ПРОСТРАНСТВЕ) ЧАСТИЦ РАЗНОГО РАЗМЕРА	65
С.А. Давыдов, А.В. Земсков НЕСТАЦИОНАРНАЯ ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОУПРУГОЙ ДИФфуЗИИ С УЧЕТОМ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ДИФфуЗИОННЫХ ЭФФЕКТОВ	66
Д.А. Двойников ДЕМПФИРОВАНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	67
Л.А. Дегадникова, А.В. Осинцев МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ	68
М.Н. Деменков ПОРТАТИВНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛАТТЕРА ПЛАСТИНЫ НА ПЛОСКОЙ ПРУЖИНЕ	69
Д.Н. Дерендяев, Н.В. Дерендяев О ВЛИЯНИИ АНИЗОТРОПИИ ДЕМПФИРОВАНИЯ В ЗАКРЕПЛЕНИЯХ ОСИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМА СТАЦИОНАРНОГО ВРАЩЕНИЯ РОТОРА С ЖИДКОСТЬЮ	70
К.П. Дружков МЕЛКАЯ ВОДА НАД НЕРОВНЫМ ДНОМ: ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ, ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ	71

В.В. Володин, В.В. Голуб, А.Е. Ельянов УСЛОВИЯ ДЛЯ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА НА СФЕРИЧЕСКОМ ФРОНТЕ ПЛАМЕНИ	72
А.И. Ершова ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕЛОМА БЕДРЕННОЙ КОСТИ ПОСЛЕ ХИРУРГИЧЕСКОЙ РЕЗЕКЦИИ: ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КОРТИКАЛЬНОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ	73
Ю.С. Зайко, М.Э. Эглит ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПОТОКОВ НА СКЛОНАХ	74
С.И. Трефилов, М.В. Захарова ПОСТРОЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ И ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ	75
Н.А. Зверев, А.В. Земсков, Д.В. Тарлаковский ОДНОМЕРНАЯ ЗАДАЧА ПЬЕЗОЭЛЕКТРОМАГНИТОУПРУГОЙ ДИФфуЗИИ ДЛЯ СЛОЯ	76
А.Г. Здитовец, Ю.А. Виноградов, М.М. Стронгин, Н.А. Киселев ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА	77
А.Г. Здитовец, Ю.А. Виноградов, М.М. Стронгин, Н.А. Киселев ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ КАНАЛ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ	78
А.Г. Здитовец, С.С. Попович, Н.А. Киселев, Ю.А. Виноградов, М.М. Стронгин ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОЙ СТЕНКИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ПОТОКЕ	79
А.И. Зубко АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В ГОРЕЛКЕ ГТД МЕТОДАМИ ВИБРОДИАГНОСТИКИ	80
А.Н. Голубятников, О.О. Иванов О ДВИЖЕНИИ КОНТИНУУМА ПЛАВЯЩИХСЯ ЧАСТИЦ	81
Ю.С. Зайко, О.О. Иванов, А.Д. Чичерина, В.В. Трифонов, А.И. Решмин, В.В. Веденеев ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ	82
Я.В. Калинин, И.А. Тарасова САМОПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ: ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ	83
Я.В. Калинин, М.В. Мирошкина К ВОПРОСУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ	84
Я.В. Калинин, М.В. Мирошкина, И.А. Тарасова ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ	85
А.А. Каменских, Т.Н. Устюгова АНАЛИЗ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗУБНОЙ ШИНЫ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	86
А.А. Каменских ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ	87
Д.П. Касымов, М.В. Агафонцев, В.В. Перминов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ДРЕВЕСНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОГНЕЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАЖИГАНИЯ	88
Д.П. Касымов, М.В. Агафонцев ПРИМЕНЕНИЕ ИК-ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ УЧАСТКОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ДРЕВЕСИНЫ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ТЕПЛОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ОТ ПРИРОДНОГО ПОЖАРА	89

<u>В.С. Каширин, А.В.Осинцев</u>	90
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ГЛАВНОМ РАЗЪЕМЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1000	
<u>В.С. Каширин</u>	91
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАРДИОЛОГИИ С ПОМОЩЬЮ СВЯЗКИ ABAQUS-FLOWVISION	
<u>А.Е. Киреева, В.Д. Кухарь, А.С. Сорвина</u>	92
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ОБОЛОЧЕК	
<u>С.Л. Дерябин, А.С. Кирьянова</u>	93
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА, ВОЗНИКАЮЩИХ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАСПАДА СПЕЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА ПРИ УЧЕТЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ	
<u>Н.А. Киселёв, А.Г. Здитовец, М.М. Стронгин, Ю.А. Виноградов</u>	94
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАДКОЙ И ВИХРЕОБРАЗУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ В СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ	
<u>Н.А. Киселёв, А.Г. Здитовец, М.М. Стронгин, Ю.А. Виноградов</u>	95
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ	
<u>Н.А. Киселёв, А.Г. Здитовец, М.М. Стронгин, Ю.А. Виноградов</u>	96
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕОБРАЗУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ	
<u>А.В. Копьев, К.П. Зыбин</u>	97
ДВУХТОЧЕЧНЫЕ ТРЕТЬИ СМЕШАННЫЕ КОРРЕЛЯТОРЫ СКОРОСТИ И ГРАДИЕНТА СКОРОСТИ В ОДНОРОДНОЙ ИЗОТРОПНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	
<u>А.В. Копьев, К.П. Зыбин</u>	98
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ИЗОТРОПНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ, ОСНОВАННАЯ НА ЛИНЕЙНОМ МЕХАНИЗМЕ	
<u>А.В. Копьев</u>	99
СВОЙСТВА ТЕНЗОРА СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ В СЛУЧАЙНЫХ НЕСЖИМАЕМЫХ ПОТОКАХ	
<u>Е.А. Коровайцева</u>	100
ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА О КОНТАКТЕ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО УДАРНИКА С ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТЬЮ	
<u>А.М. Коршунов, А.Д. Голубков, Е.Е. Коршунова</u>	101
ГОРЕНИЕ ВСПЕНЕННОЙ ЭМУЛЬСИОННО-СУПЕНЗИОННОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ИЗООКТАНА И ЧАСТИЦ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ	
<u>Л.А. Костырева</u>	102
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПРЕДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СДВИГОВОМ НАГРУЖЕНИИ	
<u>Б.И. Краснопольский</u>	103
О РАЗВИТИИ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С УСРЕДНЕНИЕМ ПО АНСАМБЛЮ РЕАЛИЗАЦИЙ	
<u>Б.И. Краснопольский</u>	104
ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ РАСЧЕТА ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С УСРЕДНЕНИЕМ ПО АНСАМБЛЮ РЕАЛИЗАЦИЙ	
<u>К.В. Курашкин</u>	105
ИЗМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ	
<u>А.Г. Кучумов</u>	106
БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИРУРГИЧЕСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ ПРИ	

ЛЕЧЕНИИ ЖЕЛЧНОКАМЕННОЙ БОЛЕЗНИ И ЕЁ ОСЛОЖНЕНИЙ	
<u>Ю.И. Лесникова, А.Н. Труфанов</u>	107
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НЕСОВЕРШЕНСТВ ГЕОМЕТРИИ ВОЛОКНА ТИПА ПАНДА НА ЕГО ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТА С ОПРАВКОЙ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	
<u>Ю.В. Ли, С.А. Баранникова, Л.Б. Зуев</u>	108
ПОЛОСЫ ЧЕРНОВА – ЛЮДЕРСА В БИМЕТАЛЛИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ	
<u>В.Т. Лукашенко, Ф.А. Максимов</u>	109
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЕТА И СОУДАРЕНИЙ ОСКОЛКОВ МЕТЕОРНОГО ТЕЛА	
<u>В.Г. Лущик, М.С. Макарова</u>	110
ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ: УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ	
<u>В.Г. Лущик, М.С. Макарова</u>	111
ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ: УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ОТСОСА ГАЗА НА СТЕНКЕ	
<u>А.Г. Макоед, П.Н. Конон</u>	112
НЕЛИНЕЙНОЕ РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОГО ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ	
<u>А.И. Ермоленко, А.Г. Макоед, П.Н. Конон</u>	113
ВОЗМУЩЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ СЛОЕВ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ И МАССОВЫХ СИЛ	
<u>А.В. Жук, А.Г. Макоед, П.Н. Конон</u>	114
НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕТОНКОГО СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА	
<u>А.Н. Максимов</u>	115
МНОГОКРАТНОЕ МАХОВСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ ПРИ ДИФРАКЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА КЛИНЕ	
<u>А.А. Мастерова</u>	116
ДИНАМИКА КОЛЕСНОЙ ТЕЛЕЖКИ С РОТОРОМ САВОНИУСА	
<u>Д.И. Меркулов, Д.А. Пелевина</u>	117
ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЭЛАСТОМЕРОВ	
<u>Д.И. Меркулов, Д.А. Пелевина</u>	118
ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЭЛАСТОМЕРОВ: МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	
<u>И.С. Месензова, Н.А. Павлов, А.Г. Маликов, А.М. Оришич, Е.В. Карпов</u>	119
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ, ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg-Li ЗА СЧЁТ ТЕРМООБРАБОТКИ	
<u>С.А. Михайленко, М.А. Шеремет</u>	120
РЕЖИМЫ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ И ПОВЕРХНОСТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ	
<u>А.В. Мишин</u>	121
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД	
<u>В.И. Бородулин, А.В. Иванов, Ю.С. Качанов, Д.А. Мищенко, R. Örlü, A. Hanifi, S. Hein</u>	122
КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОРОЖДЕНИЯ МОД НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ	
<u>К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов, Д.А. Крайнов</u>	123
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ АЭРОВЗВЕСИ АЛЮМИНИЯ	

<u>А.С. Мурачёв</u>, А.М. Кривцов, Д.В. Цветков НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕРМОДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНЕЧНОМ ОДНОМЕРНОМ КРИСТАЛЛЕ	124
<u>А.Р. Мустаев</u>, Н.А. Остапенко ПЛОСКИЕ КОНТУРА С МАКСИМАЛЬНОЙ ТЯГОЙ В НЕИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ ПОТОКЕ	125
<u>Н.Д. Мушак</u>, Е.А. Подольская, А.Ю. Панченко ПРИМЕНЕНИЕ ПАРНЫХ СИЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРНОГО ПЕРЕХОДА ГЦК-ОЦК	126
<u>А.С. Оконечников</u>, Д.В. Тарлаковский, Г.В. Федотенков НЕСТАЦИОНАРНЫЙ КОНТАКТ ШТАМПА С ПОЛУПЛОСКОСТЬЮ ПРИ УЧЕТЕ АДГЕЗИИ	127
<u>Н.А. Павлов</u>, И.С. Месензова, А.Г. Маликов, А.М. Оришнич, Е.В. Карпов ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Cu-Li С ПОМОЩЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО CO ₂ -ЛАЗЕРА И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКИ	128
<u>О.И. Дударь</u>, Н.Б. Асташина, Е.П. Рогожникова, <u>С.Е. Пешин</u> ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОПОДВИЖНОСТИ ЗУБОВ В НОРМЕ И ПРИ ПАТОЛОГИИ С ПОМОЩЬЮ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЗУБОЧЕЛЮСТНОЙ СИСТЕМЫ	129
<u>С.Е. Пешин</u>, О.И. Дударь ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ В ЖЕВАТЕЛЬНЫХ МЫШЦАХ И ВИСОЧНО-НИЖНЕЧЕЛЮСТНОМ СУСТАВЕ	130
<u>А.В. Подопросветов</u>, В.Е. Павловский СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА МАНГО	131
<u>А.А. Попов</u>, Н.Н. Берендеев, А.Н. Сысоев, М.С. Болдин, Е.А. Ланцев НОВАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ КЕРАМИК, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ МНОГООСНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	132
<u>Ю.А. Виноградов</u>, <u>С.С. Попович</u>, М.М. Стронгин ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА	133
<u>С.С. Попович</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА	134
<u>С.С. Попович</u>, А.Г. Здитовец, Н.А. Киселёв, М.С. Макарова ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ДЛЯ БЕЗОГНЕВОГО ПОДОГРЕВА И РЕДУЦИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА	135
<u>А.Б. Порошина</u>, В.В. Веденеев ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГИХ ТРУБОК КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ С ПРОТЕКАЮЩЕЙ ВНУТРИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ	136
<u>Р.Д. Пряжевский</u>, О.А. Саченков, Е.В. Осовский ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ АЦЕТАБУЛЯРНОГО КОМПОНЕНТА ЭНДОПРОТЕЗА ШЕЙКИ БЕДРА	137
Д.В. Тарлаковский, Г.В. Федотенков, <u>Р.Д. Пряжевский</u> ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ИНВАРИАНТНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ С ПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ	138
<u>Е.А. Родина</u>, С.П. Баутин ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА С ПОМОЩЬЮ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ	139
<u>К.Ю. Рысин</u>, В.Г. Козлов, А.А. Вяткин ТЕРМОВИБРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПЛОСКОМ СЛОЕ ПРИ КРУГОВЫХ ВИБРАЦИЯХ	140

А.А. Сафронов АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОСАТЕЛЛИТОВ В ПРОЦЕССЕ КАПИЛЛЯРНОГО РАСПАДА ВЯЗКИХ СТРУЙ	141
И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, А.Н. Кондрашов, М.М. Гончаров СТРУКТУРА КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ	142
И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, А.Н. Кондрашов, А.А. Старцев ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ЛАМИНАРНОГО ОСЕСИММЕТРИЧНОГО КОНВЕКТИВНОГО ФАКЕЛА	143
Л.П. Семенова ОСОБЕННОСТИ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ СЕРДЕЧНИКОВ ПУЛЬ С УДЛИНЕННОЙ ОЖИВАЛЬНОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТЬЮ С ЗАДАНЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ	144
Е.Б. Старобинский, Д.В. Цветков, А.М. Кривцов ОПИСАНИЕ ПЕРЕХОДА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ В ИДЕАЛЬНОМ КРИСТАЛЛЕ	145
М.Ю. Степкина, О.Б. Кудряшова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ПРИ КОМБИНИРОВАНИИ ВОЗДЕЙСТВИЙ ВНЕШНИХ ПОЛЕЙ	146
Н.А. Остапенко, С.С. Страдомский ВОЛНОЛЕТЫ НА ПЛОСКИХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ С МАКСИМАЛЬНЫМ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ КАЧЕСТВОМ	147
С.В. Субботин, А.С. Кропачева О СТРУКТУРЕ ТЕЧЕНИЯ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ С ЖИДКОСТЬЮ	148
С.В. Субботин, В.Г. Козлов, Р.Р. Сабилов ОСРЕДНЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ЭЛАСТИЧНОЙ ПОЛОСТИ, ЗАЖАТОЙ МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ, СОВЕРШАЮЩИМИ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ	149
П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин ТРЕХМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ПЛОТНОСТИ В ГАЗАХ	150
О.Г. Сутырин ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ СХЕМ WENO ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ	151
В.В. Терауд ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ИСПЫТАНИЙ В ТЕЧЕНИЕ ДНЕЙ И НЕДЕЛЬ	152
А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский, В.В. Трифонов РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КАНАЛЕ С МАЛЫМИ УГЛАМИ РАСКРЫТИЯ	153
П.М. Тюбаева, А.А. Ольхов, А.А. Попов ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИГИДРОКСИБУТИРАТА	154
А.Н. Голубятников, Д.В. Украинский О ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПО ВРЕМЕНИ РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ ОДНОМЕРНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ	155
А.С. Федченко (Гаврилова) АНАЛИЗ ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ О РАСШИРЕНИИ ОБЛАСТИ НН	156
Д.Е. Хазов БЕЗМАШИННОЕ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ	157

<u>Д.Е. Хазов, Ю.А. Виноградов</u> ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ	158
<u>Ю.Д. Цветкова</u> О ВЛИЯНИИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ СВОЙСТВ МАГМЫ НА ТЕЧЕНИЕ В КАНАЛЕ ВУЛКАНА	159
<u>Н.Г. Шаронов</u> ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРИВОДОВ ДИСКРЕТНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДВИЖИТЕЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ	160
<u>Е.А. Франц, В.С. Шелистов, Г.С. Ганченко</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНОГО ЭЛЕКТРОФОРЕЗА И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ	161
<u>Е.А. Франц, В.С. Шелистов, Г.С. Ганченко</u> ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА В ОКРЕСТНОСТИ ПОЛУПРОНИЦАЕМОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ	162
<u>А.С. Шишаева, В.В. Веденеев, М.М. Симоненко, А.А. Синявин, Г.Б. Сушко, А.А. Аксенов</u> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ В УСЛОВИЯХ ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ И ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА С КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНОЙ	163
<u>А.С. Шишаева, А.Ф. Зубков, М.М. Симоненко, А.А. Синявин, А.А. Аксенов</u> ГИСТЕРЕЗИС ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА С КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНОЙ	164
<u>А.С. Шишаева, В.В. Веденеев, Г.Б. Сушко, А.А. Аксенов</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ СНИЖЕНИЯ НАГРУЗКИ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ФЛАТТЕРЕ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ	165
<u>А.А. Шкуратенко</u> ДИАГНОСТИКА ТЕПЛООБМЕНА В ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ	166
<u>Н.Д. Шмакова, Е.В. Ерманиук, С.Ф.А. Сантуччи</u> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПЕНЫ С ЛОКАЛЬНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ	167
<u>М.И. Шмурак, М.Р. Камалтдинов, А.А. Породилов</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕМОДИНАМИКИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ХИРУРГИЧЕСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ ПРИ ВРОЖДЕННОЙ ПАТОЛОГИИ ЛЕГОЧНОГО КРОВОТОКА У ДЕТЕЙ	168
<u>А.Г. Шпенев</u> РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА ПРИ НАЛИЧИИ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ В КОНТАКТЕ	169
<u>В.Д. Щипицын</u> ДИНАМИКА ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ В ЗАПОЛНЕННОМ ЖИДКОСТЬЮ КОНТЕЙНЕРЕ ПРИ ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ ВИБРАЦИЯХ	170
<u>В.Ф. Копьев, С.А. Чернышев, М.А. Юдин</u> ЗАДАЧА КОШИ ДЛЯ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ПОТОКЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ЗАВИХРЕННОСТИ В КРИТИЧЕСКОМ СЛОЕ	171

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

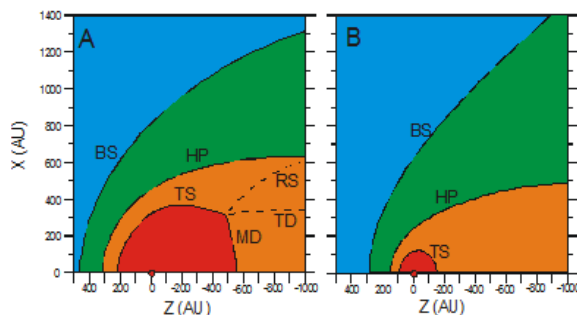
В.Б. Баранов^{1,2}

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

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

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.)



Левый рисунок не учитывает процесс резонансной перезарядки. Правый рисунок учитывает этот важный в проблеме эффект.

В настоящем докладе 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 рисунке 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 $\sim 3\%$, 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 Vega–1, Vega–2, Giotto, Suissei и Sakigake к комете Галлея в марте 1986 года и аппарата Rosetta к комете Чурюмова–Герасименко (2014–2016 гг.). 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.

Автор выражает благодарность гранту РФФИ № 16-01-00305 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.

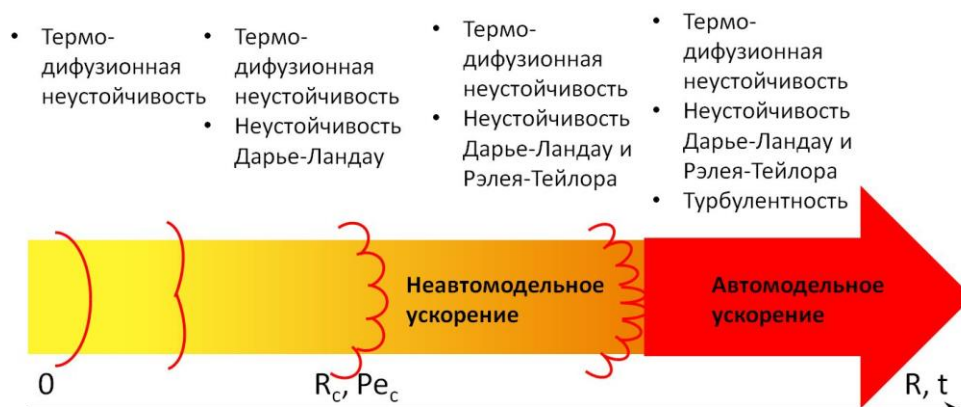
ВЛИЯНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА УСКОРЕНИЕ ФРОНТА ПЛАМЕНИ

В.В. Голуб

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Расширяющиеся фронты химических реакции имеют отношение к процессам в двигателях с искровым зажиганием, к проблемам предотвращения взрывов, а также таких космических явлений, как термоядерное горение в сверхновых. При воспламенении горючей смеси газов в районе точки зажигания, возникает сферическое пламя. Сразу после зажигания пламя является гладким и сферическим. С увеличением размера фронт пламени деформируется и ускоряется. Ускорение фронта пламени является сложным процессом под действием теплового расширения, различных неустойчивостей—гидродинамических, термо-диффузионных, термо-акустических и турбулентности. Когда фронт пламени достигает критического значения Re , его ускорение становится неавтомоделным, а затем автомоделным. Величина Re представляет собой отношение радиуса фронта пламени к толщине фронта пламени. Л.Д. Ландау показал, что пламя становится неустойчивым к возмущениям всех длин волн при $Re > 1$. А.Г. Истратов и В.Б. Либрович показали, что пламя становится неустойчивым при $Re > 10^3 - 10^4$. Они учитывали влияние химической кинетики, диффузии и теплопроводности и показали, что эти процессы препятствуют развитию возмущений с малой длиной волны. На сегодняшний день существует множество методов моделирования ускорения пламени, как аналитических (фрактальный подход, анализ неустойчивостей, статистический турбулентный подход Колмогорова-Обухова...) так и численных (RANS, LES, DNS...).

Основными задачами исследований в этой области является обобщение знаний о влиянии отдельных физических явлений на ускорение сферического фронта пламени, экспериментальное определение ускорения пламени в большом объеме, разработка моделей описания ускорения пламени с учетом переменной энергии диссипации и методов его замедления.



Проведен анализ влияния кривизны фронта на химическую кинетику, диффузию, теплопроводность и скорость пламени. Выполнен анализ ускорения фронта пламени с помощью закона Колмогорова [1]. Определено влияние теплопоглощающих поверхностей на распространение полусферического пламени [2].

Исследование эволюции расширяющегося фронта реакции находится на стыке различных направлений газодинамики, химических превращений, теории фракталов, статистического анализа и является фундаментом для анализа явлений возникающих при газовом взрыве в земных условиях, а также при взрыве сверхновых.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №14-50-00124.

1. Golub V., Korobov A., Mikushkin A., Solntsev O., Volodin V. Acceleration of hydrogen/air flames in a cylindrical envelope// Int. J. Hydrogen Energ. 2017. T 42. № 17. С. 12724–12734.

2. Golub V., Korobov A., Mikushkin A., Solntsev O., Volodin V. Influence of a heat-absorbing surface on the propagation of a hemispherical flame // J. Loss Prevent. Proc. 2018. T 51. № 1. С. 1–7.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

И.Г. Горячева^{1,2}

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

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

Изнашивание есть удаление материала с поверхности трения вследствие ее разрушения, проявляющееся в постепенном изменении формы и размеров взаимодействующих тел. Изнашивание машин и механизмов приводит к ухудшению работы сопряжений и выходу их из строя.

При моделировании разрушения поверхностных слоёв элементов трибосопряжений используются методы и модели механики контактного взаимодействия и разрушения с учетом ряда специфических свойств, выделяющих изнашивание в особый вид разрушения. Специфика износа заключается, прежде всего, в том, что сам факт протекания этого процесса не является критическим для работы сопряжения. Обычно допустимый износ подвижных элементов сопряжений намного больше характерного размера частицы износа [1], поэтому при работе сопряжений имеет место многократно повторяющееся отделение частиц материала с поверхности трения. Свойства (микрогеометрия, степень поврежденности и т.д.) оставшегося материала зависят от истории процесса фрикционного взаимодействия, т.е. изнашивание является процессом наследственного типа. Кроме того, изнашивание есть процесс с обратной связью. Процессы самоорганизации и формирования равновесных структур при изнашивании являются проявлением действия обратной связи [2].

Модели изнашивания обычно рассматриваются на двух масштабных уровнях (см. рисунок): макроуровень, определяющий кинетику изменения макроформы тел при изнашивании, и микроуровень, описывающий каждый элементарный акт отделения частицы с поверхности [3]. Многократное повторение расчетов на микроуровне позволяет оценить изменение характеристик сопряжения на макроуровне (изменение макроформы, сближение тел при изнашивании и т.д.) и рассчитать долговечность сопряжения по критериям износостойкости.

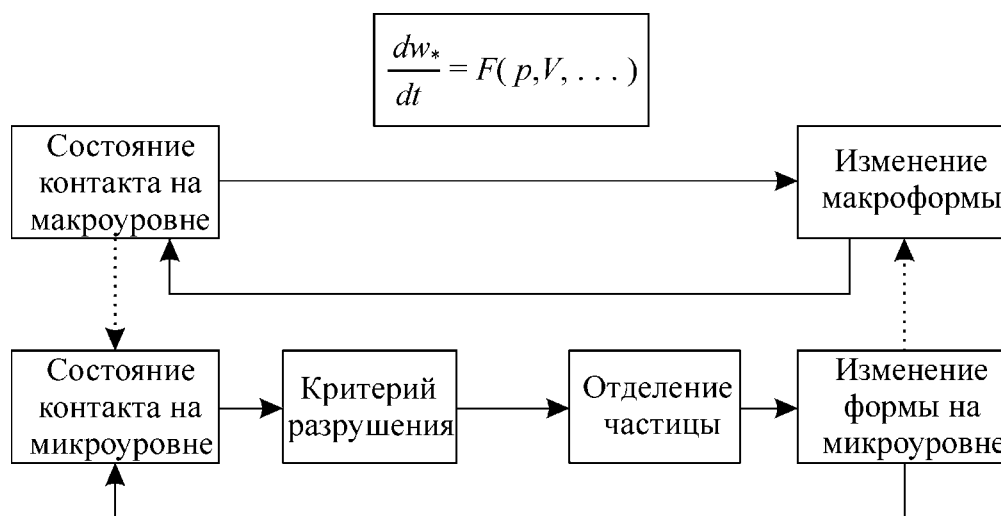


Рис. Основные этапы моделирования изнашивания и их взаимосвязь

При построении модели изнашивания на микроуровне (нижняя часть рисунка) необходимо, прежде всего, определить физический механизм отделения частицы износа с поверхности трения. К числу наиболее распространенных механизмов изнашивания, проявляющихся в условиях фрикционного взаимодействия поверхностей, относятся абразивное, адгезионное, усталостное, коррозионно-механическое и т.д. В соответствии с установленным механизмом изнашивания выбирается критерий разрушения, рассчитываются напряженное состояние и температура поверхностных слоев, возникающие вблизи поверхности при заданных условиях контактного взаимодействия, а также другие характеристики, входящие в критерий разрушения. После этого с использованием методов и подходов механики разрушения моделируется отделение частицы и определяются новые характеристики поверхностного слоя [3,4]. Этот подход, в частности,

применяется для моделирования контактно-усталостного разрушения колес и рельсов в условиях трения качения [5,6].

Анализ процессов, протекающих на микроуровне, позволяет разработать феноменологическую модель изнашивания пары трения на макроуровне (верхняя часть рисунка), определяющую зависимость скорости износа dw^*/dt от макрохарактеристик контакта, таких как: контактное давление p , скорость V относительного перемещения поверхностей, температура и т.д. Вид этой функции зависит от процесса, протекающего на микроуровне, и определяется на базе моделирования элементарных актов разрушения и отделения частиц износа с поверхности трения [7].

С целью расчета ресурса трибосопряжений на макроуровне разработаны общие методы анализа контактной задачи с учетом формоизменения тел при изнашивании. Эта задача в общем случае описывается системой уравнений эволюционного типа. Определены необходимые условия существования установившегося режима изнашивания. Этот режим особенно важен, поскольку основная доля ресурса сопряжения приходится на установившийся режим, который характеризуется формированием стационарной формы и стационарным (или квазистационарным при растущей области контакта) распределением давлений [8]. На основании построенных моделей процесса изнашивания ставится и решается обратная задача управления параметрами структуры поверхностей с целью оптимизации процесса изнашивания (например, минимизации времени приработки, обеспечения требуемой формы изношенной поверхности и т.д.) [3]. Построено также численно-аналитическое решение износоконтактной задачи в условиях осциллирующих нагрузок при неполном проскальзывании в области контактного взаимодействия (фреттинг-износ) [9].

Разработанные методы решения износоконтактных задач используются для расчета кинетики изменения при изнашивании контактных характеристик (контактного давления, сближения взаимодействующих поверхностей, размера области контакта и т.д.) многих трибосопряжений – подшипников скольжения, зубчатых передач, направляющих скольжения, уплотнений [10,11]. Исследование износоконтактных задач позволяет также разработать методы управления процессами изнашивания различных трибосопряжений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы Президиума РАН I.16 «Развитие физико-химической механики поверхностных явлений как фундаментальной основы для разработки современных конструкций и технологий».

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977, 576 с.
2. Буше Н.А., Копытко В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981, 128 с.
3. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. – М. Наука, 2001, 478 с.
4. Горячева И.Г., Торская Е.В. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений и усталостного износа // Сб. научн. тр. “Трибология. Состояние и перспективы” / Под. ред. И.Г. Горячевой и М.А. Броновца. 2016, Уфа: РИК УГАТУ, Т.1. 134–147.
5. Goryacheva I, Zakharov S. Rolling contact fatigue defects in freight car wheels // Wear., 2005, V. 258. № 7–8. P. 1142–1147.
6. Контактно-усталостные повреждения колес грузовых вагонов. / Под ред. С.М. Захарова. М.: Интекст, 2004, 160 с.
7. Горячева И.Г., Чекина О.Г. Изнашивание поверхностей: от моделирования микроразрушения к анализу формоизменения. // Изв.РАН. МТТ. 1999. № 5, С. 131–147.
8. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. – М. Машиностроение, 1988, 254 с.
9. Горячева И.Г., Горячев А.П. Износоконтактная задача с неполным проскальзыванием // ПММ. 2006, Т. 70. Вып. 6. С. 1042–1053.
10. Goryacheva I.G. Contact Mechanics in Tribology. Dordrecht: Kluwer, 1998, 344 p.
11. Солдатенков И.А. Износоконтактная задача с приложениями к инженерному расчету износа. М. Физматкнига, 2010, 160 с.

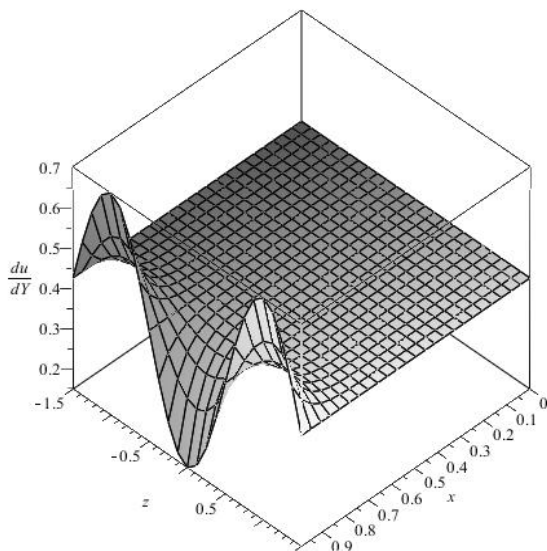
ГИПЕРЗВУКОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ. РЕЖИМ СИЛЬНОГО ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Г.Н. Дудин

САГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

В первой части лекции, которая носит обзорный характер, приведены результаты исследований гиперзвуковых течений вязкого газа начиная с середины XX века. Обсуждаются особенности течений для различных режимов вязко-невязкого взаимодействия, которые были установлены в экспериментальных работах Борового В.Я., Майкапара Г.И., Whitehead A.H., Hefner J.N., Rao D.M., Cross E.J. и др. Для режима сильного взаимодействия приведены автомодельные решения: Lees L.J. – Stewartson K. – обтекания полубесконечной пластины, Whalen R.J. – скользящей пластины и Ладыженского М.Д. – плоских треугольных крыльев. Далее обсуждаются вопросы, связанные с распространением возмущений против потока, которое впервые в 1970 году было установлено Нейландом В.Я. [1,2]. Приведены результаты исследований Stewartson K. обтекания пластины с учетом решения уравнений для ударного слоя, а также решения Михайлова В.В., Нейланда В.Я., Дудина Г.Н. для обтекания треугольных крыльев на режиме сильного взаимодействия.

Во второй части лекции обсуждается вопрос о возможности образования пространственного течения на пластине конечной длины на режиме сильного взаимодействия. В предположении, что на задней кромке пластины задается дополнительное условие, которое является функцией от поперечной координаты и, учитывая вид первых членов разложения для функций течения в окрестности передней кромки [3], сформулированы и решены краевые задачи для определения следующих членов разложения. Впервые показано, что для функций течения $p(x,z)$, $\delta(x,z)$, $u(x,Y,z)$, $v(x,Y,z)$, $H(x,Y,z)$ эти члены имеют порядок $O((p_\alpha(z)/p_0)^2 x^{2\alpha})$, а для $w(x,Y,z) - O\left(\frac{dp_\alpha(z)}{dz}(p_\alpha(z)/p_0^2)x^{2\alpha+1}\right)$, где α – собственное число и $p_\alpha(z)$ – произвольный параметр. Установлено, что возникающее вторичное течение в сечениях $x = \text{const}$ пропорционально величине $dp_\alpha(z)/dz$.



На рисунке приведена зависимость du/dY на поверхности пластины, которая пропорциональна коэффициенту продольного трения, при температурном факторе $H_w = 1.5$ и параметре $p_\alpha(z) = 0.2 \cos(\pi z)$.

Рассмотрено также обтекание скользящей пластины. Установлено принципиальное отличие от предыдущего случая. Уравнение для $w(x,Y,z)$ не отделяются от основной системы уравнений, а самое главное, третьи члены разложений имеют порядок $O((dp_\alpha(z)/dz)x^{\alpha+1})$. Таким образом, при наличии угла скольжения, влияние третьего члена разложения на распространение возмущений существенно больше, чем при

отсутствии скольжения. Установлено, что увеличение угла скольжения приводит к значительному уменьшению значений собственного числа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00211).

1. Нейланд В.Я. Распространение возмущений вверх по течению при взаимодействии гиперзвукового потока с пограничным слоем // Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. № 3. С. 40–49.

2. Нейланд В.Я., Боголепов В.В., Дудин Г.Н., Липатов И.И. Асимптотическая теория сверхзвуковых течений вязкого газа. – М.: Физматлит, 2003. – 456 с.

3. Дудин Г.Н., Нейланд В.Я. Об индуцировании трехмерных возмущений в пограничном слое при сильном взаимодействии с гиперзвуковым потоком // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 1. С. 89–96.

СРАВНЕНИЕ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С МЕДЛЕННЫМ ГОРЕНИЕМ И ГОРЕНИЕМ В ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛНАХ

А.Н. Крайко

ЦИАМ имени П.И. Баранова, Москва

Выполнено сравнение термических коэффициентов полезного действия и удельных тяг и импульсов прямоточных реактивных двигателей разных типов с медленным («дефлаграционным») горением (МГ) и с горением в движущихся (пульсирующих и вращающихся – «спиновых») и неподвижных детонационных волнах (ДВ). Актуальность такого сравнения обусловлена распространенными, особенно в последнее время, утверждениями о возможном увеличении тяговых характеристик воздушно-реактивных двигателей (ВРД) с горением в ДВ (в первую очередь, в пульсирующих – PDE и вращающихся – RDE) на десятки процентов в сравнении с прямоточными ВРД (ПВРД) с МГ при постоянном давлении в дозвуковом потоке. Подобные прогнозы, однако, опираются не на прямой расчет тяг этих двигателей, а на сравнение их идеальных термических коэффициентов полезного действия (кпд) – η_{th} и на применимые только к стационарным течениям в инерциальных системах координат формулы, связывающие также идеальные удельные тяги и импульсы с идеальными кпд. Для PDE эти формулы неверны из-за нестационарности течения.

В России утверждения о преимуществах детонационного горения (ДГ) нередко сопровождаются ссылками на заметку Я.Б. Зельдовича [1] 1940 г., переведенную на Западе только в начале XXI века. Для незнакомых с этой заметкой ссылки на столь авторитетного ученого производят требуемый эффект в противоположность тому, что писал сам автор. Хотя Я.Б. Зельдович обнаружил некоторое увеличение термического коэффициента полезного действия (кпд) при ДГ, это не вызвало у него эйфории. Напротив, в той же заметке высказаны только скептические соображения о применении ДГ, например: «... поиски циклов с ДГ в погоне за небольшим увеличением принципиально достижимого кпд бесперспективны». Ни в этой, ни в других публикациях Я.Б. Зельдовича высказываний в поддержку ДГ нет.

В развитие [1,2] выполнен термодинамический анализ разных типов ВРД с ДГ и МГ. В исследуемых далее ВРД горению почти всегда предшествует сжатие в воздухозаборнике поступающего из атмосферы со скоростью V_0 воздуха и всегда заканчивается "расчетным" расширением в сопле продуктов сгорания до давления набегающего потока p_0 . В рассматриваемых моделях двигателей предварительное сжатие воздуха в воздухозаборнике и расширение продуктов сгорания в сопле принимаются изэнтропическими и стационарными. По определенным, как в [2], идеальным термическим кпд (η_{th}) находится отношение V_e/V_0 , где V_e – скорость на выходе из сопла при расчетном расширении до p_0 . Удельные тяга и импульс пропорциональны разности $(V_e/V_0 - 1)$. Рассмотренные типы ВРД включают двигатели с МГ при постоянном давлении, как в ПВРД (по циклу Брайтона), и постоянном объеме (по циклу Хэмфри), пульсирующие детонационные двигатели (PDE) с горением в ДВ Чепмена-Жуге (ДВ_{СЖ}), ВРД с горением в стационарных ДВ_{СЖ}, в том числе, с предварительным торможением сверхзвукового потока ($SDE_{\psi \geq 1}$, $\psi = T_3/T_0$, T_0 и T_3 – температуры холодного воздуха и горючей смеси перед ДВ) и в косой ДВ – SDE_{OSW} (при $\psi = 1$).

При фиксированных показателях адиабаты воздуха, горючей смеси и продуктов сгорания идеальные характеристики рассмотренных ВРД, предполагающие, как в [2], отсутствие потерь при торможении воздуха в воздухозаборнике, его смешении с газообразным топливом и истечении продуктов сгорания из реактивного сопла, зависят от двух безразмерных параметров: числа Маха полета M_0 и $q^\circ = q/(c_p T_0)$ – безразмерной теплотворной способности горючей смеси (c_p – теплоемкость при постоянном давлении). При $q^\circ = 6$ и 9 сравнение идеальных кпд η_{th} и рассчитанных по η_{th} с помощью упомянутых выше формул (незаконных для PDE) идеальных удельных тяг и импульсов всех рассмотренных двигателей выполнено для M_0 от 0.3 до 8. Для этих q° и M_0 по такой идеальной тяге PDE незначительно превосходит ВРД с горением при постоянном объеме (по циклу Хэмфри), а ПВРД с МГ – намного только при $M_0 < 1.5$. С ростом M_0 превышение идеальной тяги PDE над идеальными тягами других ВРД за исключением SDE_{OSW} быстро уменьшается. Так, при $q^\circ = 6$ и 9 превосходство по идеальной тяге PDE над остальными становится малым при увеличении числа Маха полета M_0 .

Пусть PDE имеет n цилиндрических, синхронно работающих групп детонационных камер (ДК) с мгновенно открывающимися и закрывающимися клапанами (входными силовыми стенками). При открытых клапанах в ДК поступает идеально перемешанная горючая смесь. Период работы одной ДК

PDE можно разбить на несколько этапов: 1. Открытие клапана, заполнение ДК горючей смесью, мгновенное закрытие клапана и инициирование ДВ волны у входного конца ДК; 2. Приход ДВ на правый конец ДК – сечение входа в идеально регулируемое реактивное сопло; 3. ДВ отражается от правого частично открытого сечения ДК (сужения сопла) как ударная волна (УВ), которая движется к закрытому входному сечению ДК. Далее нестационарные ударные волны, двигаясь по ДК, могут несколько раз отразиться от ее концов. Несмотря на затухание, отражающиеся УВ – не учитываемый при определении идеальных характеристик PDE источник роста энтропии. Клапан мгновенно открывается, когда среднее давление продуктов сгорания в ДК становится меньше давления заторможенного воздуха и идеально перемешанного с ним топлива в объеме перед клапаном.

Истечение продуктов сгорания происходит на протяжении всего цикла работы PDE. Течение в расширяющейся части сопла квазистационарное и изэнтропическое, площадь выходного сечения сопла идеально регулируемая. Расчёты проводились в рамках одномерной задачи в приближении уравнений Эйлера. Система уравнений одномерной нестационарной газовой динамики численно решалась с помощью явной монотонной распадной разностной схемы второго порядка (для гладких решений) по пространственной координате x и по времени t . Второй порядок по времени обеспечивался привлечением схемы Рунге-Кутты. При заданных f° (отношении площади критического сечения сопла к площади поперечного сечения ДК), M_0 и q° в течении периода работы ДК PDE отношение скоростей V_e/V_0 получается как функция времени. Его интегрирование по периоду дает средние значения V_e/V_0 и тяговые характеристики с учетом нестационарности и неизэнтропичности течения продуктов сгорания в детонационной камере.

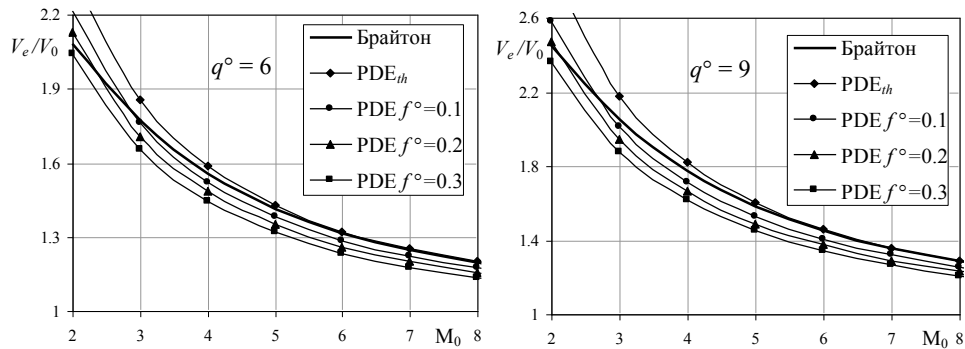


Рис. Кривые V_e/V_0 ПВРД (цикл Брайтона) и PDE, рассчитанные по идеальному КПД (PDE_{th}) и по нестационарной модели

На рисунке приведены кривые отношений V_e/V_0 для ПВРД (цикл Брайтона, от времени не зависит) и для PDE: посчитанных по идеальному термическому КПД (PDE_{th}) и для нескольких значений f° , найденных в рамках описанной выше нестационарной модели. Видно, что в типичных ситуациях ПВРД лучше многокамерных PDE с вращающимся клапаном (для $f^\circ = 0.3$ и 0.1 – при $M_0 \geq 2$ и $M_0 \geq 3$). Согласно [3] тяговые характеристики ПВРД заведомо лучше тяговых характеристик и однокамерного PDE, предложенного в [4]. По этим характеристикам уступают ПВРД и все рассмотренные выше ВРД с горением в стационарных ДВ. Из еще не рассмотренных "детонационных" ВРД в последнее время особое внимание уделяется двигателям с вращающейся или спиновой ДВ (RDE). Одно из объяснений такого внимания – переход к стационарному течению во вращающейся со скоростью ДВ системе координат и последующие рассуждения с сохраняющейся в стационарных потоках полной энтальпией. При этом, правда, забывают, что в координатах, вращающихся с угловой скоростью ω , вдоль линий тока сохраняется не «обычная» полная энтальпия H , а разность $H^\circ = H - (\omega r)^2/2$. В кольцевой камере сгорания RDE произведение ωr равно скорости детонационной волны. Поэтому величина ω так велика, что любые изменения радиальной координаты r при истечении продуктов сгорания заведомо исключают возможность определения отношения V_e/V_0 через η_{th} ВРД с ДГ. В противоположность этому, в силу сохранения H удельный импульс I_{sp} RDE с сужающимся центральным телом и цилиндрической "внешней" образующей сопла заметно уменьшится. То что это так, подтверждают низкие значения I_{sp} , рассчитанные в [5] для четырех вариантов RDE, летящих с $M_0 = 5$ в однородной стехиометрической смеси водорода и воздуха с параметрами атмосферы Земли на высоте 20 км. Эти значения $I_{sp} = 1990, 2350, 2300$ и 2250 с "традиционно" для авторов [5] (см. [3]) завышены: определяя I_{sp} , они почему-то не учитывают сопротивления наветренной части центрального тела воздухозаборника. Исправленные значения I_{sp} близки к 1420, 1830, 1780 и 1720 с, однако даже завышенные величины I_{sp} заметно меньше I_{sp} ПВРД, который при тех же условиях по

оценке авторов [3] равен $3500 \div 3900$ с. Дополнительное возрастание энтропии в RDE также имеет место – в УВ, примыкающей к ДВ на границе свежей горючей смеси и продуктов сгорания. Правда, интенсивность этой УВ невелика.

Итак, утверждения о возможном увеличении тяговых характеристик ВРД на десятки процентов благодаря использованию ДГ необоснованны. Даже для дозвуковых и малых сверхзвуковых чисел Маха полета, на которых ВРД с МГ может по тяговым характеристикам уступать PDE, последние заведомо уступают ТРД с МГ. Поэтому преимущества ВРД с ДГ, если и возможно, то не по тяговым характеристикам, а по простоте конструкции (как при малых M_0 по сравнению с ТРД) или по меньшей теплonaпряженности тракта двигателя (напротив, при больших сверхзвуковых числах Маха $M_0 > 5$ в сравнении с пульсирующим детонационно-дефлаграционным двигателем [6]).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 17-01-00126).

1. Зельдович Я.Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ. 1940. Т. 10. Вып. 17. С. 1453–1461.
2. Heiser W.H., Pratt D.T. Thermodynamic Cycle Analysis of Pulse Detonation Engines // J. of Propulsion and Power. 2002. V. 18. No. 1. P. 68–76.
3. Егорян А.Д., Крайко А.Н., Пьянков К.С., Тишин А.П. О расчете характеристик импульсного детонационного двигателя и их сравнении с характеристиками ПВРД // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 2. С. 307–310.
4. Remeev N.Kh., Vlasenko V.V., Khakimov R.A. Analysis of operation process and possible performance of the supersonic ramjet-type pulse detonation engine // Pulse and continuous detonation propulsion / Eds. G. Roy, S. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2006. P. 235–250.
5. Дубровский А.В., Иванов В.С., Зангиев А.Э., Фролов С.М. Трехмерное численное моделирование характеристик прямоточной воздушно-реактивной силовой установки с непрерывно-детонационной камерой сгорания в условиях сверхзвукового полета // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 6. С. 49–63.
6. Крайко А.Н., Александров В.Ю., Александров В.Г. и др. Способ организации горения топлива и детонационно-дефлаграционный пульсирующий прямоточный воздушно-реактивный двигатель. 2016. Патент РФ № 2585328.

МЕХАНИКА ДИСКРЕТНЫХ СРЕД И АНОМАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

А.М. Кривцов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

В докладе излагаются подходы и приложения механики дискретных сред. Рассматриваются задачи, в которых проявляется нарушение континуальности среды – или в силу дискретности структуры вещества, или в силу особенности протекающих в нем процессов. Подробно рассматриваются задачи, связанные с описанием аномальных тепловых процессов на микроуровне: немонотонной тепловой релаксации, тепловой сверхпроводимости и др. Предлагаются подходы, позволяющие в простейших случаях на основе уравнений динамики частиц вещества получить аналитическое описание указанных процессов. Проводится сравнение эволюции теплового возмущения при обычной теплопроводности (Рис. а) и тепловой сверхпроводимости (Рис. б). Показывается, что тепло в сверхпроводящих системах может распространяться со скоростью, близкой к скорости звука, что открывает возможность для перспективных практических приложений.

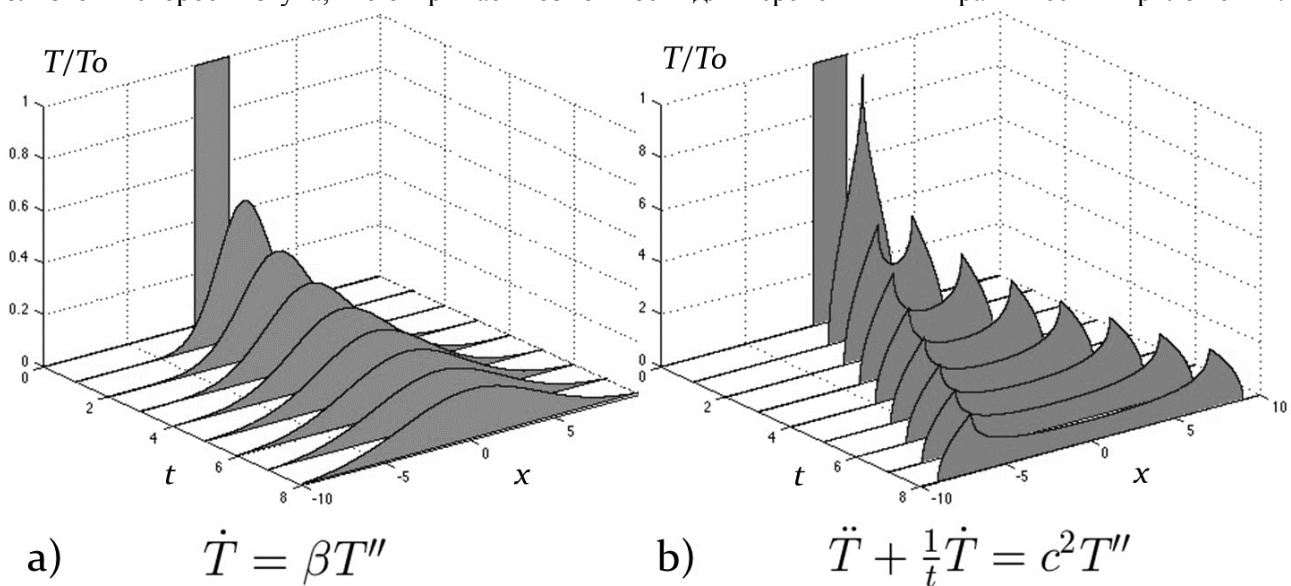


Рис. Сравнение эволюции теплового возмущения при обычной теплопроводности (а) и тепловой сверхпроводимости (б)

1. А.М. Кривцов. Распространение тепла в бесконечном одномерном гармоническом кристалле. Доклады Академии Наук. 2015, том 464, № 2, С. 162–166. English version: Krivtsov A. M. Heat transfer in infinite harmonic one dimensional crystals. Doklady Physics, 2015, Vol. 60, No. 9, pp. 407–411.

ИСТОРИЯ ТЕОРИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

И.И. Липатов

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

В докладе представлены исторические аспекты создания новых направлений в механике и в математике, связанные с новым подходом к исследованию проблем, содержащих малый параметр (или малые параметры). Эти подходы во многом связаны с именем Людвиг Прандтля, создавшего как теорию пограничного слоя, так и методологию решения многих других задач с использованием асимптотических методов. Кроме истории создания этой теории представлены также и результаты, полученные в течение последующих 100 лет после публикации ключевой работы Прандтля. Обсуждаются перспективы дальнейших исследований, а также достигнутые результаты в области изучения устойчивости и перехода ламинарного пограничного слоя.

Sonderabdruck
aus den „Verhandlungen des III. Internationalen Mathematiker-Kongresses,
Heidelberg 1904.“
Druck und Verlag von B. G. Teubner, Leipzig, 1905, S. 484 bis 491.

Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung.

Von

L. PRANDTL aus Hannover.

(Hierzu eine Figurentafel.)

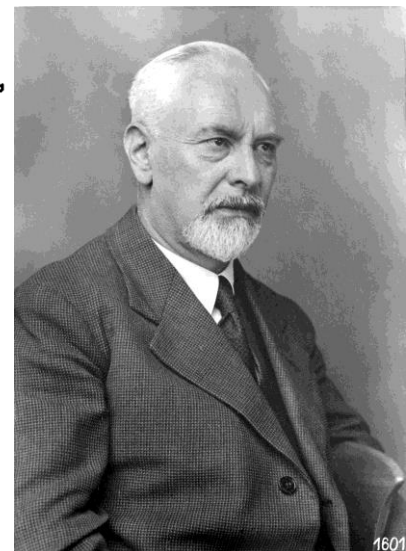


Рис. 1. Людвиг Прандтль «О движении жидкости с малым трением», 1904 г.

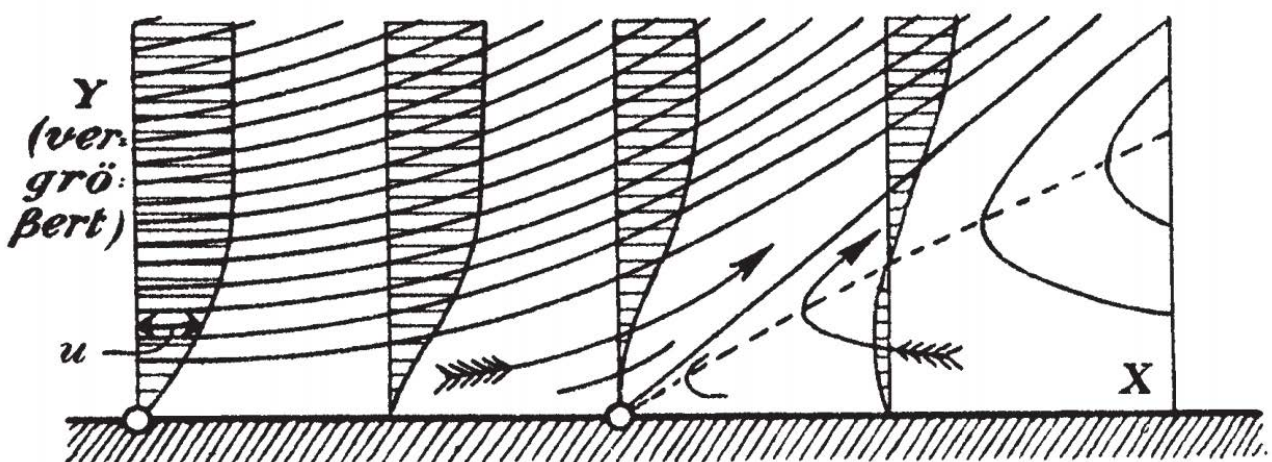


Рис. 2. Пограничный слой на пластине (из работы Прандтля 1904 г.)

ДВИЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В ОКРЕСТНОСТИ ТРЕУГОЛЬНЫХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ

Т.В. Сальникова¹, С.Я. Степанов^{1,2}

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

²Вычислительный центр имени А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Москва

В классической ограниченной плоской круговой задаче трех тел существует пять точек либрации, в которых уравниваются силы притяжения к основным телам и центробежная сила, возникающая за счет вращения системы отсчета, связанной с основными телами. Две из этих точек – треугольные лагранжевы точки либрации – устойчивы по Ляпунову в достаточно широком диапазоне отношений масс основных тел. В окрестности этих точек естественно ожидать скопления космической материи. В системе Солнце-Юпитер зафиксировано порядка десяти тысяч таких космических тел – троянских астероидов. Кроме троянцев Юпитера известны троянцы Земли, Марса, Урана и Нептуна.

Подобные скопления астрономы пытались обнаружить и в треугольных точках либрации системы Земля-Луна. Впервые наличие сгущения космической массы в этих точках было зарегистрировано польским астрономом Кордылевским более полувека назад. Однако, после Кордылевского многие астрономы пытались повторить эти наблюдения, и в большинстве случаев их попытки оказывались безуспешными. Дискуссия о «неуловимых облаках Кордылевского» не утихает до сих пор.

Как показало теоретическое исследование, феномен «появления и исчезновения» облаков Кордылевского объясняется существенным влиянием на движение частиц гравитационных сил и сил светового давления, действующих со стороны Солнца. При учете этих сил треугольные точки либрации системы Земля-Луна уже не будут точками равновесия всех действующих сил. Частица, помещенная в треугольную точку либрации без начальной относительной скорости, быстро покидает окрестность этой точки. Вместо точек равновесия возникают устойчивые периодические движения с периодом в один синодический месяц, равный промежутку времени между двумя новолуниями (29 дн. 12 час. 44 мин.).

В теоретическом исследовании мы рассматривали ограниченную плоскую круговую задачу четырех тел Земля-Луна-Солнце-частица: Земля и Луна движутся по круговым орбитам вокруг их общего центра масс, который, в свою очередь, движется по круговой орбите вокруг Солнца (Рис. 1). Показано существование устойчивых периодических орбит, охватывающих треугольные точки либрации: каждая из двух симметричных треугольных точек либрации охватывается двумя устойчивыми периодическими орбитами. Одна из орбит показана на рис. 2 (внутренняя орбита), цифры означают фазы Луны с интервалом $1/8$ синодического месяца. Устойчивость по Ляпунову этих орбит обуславливает возможность наличия в окрестности точки, движущейся по периодической орбите, скопления частиц, движущихся по близким возмущенным орбитам. Эти частицы могут составлять в общей совокупности четыре облака Кордылевского.

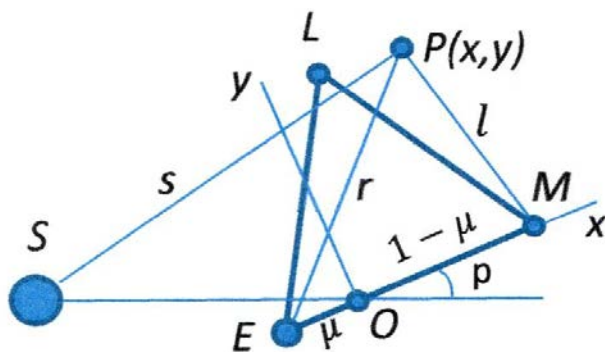


Рис. 1. Ограниченная плоская круговая задача четырех тел: S – Солнце, E – Земля, M – Луна, O – центр масс Земли и Луны, L – треугольная точка либрации, P – пробная частица, μ – отношение масс основных тел.

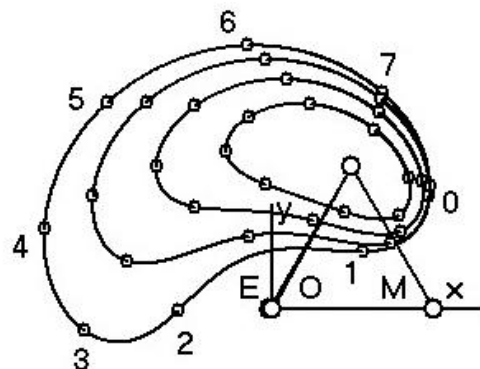


Рис. 2. Семейство периодических орбит. Внутренняя орбита соответствует отсутствию светового давления. Цифры означают фазы Луны с интервалом $1/8$ синодического месяца.

Для успешного наблюдения этих облаков нужно знать точное место их нахождения на небосводе и время для наблюдения. Появление облака на линии визирования треугольной точки либрации соответствует вполне определенному периоду синодического месяца, сдвинутому относительно момента новолуния на фиксированный отрезок времени вперед или назад в зависимости от выбора одной из двух треугольных точек либрации. Показано, что именно этот период отвечает наилучшим условиям наблюдения: минимальному расстоянию от Земли и наилучшему освещению Солнцем. Кроме того, для наблюдения необходимо, чтобы в данной местности расчетный период времени приходился на ночь и чтобы точка либрации находилась выше горизонта, а Луна находилась ниже горизонта. Одновременное выполнение этих условий осуществляется не каждый месяц и требует дополнительных расчетов. Проведенные расчеты подтвердились известными из астрономической литературы датами успешных наблюдений. Эти трудности объясняют кажущийся «феномен появления и исчезновения» облаков Кордылевского.

Интересно было выяснить структуру распределения плотности частиц внутри облака Кордылевского. Для этого было численно проинтегрировано уравнение в частных производных Лиувилля для определения плотности вероятности распределения координат и скоростей частиц в шестимерном фазовом пространстве с последующим агрегированием решения по скоростям. Полученные распределения качественно совпали с фотографиями, полученными Кордылевским.

Что касается силы светового давления, то она, также как и гравитационная сила, обратно пропорциональна расстоянию частицы от Солнца, поэтому эффект светового давления сводится к редукации коэффициента притяжения к Солнцу. С другой стороны, сила светового давления пропорциональна площади Миделя частицы ортогональной направлению солнечных лучей, пропорциональной квадрату характерного линейного размера частицы, а гравитационная сила пропорциональна массе частицы, которая при постоянной плотности пропорциональна кубу линейного размера частицы. Отсюда следует, что эффект светового давления увеличивается обратно пропорционально линейному размеру частицы. При учете светового давления мы получаем семейство периодических траекторий (рис. 2), рождающееся из периодических траекторий, соответствующих отсутствию светового давления.

При определенном микроскопическом размере пылевых частиц действие гравитационных и световых сил уравнивается, и мы приходим к классической невозмущенной задаче трех тел. Отдельно был рассмотрен этот особый случай микроскопических пылевых частиц. Однако, микроскопические космические частицы обычно оказываются электрически заряженными, и для них существенную роль играют электростатические силы взаимодействия, т.е. необходимо рассматривать уравнение движения плазмы – интегро-дифференциальное уравнение в частных производных Власова. Исследование показало наличие периодически изменяющихся устойчивых пульсирующих и неравномерно вращающихся форм облаков заряженных частиц в окрестности треугольных точек либрации.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ №15-01-03747 и №16-01-00625.

1. Salnikova T.V., Stepanov S.Ya., Anna Shuvalova A.I. Three-body problem for the Earth-Moon system under photo-gravitational influence of the Sun // *Advances in the Astronautical sciences*, 2018, vol. 161, pp. 201–208.

2. Сальникова Т.В., Степанов С.Я. Математическая модель образования космических пылевых облаков Кордылевского // *Доклады Академии наук, Наука (М.)*, 2015, том 463, № 2, с. 164–167.

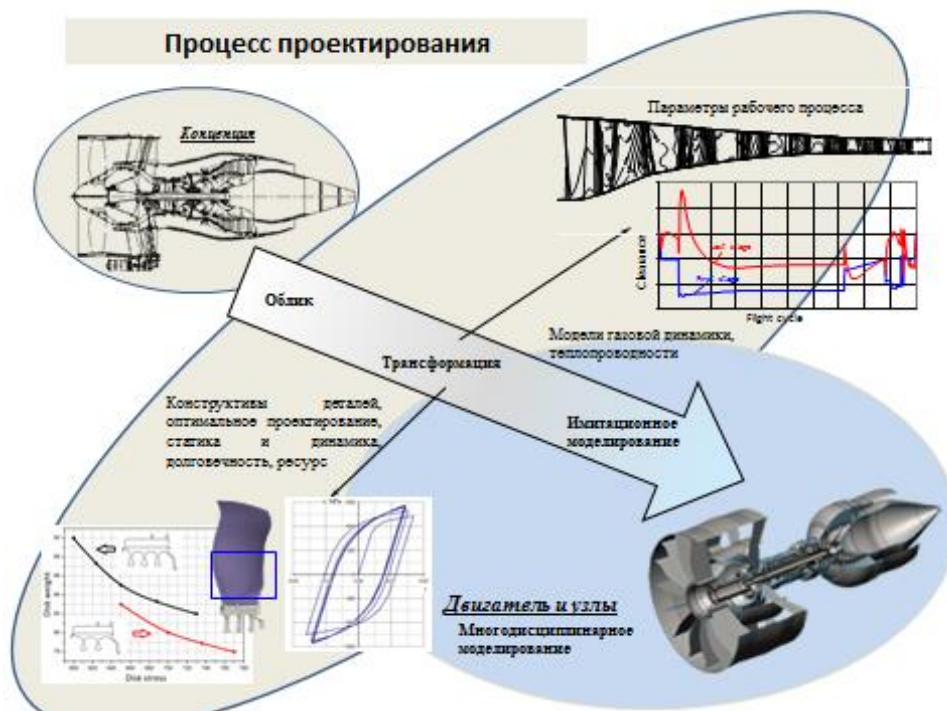
МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГТД

Ю.М. Темис

ЦИАМ имени П.И. Баранова, Москва

Авиационные двигатели – высоконагруженные конструкции энергетического машиностроения, процесс проектирования которых требует применения современных методов и алгоритмов multidisciplinary mathematical modeling объединяющих в единую стратегию «Виртуального двигателя» [1] модели газовой динамики, теплопроводности и механики деформируемого твердого тела. Актуальность такого подхода основана на необходимости сокращения объемов дорогостоящих натурных испытаний деталей, узлов и конструкций. Кроме этого, технология multidisciplinary modeling позволяет, при наличии моделей различного уровня, обеспечить как распознавание и восполнение объемов информации, получаемой в натурных экспериментах, так и проведение вычислительных экспериментов, позволяющих исследовать поведение конструкций в экстремальных условиях.

Методически процесс проектирования двигателя и его узлов может быть разбит на три стадии: создания облика конструкции (область дивергенции), проектирования деталей и узлов (область трансформации) и имитационного моделирования (область конвергенции) [1]. На первой стадии определяются условия и требования, которые позволяют вести на последующих стадиях автономную работу над отдельными узлами и деталями параллельно. При этом на каждой из стадий проектирования деталей и узлов двигателя необходимо применять математические модели различного уровня, однако следует соблюдать требования информационного единства и информационной взаимосвязи между моделями газовой динамики, теплопроводности и механики твердого тела. Отметим, что информационное единство и взаимосвязь между математическими моделями определяются граничными и начальными условиями, которые во многих случаях являются вычисляемыми. Это важно для стадии имитационного моделирования, на которой необходимо применять модели наиболее приближенные к условиям работы детали, узла или двигателя, что позволяет получить окончательные оценки рабочих параметров двигателя, кинетики теплового и напряженно-деформированного состояния деталей в рабочем цикле, прогнозировать ресурс и надежность конструкции. В лекции рассмотрены принципы создания моделей multidisciplinary modeling и приведены примеры применения стратегии «Виртуальный двигатель» на различных стадиях проектирования узлов и деталей.



На стадии концептуального проектирования – формирования облика конструкции определенное место занимают экспертные базы знаний, обобщающие существующий опыт создания двигателей и тенденции развития технологий производства материалов, деталей и узлов, математические модели

прогноза развития технологий, потребностей рынка на ряд лет вперед, методы экспресс оптимизации при ограниченном объеме информации. Несмотря на то, что стоимость этого этапа в общих затратах на разработку двигателя невелика, его реализации необходимо уделять большое внимание, так как ошибка в прогнозе может привести к проблеме успешной реализации проекта. Следует отметить, что эта часть процесса проектирования требует участия специалистов с наиболее высокой квалификацией.

Так как авиационный двигатель хорошо структурированная конструкция, проектирование его деталей и узлов происходит на стадии трансформации параллельно в различных подразделениях, при условии, что разрабатываемые проекты не выходят за рамки общих ограничений установленных на стадии концептуального проектирования. При этом определенное место занимают «быстрые алгоритмы», основанные на одновременном применении средств вычислительной механики и оптимизации при проектировании лопаток компрессора и турбины, дисков и роторов, опор и силовой схемы двигателя. На этой стадии существенно качество моделей и алгоритмов газовой динамики, теплопроводности и структурного анализа, моделей поведения материалов, моделей прогноза ресурса и надежности [2]. Ряд примеров применения таких алгоритмов приведен в докладе.

На стадии конвергенции применяют модели, наиболее адекватно описывающие физические процессы в деталях и узлах двигателя. Это позволяет оценить поведение конструкции на всех этапах рабочего цикла, учесть возможные ресурсные явления, моделировать аварийные ситуации и т.д. В докладе приведен пример математического моделирования кинетики теплового и напряженно-деформированного состояний ротора компрессора с использованием термомеханической модели, объединяющей совместную работу модулей газовой динамики, описывающих вторичные течения в полостях, модулей расчета теплового состояния деталей и модуля изменения напряжений и деформаций конструкции. Также в докладе рассмотрены:

- технологии «Виртуального двигателя» при моделировании нелинейных колебаний систем ротор-корпус, зубчатых колес редукторов и трансмиссий, уплотнений с учетом эффектов контактного взаимодействия деталей. Показано, что наибольший эффект может быть получен при предварительном анализе трехмерных задач расчета статики и динамики узлов и редукции этих задач к адекватным «быстрым моделям» «балочного типа»;

- принципы построения моделей пластичности, ползучести и ресурса применительно к задачам неизотермического циклического деформирования высоконагруженных деталей ГТД;

- принципы построения систем автоматизированного и оптимального проектирования дисков и лопаток ГТД. Определенное внимание уделено разработке систем, взаимодействующих с конструктором в диалоговом режиме;

- перспективы применения быстрых алгоритмов МКЭ и МГЭ для решения физически и геометрически нелинейных задач деформирования деталей ГТД; принципы построения вычислительных комплексов, в которых взаимодействуют модули, работающие с моделями различного уровня и принципы управления потоками информации.

Вопросы технологии «Виртуального Двигателя» рассмотрены в ряде глав работы [1] и в других публикациях [2–5].

1. Скибин В.А., Солонин В.И., Темис Ю.М. в кн. Машиностроение. Энциклопедия/ Ред. Совет К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Самолеты и вертолеты. Т. IV–21/ Авиационные двигатели. Кн.3 / В.А. Скибин, В.И. Солонин, Ю.М. Темис и др.; под ред. В.А. Скибина, Ю.М. Темиса и В.А. Сосунова. – 2010. – 720 с.

2. Temis Y.M., Selivanov A.V, Yakushev D.A. “Virtual Engine” Approach for the Coupled Analysis of Engine Structure, Proc. 23rd ISABE Conference, Manchester, UK, 3-8 Sep. 2017, Paper ISABE-2017-22645.

3. Темис Ю.М., Якушев Д.А. Оптимальное проектирование конструктивных элементов ГТД. Техника воздушного флота, №1(694) М.: ЦАГИ, 2009. С. 54–64.

4. Темис Ю.М., Якушев Д.А., Алхимов Д.А. Проблемы оптимального проектирования деталей ГТД // III Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство»: Сборник материалов мини-конгресса Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова «Математическое моделирование и проектирование в авиадвигателестроении» / Под ред. д.т.н., проф. Ю.М. Темиса. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2016. – С. 11–24.

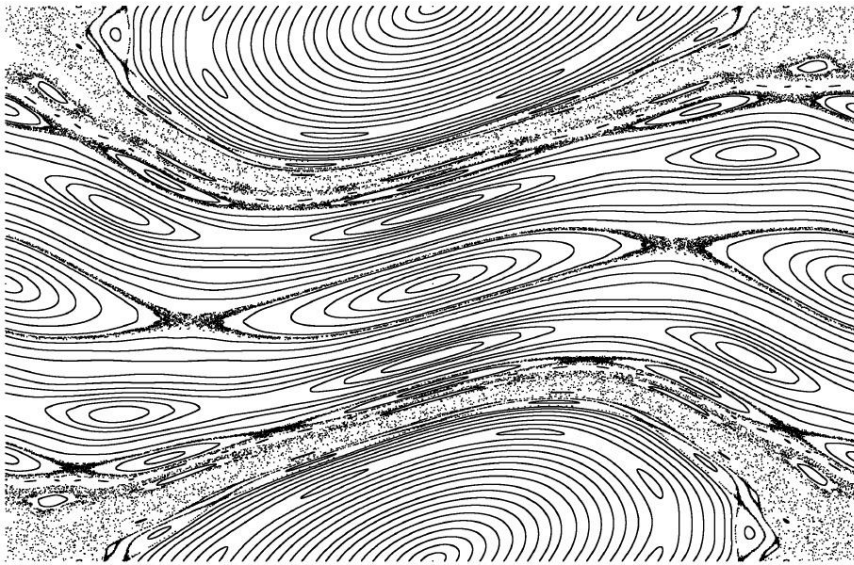
5. Бондарь В.С., Алхимов Д.А., Факеев А.И., Темис Ю.М., Якушев Д.А., Пестов А.В. Система автоматизированного проектирования роторов ГТД. // Известия МГТУ «МАМИ». Естественные науки. М., МГТУ «МАМИ», № 1(23), 2015. Т. 4. С. 10–20.

ХАОС В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Д.В. Трещев

Математический институт имени В.А. Стеклова РАН, Москва

Динамические явления в природе описываются дифференциальными уравнениями. Мы сконцентрируемся на случае обыкновенных дифференциальных уравнений, хотя следы обсуждаемых эффектов и явлений можно найти и в уравнениях с частными производными. Вплоть до конца XIX века основные усилия математиков, механиков и физиков были направлены на получение явных решений уравнений динамики. Переворот в понимании подходов и приоритетов произвел А.Пуанкаре, который, с одной стороны, объяснил, что в общей ситуации получение явных формул для решений дифференциальных уравнений – дело безнадежное, а с другой стороны, предложил ряд методов качественного исследования динамических систем. На этом пути была обнаружена типичность различных хаотических явлений сначала в гамильтоновой, а затем и в диссипативной динамике. Историю этих вопросов, а также математические определения понятия хаоса я и планирую обсудить в своей лекции.



ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛАТТЕРА КОНСТРУКЦИЙ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Ф.А. Абдухакимов

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
farruh.abduhakimov7@gmail.com

Явление флаттера встречается в различных системах. Хорошо известен панельный флаттер – потеря устойчивости и интенсивные вибрации панелей обшивок летательных аппаратов, возбуждающихся при взаимодействии с потоком воздуха при больших скоростях полета. Обычно панельный флаттер приводит не к немедленному разрушению летательного аппарата, а к накоплению усталостных повреждений панелей. Одной из основных проблем, стоящих перед конструкторами современных газотурбинных двигателей, является флаттер лопаток. Как правило, для прогнозирования флаттера компрессорных лопаток используются упрощённые критерии, выработанные в конструкторских бюро на опыте проектирования и доводки двигателей.



Рис. Геометрия задачи: а) одномодовый флаттер пластины, б) флаттер лопатки

В докладе описывается применение энергетического метода [1] для решения двух задач: 1) исследование одномодового флаттера пластин в форме прямоугольника, параллелограмма и трапеции (Рис. а); 2) Изучение влияния конструктивных параметров на прогнозирование флаттера лопаток компрессоров газотурбинных двигателей (Рис. б).

Суть энергетического метода 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 построены границы одномодового флаттера при разных значениях длины пластины. Получено, что границы одномодового флаттера трапециевидных пластин близки к границам одномодового флаттера прямоугольных пластин и при уменьшении значения угла скоса меняются незначительно. В противоположность этому, границы флаттера пластин в форме параллелограмма существенно отличаются от границ флаттера прямоугольных пластин, и при уменьшении угла скоса увеличивается их аэроупругая устойчивость при малых сверхзвуковых скоростях. Также было исследовано влияние радиального и осевого зазора, угла прикрытия и открытия входного направляющего аппарата, радиальной неравномерности потока и величины монтажного натяга на результаты расчетов по прогнозированию флаттера лопаток. Показано, что влияние конструктивных параметров, кроме величины монтажного натяга, на границы флаттера незначительно. Значение же монтажного натяга существенно влияет на границы флаттера.

1. Vedeneev 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 (в печати).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВПЛОТЬ ДО РАЗРУШЕНИЯ

А.А. Абу Газал, В.И. Сурин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
gazal.ayman@yandex.ru

Электрофизический метод неразрушающего контроля – метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП), разработанный в лаборатории ElphysLAB НИЯУ МИФИ, обеспечивает эффективную диагностику реакторного оборудования, гарантируя надежность результатов измерений в условиях, приближенных к условиям эксплуатации ядерных материалов [1].

В конструкциях электрофизических датчиков отсутствуют сильноточные цепи и нагреваемые области, поэтому измерительные системы характеризуются высокой пожаробезопасностью. Также следует отметить низкий по электрической мощности уровень полезного сигнала и отсутствие, в связи с этим, искрения в механических контактах. Метод СКП обеспечивает возможность проведения многоточечных и распределенных измерений, в том числе с использованием мультиплексирования чувствительных элементов, расположенных на различных участках объекта контроля. Для обработки потока поступающей информации применяются программные коды частотно-временного и спектрального анализа. Одно из главных преимуществ метода контактной потенциометрии заключается в том, что преобразователи измерительной системы имеют малые линейные размеры (диаметром 1-2 миллиметра), обеспечивают высокую надежность и воспроизводимость результатов измерений; высокую помехоустойчивость и низкий уровень собственных шумов, и могут быть размещены, практически, в любом труднодоступном месте. Метод СКП открывает широкие практические возможности для исследования распределения на поверхности напряжений и деформаций, механизмов пластической деформации, стадий развития внутренних дефектов вплоть до разрушения материала.

Исследование, с помощью нового метода СКП, при испытаниях на растяжение образца Д16Т показало, что заранее можно определить в каком месте разрушится образец (Рис.). другими словами, использование при обработке результатов метода амплитудной дискриминации сигнала (на структурном уровне 5 мкВ) позволило, при напряжении 400 МПа, на всей длине образца выделить тот участок, на котором впоследствии образовалась шейка[2].

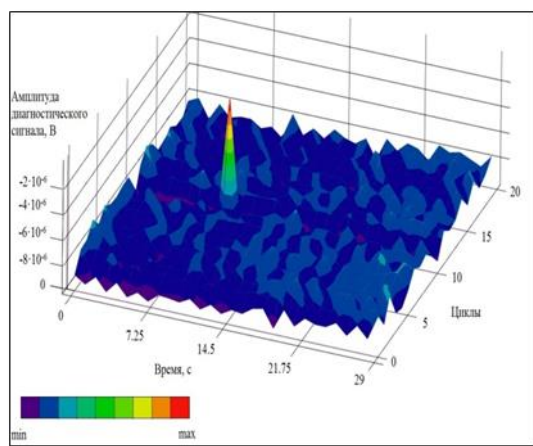


Рис. Модель линейно-временной потенциограммы, полученная при растяжении сплава Д16Т на нагрузочной машине LM-29 СУС «5» при $\sigma = 400$ МПа, с помощью метода сканирующей контактной потенциометрии

1. Сурин В.И., Волкова З.С., Денисов Р.А., Мотовилин В.Д., Рейн Н.В. Методы электрофизической диагностики и контроля реакторного оборудования// Глобальная ядерная безопасность – М.: НИЯУ МИФИ, 2016, №4(21), с. 51–62.

2. Abu Ghazal A.A., Bokuchava G.D, Papushkin I.V., Surin V.I., Shef E.A., “The application of scanning contact potentiometry method and diffraction of thermal neutrons at physico-mechanical tests of materials”, Proc. of the XIII International Youth Scientific and Practical Conference “FUTURE OF ATOMIC ENERGY - AtomFuture 2017”, KnE Life Sciences, 2017, pp. 91–106. DOI 10.18502/12.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ СИЛ ТЯЖЕСТИ И КОРИОЛИСА В ПРИМЕНЕНИИ К ТРОПИЧЕСКИМ ЦИКЛОНАМ

Ю.А. Агеева¹, С.П. Баутин^{1,2}

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург

²Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск

sqwerzy@mail.ru

Тропический циклон — тип циклона, или погодной системы низкого давления, что возникает над теплой водяной поверхностью и сопровождается мощными грозами, выпадением ливневых осадков и ветрами штормовой силы. Традиционно считается, что тропические циклоны получают энергию от поднятия влажного воздуха вверх, конденсации водяных паров в виде дождей и опускания более сухого воздуха вниз.

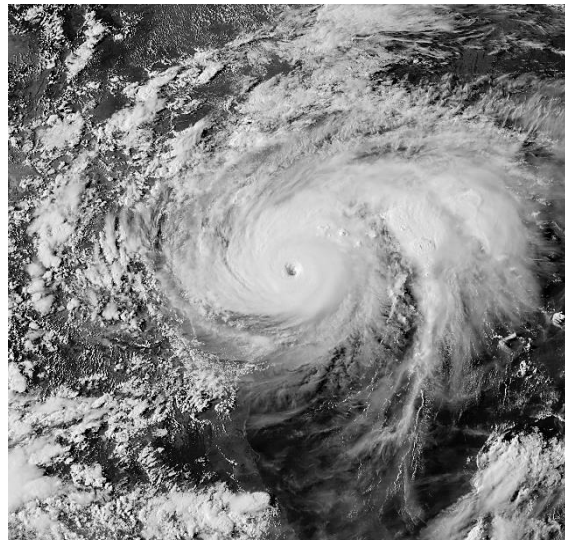


Рис. Ураган Харви на пике интенсивности, до выхода на берег в южном Техасе, 25 августа 2017 года

В книгах [1, 2] предложена другая схема возникновения и функционирования тропических циклонов. Неравномерный локальный нагрев подстилающей поверхности приводит к появлению неоднородностей температуры, плотности и давления. При действии сил тяжести и Кориолиса это является причиной возникновения сложного нестационарного закрученного движения среды.

Для решения задачи о моделировании трехмерных нестационарных течений, имеющих место в тропических циклонах, предлагается строить решение полной системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса, при действии сил тяжести и Кориолиса. Для численного моделирования таких течений используется метод конечных разностей с использованием явной разностной схемы.

1. Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск: Наука, 2008.

2. Баутин С.П., Дерябин С.Л., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2017.

О НОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА В НЕВЯЗКОЙ, НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

В.Ф. Копьев¹, С.А. Чернышев¹, Р.В. Акиншин^{1,2}, М.А. Юдин^{1,2}

¹«НИМК» ЦАГИ, Жуковский

²Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный
akinshinrv@mail.ru

Изучение динамики вихревого кольца представляет большой интерес, так как вихревое кольцо позволяет исследовать механизмы образования шума в турбулентных течениях. Этот объект легко может быть создан в опыте для экспериментального исследования и допускает теоретическое описание как стационарных, так и колебательных режимов. В то же время, теоретическое изучение динамики вихревого кольца в виду ее сложности проводится лишь в приближении тонкого вихревого кольца [1]. Параметр тонкости вихревого кольца определяют, как отношение характерного радиуса сечения ядра вихревого кольца к радиусу вихревого кольца a/R (Рис.). Из всевозможных течений выделяется движение изохронного вихревого кольца, для которого период обращения жидких частиц внутри ядра вихревого кольца постоянен. Для такого вихревого кольца отсутствуют возмущения непрерывного спектра, что существенно облегчает проведение аналитических расчетов [2].

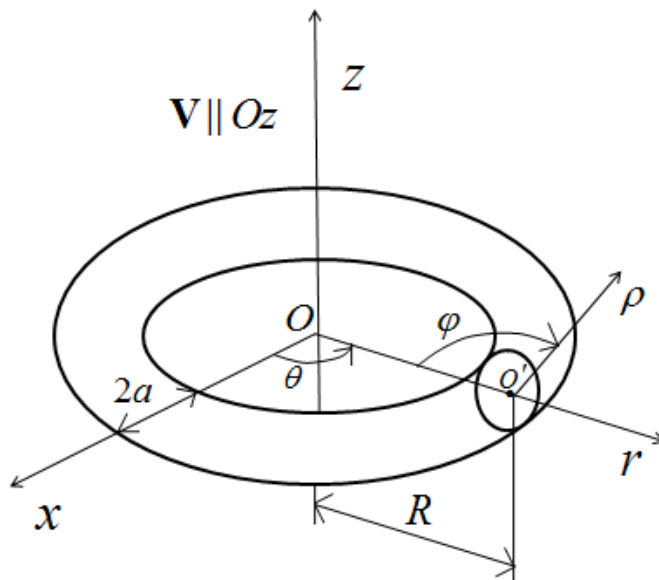


Рис. Вихревое кольцо

В этой задаче применяется подход, основанный на использовании поля смещения [3] как основной функции. Для исследования малых колебаний вихревого кольца этот подход использовался в работе [2], где впервые были правильно описаны бочкообразные моды вихревого кольца, а затем другие колебания.

В работе обсуждается возможная неустойчивость вихревого кольца, которая может реализовываться за счет взаимодействия колебаний разных типов, имеющих энергию разного знака (колебания с положительной энергией и колебания с отрицательной энергией [3]). Сложность задачи заключается в том, что вырождение собственных колебаний и количественное установление их связи может проявляться только при учете пятого приближения по параметру тонкости μ . В работе [2] вычисления проведены с точностью до μ^2 . В данной работе получено дисперсионное уравнение в приближении μ^3 и отработана процедура получения следующих приближений. Отметим, что для получения решения в следующих приближениях требуются более глубокие разложения не только колебаний, но и стационарного решения.

Работа выполнена по гранту РНФ, проект 17-11-01271.

1. Fraenkel L.E. Examples of steady vortex rings of small cross-section in an ideal fluid // J. Fluid Mech., 1972.
2. Kopiev V.F., Chernyshev S.A. Vortex-ring eigen-oscillations as a source of sound // J. Fluid Mech., 1997.
3. Копьев В.Ф., Чернышев С.А. Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерации звука // УФН. 2000. Т. 170. № 7. С. 713–742.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И УПРАВЛЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

И.А. Амелюшкин^{1,2}, А.Л. Стасенко^{1,2}

¹ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Amelyushkin_Ivan@mail.ru

Моделирование нестационарных дисперсных течений в неоднородных средах и их взаимодействия с обтекаемым телом представляет большой научный и практический интерес в широком спектре областей науки и техники. Сложность строгого математического моделирования движения множества тел в неоднородных потоках и стохастический характер их траекторий при экспериментальном исследовании в градиентных средах продиктовали построение новых подходов в математическом и численном моделировании динамики таких течений. Составлена таблица безразмерных управляющих параметров, которые определяют влияние различных факторов на динамику дисперсной фазы аэрозольного потока. Кроме того, построена система уравнений стохастической динамики частиц естественного происхождения, которые имеют возможность самостоятельно перемещаться под действием градиента тепла, освещенности, поддерживать постоянную температуру, генерировать турбулентную энергию, уклоняться от столкновений с препятствиями и менять решения. Сформулированы уравнения движения и уравнение состояния газа частиц естественного происхождения, учитывающих их внутреннюю энергию и неустойчивость принятия решений. Определены безразмерные управляющие параметры, характеризующие физические особенности таких течений.

Развиты численные алгоритмы молекулярного моделирования управления взаимодействием дисперсных систем и реальных газов с поверхностью твердых тел, обладающих различной степенью гидрофобности. В частности, аналитически получены зависимости коэффициентов восстановления нормальных компонент скорости молекул от поверхности твердого тела в зависимости температуры Дебая, температуры и безразмерного параметра $AK = \varepsilon_{w-m}/\varepsilon_{m-m} \approx 0.5(1+\cos\theta)$, который можно трактовать как отношение энергий ε_{w-m} взаимодействия между молекулой потока и атомом поверхности к характерной энергии ε_{m-m} взаимодействия молекул потока между собой, θ – угол смачивания. Полученные решения существенно сокращают объем вычислительных ресурсов при расчете коэффициентов отскока частиц от поверхности твердых тел. Кроме того, в представленном исследовании получена статистическая диаграмма, показывающая вероятность кристаллизации переохлажденной метастабильной жидкости при различных количествах и интенсивности механических воздействий.

Исследования выполнены за счет Российского научного фонда (проект 16–19–10472) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-31-00485).

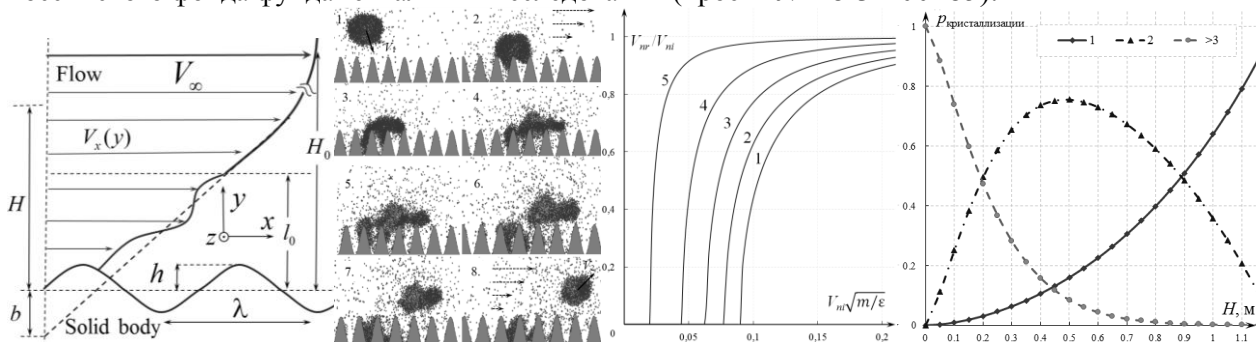


Рис. а) схема управления взаимодействием потока с нанорельефным твердым телом, обладающим различной степенью гидрофобности, б) пример молекулярного моделирования неполного отскока капли воды от рельефного тела, в) зависимость коэффициентов восстановления нормальных компонент скорости отскочивших от поверхности молекул в зависимости от начальной скорости удара V_{ni} д) Статистическая диаграмма вероятности кристаллизации переохлажденной метастабильной жидкости

1. Амелюшкин И.А., Стасенко А.Л. Взаимодействие потока газа, несущего несферические микрочастицы, с поперечным цилиндром // Инж.-физ. журнал. 2018. Т. 91. № 2. С. 307–318.

2. Amelyushkin I.A. Mathematical models and optical investigation of two phase flows in wind tunnels // Proceedings from the 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences ICAS-2016 25th–30th September 2016. – Daejeon, Korea. Paper No 2016_0665. – 5 p.

ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ НОВЫХ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

И.А. Амелюшкин^{1,2}

¹ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Amelyushkin_Ivan@mail.ru

Применение научных методов в разработке новых музыкальных инструментов представляет большой практический интерес. Разработана концепция нового музыкального инструмента, которая обладает значительными преимуществами в сравнении с аналогами, прототипами и традиционными инструментами. Подготовлены формула изобретения, реферат, выполнен патентный поиск, приведено детальное описание существующих решений. Проведены исследования по оптимизации системы управления подачей воздуха на колеблющиеся звуковые элементы. Построена математическая модель автоколебаний пластин в нестационарном воздушном потоке, приведены численные оценки амплитудно-частотных характеристик. Получены результаты моделирования управления формами колебаний воздушного потока в звуковых трубах переменного сечения. Интенсивность звуковых колебаний в заданном направлении рассчитывается по известной формуле Кирхгофа [1].

С помощью предложенных автором диаграмм сравнительного анализа музыкальных инструментов наглядно показаны преимущества оригинальных решений. Разработаны и описаны оригинальные концепции новых музыкальных инструментов. В настоящем исследовании сформулированы направления развития новых музыкальных технологий. Создана опытная модель нового музыкального инструмента (Рис.), описаны модификации его конструкции. Уже в таком виде конструкция обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами и прототипами. Расположенная перед глазами компактная кнопочная клавиатура позволяет кистью одной руки охватить три октавы, менять тональность путем смещения кистей на несколько кнопок в сторону, не меняя сохраненные в мышечной памяти музыканта действия при исполнении музыкального произведения. Приведен обзор существующих решений и описание преимуществ нового инструмента по сравнению с известными аналогами, прототипами и традиционными инструментами [2–4].

Помимо существенного повышения возможностей исполнения сложных музыкальных произведений и выполнения элементов музыкальных украшений, механическая система регистров нового музыкального инструмента позволяет менять тембр и воспроизводить тембр других духовых инструментов, управлять звуком в широком диапазоне акустических параметров. Дополнительные ряды в клавиатуре позволяют отдельными пальцами извлекать готовые аккорды и использовать микрохроматические интервальные системы. Разрабатываемый инструмент полностью механический и управляется только за счет действий музыканта. Сформулированы преимущества и перспективы механических музыкальных инструментов по сравнению с электронными аналогами.



Рис. Опытная модель
разрабатываемого музыкального
инструмента

1. Farassat F. Myers M.K. Extension of Kirchhoff's Formula to Radiation from Moving Surfaces // Journal of Sound and Vibration, 1988. – V. 123. – P. 451–460.
2. Jankó P. Neuerung an der patentirten Klaviatur // Patentschrift 32138 aus dem Jahr 1885. – 2 s.
3. Woźniak J.: Polski Folklor Muzyczny / Gdańsk: Akademia Muzyczna Gdańsk. – 1995. – 184 s.
4. Hardouin P. Twelve well-known positive organs: useful evidence or difficult problems // Organ Yearbook. – 1974. – P. 20–29.
5. Амелюшкин И.А. Многотембровый механический музыкальный инструмент с горизонтальной кнопочной клавиатурой // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2018» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2018. — 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM); – 65401_uid162008_report.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЧАСТИЧНО ПОРИСТОЙ ПОЛОСТИ В ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ

М.С. Астанина, М.А. Шеремет

Механико-математический факультет Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск
astanina.marina@bk.ru

В работе проведено численное моделирование естественной конвекции в частично пористой полости с использованием неравновесной тепловой модели. Рассматривается замкнутая квадратная полость, содержащая пористую вставку высоты h и теплогенерирующий теплопроводный источник энергии на нижней стенке. Горизонтальные стенки области теплоизолированы, боковые поддерживаются при постоянной температуре охлаждения. Область заполнена ньютоновской теплопроводной жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска. Вязкость рабочей среды зависит от температуры по экспоненциальному закону [1]. Считается, что температура пористой вставки отлична от температуры жидкости, и моделирование ведется в рамках тепловой локально-неравновесной модели. Для описания пористого изотропного слоя используется модель Дарси-Бринкмана.

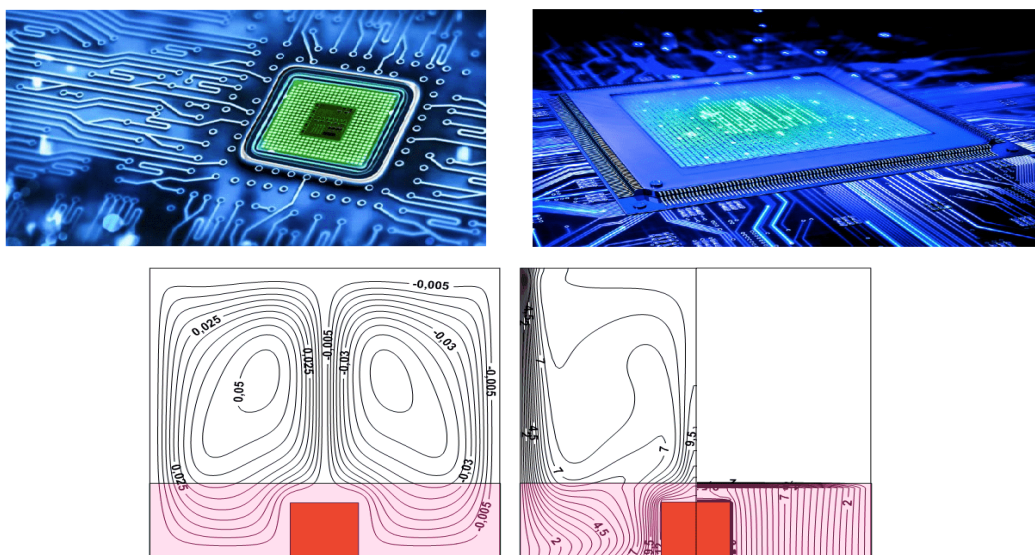


Рис. Моделирование пассивной системы охлаждения электронных чипов для значений $h=0.25$, $Da=10^{-3}$, $\zeta=1000$, $Ra=10^5$, $Os=5.0$: распределение изолиний функции тока и температуры в двух фазах

Уравнения, описывающие теплоперенос в рассматриваемой области, решались в безразмерных преобразованных переменных «функция тока – завихренность – температура». На границах раздела сред (чистая среда/пористая среда, пористая среда/источник энергии) реализованы граничные условия четвертого рода.

Полученные результаты позволяют прогнозировать поведение пассивных охлаждающих систем для электронных устройств различного типа в первом приближении. Благодаря фундаментальному характеру исследования и широкому диапазону определяющих параметров рассмотрены различные варианты взаимодействия жидкой и пористой среды, рабочих сред, а также мощностей тепловыделителя. Установлены основные зависимости между выбранными параметрами и эффективностью теплоотвода от источника.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-20141).

1. Astanina M. S., Sheremet M. A., Umavathi J. C. Unsteady natural convection with temperature-dependent viscosity in a square cavity filled with a porous medium // *Transport in Porous Media*. – 2015. – Vol.110 – No. 1. – P. 113–126.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОИСТОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СОЛЁНОЙ ЖИДКОСТИ

А.А. Афанасьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
afanasyev@imec.msu.ru

Формирование порфировых месторождений цветных металлов связывают с образованием линз высококонцентрированных растворов соли [1]. При дегазации магматических очагов подобные линзы, содержащие в растворенном виде помимо соли также и цветные металлы, формируются на глубинах 1–2 км. Они находятся в условиях интенсивной конвекции воды, обусловленной высоким геотермическим градиентом, т.е. быстрым возрастанием температуры с глубиной. Если конвекция не размывает линзу, то создаются условия для формирования месторождения.

Для определения возможных условий существования линз рассмотрена нестационарная двумерная задача фильтрации солёной жидкости в области $(x,z) \in [0, L] \times [0, H]$ (Рис.), верхняя «открытая» граница которой $z=0$ соответствует поверхности Земли. На нижней границе $z=H$ поддерживается повышенная температура (T), соответствующая заданному при $t=0$ линейному распределению T от z . При $z < h$ концентрация соли (c) равна нулю, а при $z \geq h$ она положительная константа. Предполагается, что плотность жидкости возрастает при уменьшении T или возрастании c . Таким образом, при $t=0$ имеется неустойчивая стратификация жидкости в областях $z < h$ и $z \geq h$ – плотность жидкости с глубиной z убывает, а при $z=h$ плотность скачком возрастает.

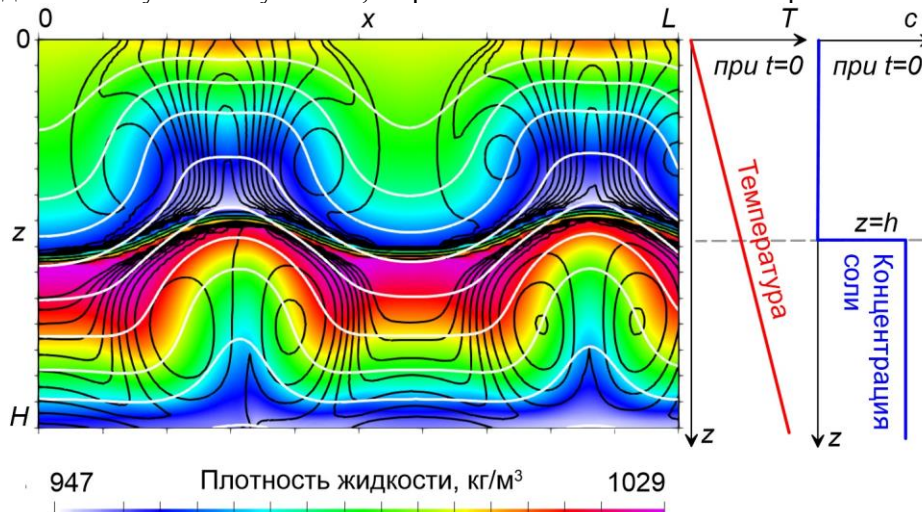


Рис. Распределение плотности жидкости; темными изолиниями показано распределение концентрации соли (c), а светлыми – температуры (T). Справа – начальные распределения T и c

В комплексе программ MUFITS [2] проведено прямое численное моделирование эволюции описанного распределения с учетом процессов теплопроводности, диффузии и механической дисперсии соли в пористой среде. Показано, что на начальном этапе развивается двухслойная конвекция с различными циркуляционными течениями в областях $z < h$ и $z \geq h$ [3], причем граница между жидкостями различной солёности искривляется. Обнаружено два различных режима эволюции системы. При реализации первого режима конвективное течение полностью перемешивает жидкости различной солёности, вынося соль через «открытую» границу $z=0$. Во втором режиме после начального переходного этапа, приводящего к незначительному перемешиванию жидкостей, система приходит к устойчивому положению равновесия, а конвекция прекращается. Причем, в области $z \geq h$ сохраняются высокие значения концентрации. Первый и второй режимы определяют условия, при которых линза и месторождение не могут и, соответственно, могут образоваться.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам при Президенте РФ (проект МД-3567.2018.1).

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. Afanasyev A. MUFITS Reservoir Simulation Software. <http://www.mufits.imec.msu.ru/>
3. Griffiths R.W. Layered doubled convection in porous media // *J. Fluid Mech.* 1981. V.102. P.221–248.

РАСЧЁТ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ MUFITS

А.А. Афанасьев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
afanasyev@imec.msu.ru

Многокомпонентные течения жидкостей и газов в пористых средах сопровождаются перемешиванием, приводящим к выравниваю полей концентрации – компонентного состава жидкости. К перемешиванию приводит, во-первых, молекулярная диффузия, вызывающая перенос компонента жидкости в направлении противоположном градиенту его концентрации. Вторым механизмом перемешивания является механическая дисперсия в пористой среде, связанная с переменчивостью на масштабе отдельных пор поля скорости жидкости и соответствующим ветвлением траекторий движения элементарных частиц (Рис.) [1,2]. Интенсивность перемешивания из-за механической дисперсии зависит от направления и абсолютной величины средней скорости жидкости. В направлении, совпадающим с вектором средней скорости, интенсивность определяется различной скоростью движения частиц вдоль различных траекторий, а в перпендикулярном направлении – частотой ветвления траекторий. Во многих приложениях, как, например, при развитии слоистой конвекции в неізотермических фильтрационных течениях солёной воды, интенсивность перемешивания из-за механической дисперсии может на несколько порядков превышать интенсивность молекулярной диффузии.

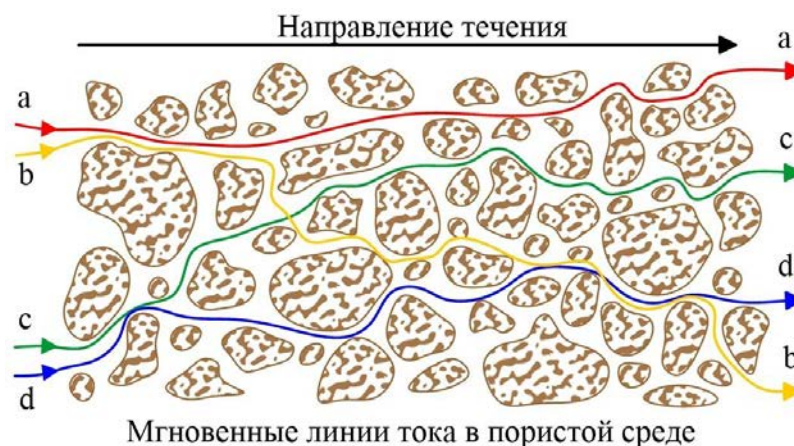


Рис. Схематическое изображение процесса механической дисперсии в пористой среде. В установившемся «осредненном» течении частицы жидкости, выпущенные в различные моменты времени из одной и той же точки (a/b; c/d), перемещаются вдоль различных траекторий

В настоящей работе проведено расширение функциональных возможностей комплекса программ MUFITS [3] для численного моделирования неізотермических многокомпонентных многофазных течений в пористой среде. Разработан новый модуль для расчёта однофазной фильтрации с учётом механической дисперсии. Тестирование методов расчёта механической дисперсии, реализованных в модуле, проведено на одномерных и двухмерных задачах двухкомпонентной фильтрации солёной воды, допускающих аналитическое решение. Получены оценки для размеров шагов сетки по пространству и времени, при которых механическая дисперсия на порядок величины превосходит численную дисперсию. Обсуждаются особенности применения разработанного модуля к расчёту слоистой конвекции в пористой среде. Даны оценки скорости перемешивания из-за молекулярной диффузии и механической дисперсии при развитии конвекции.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам при Президенте РФ (проект МД-3567.2018.1).

1. Whitaker S. Diffusion and dispersion in porous media// AIChE J. 1967. V.13. P.420–427.
2. Sahimi M., et al. Dispersion in flow through porous media – I. One-phase flow// Chem. Eng. Sci. 1986. V.41(8). P.2103–2122.
3. Afanasyev A. MUFITS Reservoir Simulation Software. <http://www.mufits.imec.msu.ru/>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ СТРУЙ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В МЕЖТУРБИННОМ КАНАЛЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТРДД

В.Г. Белова^{1,2}, В.А. Степанов¹, А.Ю. Чирков²

¹ЦИАМ имени П.И. Баранова, Москва

²МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва

belova.v.g@mail.ru

Синтетические струи с нулевым расходом газа являются перспективным активным средством управления течением в каналах ТРДД, с помощью которых можно добиться значительного сокращения потерь полного давления, за счет полной или частичной ликвидации отрывных зон. Для создания синтетических струй используется генератор синтетических струй (ГСС) (Рис. 1), который представляет собой независимую систему управления потоком. Для его работы не требуется дополнительный расход воздуха, необходимо только подать энергию для возбуждения колебаний в пристеночной полости [1]. При работе ГСС увеличивается полный импульс пристеночного потока за счет роста скорости движения, отрыв потока при этом сокращается, и как следствие снижается тепловая нагрузка, так как в отрывных зонах тепловой поток в стенку значительно больше.

В данной работе расчет проводился в программном комплексе ESI-ACE+ с описанием газодинамических процессов в полости блоков ГСС с использованием URANS-методов в сочетании с SST-моделью турбулентности. При расчете использовалась модель реального воздуха с переменной теплоемкостью и температурой набегающего потока 1000K, которая соответствует приблизительной температуре потока на входе в переходный канал между турбиной высокого и низкого давления. Была выбрана система управления потоком из трех блоков ГСС с выдувом синтетических струй под углом 45° с частотой 1 кГц, расположенных последовательно в начале предполагаемой отрывной зоной на наклонном участке переходного канала [2]. В области отрыва с внешней стороны стальной стенки толщиной 3 мм задавалась температура 500K.

Расчетные исследования в модельном диффузорном канале с системой управления потоком показали, что при увеличении числа Маха на входе отрыв увеличивается и тем самым увеличивается тепловой поток в стенку в зоне обратного течения (рис. 2). При работе ГСС осредненное значение теплового потока в стенку за период меньше, чем без работы ГСС. Вследствие этого можно сделать вывод о том, что ГСС помогает не только сократить значение потерь в канале, но и уменьшить тепловую нагрузку на отдельные элементы конструкции.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00271.

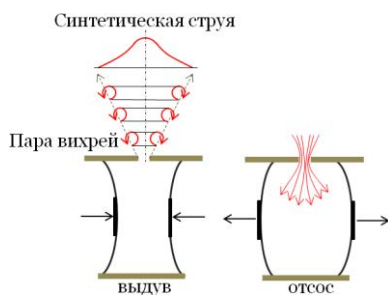


Рис. 1. Принцип работы ГСС

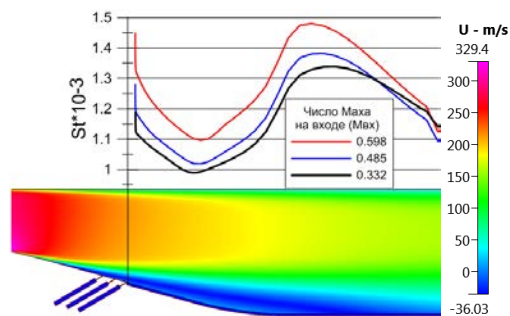


Рис. 2. Распределения числа Стэнтона в области отрыва по длине при $M_{вх} = var$

1. Белова В.Г., Макаров А.Ю., Маслов В.П., Степанов В.А. Проектирование блоков генераторов синтетических струй и экспериментальные исследования нестационарного истечения струй с помощью PIV-метода // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2018. Вып. 3.

2. Белова В.Г., Степанов В.А. Многопараметрические расчетные исследования генератора синтетических струй для активного управления течением в переходном канале // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2018. Вып. 4.

ОДНОМОДОВЫЙ ФЛАТТЕР УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ НАЛИЧИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

В.О. Бондарев, В.В. Веденеев

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
bondarev.vsevolod@yandex.ru

До недавнего времени был известен лишь один вид панельного флаттера – флаттер связанного типа, однако, в 2009-2010 годах было экспериментально доказано существование другого – одномодового типа панельного флаттера [1], который возникает при малых сверхзвуковых скоростях. Был проделан ряд работ по изучению одномодового флаттера, без учета пограничного слоя.

В первой части настоящей работы изучается влияние возмущений пограничного слоя на устойчивость упругой пластины конечной длины в сверхзвуковом потоке газа при больших числах Рейнольдса. Исследование проводится в плоской постановке. Для решения задачи используется метод ВКБ-решений и асимптотический критерий глобальной устойчивости [2].

Получено, что в случае обобщенно выпуклого профиля пограничного слоя увеличение толщины слоя приводит к смещению частот растущих мод к более высоким значениям; при толстых пограничных слоях, пластина полностью стабилизируется. Для случая профиля с обобщенной точкой перегиба, увеличение толщины слоя сначала приводит к увеличению скорости роста возмущений. При больших толщинах, скорости возрастания возмущений уменьшаются при увеличении толщины пограничного слоя.

Эффект вязкости довольно сложен: есть собственные моды, которые стабилизируются вязкими возмущениями, и моды, которые дестабилизируются. Важным замеченным явлением, является то, что в диапазоне собственных частот, который соответствует самой высокой скорости роста в невязкой аппроксимации, влияние вязкости дестабилизирующее, т.е. скорость роста возмущений становится больше.

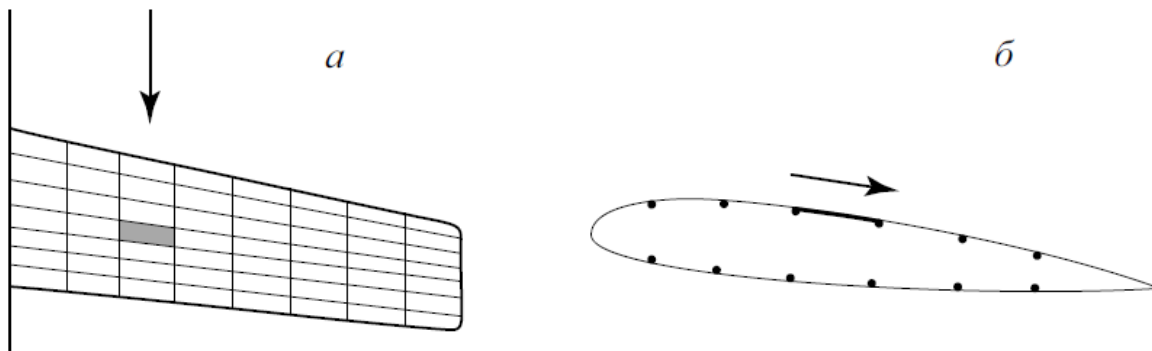


Рис. Панели обшивки крыла. Вид крыла сверху (а), сечение крыла (б)

Во второй части работы численно исследуются сверхзвуковые течения газа с пограничным слоем над абсолютно жесткими поверхностями различных форм, с целью поиска и анализа устойчивых профилей пограничного слоя с обобщенной точкой перегиба, которые могут оказывать дестабилизирующее влияние на флаттер упругой поверхности.

Расчеты подтверждают возможность возникновения данных профилей слоя над криволинейными поверхностями. Обнаружены области (рассмотренных поверхностей), над которыми образуются искомые профили пограничного слоя, найдены границы этих областей – диапазоны длин от начальной кромки поверхности.

Работа поддержана грантами РФФИ № 18-01-00404 и № 18-31-00407.

1. Веденеев В.В., Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Колотников М.Е. Экспериментальное исследование одномодового панельного флаттера в сверхзвуковом потоке газа // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 2. С. 161–175.

2. Куликовский А.Г. Об устойчивости однородных состояний // Известия АН СССР. ПММ. 1966. Т. 30. Вып. 1. С. 148–153.

МЕТОД РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНОГО МНОГОТОЧЕЧНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПАНЕЛИ В РЕЖИМЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

К.С. Бормотин, Вин Аунг, Ю.А. Сверкунов

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре
cvmi@knastu.ru

В последнее время в авиастроении в качестве деталей все больше применяются крупногабаритные монолитные и монолитно-сборные панели, которые позволяют повысить прочность и жесткость конструкций с одновременным снижением массы и улучшением аэродинамических характеристик. Задание аэродинамической формы таких монолитных панелей проводится процессами формообразования, осуществляющихся в режимах пластического деформирования, как при обычных, так и при повышенных температурах [1]. Формирование в режиме ползучести и при напряжениях, не превышающих предела упругости материала, обеспечивает более высокий остаточный прочностной ресурс по сравнению с методом обычной холодной штамповки [2]. Экспериментальные результаты позволяют отождествить работу рассеяния с параметром поврежденности [2]. В этом случае процессы формообразования позволяют управлять уровнем поврежденности материала, согласовывать с технологическими ограничениями, за счет оптимального выбора пути деформирования во времени [3].

В качестве примера, рассматривается формование изделий из листов и панелей, с помощью реконфигурируемого стержневого пуансона (матрицы), позволяющего изменять форму заготовки. Точность формы и качество детали, полученной технологиями обработки материалов давлением при заданных параметрах процесса, зависит от точности вычисленной формы оснастки с законом изменения в процессе деформирования, задающей упреждающую форму (рис.). Упреждающая форма должна обеспечивать заданную остаточную кривизну панели после освобождения ее от силовой оснастки.

Задача деформирования в ползучести с контактными условиями решается методом конечных элементов. В качестве критерия оптимизации принимается накопленная в процессе деформирования работа рассеяния. Учитывая дискретные по времени уравнения пошаговой процедуры интегрирования и минимизируемую функцию, формулируется дискретная задача оптимального управления. Данная задача решается методом динамического программирования.

Таким образом, разработанный численный метод позволяет находить рациональные процессы формообразования не только для идеальной пластинки или оболочки, но и для таких деталей, как панели крыла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (16-31-60038 мол_а_дк), совета по грантам Президента РФ (МД-4117.2018.1).

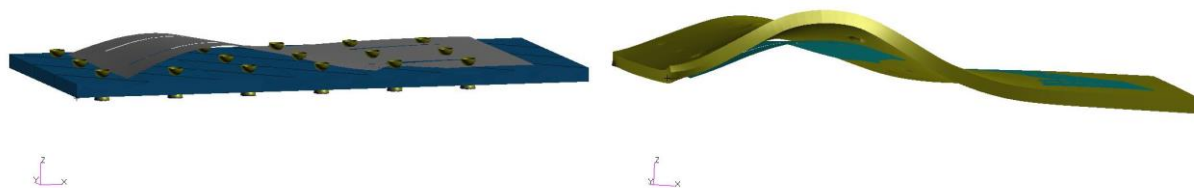


Рис. Конечно-элементная модель заготовки и поверхность с заданной кривизной до и после расчета упреждающей формы

1. Аннин Б.Д., Олейников А.И., Бормотин К.С. Моделирование процессов формообразования панелей крыла самолета SSJ-100 // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 4. С. 155–165.
2. Соснин О.В., Никитенко А.Ф., Горев Б.В. К обоснованию энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности металлов // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 4. 188–197.
3. Бормотин К.С., Олейников А.И. Вариационные принципы и оптимальные решения обратных задач изгиба пластин при ползучести // Прикладная механика и техническая физика. 2012. № 5. С. 136–146.

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЛНАМИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЯХ

В.Ф. Копьев¹, Г.А. Фараносов¹, С.А. Чернышев¹, О.П. Бычков^{1,2}

¹НИМК ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, Москва

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный

oleg.bychkov@tsagi.ru

Одним из основных источников шума самолета с реактивными двигателями является турбулентная струя. Интенсивность данного источника шума имеет сильную зависимость от скорости истечения струи. Данный факт помог достигнуть существенного прогресса по снижению шумности данного источника в современных двигателях повышенной степени двухконтурности, в которых скорость струи на фоне увеличенного диаметра сопла снижена. Тем не менее, такой подход к данной проблеме носит свои ограничения, что приводит к необходимости поиска новых способов по управлению данным источником шума.

Из всех современных концепций снижения шума турбулентной струи при заданной скорости ее излучения в данной работе рассматривается система активного управления, основанная на непрерывном отслеживании в реальном времени состояния потока и реагировании на его возмущения с подстройкой управляющего воздействия таким образом, чтобы снизить нежелательные возмущения в потоке.

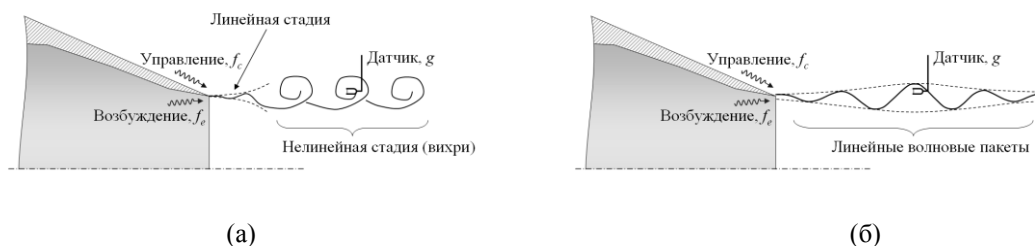


Рис. Развитие гидродинамической неустойчивости в возбужденной струе.
(а) – нелинейный режим, (б) – линейный режим

В качестве наиболее подходящего объекта активного управления в работе рассматриваются развивающиеся в слое смещения турбулентных струй крупномасштабные структуры, которые могут быть описаны теоретически с помощью представления о пакетах волн неустойчивости, растущих на начальном участке благодаря неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и представляющих собой собственные решения исходных уравнений. Таким образом, подавление амплитуды волн неустойчивости должно напрямую вести к снижению шума высокоскоростных струй, для которых шум смещения все больше определяется данными структурами, но также и к снижению шума взаимодействия струи и крыла, так как в недавних исследованиях (например [1]) было показано, что для струи, установленной вблизи крыла, именно рассеяние пакетов волн неустойчивости на задней кромке крыла приводит к существенному усилению шума низко-, и высокоскоростных струй, поэтому управление волнами неустойчивости можно рассматривать также как универсальный подход к снижению шума конфигурации «струя-крыло».

В работе, являющейся продолжением работ [2, 3], представлены результаты экспериментальной диагностики волн неустойчивости в невозбужденных струях. Кроме того, разработан алгоритм управления волнами неустойчивости в невозбужденных струях, подходящий для использования в экспериментальных исследованиях. Принципиальная реализуемость предлагаемой концепции управления проверена на наборе данных, полученных при измерении ближнего поля невозбужденной струи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00430.

1. Бычков О.П., Фараносов Г.А. О возможном механизме усиления шума струи вблизи крыла // Акуст. Журн. 2014. Т. 60. № 5. С. 596–610.

2. Беляев И.В., Зайцев М.Ю., Копьев В.А., Копьев В.Ф., Фараносов Г.А. Акустическое управление волнами неустойчивости в турбулентной струе // Акуст. Журн. 2013. Т. 59. № 1. С. 19–30.

3. Koriev V.F et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 1–18.

ИСТЕЧЕНИЕ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА ИЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЛИ СФЕРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА В ПУСТОТУ

Х.Ф. Валиев

ЦИАМ имени П.И. Баранова, Москва
haris@ciam.ru

Получены решения начально-краевых задач об истечении идеального (невязкого и нетеплопроводного) совершенного газа из цилиндрических или сферических источников в пустоту. Время отсчитывается от момента включения источника, вне которого в момент включения – пустота. Фиксируются энтропийная функция, расход ("интенсивность" источника), равное или большее единицы начальное число Маха истекающего из источника газа, а также радиус начального цилиндра или сферы ("радиус источника"). Если радиус источника больше нуля, то область течения в плоскости "радиальная координата - время" состоит из двух подобластей: подобласти стационарного течения от источника и примыкающей к ней неавтомоделной центрированной волны разрежения (ЦВР) из C^- -характеристик. Стационарное течение описывается известными конечными формулами, а ЦВР рассчитывается методом характеристик для одномерных нестационарных течений. При больших значениях радиальной координаты расчеты методом характеристик подтвердили полученные ранее асимптотические закономерности.

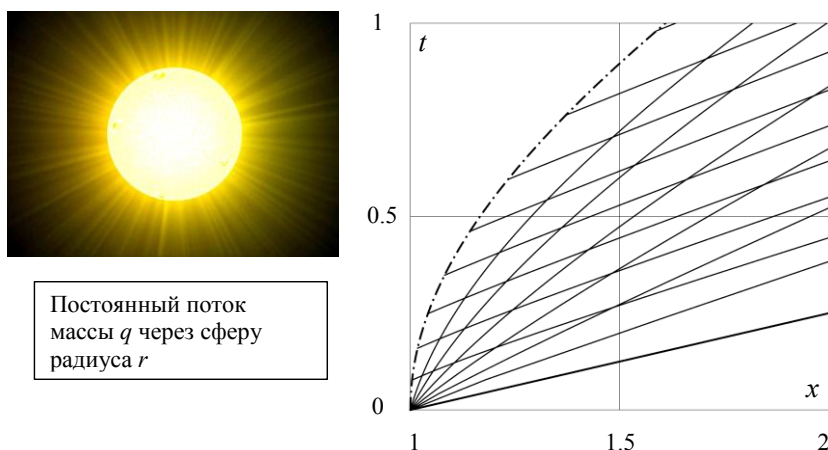


Рис. Поток массы с поверхности звёзд считаем постоянным (слева).
Сетка C^- и C^+ -характеристик на начальном участке (справа)

Граница между ЦВР и пустотой – прямая C^0 -характеристика (траектория частиц), совпадающая с граничной и единственной прямолинейной C^- -характеристикой ЦВР. Она же – асимптота части C^+ -характеристик. Течение, возникающее при истечении в пустоту из источника с нулевым начальным радиусом, т.е. из "точечного" источника, принципиально отличается от описанного выше. В рассмотренной постановке при заданном конечном расходе и нулевом радиусе такого источника начальные скорость, плотность и скорость звука газа, истекающего из него, бесконечны. Вне зависимости от величины радиуса источника скорость газа и в стационарной части течения, и в нестационарной ЦВР с ростом радиальной координаты растет, а плотность и скорость звука уменьшаются. Показано, что такое же поведение этих параметров будет и для точечного источника. При этом скорость газа, будучи изначально бесконечной, остается такой всюду, а плотность и скорость звука, уменьшаясь, становятся нулевыми при любых ненулевых значениях радиальной координаты. При нулевом радиусе источника рассматриваемая задача становится автомоделной. Ее решение в плоскости "автомоделных" скорости и скорости звука дается тремя особыми точками дифференциального уравнения с этими переменными. Согласно сказанному выше в одной из них автомоделная скорость бесконечна, а автомоделная скорость звука равна нулю.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 17-01-00126).

1. Х.Ф. Валиев, А.Н. Крайко. Истечение идеального газа из цилиндрического или сферического источника в пустоту // Изв. РАН.Механика жидкости и газа. 2018. №5.

МЕХАНИКА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НАТУРАЛЬНОГО КАУЧУКА

И.А. Варьян^{1,2}, Е.Е. Масталыгина^{1,2}, Н.Н. Колесникова², А.А. Попов^{1,2}

¹Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, Москва

²Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва

ivetta.varyan@yandex.ru

Огромные масштабы промышленного производства и обширный спектр применения полиэтилена свидетельствуют о важности разработки новых материалов на его основе. В настоящей работе в качестве добавки к полиэтилену низкой прочности (ПЭ) использовали натуральный каучук (НК) – продукт растительного происхождения, достаточно быстро подвергающийся окислительной и биологической деструкции, введение которой способствует ускорению процесса биodeградации ПЭ. Объектами исследования являлись двойные композиты на основе ПЭ (ТМ 15803-020, ОАО «Нефтехимсевилен») с содержанием 10-50 мас.% НК (ТМ SVR 3L, Вьетнам). Смешение полимеров на смесителе типа Брабендер при $140 \pm 5^\circ\text{C}$ и 30 об./мин с последующим прессованием при $140 \pm 5^\circ\text{C}$ и быстрым охлаждением до $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Механические свойства композиций при растяжении исследовали с использованием разрывной машины DVT DevotransTM GP UG 5 DLC-0,5 в соответствии с ISO 527-3:1996 (форма образца тип 2, скорость растяжения 100 мм/мин).

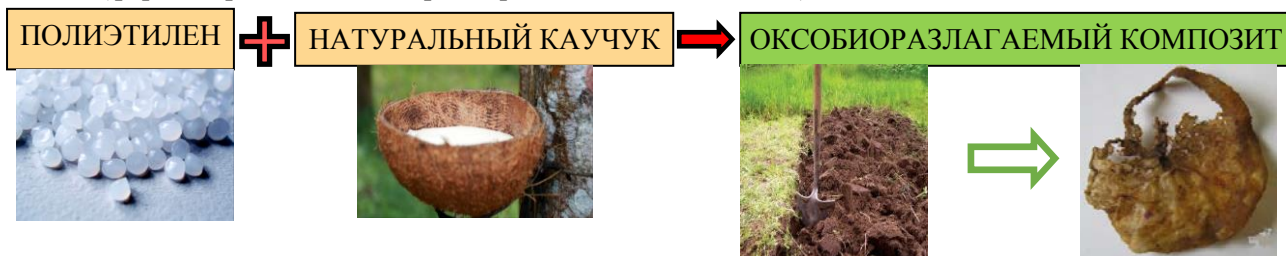


Рис. Биоразлагаемые полимерные композиты ПЭ/НК

По результатам испытаний установлено, что соотношение ПЭ/НК сильно влияет на относительное удлинение (ϵ_r) и прочность при разрыве (σ_r), а также модуль упругости ($E_{упр}$). Наблюдается значительное снижение σ_r при добавлении 10 и 20 мас.% НК по сравнению с чистым ПЭ. Неоднородная система, образованная путем добавления НК к ПЭ, способствует распространению трещин и уменьшению σ_r . При деформации смеси, чем больше размер диспергированных доменов, тем выше перенапряжение, происходящее на границе раздела фаз. ϵ_r резко уменьшается при добавлении 10 мас.% НК. Это связано с образованием гетерогенной системы, где домены НК ведут себя как дефектные структуры в матрице ПЭ. Когда НК образует непрерывную фазу (более 20 мас.% НК) ϵ_r возрастает. Материалы становятся более гибкими, о чем свидетельствует уменьшение $E_{упр}$ пропорционально содержанию НК в смеси.

Композиции	Прочность при разрыве (σ_r), МПа ($\Delta \pm 0,5$ МПа)	Относительное удлинение (ϵ_r), % ($\Delta \pm 10\%$)	Модуль упругости ($E_{упр}$), МПа ($\Delta \pm 5$ МПа)
ПЭ	15.1	610	87
ПЭ/НК (90/10)	6.3	110	62
ПЭ/НК (80/20)	6.5	280	59
ПЭ/НК (70/30)	6.4	380	49
ПЭ/НК (60/40)	4.8	330	38
ПЭ/НК (50/50)	3.9	280	29
НК	0.4	80	-

Механические свойства образцов ПЭ и ПЭ/НК при растяжении.

1. Domininghaus H. *Plastics for Engineers: Materials, Properties, Applications* // Hanser Gardner Publications, 1993.
2. Липатов Ю.С. *Физическая химия наполненных полимеров*. М.: Химия, 1977.
3. Varyan I.A., Mastalygina E.E., Kolesnikova N.N., et. al. // AIP Conf. Proc. 1909, 020226 (2017).
4. Mastalygina E.E., Varyan I.A., Kolesnikova N.N., et. al. // AIP Conf. Proc. 1736, 020097 (2016).
5. Ванкревелен Д.В. *Свойства и химическое строение полимеров* // Под ред. А.Я. Малкина. М.: Химия, 1976.

СТЕКАНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ

Р.Д. Вахитова, Е.И. Могилевский, Е.Б. Николаев

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
vakhitova1996@bk.ru

В работе рассматривается течение слоя нелинейно-вязкой жидкости по вертикальной плоскости под действием силы тяжести. В этом случае имеется точное стационарное решение, описывающее течение с плоской границей раздела; толщина слоя определяется балансом силы тяжести и вязкого трения на твердой поверхности. В [1] рассмотрена задача о линейной устойчивости такого течения к малым возмущениям и показано, что при течении по вертикальной плоскости возмущения из некоторого диапазона частот нарастают со временем. Размер этого диапазона для псевдопластических жидкостей шире, чем для ньютоновской, дилатантные свойства приводят к уменьшению диапазона неустойчивых возмущений и уменьшению характерных коэффициентов усиления.

В настоящей работе рассматривается дополнительный фактор, влияющий как на параметры основного течения, так и на характеристики неустойчивости — осцилляции удерживающей поверхности. Предполагается, что плоскость совершает продольные колебания по гармоническому закону. При переходе в неинерциальную систему отсчета, связанную с плоскостью, возникает дополнительная массовая сила инерции, изменяющаяся со временем по гармоническому закону. Рассмотрено безволновое течение — плоскопараллельное течение с плоской границей раздела, в котором профиль продольной скорости периодически изменяется со временем с той же частотой, что и сила инерции. Показано, что средний расход псевдопластической жидкости растет с ростом амплитуды колебаний при фиксированной толщине слоя.

Выведено уравнение для описания длинных волн, частота которых много меньше частоты колебаний плоскости. Уравнение получено путем интегрирования по толщине слоя, причем предполагается, что профиль скорости в каждом сечении в каждый момент времени соответствует решению задачи о безволновом течении, а локальными характеристиками течения являются толщина и расход. Уравнение содержит не только средние по периоду колебаний плоскости характеристики, но и более высокие моменты, а именно среднее значение квадрата скорости. Таким образом, даже для случая ньютоновской жидкости, когда колебания не изменяют среднего расхода при заданной толщине, происходит изменение параметров волновой динамики.

Рассмотрена задача о линейной устойчивости безволнового решения. Показано, что наличие колебаний приводит к стабилизации пленки. Для случая быстрых колебаний, когда в пленке выделяется осциллирующий вместе с плоскостью тонкий подслой, результаты получены аналитически.

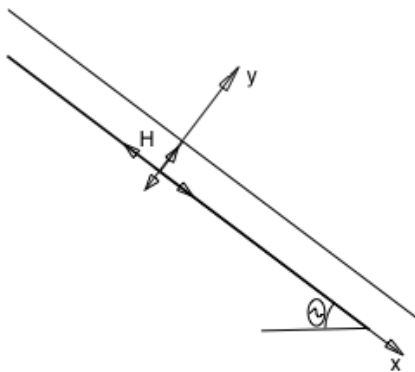


Рис. Схема течения

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам при Президенте РФ (проект МК-1798.2017.1).

1. Могилевский Е. И., Шкадов В. Я. Неустойчивость и волны при течении пленки обобщенно-ньютоновской жидкости по вертикальной стенке // Изв. РАН. МЖГ 2010. № 3. С.43–56

БЕЗВОЛНОВОЕ СТЕКАНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ

Р.Д. Вахитова, Е.И. Могилевский, Е.Б. Николаев

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
vakhitova1996@bk.ru

Толщина слоя со свободной поверхностью, стекающего по плоскости под действием силы тяжести определяется балансом массовой силы и трения на твердой поверхности. Для линейно-вязкой жидкости имеется точное решение уравнений Навье-Стокса, которое предсказывает, что расход жидкости пропорционален третьей степени толщины. При течении неньютоновской жидкости эта зависимость определяется реологическим законом [1], в частности, для степенной жидкости (эффективная вязкость является степенной функцией скорости сдвига) показатель степени зависит от показателя вязкости и расход пропорционален большей степени толщины для псевдопластических жидкостей и меньшей для дилатантных. В случае нелинейного закона зависимости вязкости от скорости сдвига колебания плоскости приводят к локальному изменению трения и существенному изменению расхода, причем его среднее значение по периоду также изменяется.

Изучается зависимость среднего расхода стекания неньютоновской жидкости по наклонной плоскости от параметров колебаний. Периодическое решение нелинейного уравнения в частных производных параболического типа разыскивается с помощью различных подходов. Рассмотрены асимптотические случаи: медленные колебания, период которых много больше времени вязкой релаксации, вызывающие квазистационарное течение; быстрые колебания, которые приводят к образованию тонкого осциллирующего подслоя; слабая зависимость вязкости от скорости сдвига. В первых двух случаях удается аналитически найти вид зависимости расхода от параметров колебаний. Для слабо неньютоновских жидкостей задача сводится к линейному неоднородному уравнению, периодическое решение которого находится методом Фурье.

Для произвольного реологического закона и произвольных параметров колебаний решается нестационарная задача, периодическое решение устанавливается за достаточно большое время.

Результаты расчетов сравниваются с опубликованными экспериментальными данными [2] (правый рис.). По осям отложены безразмерная амплитуда скорости плоскости и частота колебаний. Обнаружены значительные расхождения при малых амплитудах и частотах колебаний, различия, вероятно, связаны с недостаточно точно выбранной реологической моделью.

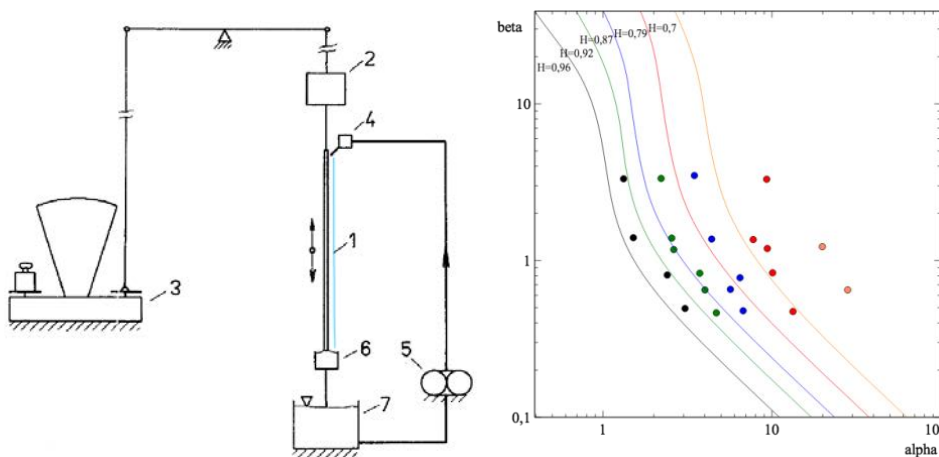


Рис. Экспериментальная установка [2]. Сравнение результатов расчетов (сплошные линии) с экспериментами (точки)

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам при Президенте РФ (проект МК-1798.2017.1).

1. Могилевский Е.И., Шкадов В.Я. Неустойчивость и волны при течении пленки обобщенно-неньютоновской жидкости по вертикальной стенке // Изв. РАН. МЖГ 2010. № 3. С.43–56.

2. V. Sobolik, Film flow of pseudoplastic liquids along an oscillating wall // Rheologica Acta. 1994. Vol. 33 (2). P. 136–144.

ОБРАТНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА О РЕКОНСТРУКЦИИ НАГРУЗКИ ДЛЯ МОДЕЛИ БАЛКИ ТИМОШЕНКО

Я.А. Вахтерова¹, Г.В. Федотенков^{1,2}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

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

yana-vahterova@mail.ru

В прямоугольной декартовой системе координат рассматривается однородная изотропная балка конечной длины, исследование поперечных колебаний которой производится на основе уточненной теории, соответствующей модели С.П. Тимошенко [1] (Рис.). В качестве граничных условий используются условия шарнирного опирания. Начальные условия нулевые. В начальный момент времени к балке прикладывается распределенная нагрузка, зависящая от координаты и времени. Требуется идентифицировать нестационарную нагрузку, действующую на балку Тимошенко.

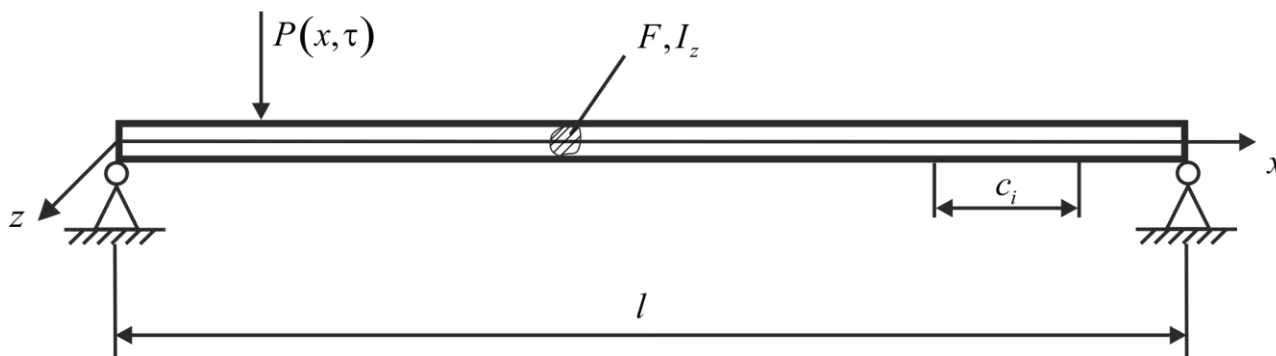


Рис. Схема нагружения балки

В основу методики решения прямой задачи положен принцип суперпозиции, при котором перемещения и контактные напряжения связаны посредством интегральных операторов по пространственной переменной и времени. При этом ядрами последних являются функции влияния для балки Тимошенко. Эти функции представляют собой фундаментальные решения систем дифференциальных уравнений движения исследуемой балки. Их построение представляет собой отдельную задачу. Функции влияния находятся с помощью преобразования Лапласа по времени и разложений в ряды Фурье по системе собственных функций.

Решение обратной задачи сводится к решению системы независимых интегральных уравнений Вольтера I-го рода, которая является некорректной по Ж. Адамару вследствие вырожденности ядер интегральных операторов. Для регуляризации обратной задачи применяется дифференцирование левых и правых частей уравнений, приводящие к системе интегральных уравнений с невырожденными ядрами [2].

Для решения системы интегральных уравнений, разрешающих обратную задачу, разработан и реализован на ЭВМ численно-аналитический алгоритм, основанный на методе средних прямоугольников.

Выполнена проверка полученных результатов. Приведены примеры расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-58-00008, 16-08-00260).

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

2. Вахтерова Я.А., Серпичева Е. В., Федотенков Г.В. Обратная задача об идентификации нестационарной нагрузки для балки Тимошенко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 4. С. 82–92.

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА И ТЕПЛА В ПОГРАНИЧНОМ ВОЗДУШНОМ СЛОЕ

М.И. Вдовин, Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru

Турбулентные потоки импульса и тепла на поверхности моря определяют обмен энергией и импульсом между атмосферой и океаном. На масштабе пограничного слоя, они являются ключевыми параметрами, которые определяют генерацию волн и формирование верхнего перемешанного слоя океана. Вопрос о коэффициентах обмена в приводном пограничном слое тесно связан с вопросом о влиянии поверхностного волнения, брызг, а также пены на обмен импульсом и массой между атмосферой и океаном.

Была выполнена серия экспериментов на Ветро-волновом канале ИПФ РАН по изучению процессов обмена импульсом и теплом в турбулентном пограничном слое воздушного потока над покрытой пеной взволнованной поверхностью. Эксперименты проведены в широком диапазоне скоростей ветра (диапазон изменения U_{10} в ходе эксперимента составил от 12 до 38 м/с) и параметров волнения. Для возможности непрерывного создания пены на поверхности воды был разработан специальный подводный пеногенератор, который не вносил бы существенного влияния на поверхностное волнение. Расход пены во всей серии экспериментов не изменялся.

Используя разработанный ранее метод профилирования [1] средней скорости и температуры в рабочей секции канала были определены значения коэффициентов обмена импульсом и теплом. Построены зависимости коэффициентов обмена от параметров воздушного потока и характеристик волнения.

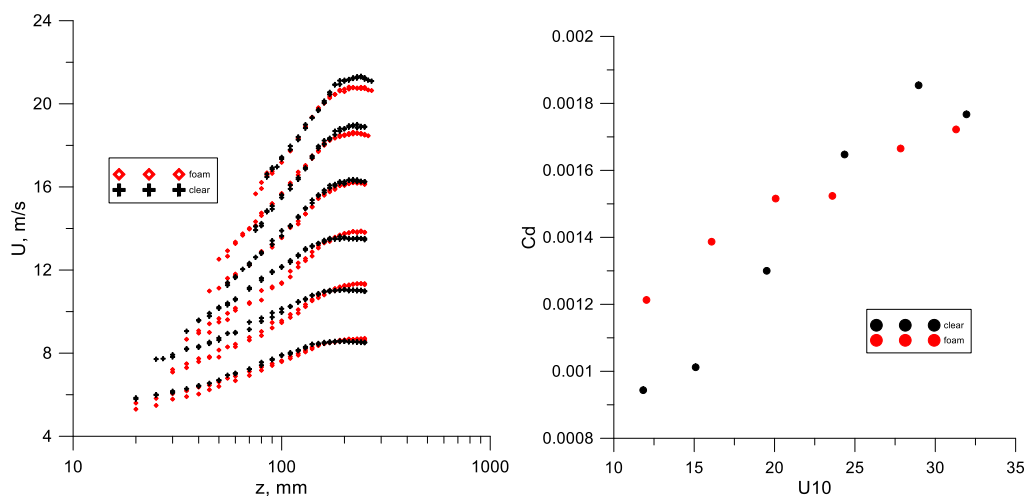


Рис. Сравнение профилей средней скорости ветра (слева) и коэффициента аэродинамического сопротивления (справа) при наличии и отсутствии пены на поверхности воды

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-05-00265, 18-55-50005, 17-05-00703, 16-55-52022, РНФ 14-17-00667, гранта Президента СП-1740.2016.1.

I. Yu. I. Troitskaya, D.A. Sergeev, A.A. Kandaurov, G.A. Baidakov, M.A. Vdovin, V.I. Kazakov Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // Journal of Geophysical Research, Vol. 117, C00J21, 13 pp., 2012 doi:10.1029/2011JC007778.

ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ОБТЕКАНИЯ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

М.И. Вдовин, Д.А. Сергеев, О.С. Ермакова, А.А. Кандауров, Ю.И. Троицкая

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru

В настоящей работе предлагается методика пошаговой верификации результатов численных расчетов течений обтекания препятствия на основе их сравнения с результатами лабораторных экспериментов, осуществленных в рамках одного исследования.

Лабораторные измерения проводились на замкнутой аэродинамической трубе ИПФ РАН, характеризующейся низким уровнем интенсивности турбулентности ($\sim 1\%$) на входе рабочего участка. В рабочий участок помещался объект препятствия (параллелепипед) для обтекания. Размеры объекта составляли 500x315x47 мм. Поперечный размер практически равен ширине рабочего участка, что обеспечивает двумерный характер обтекания в трубе. Тело устанавливалось на специальный столик, передняя кромка которого имела хорошо обтекаемый профиль, чтобы поток при подходе к препятствию был горизонтальным и плоскопараллельным. Скорость воздушного потока в экспериментах составляла 8 м/с. Соответственно число Рейнольдса рассчитанное по высоте препятствия равнялось $2,6 \cdot 10^4$.

Для измерений применялась схема PIV с непрерывной лазерной подсветкой и скоростной видеосъемкой [1]. В качестве модели турбулентности для численного решения задачи использовался метод отсоединенных вихрей DES, который обеспечивает описание в пристеночной области (пограничном слое) при помощи модели напряжений Рейнольдса RANS, а в удаленной области (в свободной турбулентной струе) – при помощи метода крупных вихрей LES. Для решения нашей задачи в качестве RANS была выбрана модель переноса сдвиговых напряжений Ментера.

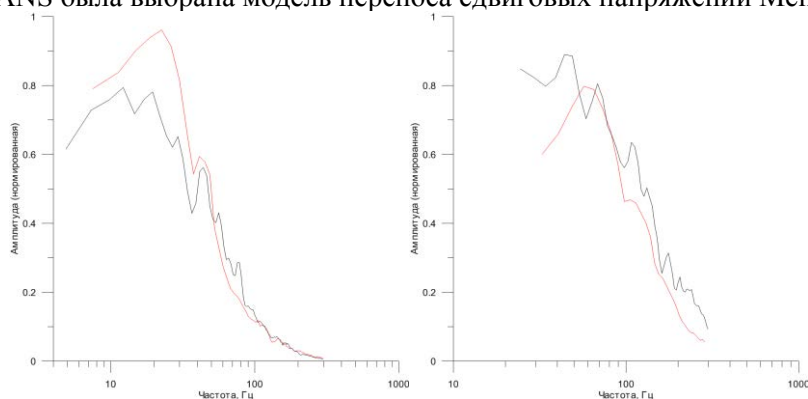


Рис. Спектры пульсаций горизонтальной компоненты скорости, усредненные по точкам измерений, для скорости 8 м/с (слева) и 16 м/с (справа): численный расчет – черная кривая, эксперимент – красная кривая

Сравнение результатов расчетов с данными экспериментов осуществлялась в 2 этапа. Вначале сравнивались общие картины поля обтекания. Показано, что расчет хорошо воспроизводит общую картину, включая характерные размеры застойной области. На втором этапе сравнивались пульсационные характеристики воздушного потока обтекания – частотных спектров флуктуаций продольной компоненты скорости воздушного потока, полученных по данным PIV-измерений и численного моделирования. Анализ частотных характеристик представляет наибольший интерес с точки зрения многочисленных практических приложений, например, исследования вопроса генерации звука турбулентностью. Продемонстрировано, что форма расчетных и экспериментальных спектров хорошо совпадают для данного эксперимента.

Исследования проведены при поддержке проекта РНФ №18-19-00473, проекта РФФИ №18-48-520023 p_a, гранта Президента СП-1740.2016.1.

1. Сергеев Д.А. Измерительный комплекс для исследования течений жидкости методом Particle Image Velocimetry (PIV) на основе твердотельного лазера с диодной накачкой // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 3, С.138–144.

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА И ТЕПЛА В СТАБИЛЬНО СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ПОГРАНИЧНОМ ВОЗДУШНОМ СЛОЕ НАД ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

М.И. Вдовин, Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru

Турбулентные потоки импульса, явного и скрытого тепла на поверхности моря определяют обмен энергией и импульсом между атмосферой и океаном. На масштабе пограничного слоя, они являются ключевыми параметрами, которые определяют генерацию волн и формирование верхнего перемешанного слоя океана. Вопрос о коэффициентах обмена в приводном пограничном слое (или о параметрах шероховатости) тесно связан с вопросом о влиянии поверхностного волнения, а также брызг на обмен импульсом и массой между атмосферой и океаном.

Была выполнена серия экспериментов на Ветро-волновом канале ИПФ РАН по изучению процессов обмена импульсом и теплом в устойчиво температурностратифицированном турбулентном пограничном слое воздушного потока над взволнованной поверхностью. Эксперименты проведены в широком диапазоне скоростей ветра и параметров волнения, включая экстремальные с интенсивным обрушением волн и образованием брызг. Для создания температурной стратификации пограничного слоя поступающий в канал воздух нагревался до 30–40 градусов. Температура поверхности воды при этом была постоянной (около 15 градусов). Скорость ветра на оси канала составляла от 8,8 до 19 м/с, что соответствует эквивалентной скорости 10–35 м/с. Используя разработанный ранее метод профилирования [1] средней скорости и температуры в рабочей секции канала, были определены значения коэффициентов обмена импульсом и теплом. Построены зависимости коэффициентов от параметров воздушного потока и характеристик волнения.

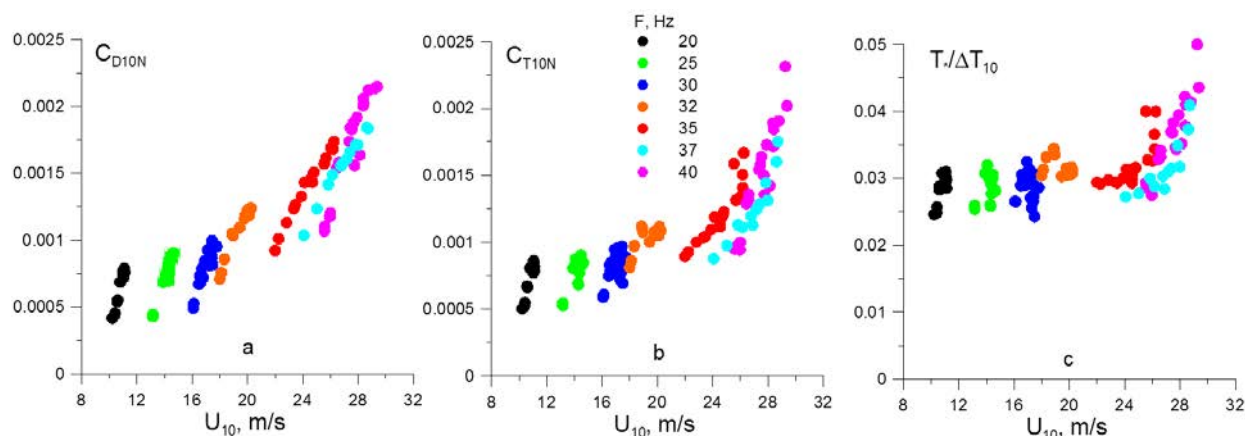


Рис. Коэффициент аэродинамического сопротивления (а), число Стэнтона (б) и коэффициент температурной шероховатости (с) в зависимости от скорости на высоте 10 м для разных значений скорости вращения вентилятора (F)

Было продемонстрировано, что в отличие от турбулентного потока импульса (скорости трения) и коэффициента обмена импульсом, температурная шероховатость (поток тепла) и, соответственно, коэффициент обмена теплом слабо зависит как от скорости, так и от параметров волнения до начала обрушения волн и генерации брызг. Брызги, которые начинают генерироваться примерно после 27 м/с, приводят к сильному росту теплообмена, а тенденции к насыщению, как у коэффициента обмена импульсом, не наблюдается.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-05-00265, 17-05-00703, 16-55-52022 и РНФ 14-17-00667, гранта Президента СП-1740.2016.1.

I. Yu. I. Troitskaya, D.A. Sergeev, A.A. Kandaurov, G.A. Baidakov, M.A. Vdovin, V.I. Kazakov Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // Journal of Geophysical Research, Vol. 117, C00J21, 13 pp., 2012 doi:10.1029/2011JC007778.

ОБ АБСОЛЮТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ

В.В. Веденеев, Ю.С. Зайко

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
vasily@vedeneev.ru

Неустойчивость течений жидкости и других физических систем может быть двух видов. В первом случае, когда ограниченные в пространстве растущие возмущения (волновые пакеты) сносятся потоком из любой заданной области, неустойчивость конвективная, а если растут вверх и вниз по потоку – то абсолютная [1] (Рис. а). Известно, что в струйных течениях и течениях в виде следа за телом с “классическими” профилями скорости (Рис. б) неустойчивость всегда конвективная, а абсолютной она может становиться лишь при наличии достаточно сильного возвратного течения [2,3] (в частности, возникновение дорожки Кармана при $Re > 47$ объясняется как результат абсолютной неустойчивости стационарного обтекания цилиндра [4]).

Однако, при анализе устойчивости затопленных струй, создаваемых устройством [5] (Рис. в), было обнаружено, что неустойчивость, порождаемая точкой перегиба в профиле скорости, вблизи выходного отверстия устройства является абсолютной. Анализ механизма абсолютной неустойчивости показал, что для её возникновения необходимы два условия: (1) скорость в точке перегиба должна быть мала, (2) крутизна падения скорости в точке перегиба должна быть достаточно высокой. При выполнении обоих условий возникает 1:1 резонанс между вверх и вниз бегущей волной, что и даёт абсолютную неустойчивость. В то время как в классических профилях [2,3] выполняется лишь второе условие, в струях с профилями скорости [5] – оба, что приводит к абсолютной неустойчивости без необходимости наличия возвратного течения жидкости.

При удалении от выходного отверстия профиль скорости в окрестности точки перегиба изменяется из-за действия вязкости (струя “расплывается”), и оба условия (1), (2) перестают быть выполненными на расстоянии лишь половины диаметра струи от выходного отверстия. В результате, в эксперименте абсолютная неустойчивость не наблюдается. Обсуждаются меры к предотвращению “расплывания” струи для экспериментального наблюдения абсолютной неустойчивости.

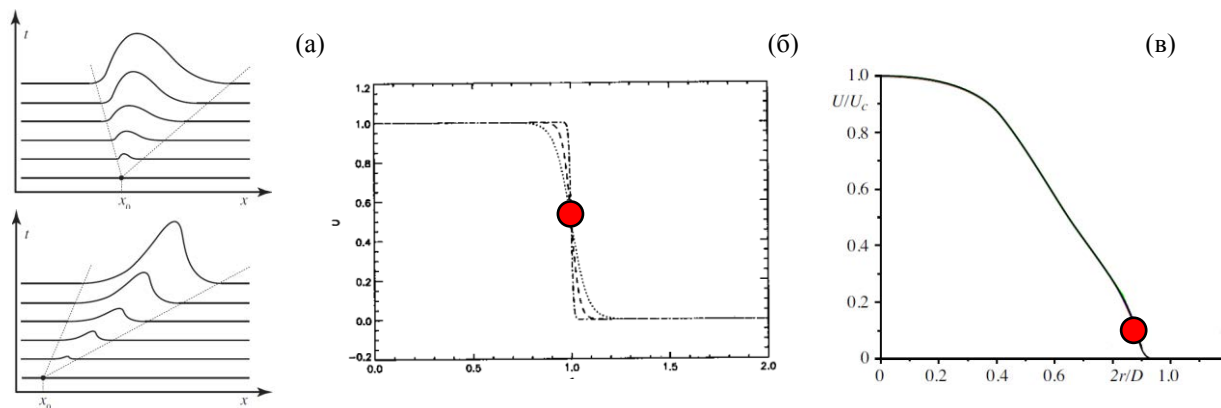


Рис. Абсолютная (сверху) и конвективная (снизу) неустойчивость (а). Классический профиль скорости струи [2,3] (б) и профиль, создаваемый устройством [5] (в); кружками показано положение точки перегиба.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-38-00745-мол_а.

1. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977. 638 с.
2. P. Huerre, P.A. Monkewitz. Absolute and convective instabilities in free shear layers // J. Fluid Mech. 1985. V. 159. P. 151–168.
3. M. Abid, M. Brachet, P. Huerre. Linear hydrodynamic instability of circular jets with thin shear layers // Eur. J. Mech., B/Fluids. 1993. V. 12. N 5. P. 683–693.
4. B. Pier. On the frequency selection of finite-amplitude vortex shedding in the cylinder wake // J. Fluid Mech. 2002. V. 458. P. 407–417.
5. J. Zayko, S. Teplovodskii, A. Chicherina, V. Vedeneev, A. Reshmin. Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers // Phys. Fluids. 2018. V. 30, 043603.

ОСРЕДНЕННАЯ ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ, ВОЗБУЖДАЕМАЯ ИНЕРЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ В ТОЛСТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ВРАЩЕНИИ

А.А. Вяткин, В.Г. Козлов, Р.Р. Сабиров

Лаборатория вибрационной гидромеханики,
Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
vjatin_aa@pspu.ru

Работа посвящена экспериментальному изучению тепловой конвекции жидкости, заполняющей цилиндрический коаксиальный зазор с границами разной температуры при вращении вокруг горизонтальной оси. Рассматривается случай толстого слоя с более нагретой внутренней границей, когда центробежная сила инерции оказывает стабилизирующее воздействие на систему. Сила тяжести, вращающаяся в системе отсчета полости, является возмущающим фактором. На фоне колебаний неизотермической жидкости относительно полости, вызываемых осциллирующим внешним силовым полем, возбуждаются инерционные волны [1]. Обнаружено, что взаимодействие инерционных волн с неоднородным неизотермическим температурным полем приводит к генерации осредненных конвективных потоков. Волны, испытывающие многократное отражение от границ полости, формируют потоки неизотермической жидкости в виде системы азимутальных вихрей, не симметрично расположенных вдоль оси вращения (см. рис.).

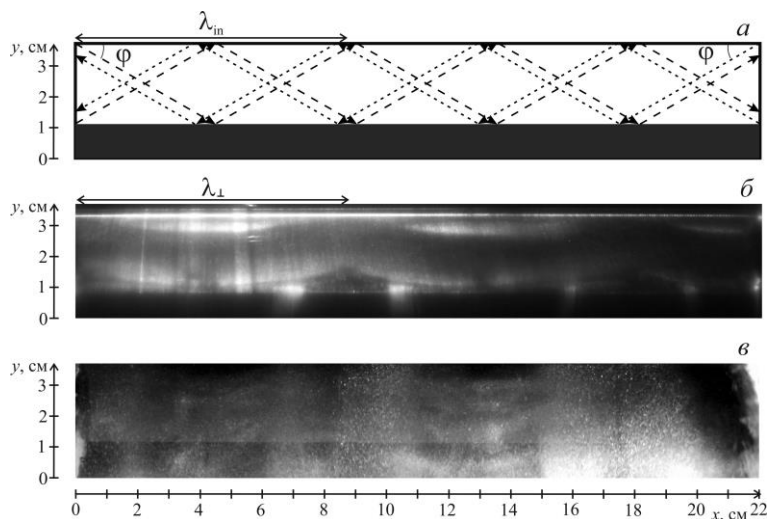


Рис. Схема распространения инерционных волн (а) и фотографии конвективных структур: тороидальных вихрей (б) и двумерных валов (в); разность температур границ слоя составляет 15.7 °С, $n = 1.2$ (б) и 0.7 об/с (в), водоглицериновый раствор

Показано, что вибрационная конвекция, в основе которой лежат инерционные волны, распространяющиеся в неизотермической жидкости, проявляется даже в условиях устойчивой стратификации (при быстром вращении) до порога «классической» вибрационной конвекции [2]. Последняя возникает пороговым образом при понижении скорости вращения полости и проявляется в виде двумерных валов вытянутых вдоль оси вращения (см. рис.) на фоне азимутальных вихрей. Влияние допороговых конвективных течений усиливается с ростом разности температур на границах слоя.

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки (проект РФ 3.9053.2017/БЧ).

1. Kozlov V.G., Ivanova A.A., Vjatin A.A., Sabirov R.R. Vibrational convection of heat-generating fluid in a rotating horizontal cylinder. The relative length of the cavity role // Acta Astronautica. 2015. Vol. 112. P. 48–55. DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.03.014.

2. Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сираев Р.Р. О конвективной устойчивости жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое // Изв. РАН. МЖГ, 2017. № 4. С. 73–84.

НОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕХОДА К РЕЖИМАМ СВЕРХПРЕДЕЛЬНЫХ ТОКОВ В УМЕРЕННО КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ ОКОЛО НЕИДЕАЛЬНЫХ ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Г.С. Ганченко¹, Н.Ю. Ганченко², А.И. Манрикан³

¹Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,
Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

²Кубанский государственный университет, Краснодар

³Кубанский государственный технологический университет, Краснодар
ganchenko.ru@gmail.com

Известно, что при эксплуатации ионоселективных поверхностей возникает один из трех токовых режимов: допределный (омический), предельный или сверхпределный [1]. Большинство изученных сценариев возникновения сверхпределных токов были рассмотрены из предположения идеальности ионоселективной мембраны [1, 2], а различные виды неидеальности мембраны рассматривались как небольшие количественные поправки к уже изученным явлениям. Однако, как показали последние исследования [3, 4], в неидеальных мембранах действуют качественно новые механизмы возникновения неустойчивости. Эти механизмы становятся еще более выраженными для концентрированных растворов электролитов, поведение которых гораздо менее изучено. Так, было показано, что наряду с электрокинетической неустойчивостью, которая вызвана электроосмотическим скольжением на границе зоны пространственного заряда, в системе с неидеальной мембраной также присутствует объемная неустойчивость.

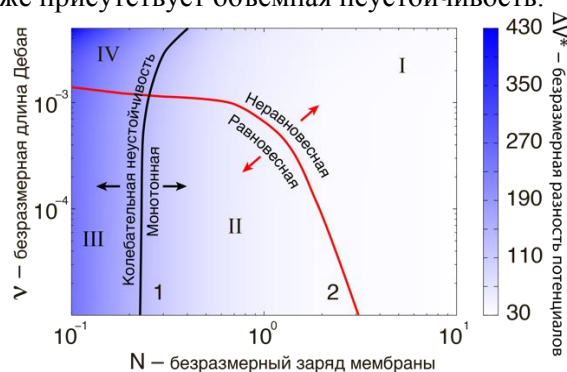


Рис. Карта режимов относительно числа Дебая и безразмерного заряда мембраны, на фоне – критическая разность потенциалов

На рисунке представлена карта режимов для двух ключевых параметров: числа Дебая ν (отношение толщины двойного электрического слоя к толщине мембраны) и безразмерного заряда мембраны N (отношение заряда мембраны к равновесной концентрации ионов в электролите). На фоне цветом обозначено критическое значение безразмерной разности потенциалов (отношение разности потенциалов и термического потенциала). Кривая 1 разделяет области монотонной (I, II) и колебательной (III, IV) неустойчивостей, а кривая 2 – области равновесной (II, III) и неравновесной (I, IV) неустойчивостей. Для мембран с достаточно большим зарядом, которые близки к идеальным, всегда реализуется только классическая неравновесная электрокинетическая неустойчивость, в то время как с уменьшением заряда мембраны или увеличением концентрированности электролита проявляются новые равновесные и колебательные механизмы неустойчивости.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ 18-08-01158-а и Министерства образования и науки Краснодарского края, проект № 16-48-230107-р_а.

1. I. Rubinstein, B. Zaltzman, Electro-osmotically induced convection at a permselective membrane // Phys. Rev. E., 2000. Vol. 62, No 2. Pp. 2238–2251, 14 pp.
2. E.A. Demekhin, S. Amiroudine, G.S. Ganchenko, N.Yu. Khasmatulina, Thermoelectroconvection near charge-selective surfaces // Phys. Rev. E., 2015. Vol. 91, No 6. P. 0630061.
3. I. Rubinstein, B. Zaltzman, Equilibrium Electroconvective Instability // Physical Review Letters, 2015. Vol. 114, No 11. Pp. 114502.
4. G.S. Ganchenko, E.N. Kalaydin, J. Schiffbauer, E.A. Demekhin, Modes of electrokinetic instability for imperfect electric membranes // Phys. Rev. E., 2016. Vol. 94, No 6. P. 063106.

ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДВУХСЛОЙНОГО МИКРОТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ КАСАТЕЛЬНОГО И НОРМАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Г.С. Ганченко¹, Е.В. Горбачева²

¹Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,
Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

²Кубанский государственный университет, Краснодар
ganchenko.ru@gmail.com

В данной работе рассматривается двухслойная система электролит-диэлектрик со свободной поверхностью раздела под действием внешнего электрического поля. Неустойчивость поверхности раздела является ключевым механизмом, ответственным за перемешивание. В микромасштабах отсутствует классическая гидродинамическая турбулентность, и для эффективного перемешивания в таких условиях необходимо искать другие эффекты, вызывающие неустойчивость одномерных течений и формирование микровихрей.

Для приведения жидкости в движение в микромасштабах обычно используют электрическое поле: оно действует на ионы солей, растворенных в жидкости, и приводит к электроосмотическому течению. Задача перемешивания жидкостей, в принципе, может быть решена аналогично: необходимо только подобрать условия, при которых электроосмотическое течение теряет устойчивость [1]. Существуют и другие способы создания неоднородности, в том числе за счет переменного электрического поля, направленного перпендикулярно каналу с жидкостями [2]. Переменное электрическое поле, особенно высокочастотное, является, к тому же, более предпочтительным по сравнению с постоянным, потому что при этом удастся избежать нежелательных химических реакций, приводящих к деградации электродов и появлению пузырьков газа. Для случая, когда электрическое поле направлено вдоль границы раздела, было обнаружено два типа неустойчивости: длинноволновый и коротковолновый, связанные с поверхностными и объемными силами соответственно [3]. Если электрическое поле направлено по нормали к свободной поверхности раздела, то возникает неустойчивость, схожая с неустойчивостью Тонкса-Френкеля [4]. Для случая высокочастотных электрических полей получены асимптотические результаты.

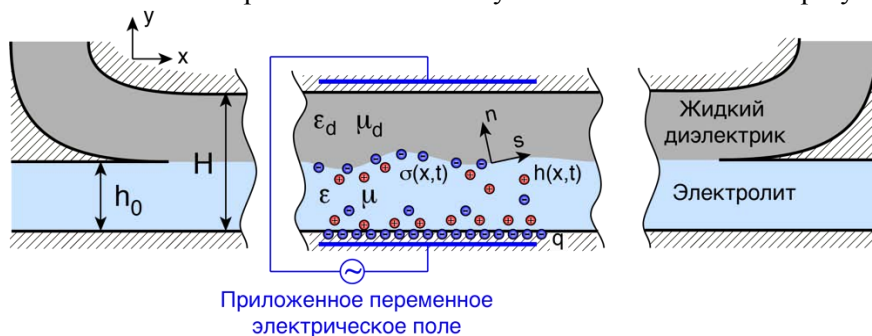


Рис. Схематичное изображение задачи об устойчивости свободной границы электролита под действием нормального переменного электрического поля

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации, грант для молодых кандидатов наук МК-5302.2018.1 и РФФИ грант 18-58-15004-НЦНИ_а.

1. E.A. Demekhin, G.S. Ganchenko, A. Navarkar, S. Amoroudine, The stability of two layer dielectric-electrolyte micro-flow subjected to an external electric field // *Physics of Fluids*. 2016. Vol. 28, No 9. Pp. 092003

2. El A.O. Mostar, N. Aubry, J. Batton, Electro-hydrodynamic micro-fluidic mixer // *Lab Chip*. 2003. Vol. 3, No 4. Pp. 273–278.

3. E.V. Gorbacheva, G.S. Ganchenko, E.A. Demekhin, Stability of the electroosmotic flow of a two-layer electrolyte-dielectric system with external pressure gradient // *Eur. Phys. J. E.*, 2018. Vol. 41, № 3. Pp. 5097–6.

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

СРАВНЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-БЕНАРА И ТЕРМОЭЛЕКТРОКОНВЕКЦИИ В МИКРОКАНАЛЕ МЕЖДУ ИОНОСЕЛЕКТИВНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Н.Ю. Ганченко¹, Г.С. Ганченко²

¹Кубанский государственный университет, Краснодар

²Лаборатория электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов,
Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

nataly.ganchenko@gmail.com

Работа посвящена теоретическому изучению термоэлектрокинетической неустойчивости. Данный тип неустойчивости возникает в электролите около ионоселективных поверхностей при учете Джоулева нагрева электролита вследствие прохождения через него электрического тока [1-3]. В результате линейного анализа устойчивости одномерного решения были обнаружены два типа неустойчивости, которые возникают при различных ориентациях канала относительно силы тяжести: $Ra > 0$ для неустойчивости Рэлея-Бенара, $Ra < 0$ для термоэлектрокинетической неустойчивости.

При малых разностях потенциалов, для допределного режима, абсолютные величины критических значений числа Рэлея имеют одинаковые порядки. При увеличении разности потенциалов ΔV возникает режим предельных токов. Возникновение этого режима обусловлено появлением области пространственного заряда. Именно наличие зоны пространственного заряда является необходимым условием для возникновения классической электрокинетической неустойчивости. Как показывают расчеты, зона пространственного заряда никак не влияет на неустойчивость Рэлея-Бенара. Термоэлектрокинетическая неустойчивость же, напротив, непосредственно связана с проводимостью электролита и наличием объемного заряда, которое порождает скорость электроосмотического скольжения на границе с зоной пространственного заряда. Наличие скорости скольжения действует совместно с термоэлектрокинетическим конвективным движением, поэтому критическое число Рэлея существенно уменьшается.

Для режима предельных токов критические числа Рэлея для термоэлектрокинетической неустойчивости уменьшаются в тысячи раз, что делает их физически возможными в микронных масштабах. В то же время критические числа Рэлея для неустойчивости Рэлея-Бенара имеют, по сути, тот же порядок, что и для режимов допределных токов, это подтверждает устоявшееся мнение, что в задачах микрофлюидики неустойчивость Рэлея-Бенара не проявляется.

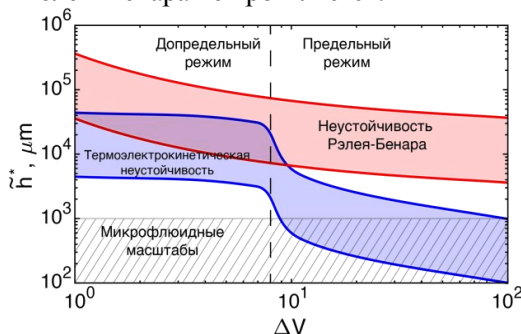


Рис. Зависимость критического характерного масштаба, выраженного через критические числа Рэлея, от разности потенциалов. Интервалы даны для диапазона характерных концентраций ионов от 1 до 1000 моль/м³.
Заштрихованный участок соответствует физическим диапазонам для задач микрофлюидики

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ 18-38-00611-мол_а и Министерства образования и науки Краснодарского края, проект № 16-48-230107-р_а.

1. E.A. Demekhin, S. Amiroudine, G.S. Ganchenko, N.Yu. Khasmatulina, Thermoelectroconvection near charge-selective surfaces // Phys. Rev. E., 2015. Vol. 91, No 6. P. 0630061.

2. Н.В. Никитин, Н.Ю. Хасматулина, Г.С. Ганченко, Е.Н. Калайдин, В.А. Кирий, Е.А. Демехин, Об одном типе гидродинамической неустойчивости при джоулевом нагреве жидкости вблизи ионоселективной поверхности // Докл. РАН. 2016. Т. 468, № 6. С. 635–639.

3. E.N. Kalaydin, N.Yu. Ganchenko, G.S. Ganchenko, N.V. Nikitin, E.A. Demekhin, Thermoelectrokinetic instability and salt superconcentration near permselective electric membranes // Phys. Rev. Fluids, 2017. Vol. 2, № 11. P. 917.

КОНКУРЕНЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ, ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТА ОКОЛО ИДЕАЛЬНЫХ ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ МЕМБРАН

Н.Ю. Ганченко¹, Д.А. Оксужьян², М.Ю. Ретина³

¹Кубанский государственный университет, Краснодар

²Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

³Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону

nataly.ganchenko@gmail.com

В последние десятилетия с развитием микро- и нанотехнологий ионоселективные поверхности нашли широкое применение в микроустройствах (например, лабораториях на чипе), что потребовало изучения их свойств в микро- и наномасштабах. Оказалось, что в электролите около таких поверхностей под действием внешнего электрического поля может скапливаться большой заряд, причем толщина заряженного слоя намного превосходит дебаевскую длину. Этот слой назвали зоной пространственного заряда. Пространственный заряд может быть неустойчивым, и при его возмущении развивается тангенциальное электрическое поле, которое приводит к электроконвективному движению [1]. Несмотря на множество практических приложений, наблюдается недостаток теоретических исследований в данной области. В частности, установки наподобие лабораторий на чипе часто не получают широкого распространения из-за невозможности добиться желаемых результатов в рамках изученных явлений. В свою очередь, большинство теоретических работ посвящено исследованию «чистой» электроконвекции, в то время как немногие, включающие в рассмотрение дополнительные эффекты (такие как Джоулев нагрев электролита [2]), показывают, что они могут приводить к качественно новым результатам.

Особенность данной работы заключается в том, что в модель включены дополнительные механизмы переноса электролита: помимо кулоновской силы, приводящей к электрокинетическим эффектам, в систему входит два механизма, связанных с подъемной силой. Первый из них – джоулев нагрев электролита, который приводит к возникновению термоэлектрокинетической неустойчивости [3], второй – это концентрационная конвекция, когда из-за неравномерного распределения соли меняется плотность электролита, и на его поведение начинает влиять сила тяжести [4]. Присутствие трех механизмов неустойчивости вызывает конкуренцию между ними. В работе получены критические значения параметров и составлена карта режимов.

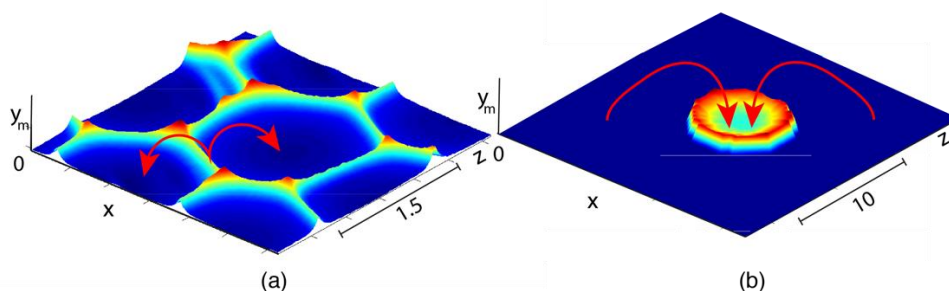


Рис. Характерные трехмерные структуры, возникающие при электроконвекции (а) и термоэлектроконвекции (б)

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ 18-38-00611-мол_а.

1. I. Rubinstein, B. Zaltzman, Electro-osmotically induced convection at a permselective membrane // Phys. Rev. E., 2000. Vol. 62, No 2. Pp. 2238–2251, 14 pp.
2. E.A. Demekhin, S. Amiroudine, G.S. Ganchenko, N.Yu. Khasmatulina, Thermoelectroconvection near charge-selective surfaces // Phys. Rev. E., 2015. Vol. 91, No 6. P. 0630061.
3. E.N. Kalaydin, N.Yu. Ganchenko, G.S. Ganchenko, N.V. Nikitin, E.A. Demekhin, Thermoelectrokinetic instability and salt superconcentration near permselective electric membranes // Phys. Rev. Fluids, 2017. Vol. 2, № 11. P. 917.
4. E. Karatay, M.B. Andersen, M. Wessling, A. Mani, Coupling between Buoyancy Forces and Electroconvective Instability near Ion-Selective Surfaces // Phys. Rev. Lett., 2016. Vol. 116, № 19. P. 194501.

ВЕТРОДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ПЛАВАТЕЛЬНЫХ СУДОВ

М.А. Гарбуз^{1,2}

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

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

misha-garbuz@yandex.ru

Ветродвижателем называют устройство, преобразующее энергию ветра в энергию вращательного движения главного рабочего органа ветродвигателя -- вертушки. Считается, что первые ветродвигатели появились на Ближнем Востоке, примерно, за 200 лет до н.э. Использовались они для размола зерна. И вот, спустя столько времени человечество продолжает использование ветродвигателей и, кроме того, находит им всё новое и новое применение.

В данной задаче рассматривается модель катамарана с ветродвигателем. Представлена динамическая модель катамарана. Проведённый анализ показал, что тянущая сила гребного винта может превосходить суммарную силу лобового сопротивления винта и пропеллера, а значит, при установке ветродвигателя на плавающее судно можно ожидать движение любым курсом, с том числе, против ветра.

В настоящей работе представлена динамическая модель системы с ветродвигателем, проведен параметрический анализ модели.

Собраны 2 тестовых варианта катамарана с ветродвигателем:

1. С одним пропеллером и одним винтом, соединёнными валом;
2. С двумя пропеллерами и двумя винтами, подсоединёнными к двум вложенным осям. При этом векторы угловых скоростей вложенных осей противоположны.

В силу особенностей конструкции, возможна установка на оси пропеллеров и винтов различной формы.

Проведены серии экспериментов для обоих типов катамарана с различными парами «пропеллер – винт», отличающимися между собой количеством, размером и формой лопастей. Экспериментально определена сила тяги в зависимости от скорости набегающего потока. Наличие установившегося режима движения судна с ветродвигателем подтверждено экспериментально.

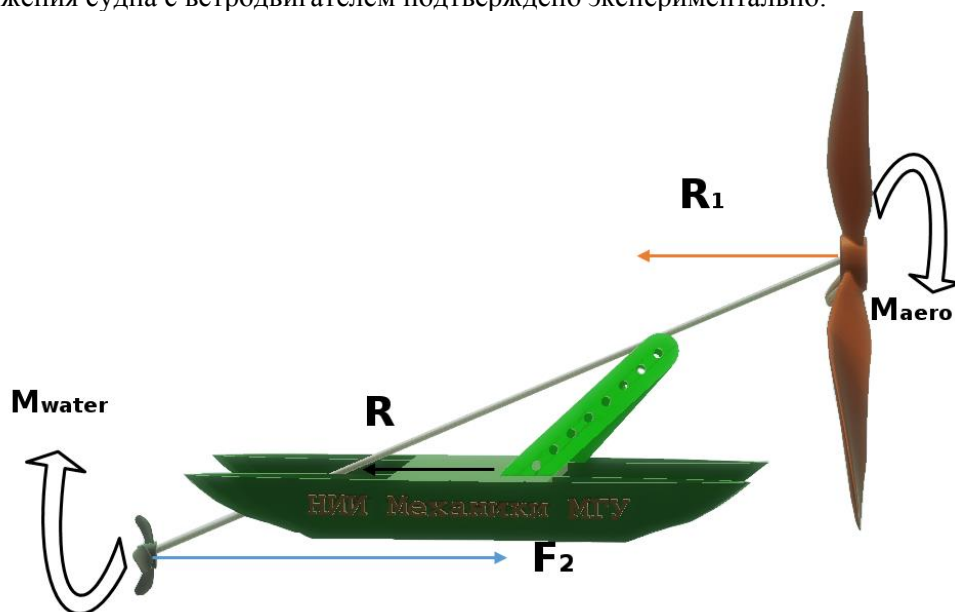


Рис. Расстановка сил и моментов

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-01366).

1. Досаев М.З., Кобрин А.И., Локшин Б.Я., Самсонов В.А., Селюцкий Ю.Д. Конструктивная теория МВЭУ. Часть I. Москва 2017.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ В НАВИГАЦИИ СУДОВ

М.А. Гарбуз^{1,2}

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

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

misha-garbuz@yandex.ru

В данной задаче в качестве основного рабочего органа ветродвигателя выступает пропеллер. При помощи соединяющего вала пропеллер передаёт энергию гребному винту, который создаёт тянущую силу. Анализ такой установки показал, что тянущая сила гребного может превосходить суммарную силу лобового сопротивления винта и пропеллера, а значит, при установке ветродвигателя на плавающее судно можно ожидать движение любым курсом, в том числе, против ветра.

В настоящей работе представлена динамическая модель системы с ветродвигателем, проведен параметрический анализ модели.

Собраны 2 тестовых варианта катамарана с ветродвигателем:

1. С одним пропеллером и одним винтом, соединёнными валом;
2. С двумя пропеллерами и двумя винтами, подсоединёнными к двум вложенным осям. При этом векторы угловых скоростей вложенных осей противоположны.

В силу особенностей конструкции, возможна установка на оси пропеллеров и винтов различной формы.

Проведены серии экспериментов для обоих типов катамарана с различными парами «пропеллер – винт», отличающимися между собой количеством, размером и формой лопастей. Экспериментально определена сила тяги в зависимости от скорости набегающего потока. Наличие установившегося режима движения судна с ветродвигателем подтверждено экспериментально.

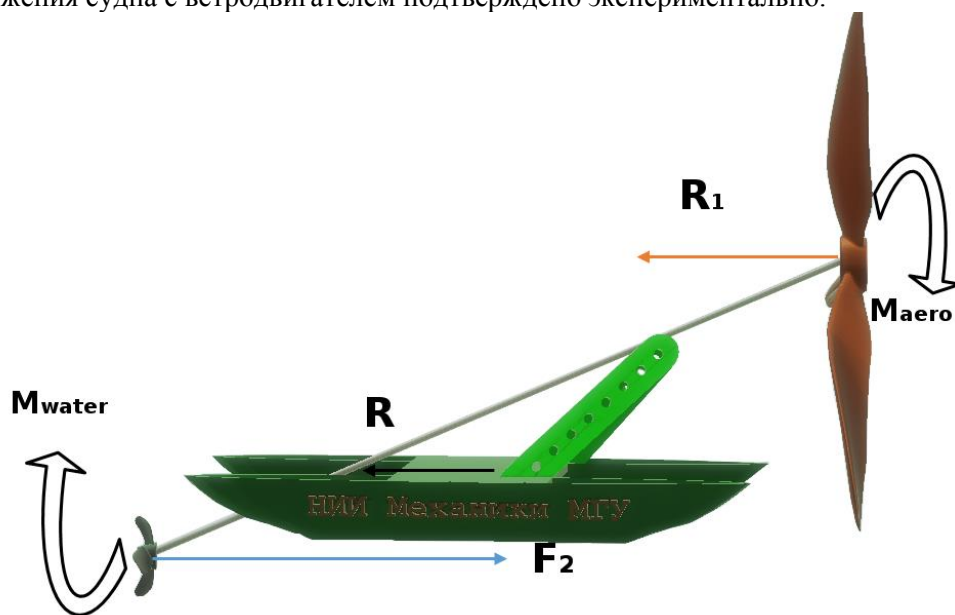


Рис. Расстановка сил и моментов

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект № 17-08-01366).

1. Досаев М.З., Кобрин А.И., Локшин Б.Я., Самсонов В.А., Селюцкий Ю.Д., Конструктивная теория МВЭУ. Часть I. Москва 2017.

МЕТОД МОМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

А.К. Гильфанов¹, Т.Ш. Зарипов²

¹Институт экологии и природопользования, К(П)ФУ, Казань

²Высшая школа информационных технологий и информационных систем, К(П)ФУ, Казань

artur.gilfanov@kpfu.ru

Взвешенные в газе частицы представляют собой полидисперсную среду, описываемую функцией плотности распределения по фазовым переменным. В случае малых частиц функция плотности является одномерной и характеризуется распределением частиц по размерам [1]. Для частиц крупных размеров дисперсная фаза имеет распределение и по другим переменным: компоненты скорости частиц и др. [2]

В настоящей работе развит метод условных моментов для моделирования дисперсной фазы, описываемой функцией распределения по двум компонентам скорости в предположении одинакового размера для всех частиц. Моделирование основано на численном решении уравнения Больцмана с учетом силы сопротивления по закону Стокса. Рассмотрены одно-, двух- и трехточечные аппроксимации функции плотности распределения в рамках ее дискретного представления с помощью квадратурных узлов. Модифицирована численная схема расчета адвекции инерционных частиц, гарантирующая физическое правдоподобие аппроксимации функции распределения при решении задачи ее восстановления по значениям моментов. Решена задача о течении инерционных частиц в гиперболическом потоке. Дано сравнение результатов моделирования, полученных методом моментов, прямым лагранжевым и полным лагранжевым подходами. Показано, что одноточечная аппроксимация функции распределения в зоне разворота частиц некорректно учитывает пересечение траекторий, приводящее к схлопыванию потока частиц в этой зоне. Двух- и трехточечные приближения верно отображают образование складки в зоне разворота. Показано, что наилучшее согласие с лагранжевыми подходами дает метод моментов с использованием двухточечной аппроксимации функции распределения. Решена задача о движении инерционных частиц в вихре Ламба. Показано, что метод моментов хорошо предсказывает положение фронта облака частиц,двигающегося от центра вихря, однако значительно занижает значение числовой плотности частиц на фронте.

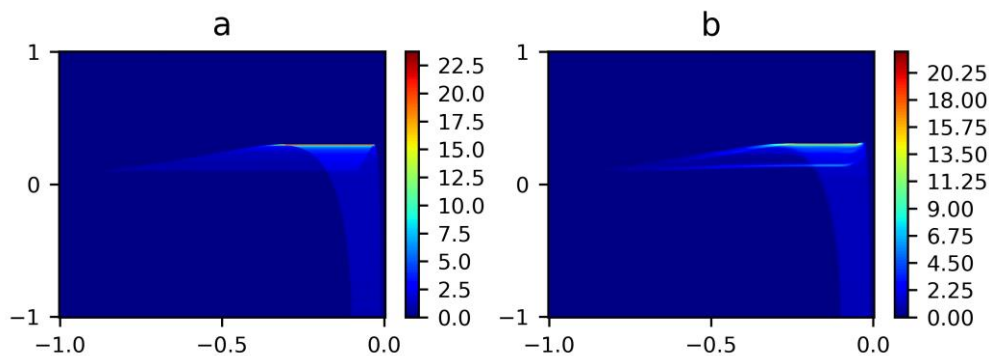


Рис. Образование складки при течении инерционных частиц в гиперболическом потоке: а) прямой лагранжев подход, б) метод условных моментов

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-31-00387).

1. Gilfanov A.K., Koch W., Zaripov S.K. Mathematical modeling of di-ethyl-hexyl-sebacate nanoparticle formation in a free turbulent jet under high nucleation rate conditions // Journal of Aerosol Science. 2016. V.96. P.124–139.

2. Williams F.A. Spray combustion and atomization // Physics of Fluids. 1958. V.1, I.6. P.541–545.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ И ВЛИЯНИЕ УПРУГОГО КРЕПЛЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ДВУХЗВЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

А.П. Голуб

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
holub.imech@gmail.com

Рассматривается двухзвенный маятник, на втором звене которого закреплено тонкое крыло с симметричным аэродинамическим профилем, как показано в [1]. Вся система помещается в поток с постоянной скоростью V и монтируется таким образом, что обе оси маятника были вертикальны. Первое звено маятника снабжено линейной спиральной пружиной. Введём систему отсчета O_1XY , как показано на Рис. Ось абсцисс направлена по скорости потока. Выберем угол между этой осью и первым звеном и угол между этой осью и вторым звеном в качестве обобщенных координат. Предполагается, что пружина не напряжена, когда угол между первым звеном и осью абсцисс равен нулю, т.е. звено ориентировано «вдоль потока».

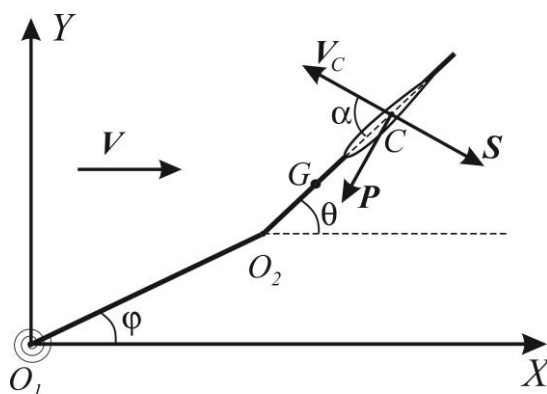


Рис. Двухзвенный маятник в упругом закреплении

Чтобы описать аэродинамическую нагрузку на крыло, используется квазистатический подход, как например в [2]. В рамках этого подхода предполагается, что аэродинамическая нагрузка на крыло зависит только от мгновенного состояния движения системы. Получены условия асимптотической устойчивости положения равновесия «вдоль потока». Исследуется влияние положения крыла и жёсткости пружины на устойчивость. Увеличение расстояния, на котором крепится лопасть, ведёт к устойчивости системы, а увеличение жёсткости пружины на первом звене приводит к её потере.

Также, изучаются предельные циклы, возникающие в системе при определённых значениях параметров. Проанализирована зависимость их амплитуд и частот от жёсткости пружин.

Эксперименты с таким маятником проводились в аэродинамической трубе НИИ механики МГУ. В ходе испытаний были определены характеристики колебательных режимов для разных скоростей ветра и различных положений крыла на втором звене. Показано, что экспериментальные данные качественно согласуются с результатами численного моделирования.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты №№ 17–08–01366, 18–01–00538).

1. Голуб А.П., Селюцкий Ю.Д. О влиянии упругого крепления на колебания двухзвенного аэродинамического маятника // Труды Московского физико-технического института. 2017. No. 3. С. 8 – 13.

2. Klimina L., Dosaev M., Selyutskiy Yu. Asymptotic analysis of the mathematical model of a wind-powered vehicle // Applied Mathematical Modelling. Elsevier BV. 2017. Vol. 46. P. 691–697.

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН В ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА АДИАБАТИЧЕСКОЙ СТЕНКЕ

И.В. Голубкина, А.Н. Осипцов, А.И. Агеев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
giv-mm@mail.ru

В рамках двухконтинуальной модели сжимаемого ламинарного пограничного слоя [1] исследуется продольное обтекание полубесконечной плоской теплоизолированной пластины сверхзвуковым газокapельным потоком. Массовая доля дисперсной фазы считается малой, но конечной. Рассматривается диапазон невысоких равновесных температур пластины, в котором испарением капель внутри пограничного слоя и на поверхности пластины можно пренебречь. Показано, что в заданных условиях необходимо учитывать неоднородность температуры вещества внутри капли. В межфазном обмене импульсом, помимо силы Стокса, учитывается подъемная сила Сэфмана [2], приводящая к осаждению капель на пластину и формированию тонкой жидкой пленки внутри пограничного слоя [3]. На основании параметрических численных расчетов исследованы распределения параметров фаз внутри пограничного слоя и равновесной температуры вдоль поверхности пластины. Показано, что снижение температуры обтекаемой поверхности напрямую зависит от величины силы Сэфмана, а также, что даже при небольших (порядка процента) массовых концентрациях капель в набегающем потоке равновесная температура стенки может понизиться на десятки градусов (Рис.). Данное обстоятельство делает возможным использование примеси жидких капель в перспективных системах безмашинного энергоразделения газовых потоков [4].

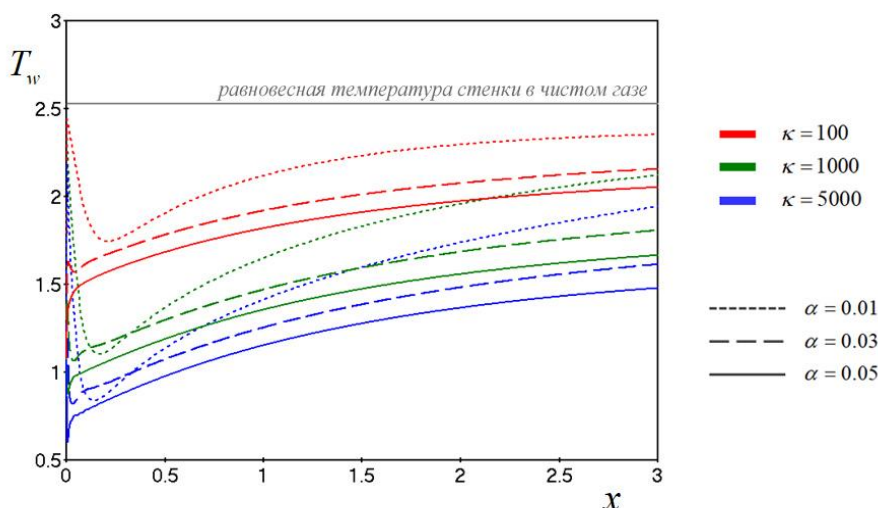


Рис. Распределение равновесной температуры стенки T_w при числе маха $M=3$ для различных значений массовой концентрации капель α и коэффициента силы Сэфмана κ

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

1. Osipov A.N. Mathematical modeling of dusty-gas boundary layers// Appl. Mech. Rev. 1997. V. 50. P. 357-370.
2. Saffman P.G. The lift on a small sphere in a slow shear flow// J. Fluid Mech. 1965. V. 22. P. 385. Corrigendum: J. Fluid Mech. 1968. V. 31. P. 628.
3. Осипцов А.Н., Шапиро Е.Г. Обтекание поверхности аэродисперсным потоком с образованием жидкой плёнки из осаждающихся частиц// Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 4. С. 85–92.
4. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков// Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 1. С. 157.

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЗАДАЧЕ О КОНВЕКЦИИ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ЧАСТИЧНО НАГРЕТЫМИ ЦИЛИНДРАМИ

М.М. Гончаров, А.Н. Кондрашов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
123goncharov@mail.ru, akon.psu@yandex.ru

В последние годы в России были разработаны самолеты нового поколения и осуществлены их частные и государственные запуски. В связи с этим возникли новые сложные и крайне важные инженерные задачи. Так, на самолете МС 21 используются крылья из композитного материала, имеющего хорошие прочностные характеристики и низкую плотность, но, одновременно, большую чувствительность к высоким температурам. В связи с этим повреждение, например, системы кондиционирования способно привести к перегреву или даже к полному разрушению сегмента крыла. Подобные утечки случаются и в других технических ситуациях. К примеру, пробой газопровода может повлечь существенные экономические потери, а также привести к экологическому загрязнению. Таким образом, существует необходимость своевременного обнаружения и локализации разрывов трубопроводов.

Как правило, трубопровод окружен теплоизолирующей оболочкой, поэтому при повреждении нагретая жидкость не вытекает в окружающую среду, а просто прогревает (или охлаждает) теплоизоляцию изнутри. В результате на внешней поверхности трубопровода образуется температурная неоднородность, причем ее размер и форма будут зависеть не только от характера повреждения, но и его ориентации относительно вектора ускорения свободного падения. Поэтому в зависимости от локализации повреждения вокруг трубы возникнут разные конвективные структуры, исследование которых поможет спроектировать адекватные распределенные системы мониторинга.

Так как при разрыве вытекающая жидкость часто остается под слоем тепловой изоляции, задача определения местоположения повреждения оказывается тесно сопряжена с процессом тепломассопереноса на внешней поверхности трубопровода. В качестве упрощения можно рассмотреть систему коаксиальных цилиндров с неравномерным подогревом [1-3]. Внешний цилиндр находится при температуре T_0 и играет роль холодильника. Внутренний цилиндр разделен на две области в вертикальном направлении: одна половина теплоизолирована, другая поддерживается при постоянной температуре $T_i > T_0$. Система находится в поле силы тяжести, причём вектор ускорения свободного падения g ортогонален оси цилиндров. Для имитации поворота внутреннего цилиндра, вектор g задаётся под некоторым углом α к вертикальной оси y .

Нами изучено влияние интенсивности нагрева и ориентации системы относительно направления вектора ускорения свободного падения g на структуру течения, распределение температуры в слое жидкости и интенсивность теплоотдачи. По результатам работы были сформированы требования к расположению и чувствительности элементов БРСКУ.

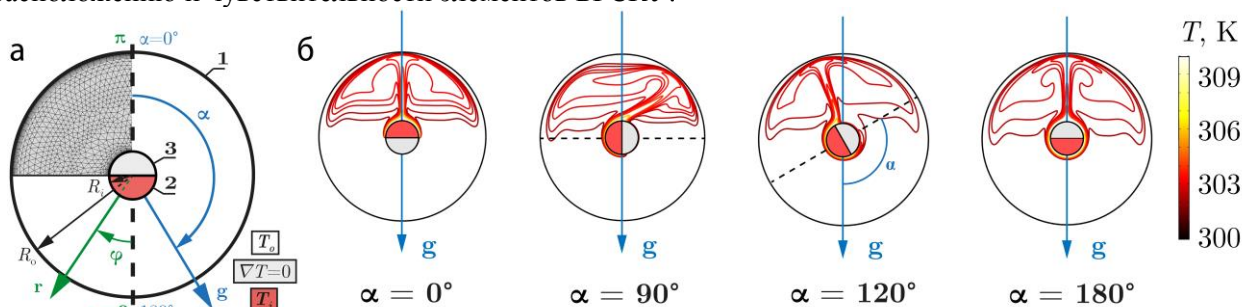


Рис. а) Схема расчетной полости, б) Изотермы, соответствующие термогравитационной конвекции при различных направлениях гравитационного поля $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$

1. Teertstra P, Yovanovich MM. Comprehensive review of natural convection in horizontal circular annuli // ASME-PUBLICATIONSHTD. 1998. Vol. 357. P. 141–152.

2. Шеремет Михаил Александрович. Нестационарная сопряженная задача термогравитационной конвекции в горизонтальном цилиндре // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2010. no. 2.

3. Shareef Amer Jameel, Abed Waleed Mohammed, Najeeb Ahmed Ali. Natural convection heat transfer in horizontal concentric annulus between outer cylinder and inner flat tube//AJES. 2010. Vol. 3, no.2.P. 31.

К ВОПРОСУ О ДЕТЕКТИРОВАНИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

М.М. Гончаров, А.Н. Кондрашов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
123goncharov@mail.ru, akon.psu@yandex.ru

Поломка магистральных труб – очень распространенное явление [1]. Порой это может привести к потерям экономического характера или к техногенной катастрофе. Поэтому своевременное обнаружение места утечки, особенно в случае сильно протяженного трубопровода, остается крайне важной задачей, несмотря на большое количество существующих решений. Для локализации разрывов часто применяются электронные или оптоволоконные интегральные датчики температуры. Однако в ходе эксплуатации измерительной системы возникает проблема интерпретации их показаний, ведь повреждения, произошедшие в разных местах трубопровода, могут привести к совершенно различным структурам теплового поля на поверхности внешней трубы. Например, если разрыв происходит под непроницаемой теплоизолирующей оболочкой, вытекший газ организует зазор, внутри которого организуется интенсивное течение. Такое течение экранирует теплоизоляционный материал от поверхности трубы и, тем самым, изменяет интенсивность теплоотдачи. Более того, в различных областях может происходить как понижение температуры в результате расширения газа, так и повышение, обусловленное сжатием. Поэтому на поверхности теплоизоляции способна возникнуть достаточно сложная структура температурного поля. В докладе будут обсуждаться вопросы построения адекватной математической модели такого процесса, а также возможности её использования для интерпретации показаний интегральных оптоволоконных датчиков температуры.

В ходе выполнения поставленной задачи была решена задача об адиабатическом истечении газа из цилиндрического отверстия в воздушный зазор между теплоизолирующей оболочкой и нагретой металлической поверхностью трубопровода. Возникшее течение считалось трансзвуковым и изменяло тепловые граничные условия на внутренней поверхности теплоизоляционного материала. Исследовалось распределение температуры на внешней поверхности теплоизоляции при различных значениях управляющих параметров.

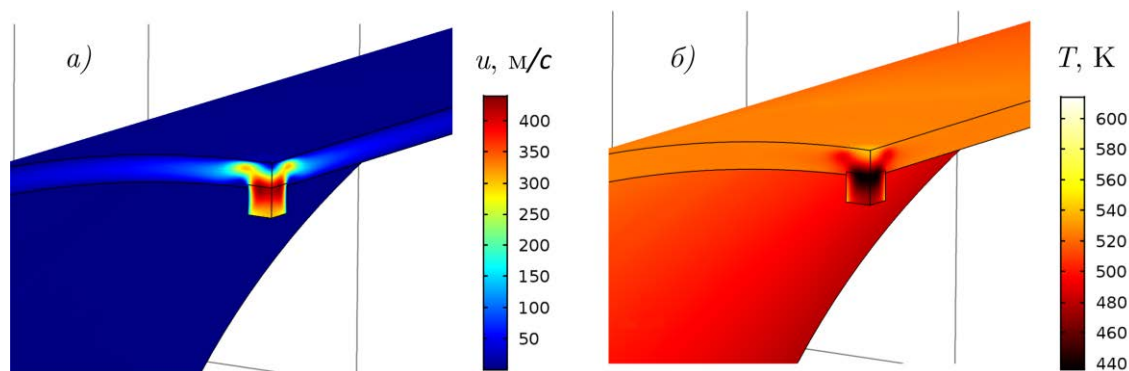


Рис. а) Скоростное и б) температурное распределение на поверхностях полости с газом в стационарном режиме

В ходе выполнения численного моделирования были получены результаты, показывающие стремительное повышение температуры в результате резкого сжатия высвободившегося газа вблизи повреждений и охлаждение с обратной стороны трубы. Проведены оценки минимального времени регистрации разрыва, необходимой точности оборудования, а также сформулированы рекомендации по способу установки чувствительных элементов интегральных оптоволоконных датчиков температуры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-31-00165 мол_а).

1. Савина А. В., Сумской С. И., Лисанов М. В. Анализ риска аварий на магистральных трубопроводах при обосновании минимальных безопасных расстояний //Безопасность труда в промышленности. 2012. №. 3. С. 58–63.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ СМЕСИ ГАЗ - ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ЭЛЕКТРИЗАЦИИ

Н.В. Горохова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
GorokhovaNV@list.ru

Молнии, образующиеся в пепловой колонне – довольно частое явление, происходящее во время крупных эксплозивных извержений. Вулканические молнии образуются в процессе электризации и пространственного разделения разноимённо заряженных частиц пепла при достижении некоторой критической разности потенциалов. Предполагается, что электризация частиц происходит за счёт трения и столкновения частиц [1].

В работе рассматривается течение однородного потока газа с частицами, имеющими разные диаметры (100 и 500 мкм) и заряды. Для моделирования движения частиц в потоке газа используется лагранжев подход. Учитывается взаимодействие заряженных частиц и возможность их столкновения и передачи электрического заряда. Проводится исследование влияния различных параметров: концентрации частиц в смеси, доли крупных частиц, начальных зарядов частиц.

В результате исследования показано, что при достаточно высоких концентрациях необходимо учитывать столкновение частиц. Получено, что частицы могут приобрести существенный заряд (при нулевых начальных зарядах) только за счёт их столкновений.

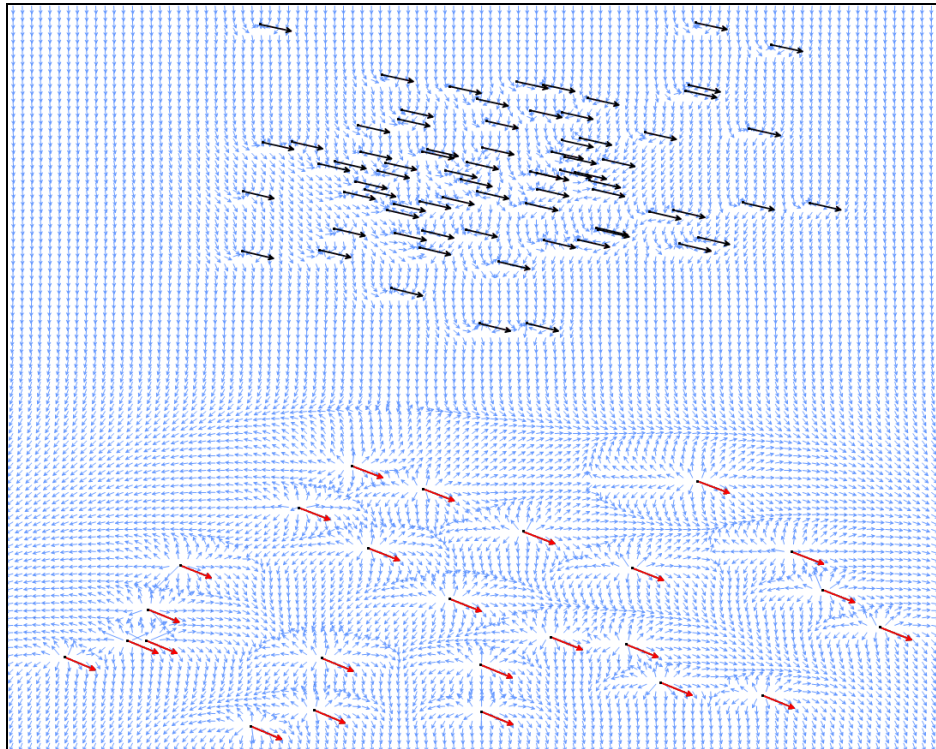


Рис.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-05-00004_a.

1. Горохова Н. В. Формирование вулканических молний в пепловой колонне // Всероссийская конференция молодых-ученых механиков, 5–15 сентября 2017 г., Сочи, "Буревестник" МГУ, Тезисы докладов. 2017.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Н.В. Горохова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
GorokhovaNV@list.ru

Молнии, образующиеся в пепловой колонне – довольно частое явление, происходящее во время крупных эксплозивных извержений. Вулканические молнии образуются в процессе электризации и пространственного разделения разноимённо заряженных частиц пепла при достижении некоторой критической разности потенциалов. Предполагается, что электризация частиц происходит за счёт трения и столкновения частиц [1].

В этой работе строится модель движения и взаимодействия заряженных частиц разного размера. Для моделирования движения частиц в потоке газа используется лагранжев подход. При движении на частицы действуют гидродинамические силы со стороны потока газа, электростатические силы со стороны других частиц и внешние силы (со стороны Земли). В результате столкновения частиц могут измениться их скорости и заряды. Проводится исследование влияния различных параметров на движение заряженных частиц: концентрации частиц в смеси, доли крупных частиц, начальных зарядов частиц.

В результате исследования показано, что при достаточно высоких концентрациях необходимо учитывать столкновение частиц. Получено, что частицы могут приобрести существенный заряд (при нулевых начальных зарядах) только за счёт их столкновений.

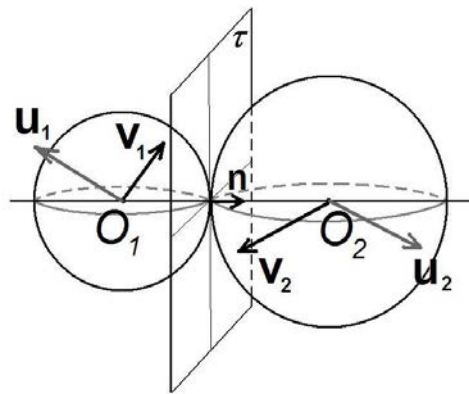


Рис.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-05-00004_a.

1. Горохова Н. В. Формирование вулканических молний в пепловой колонне // Всероссийская конференция молодых-ученых механиков, 5–15 сентября 2017 г., Сочи, "Буревестник" МГУ, Тезисы докладов. 2017.

РАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НА ПЛОСКОСТИ (В ПРОСТРАНСТВЕ) ЧАСТИЦ РАЗНОГО РАЗМЕРА

Н.В. Горохова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
GorokhovaNV@list.ru

При моделировании течений смеси газ-частицы необходимо задавать начальное распределение частиц на плоскости (в пространстве). При этом частицы должны быть расположены достаточно равномерно, но хаотично – иначе влияние начального распределения частиц на течение смеси может быть существенно.

В [1] предложен метод равномерного заполнения n -мерного пространства одинаковыми частицами (заданный одним параметром – желаемым расстоянием между центрами частиц). В этой работе на основе метода, предложенного в [1], строится метод равномерного заполнения области на плоскости (в пространстве) частицами разного размера (двух различных диаметров). Исследуется зависимость получаемой в результате концентрации частиц от заданного расстояния между частицами (параметра метода). В результате решается обратная задача построения равномерного распределения частиц двух разных диаметров на плоскости (в пространстве) в зависимости от заданной концентрации частиц и доли крупных частиц.

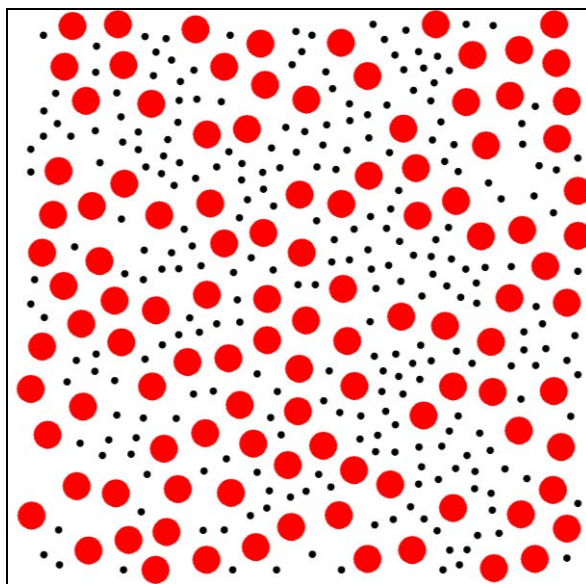


Рис.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-05-00004_a.

1. Robert Bridson. Fast Poisson Disk Sampling in Arbitrary Dimensions // ACM SIGGRAPH. 2007. Article No. 22. DOI: 10.1145/1278780.1278807.

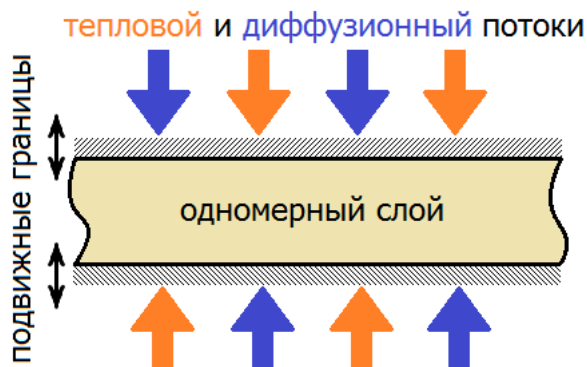
НЕСТАЦИОНАРНАЯ ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОУПРУГОЙ ДИФФУЗИИ С УЧЁТОМ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

С.А. Давыдов¹, А.В. Земсков^{1,2}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

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

xenon_93@inbox.ru



Существует ряд подходов к созданию математических моделей механики сплошных сред. Одним из перспективных направлений, дающих возможность наиболее точно аналитически описать поведение среды, является моделирование связанных полей различной природы, примером которого является модель термоупругости с учётом диффузии. Она позволяет описать взаимное влияние поля перемещений и поля температур, учитывая при этом изменение поля концентраций материи в деформируемом твёрдом теле. Большинство

имеющихся моделей термоупругости с учётом диффузии представлены в стационарной или квазистационарной постановке и не учитывают перекрестных диффузионных эффектов. Для решения этих задач используются в основном численные алгоритмы, однако для моделирования и анализа сложных реальных процессов часто требуется именно нестационарная аналитическая модель.

В работе рассматривается связанная одномерная нестационарная задача термоупругости с учётом массопереноса для однородной многокомпонентной среды (слой или полупространство). Математическая постановка задачи в прямоугольной декартовой системе координат представляет собой связанную систему уравнений в частных производных, состоящую из уравнений движения, теплопереноса и N уравнений массопереноса (N – число компонент среды). Уравнения массопереноса также учитывают взаимное влияние полей концентраций различных компонент среды. На границах среды задаются перемещение, тепловой поток и диффузионные потоки для каждой компоненты среды, зависящие от времени. В случае полупространства один наборов граничных условий заменяется на условие ограниченности искомых величин на бесконечности. Начальные условия приняты нулевыми.

Решение ищется в интегральной форме, которая представляет собой свёртку по времени функций Грина с правыми частями граничных условий. В задаче для слоя, для нахождения функций Грина, используется преобразование Лапласа по времени и разложение искомых функций в неполные ряды Фурье, что сводит задачу в изображениях к системе линейных алгебраических уравнений относительно искомых функций. В задаче для полупространства вместо разложения в ряды Фурье используется синус-, косинус-преобразование Фурье. При таком подходе трансформанты искомых функций являются рациональными функциями параметра преобразования Лапласа. Их оригиналы находятся с помощью известных теорем операционного исчисления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №17-08-00663 и №18-31-00437).

1. Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Двухкомпонентное упруго диффузионное полупространство под действием нестационарных возмущений // Экологический вестник научных центров Черноморского Экономического сотрудничества. – 2014. – № 2. – С. 31–38.

2. Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Поверхностные функции Грина в нестационарных задачах термомехано-dиффузии // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. – Т.79, № 1. – С. 38–47.

ДЕМПФИРОВАНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Д.А. Двойников

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург
dvoynikov@imach.uran.ru

При решении задачи оптимизации по быстродействию ЭМС необходимо учитывать свойства источников питания, двигателей и механизмов, выявлять закономерности управления при параметрических (инерционность) и физических (амплитуда) ограничениях, характеризующих пределы возможных значений координат перемещения, скорости, нагрузки, ускорения и его производных.

Одним из этапов развития физической теории управления, предложенной акад. Красовским А.А. и используемой при создании быстродействующих многоконтурных ЭМС, являются выводы и разработки д.т.н. Мазунина В.П. В них предложены и обоснованы нелинейные системы любого порядка с формированием процессов, максимально приближенных к оптимальным по быстродействию, при широком диапазоне задающих воздействий и качественном регулировании.

В данной работе на основе перечисленных выше разработок предложена методика создания оптимизированных ЭМС со сложным объектом управления, содержащим упругие звенья. Исследованы двухмассовые механизмы с упругим валом без учёта внутренней и внешней механической диссипации. Эффективность демпфирования колебаний исследована с учетом особенностей реализации ЭМС при обратной связи по ускорению (динамическому моменту первой массы) в объекте.

При управлении нелинейной системой с колебательным объектом формирование процессов происходит с однонаправленным воздействием на обе инерционные массы механизма. Поскольку контур ускорения во всех режимах остаётся линейным, структура системы при управлении и физическом ограничении только в контуре скорости приводится к виду, показанному на рис.

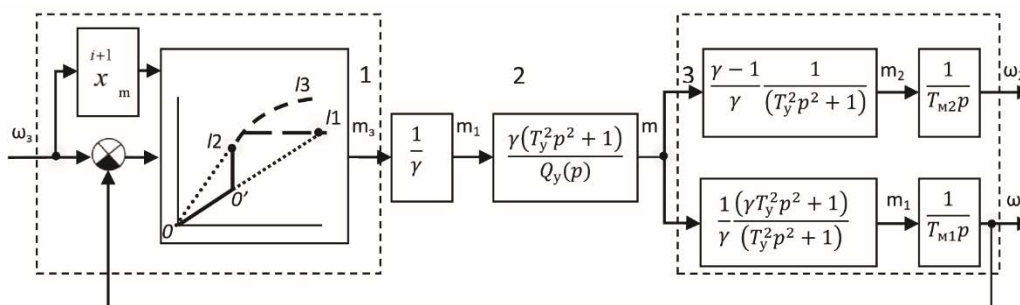


Рис. Система управления с упругим звеном при $m_c = 0$

Сложная часть системы – звенья 2 и 3 – характеризуется увеличенным параметрическим ограничением ($T_{ec} \geq T_3$ в «жесткой» системе), поэтому максимально допустимый коэффициент усиления РС (звено 1) в линейной области характеристики управления $(k_{pc})_{доп}$ выше расчётного (k_{pc}) по условию эффективного демпфирования, происходит увеличение линейной области с возрастанием времени переходных процессов относительно ожидаемого. Для условия, когда $(k_{pc})_{доп} \geq (k_{pc})$, предложена и апробирована функция перехода с характеристики управления на характеристику эффективного демпфирования на границе линейной области. Этим обеспечено быстродействие, и сохранены параметры демпфирования.

1. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Параметрические ограничения в нелинейных системах управления механизмами с упругостью // Электротехника. 2010. №5. С. 9–13.

2. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Повышение быстродействия при управлении регулируемые электроприводами механизмов с упругими связями // Электротехника. 2012. №10. С. 35–41.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Л.А. Дегадникова, А.В. Осинцев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
liidiyadega@gmail.com

Выполнение механических испытаний материалов регламентируется ГОСТами, в которых прописаны требования к образцам, испытательному оборудованию, условиям проведения испытаний и способам обработки результатов [1–4].

Использование метода цифровой корреляции изображений при проведении механических испытаний позволяет успешно осуществлять контроль всех этапов механических испытаний.

С применением метода цифровой корреляции изображений возможно определение качества поверхности, геометрии и формы испытуемых образцов, контроль процесса установки образца в захваты испытательной машины, а также положения губок захватов в пространстве.

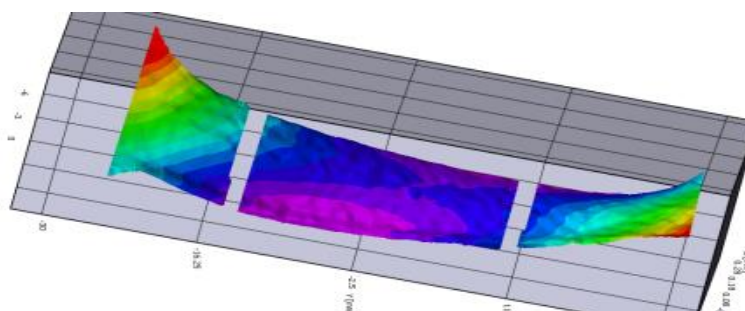


Рис. Трехмерная модель образца с дефектом (закрученный винт) при изготовлении

Разработана методика определения модуля упругости и коэффициента Пуассона с использованием функции оптического экстензометра. Сравнение значений модуля упругости, полученных с помощью оптического экстензометра, и значений, полученных с внешнего экстензометра, практически совпадают.

1. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
2. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Методы испытания на сжатие.
3. ГОСТ 14019-80. (СТ СЭВ 474-88, ИСО 7438-85) Металлы. Методы испытания на изгиб.
4. Ю.В. Гольцев Методы механических испытаний и механические свойства материалов: Учебное пособие. Москва: НИЯУ МИФИ, 2012. 228 с.

ПОРТАТИВНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛАТТЕРА ПЛАСТИНЫ НА ПЛОСКОЙ ПРУЖИНЕ

М.Н. Деменков

Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова, Москва
britain.scientist@yandex.ru

В докладе описывается малогабаритная установка для экспериментального изучения аэроупругих колебаний, собранная из доступных робототехнику-любителю деталей, таких как микроконтроллер Ардуино, вентилятор и гибкий тензорезистор, меняющий свое сопротивление при изгибе, к которому присоединена пластиковая пластина. Установка позволяет осуществлять сбор и анализ данных на компьютере и может найти применение в университетском учебном процессе.

Установка является модификацией устройства Flexy (см. <https://github.com/martin-kaluz/flexy-arduino/wiki>), разработанного в Словацком технологическом университете для обучения студентов основам автоматического управления. В оригинальной версии воздушный поток вентилятора направлен снизу вверх и отклоняет на некоторый угол пластиковую пластину, лежащую на нем и прикрепленную к тензорезистору.

В модифицированной версии пластина установлена почти перпендикулярно вентилятору в горизонтальной плоскости. Наблюдаемый угол отклонения пластины является нелинейной функцией сопротивления тензорезистора. Тензорезистор является плоской пружиной и в отсутствие подъемной силы, возвращающей пластину в исходное положение после отклонения. Микроконтроллер передает по USB данные о сопротивлении и управляет скоростью вращения вентилятора.

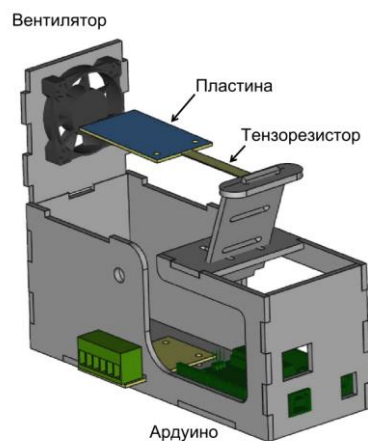


Рис. Общий вид экспериментальной установки (габариты 20х6х13 см, размеры пластины 5х4.5 см)

Предварительные эксперименты с установкой [1] (см. <https://vimeo.com/mdemenkov/flexyflutter>) демонстрируют жесткое возбуждение и последующее мягкое затухание колебаний в диапазоне скорости потока 3–5 м/с, а также дивергенцию пластины. Выявлен эффект вязкоупругого гистерезиса тензорезистора (см. <https://vimeo.com/mdemenkov/elastoplastic>). Для корректного наблюдения угла отклонения необходима идентификация гистерезиса и его учет при обработке поступающих данных. Также, пока не решена задача идентификации всей аэроупругой системы для сравнения эксперимента с результатами численного бифуркационного анализа [2–4].

1. Demenkov M. Studying aeroelastic oscillations with tensoresistor and Arduino // AIP Conference Proceedings of the Eighth Polyakhov's Reading, St. Petersburg, Russia. 2018 (in press, <https://yadi.sk/i/MEERO0uR3SqUCR>).

2. Demenkov M. Regions of attraction and the flutter suppression problem // Proc. of 54th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences, Technion, Haifa, Israel. 2014. V. 3. P. 1532–1544.

3. Demenkov M. Polyhedral Lyapunov functions for aeroelastic oscillations suppression // Proc. of International Forum of Aeroelasticity and Structural Dynamics (IFASD), Paris. 2011.

4. Demenkov M., Goman M. Bifurcation control of aeroelastic limit cycle oscillations // IFAC Proceedings Volumes. 2009. V. 42. No. 7. P. 355–360.

О ВЛИЯНИИ АНИЗОТРОПИИ ДЕМПФИРОВАНИЯ В ЗАКРЕПЛЕНИЯХ ОСИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМА СТАЦИОНАРНОГО ВРАЩЕНИЯ РОТОРА С ЖИДКОСТЬЮ

Д.Н. Дерендяев, Н.В. Дерендяев

ННГУ имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

derendyaevdm@mail.ru

Исследование устойчивости стационарного вращения роторных систем с жидкостью представляет интерес как с общетеоретической, так и с прикладной точек зрения. Ранее был разработан оригинальный метод исследования устойчивости таких систем [1]. Предполагалось, что ось вращения ротора расположена в изотропных вязкоупругих креплениях, а угловая скорость вращения поддерживается постоянной. В дальнейшем метод удалось обобщить и распространить на системы с анизотропными креплениями оси ротора [2]. В работе [2] установлено влияние анизотропии жесткости креплений оси ротора на форму границ областей устойчивости в пространстве параметров.

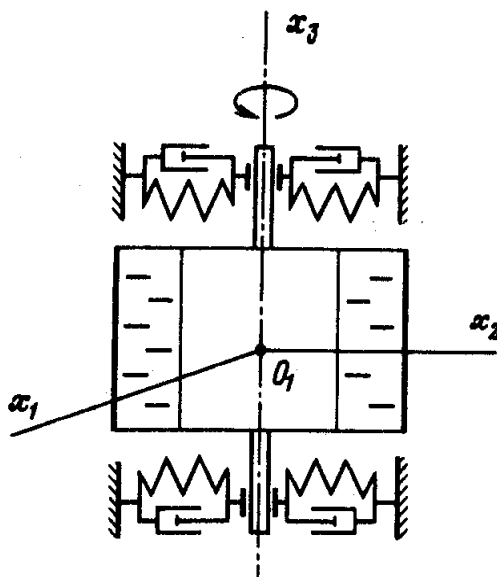


Рис. Типичная роторная система с жидкостью

В данной работе исследуется устойчивость режима стационарного вращения типичной роторной системы с жидкостью (Рис.), имеющей вязкоупругие крепления оси ротора с анизотропией сил вязкости. Приведены примеры построения границ областей устойчивости в пространстве параметров и отмечено возникновение механических эффектов, вызванных анизотропией креплений оси ротора.

1. Дерендяев Н.В. Устойчивость вращения роторных систем, содержащих жидкость: Монография. - Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2014. 154 с.

2. Дерендяев Н.В., Дерендяев Д.Н. Исследование устойчивости стационарного вращения роторных систем с жидкостью. Труды Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики». Москва: изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 222 с.

МЕЛКАЯ ВОДА НАД НЕРОВНЫМ ДНОМ: ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ, ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

К.П. Дружков

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
Konstantin.Druzhkov@gmail.com

Рассматривается система уравнений одномерной мелкой воды над неровным дном [1]. Для этой системы уравнений в работах [2, 3] был найден новый закон сохранения, дополнительный к двум основным. Были также найдены все гидродинамические законы сохранения и симметрии для произвольных профилей дна.

В работе [4] было приведено преобразование, связывающее систему уравнений одномерной мелкой воды над наклонным дном с линейной системой уравнений, которая может быть получена из исходной формальным отбрасыванием нелинейных слагаемых.

В данной работе рассматривается класс алгебраических точных решений линеаризованной системы уравнений одномерной мелкой воды над наклонным дном, который позволяет получить класс точных решений нелинейной мелкой воды с помощью преобразования [4]. Описаны эффекты заплеска и усиления амплитуды при отражении волны от берега.

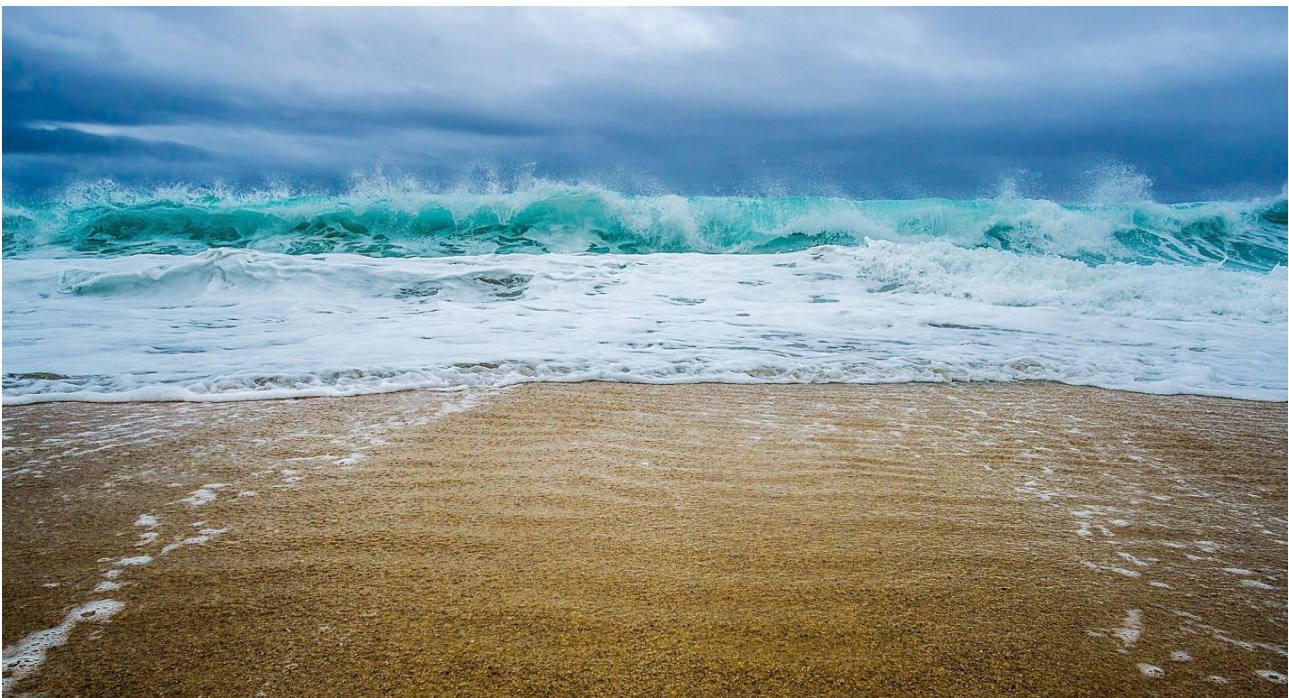


Рис. Волны на мелководье

Выражаю благодарность профессорам А.В. Аксёнову и С.Ю. Доброхотову.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-01-00890.

1. Stoker J.J. The formation of breakers and bores. The Theory of Nonlinear Wave Propagation in Shallow Water and Open Channels // Comm. Pure Appl. Math. 1948. V. 1. № 1. P. 1–87.
2. Аксенов А.В., Дружков К.П. Законы сохранения, симметрии и точные решения системы уравнений мелкой воды над неровным дном // Вестник НИЯУ МИФИ. 2016. Т. 5. № 1. С. 38–46.
3. Aksenov A.V., Druzhkov K.P. Conservation laws and symmetries of the shallow water system above rough bottom // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 722. P. 1–7.
4. Доброхотов С.Ю., Тироцци Б. Локализованные решения одномерной нелинейной системы уравнений мелкой воды со скоростью $c = \sqrt{x}$ // Успехи математических наук. 2010. Т. 65. Вып. 1. С. 185–186.

УСЛОВИЯ ДЛЯ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА НА СФЕРИЧЕСКОМ ФРОНТЕ ПЛАМЕНИ

В.В. Володин¹, В.В. Голуб¹, А.Е. Ельянов^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

elyanov14@physics.msu.ru

Неустойчивость фронта пламени – одна из актуальных задач современной механики жидкости и газа. В зависимости от процессов, определяющих рост неоднородностей, для свободного сферического пламени различают гидродинамическую (Дарье-Ландау), термодиффузионную и неустойчивость Рэлея-Тейлора. Условиям для развития последней и посвящена данная работа.

Неустойчивость Рэлея-Тейлора возникает на границе раздела двух жидкостей или газов разной плотности при наличии ускорения, направленного от более легкого к тяжелому. При распространении пламени менее плотные разогретые продукты горения двигаются с ускорением в более плотном газе. Когда вектор ускорения и градиент плотности на фронте пламени сонаправлены, происходит развитие неустойчивости. Основным параметром, определяющим скорость развития этой неустойчивости, является число Атвуда. В ходе работы было рассчитано число Атвуда и обнаружено, что на границе раздела продуктов сгорания и горючей смеси оно зависит от начального содержания водорода.

Для исследования развития неустойчивостей была проведена серия экспериментов. Прозрачные латексные оболочки наполнялись предварительно подготовленной водородно-воздушной смесью. В различных сериях экспериментов менялось процентное содержание водорода. Инициирование пламени производилось искровым разрядом с энергией 1 мДж, разрядником, расположенным в центре оболочки. Регистрация распространения фронта пламени производилось с использованием теневого метода, реализованного в теневом приборе ИАБ-451, и высокоскоростной камеры ВидеоСпринт. Видеосъемка процесса производилась с частотой от 500 до 1000 кадров в секунду с экспозицией в 500 мкс. С целью автоматизации обработки полученных изображений в среде Matlab написана программа, преобразовывающая набор изображений расширяющегося фронта пламени в зависимость среднего радиуса от времени.

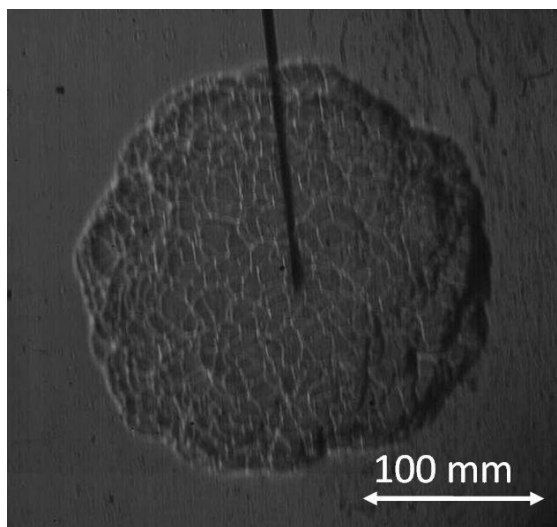


Рис. Шлирен-фотография ячеистого фронта пламени

Обнаружено, что на начальной стадии распространения возникают как ускорения, так и замедления фронта пламени. Экспериментально полученные параметры распространения фронта пламени дополнены расчетами, проведенными по аналитической модели из литературы.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №14-50-00124.

1. Elyanov A., Golub V., Mikushkin A., Petukhov V., Volodin V. Lean spherical hydrogen/air flames at 4 orders of magnitude in size and energy // Journal of Physics: Conference Series, in print.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕЛОМА БЕДРЕННОЙ КОСТИ ПОСЛЕ ХИРУРГИЧЕСКОЙ РЕЗЕКЦИИ: ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КОРТИКАЛЬНОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ

А.И. Ершова

Механико-математический факультет БГУ, Минск
anny0131@mail.ru

После хирургической резекции трубчатых костей зачастую возникают патологические переломы в области пост-резекционного дефекта, особенно при остеопорозе кортикальной костной ткани [1]. Целью настоящей работы является оценка предельных нагрузок на бедренную кость на основании конечно-элементного моделирования для различного процентного содержания остеонов и пористости кортикальной костной ткани. Проведен сравнительный анализ прогнозируемой предельной нагрузки на бедренную кость с пост-резекционным дефектом и результатов эксперимента по определению разрушающей нагрузки.



Рис. Образец бедренной кости с дефектом

Кортикальная костная ткань описывалась изотропной упругой средой с учетом различного процентного содержания остеонов (30%, 44.5% и 50%) и пористости (5% и 8%) [2]. Граничные условия соответствовали действию собственного веса человека на бедренную кость [3]. Пост-резекционный дефект размещался в средней трети диафиза бедренной кости. Дефект располагался таким образом, что оставшийся после резекции фрагмент находился в наружном анатомическом квадранте. Эксперимент по определению разрушающей нагрузки проводился для бедренной кости с костным дефектом при тех же граничных условиях. Оценка предельной нагрузки осуществлялась на основании расчета критического J -интеграла в области пост-резекционного дефекта.

Экспериментальное значение величины нагрузки на бедро с дефектом составило 630 Н. Предельное значение нагрузки на основании конечно-элементного расчета критического значения J -интеграла оказалось на 7.8% ниже для наибольшего процентного содержания остеонов и наименьшего значения пористости. При уменьшении процентного содержания остеонов и увеличении пористости предельная нагрузка на бедренную кость нелинейно возрастает. Полученные результаты могут быть использованы специализированными медицинскими учреждениями, выполняющими хирургические операции по удалению опухолеподобных поражений длинных трубчатых костей, для прогнозирования возникновения трещин в окрестности пост-резекционного дефекта и формулировке рекомендаций по их предупреждению.

Работа выполнена при поддержке граната FP7 IRSES Marie Curie 610547 TAMER.

1. Шпилевский, И.Э. Оценка прочности бедренной кости при секторальной резекции / И.Э. Шпилевский, А.В. Спиглазов // Медицинские новости. 2010, №9. С.100–105.
2. Li S. Cutting of cortical bone tissue: analysis of deformation and fracture process / Doctoral Thesis. Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough, UK. 2013. 220 pp.
3. Letter to the editor, 2002. ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—part I: ankle, hip, and spine. Journal of Biomechanics Vol. 35, 543–548.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПОТОКОВ НА СКЛОНАХ

Ю.С. Зайко^{1,2}, М.Э. Эглит¹

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

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

zayko@imec.msu.ru

Исследуется устойчивость течений на склонах и в руслах, которые в гидравлическом приближении описываются уравнениями Сен-Венана. Известно, что 1) малые мелкомасштабные возмущения в безграничном однородном потоке представляются в виде суммы двух волн, движущихся без изменения формы со скоростями $a_{\pm} = u_0 \pm c$ (где u_0 — скорость невозмущенного

потока, $c = \partial P / \partial S$, для случая движения в русле $P = \int_0^h g \cos \alpha (h - z) b dz$, $b(x, z)$ — ширина русла

на глубине z , x — координата вдоль оси русла, h — глубина потока, S — площадь поперечного сечения потока в русле (для случая движения по склону $P = g \cos \alpha h^2 / 2$); g — ускорение свободного падения, α — угол наклона к горизонту; 2) малые крупномасштабные возмущения распространяются в виде одной волны, движущейся без изменения формы со скоростью $a = V + S(\partial V / \partial S)$, V — скорость потока ($S = h$ для потока на склоне); 3) условие устойчивости по отношению к одномерным возмущениям имеет вид $a_- \leq a \leq a_+$ [1].

В данной работе устойчивость решений уравнений для потоков в руслах и на склонах изучается по отношению к двумерным возмущениям. Возмущения представляются в виде $C(k)e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)}$, $\vec{k} = \{k \cos \theta, k \sin \theta\}$ — волновой вектор, θ — угол между направлением скорости невозмущенного потока и направлением, в котором распространяются малые возмущения. Получено дисперсионное уравнение $D(k, \omega) = 0$, связывающее частоту и волновой вектор возмущений. Исследование знаков корней дисперсионного уравнения проводится с применением принципа аргумента (см. Рисунок). Получен критерий устойчивости: возмущения не растут тогда и только тогда, когда для действительных ω 1) мнимая часть $\text{Im } D(\omega, k)$ дисперсионного уравнения имеет два корня $\omega_1 < \omega_2$, 2) $\text{Re } D(\omega_1) > 0, \text{Re } D(\omega_2) < 0$. Получена форма критерия, где в явном виде представлены ограничения на параметры исследуемого потока. Рассмотрены частные случаи для значений параметров, дающих характеристики потоков, близкие к реальным.

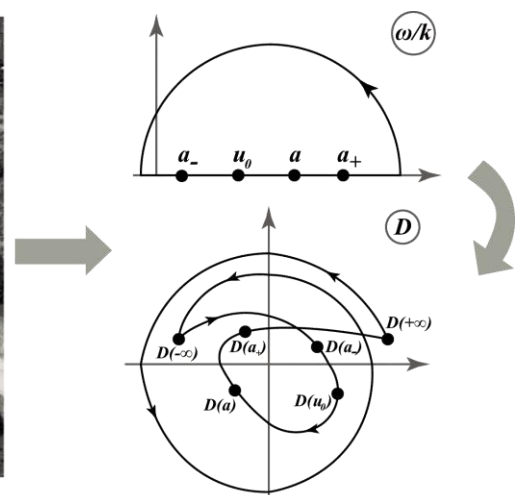


Рис. Иллюстрация к применению принципа аргумента для исследования устойчивости решений уравнений, описывающих поведение потоков на склонах

1. Эглит М.Э. Неустойчивые движения в руслах и на склонах. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. — 96 с.

ПОСТРОЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ И ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ

С.И. Трефилов¹, М.В. Захарова^{1,2}

¹Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королёв

²Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный
mariya.zakharova@phystech.edu

При проектировании конструкций предъявляются высокие требования к точности расчетов запасов прочности. При расчетах критерием прочности считается достижение предельной интенсивности пластических деформаций в какой-либо зоне конструкции. Как показано в данной работе предельная деформация существенно зависит от типа напряженного состояния.

Тип напряженного состояния характеризуется безразмерными параметрами: объемностью $\eta = \frac{-p}{q} = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$, углом Лоде: $\bar{\theta} = 1 - \frac{6\theta}{\pi} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos(\xi)$, где $\xi = \left(\frac{r}{q}\right)^3 = \cos(3\theta)$, p, q, r – 1-й, 2-й и 3-й инварианты тензора напряжений, p, σ_m – давление и среднее напряжение, соответственно.

Целью работы является определение вида зависимости предельной интенсивности деформации от типа напряженного состояния $\varepsilon_{\text{пред}} = f(\eta, \bar{\theta})$. Для определения указанной зависимости проводились испытания образцов с реализацией различных видов напряженного состояния.

Исследовалось растяжение образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Рассматривался гладкий цилиндрический образец, а так же образцы с кольцевыми выточками (концентраторами) радиусов 2,5 мм, 1 мм и 0,5 мм. Образец растягивался с постоянной скоростью перемещения захватов на сверхпрецизионном испытательном оборудовании, что позволяло остановить эксперимент в момент инициации разрушения. Далее проводилась томографическая диагностика испытанных образцов с целью выявления места инициации разрушения. Следующим шагом определялись значения расчетных параметров напряженного состояния в зоне начала разрушения. Расчет напряженно-деформированного состояния проводился с помощью программного комплекса SIMULIA Abaqus в геометрически и физически нелинейной постановке. В качестве модели материала использовался вариант теории пластического течения с нелинейным изотропным упрочнением.

В ходе изучения образцов с выточкой выявлена нетипичная зависимость. Максимальная деформация по расчетам реализуется вблизи концентраторов, однако инициация разрушения происходит в середине образца, как и в случае гладкого (Рис. 1).

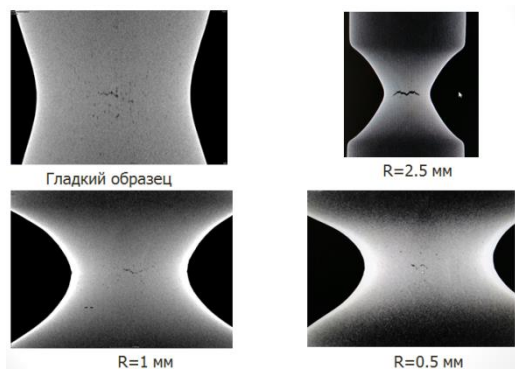


Рис. 1. Результаты томографии образцов, остановленных в момент инициации разрушения

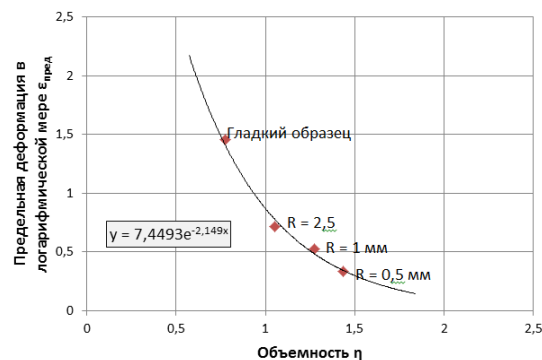


Рис. 2. Зависимость предельной деформации от коэффициента объемности

На Рис. 2 представлена выявленная зависимость предельной деформации от коэффициента объемности для всех исследуемых образцов (найдена функция $\varepsilon_{\text{пред}} = f[\eta, \bar{\theta}]$ при $\bar{\theta} = 1$).

1. Yuanli Bai, Tomasz Wierzbicki A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence // International Journal of Plasticity. 2008. Vol. 24. PP. 1071–1096.

2. Владимиров С.А., Трефилов С.И. Исследование процесса глубокого деформирования образцов с кольцевой выточкой при их растяжении // Космонавтика и ракетостроение. 2015. №3 (82).

ОДНОМЕРНАЯ ЗАДАЧА ПЬЕЗОЭЛЕКТРОМАГНИТОУПРУГОЙ ДИФфуЗИИ ДЛЯ СЛОЯ

Н.А. Зверев¹, А.В. Земсков^{1,2}, Д.В. Тарлаковский^{2,1}

¹Московский авиационный институт (НИУ), Москва

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

NikolayZverev1995@gmail.com

Моделируются связанные нестационарные пьезоэлектрические процессы в многокомпонентной упругой среде с учетом явления массопереноса.

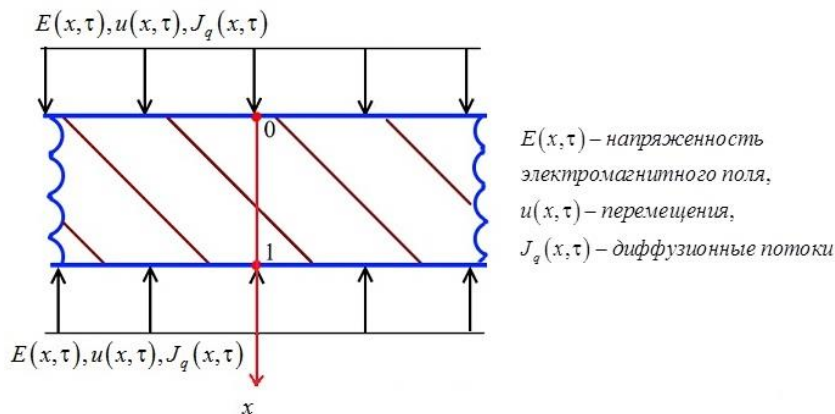


Рис.

Математическая постановка задачи представляет собой связанную систему уравнений, состоящую из линейного уравнения движения сплошной среды, линейных уравнений массопереноса и уравнений Максвелла [1–3].

Физические соотношения строятся с помощью метода термодинамических потенциалов для среды с произвольной анизотропией с использованием квадратичного приближения свободной энергии как функции деформаций, изменения концентрации веществ, входящих в состав среды и компонент векторов электрической и магнитной индукций.

Предполагается, что упругая среда является идеальным твердым раствором [4]. Кроме того, прямой пьезоэлектрический, пьезомагнитный и диффузионно-электрический эффекты слабо выражены. Это позволяет рассматривать задачу электродинамики отдельно. Её решение ищется в интегральной форме, представляющей собой свертку функций Грина с правыми частями граничных условий. Для построения функций Грина задачи электродинамики используется преобразование Лапласа и разложение в тригонометрические ряды Фурье.

Найденные таким образом электромагнитные поля включаются в объемные возмущения задачи упругой диффузии, решение которой известно [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-08-00663 А).

1. Афанасьева О.А., Вестяк А.В., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Модель связанных динамических процессов в термоэлектромагнитоупругих средах с учётом диффузии // Импульсные процессы в механике сплошных сред: Материалы X Международной научной конференции (19–22 августа 2011). Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2013. с. 27–32.

2. Aouadi M. Variable electrical and thermal conductivity in the theory of generalized thermoelastic diffusion // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik. 2005. Vol. 57, No. 2. P. 350–366.

3. Deswal S., Kalkal K. Electromagneto-thermodiffusive problem for short times without energy dissipation // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013. Vol. 86, No. 3. P. 705–715.

4. Гачкевич А.Р., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Линейная модель связанной термоупругости с учётом диффузии для неоднородных анизотропных сред // Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. М.: ООО «ТР-принт», 2011, с. 96–106.

5. Вестяк А.В., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Построение объёмных функций Грина для одномерных нестационарных задач механо-диффузии // Материалы XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1. – М.: ООО «ТР-принт», 2017. с. 47–48.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

zditovets@mail.ru

Под термином «энергоразделение» или «безмашинное энергоразделение» понимается перераспределение полной энтальпии (температуры торможения) в потоке газа без совершения им внешней работы и теплообмена с окружающей средой. В работе [1] был предложен новый способ энергоразделения газового потока, позволяющий существенно снизить потери полного давления у холодного потока. Он основан на известном газодинамическом эффекте - температура адиабатной стенки, обтекаемой потоком сжимаемого газа, может существенно отличаться от температуры торможения потока за счет диссипативных процессов, возникающих в пограничном слое (Рис.). Подробно в работе [2].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования данного метода. Энергоразделение происходит в устройстве идентичном теплообменному аппарату типа «труба в трубе», с той особенностью, что по внутреннему каналу поток движется со сверхзвуковой скоростью, а по внешнему с дозвуковой. При этом на входе в устройство потоки имеют одинаковую начальную температуру торможения. В итоге сверхзвуковой поток нагревается, а дозвуковой охлаждается. Так как величина нагрева/охлаждения потоков ограничена предельным значением адиабатной температуры стенки со стороны сверхзвукового потока, то для повышения эффективности данного метода необходимо исследовать способы воздействия на ее значение. Как один из вариантов – это использование влажного воздуха в качестве рабочего тела с последующей его конденсацией в сверхзвуковом потоке. В работе приведены результаты экспериментального исследования по влиянию начальной влажности на адиабатную температуру стенки.

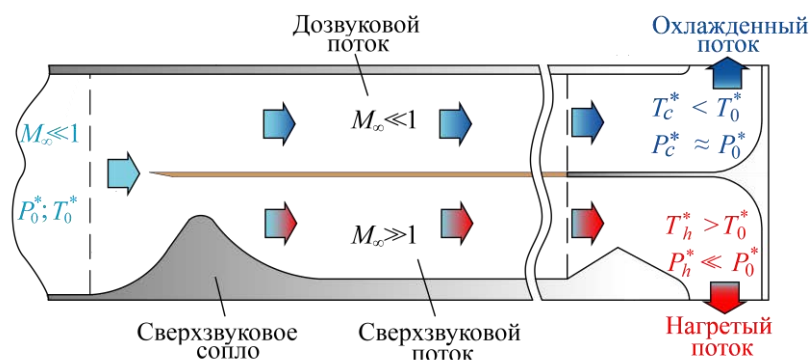


Рис. Принципиальная схема устройства для безмашинного температурного разделения:
 T^* - температура торможения, P^* - давление торможения, θ, c, h - начальное, охлажденное, нагретое

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №14-19-00699.

1. Leontiev, A.I. Temperature stratification of supersonic gas flow // Doklady Physics. 1997. Vol. 42, no. 6. P. 309–311.
2. Безмашинное энергоразделение газовых потоков / А.И. Леонтьев, А.Г. Здитовец, Ю.А. Виноградов и др. — ООО Издательство КУРС Москва, 2016. С. 112.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ КАНАЛ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

zditovets@mail.ru

Экспериментально показано, что при истечении сжатого газа через трубку с проницаемыми стенками, возможно получить как минимум два потока с полными энтальпиями (полными температурами) отличными от начальной, т.е. осуществить безмашинное энергоразделение потока. В основе полученного результата лежит известный газодинамический эффект, возникающий при обтекании адиабатной поверхности сжимаемым газовым потоком с молекулярным критерием Прандтля отличным от единицы. Он заключается в перераспределении полной энтальпии в пограничном слое, вызванном дисбалансом между процессами выделения теплоты за счет работы сил вязкости и ее отвода в поток теплопроводностью. Если адиабатную поверхность сделать проницаемой, то возможно организовать вытекание слоев газа с полной энтальпией, отличной от начальной, за счет перепада давлений с внутренней и внешней стороны поверхности [1,2].

На рис. приведена схема экспериментального стенда и измеренные значения нагрева/охлаждения потоков в зависимости от массовой доли охлажденного потока. Зафиксировано, что при истечении сжатого воздуха через сверхзвуковое сопло, соединенное с трубкой с проницаемыми стенками, часть потока, просачивающегося сквозь стенки, имеет полную температуру ниже начальной, а оставшаяся часть – выше начальной. Эффект охлаждения почти в пять раз выше эффекта Джоуля – Томпсона для соответствующего перепада давлений и температуры.

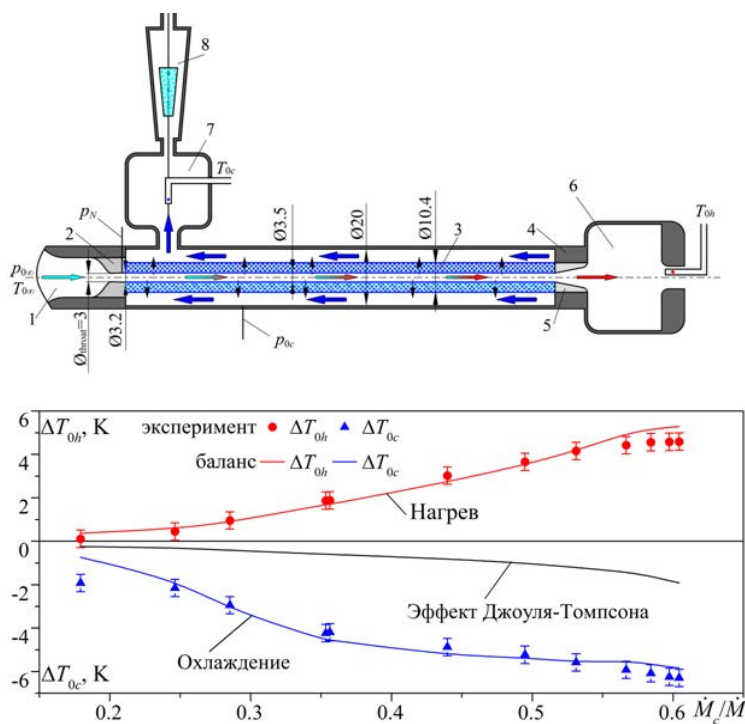


Рис. Принципиальная схема устройства для безмашинного температурного разделения и экспериментальные данные: ΔT_θ – изменение температуры торможения в устройстве, c, h – охлажденное, нагретое

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №14-19-00699.

1. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование температурной стратификации воздушного потока, протекающего через сверхзвуковой канал, с центральным телом в виде пористой проницаемой трубки // Изв. РАН. МЖГ. 2013. № 5. С. 134–145.

2. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С. Температурная стратификация при отсосе пограничного слоя из сверхзвукового потока // ТВТ, 2012. Т.50. № 6. С.1–6.

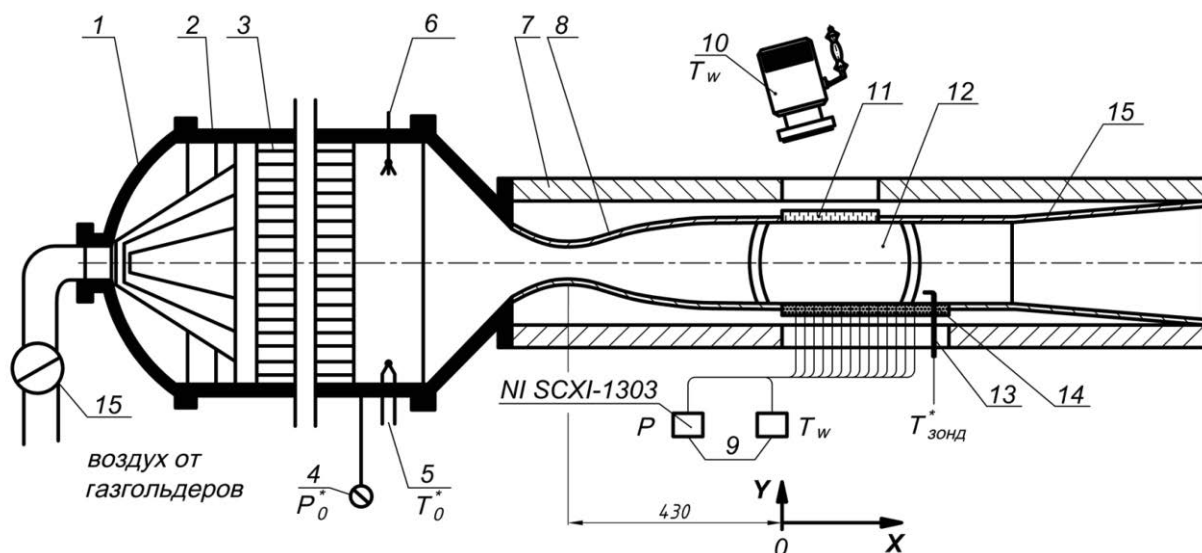
ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОЙ СТЕНКИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ПОТОКЕ

А.Г. Здитовец, С.С. Попович, Н.А. Киселев, Ю.А. Виноградов, М.М. Стронгин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

zditovets@mail.ru

Приведены результаты измерения температуры плоской теплоизолированной (непроницаемой для теплового потока) поверхности, обтекаемой сверхзвуковым потоком с числом Маха $M=2.95$. Работа проводилась на сверхзвуковой аэродинамической установке АР-2 НИИ механики МГУ (Рис.).



1 – форкамера; 2 – сборка конусов; 3 – хонейкомб; 4 – датчик для измерения давления торможения; 5 – термопара для измерения температуры торможения; 6 – форсунка; 7 – рабочий канал; 8 – плоское регулируемое сопло; 9 – датчики статического давления и термопары; 10 – ИК-камера (тепловизор); 11 – инфракрасный иллюминатор; 12 – иллюминатор из оптического стекла; 13 – зонд для измерения температуры в пограничном слое; 14 – экспериментальная модель; 15 – диффузор

Рис. Общий вид сверхзвуковой аэродинамической установки АР-2

Исследовались два режима обтекания. Первый – однофазный поток сухого воздуха, второй – воздушно-капельный поток, состоящий из смеси сухого воздуха и мелкодисперсных водных капель. Относительный массовый расход воды 0.65%. Начальная температура торможения потока – 294 К. Воздушно-капельная смесь создавалась в форкамере путем распыления воды центробежной форсункой (средний размер капель 80 мкм). Температура воды была близка к температуре торможения сухого воздуха. В итоге зафиксированы следующие результаты. Наличие влаги в потоке можно было наблюдать невооруженным глазом. В областях стыка сопла и плоской модели, а также в областях стыков смотровых окон происходило выпадение из сверхзвукового воздушно-капельного потока сконденсированной твердой фазы (льда). Наличие льда на поверхности пластины приводило к возникновению возмущений, наблюдаемых в теневой прибор, что вызывало более существенное торможение потока на длине пластины по сравнению с однофазным рабочим телом. Очевидно, что основная часть жидкой фазы двигалась вместе с потоком и не оказывала влияния на температуру обтекаемой поверхности. Распределение температуры поверхности в случае обтекания воздушно-капельным потоком более неоднородно по сравнению с однофазным потоком.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00130.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В ГОРЕЛКЕ ГТД МЕТОДАМИ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

А.И. Зубко

ОКБ имени А. Люльки, Москва
zbk2@yandex.ru

В процессе сгорания топливовоздушной смеси в основных и форсажных камерах авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) могут возникать различные, в том числе и автоколебательные процессы, сопровождающиеся изменениями скоростей и давлений потока. В зависимости от конструкции и назначения ГТД, данные процессы могут возникать на различных режимах как полета, так и работы летательного аппарата, а, следовательно, приводить к ухудшению КПД двигателя и разрушению его конструктивных элементов. Для предупреждения и устранения таких процессов, необходима выработка диагностических признаков с целью разработки системы анализа и диагностирования опасных колебательных процессов, приводящих к уменьшению удельной тяги, ресурса двигателя и увеличению расхода топлива.

Вышеописанные колебательные процессы потока в камерах сгорания могут взаимодействовать в пристеночном слое, по интегральному значению различных сечений или полному объему камеры, что создает взаимодействие с ее деталями в виде механических колебаний с различными частотами.

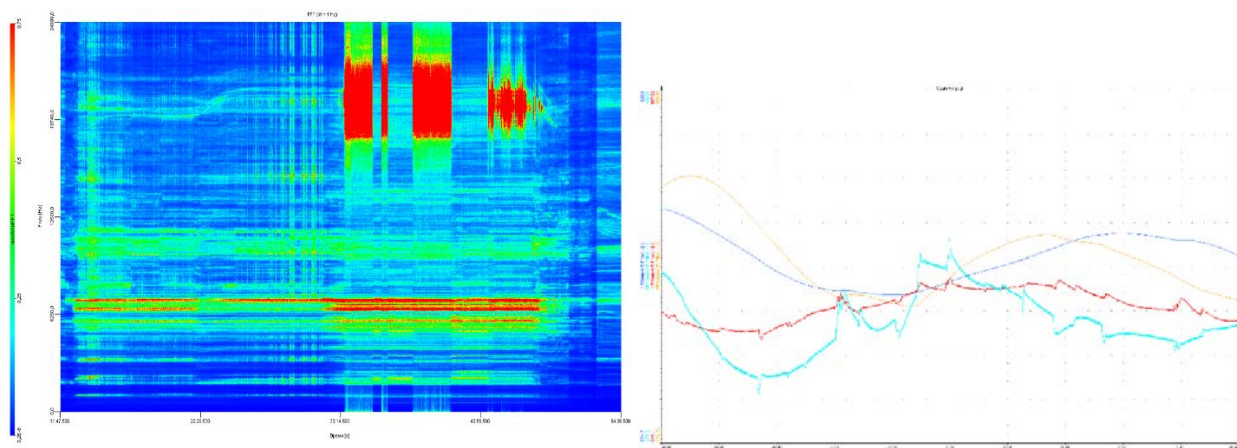


Рис. Спектрограмма колебаний горелки ГТД

На рисунке представлена спектрограмма вибрационных колебаний при работе одиночной горелки ГТД. Как видно из рисунка, спектр колебаний горелки довольно богат и в нем прослеживаются как периодические, так и почти периодические высоко- и среднечастотные процессы с изменением режима работы. В процессе анализа данных частот можно определять некоторые высокоамплитудные процессы горения, что способствует устранению таких явления в процессе эксплуатации и доводки камер сгорания.

1. Августинovich В.Г., Шмотин Ю.Н. и др. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях. – Москва: Машиностроение. 2005. Т. 515.
2. Зубко А. И. Перспективный комплекс виброакустической диагностики подшипниковых опор авиационных газотурбинных двигателей //Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 47-55.
3. Зубко А. И., Герман Г. К. Исследование комплексной методики вибродиагностики для определения технического состояния роторных систем ГТД //ЦИАМ. 2015. С. 935 – 937.

О ДВИЖЕНИИ КОНТИНУУМА ПЛАВЯЩИХСЯ ЧАСТИЦ

А.Н. Голубятников^{1,2}, О.О. Иванов^{1,2}

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

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

ivanov@imec.msu.ru

Известно, что при обтекании точечного источника (Рис.) с массовым расходом ρQ набегающим потоком со скоростью V , на источник будет действовать сила $-\rho Q V$. При движении сферической плавящейся частицы в собственном расплаве также необходимо учитывать изменение размеров частицы. Учет этих эффектов приводит к тому, что в уравнения движения частицы необходимо вводить реактивную силу, которая может существенно влиять на характер движения, как это было отмечено в [1] для случая идеальной жидкости. В работе [2] показано, что при наличии достаточно большого перепада температуры между частицей и расплавом данная сила может превышать силу вязкого сопротивления, что приводит к ускорению частицы. Получен простой критерий, определяющий характер движения частицы в зависимости от относительного перепада температуры, числа Прандтля и относительной разности плотностей расплава и частицы.

На основании выведенных уравнений решается задача о случайном движении частицы, причём плавящейся за конечное время. Обнаружено, что среднеквадратичное отклонение такой частицы от начального положения за время плавления может быть даже неограниченно велико при больших перепадах температуры.

Уравнения движения частицы в вязком расплаве при отсутствии внешних сил допускают интеграл движения, учитывающий изменение кинетической энергии, который может быть использован при построении общей статистической теории плавящихся частиц. Решается уравнение Лиувилля для системы невзаимодействующих частиц и выводится выражение для давления как функции плотности сохраняющегося числа частиц и общей равновесной температуры расплава. В результате получена гиперболическая система уравнений движения континуума частиц на фоне механических и тепловых параметров расплава.

Для исследования особенностей движения континуума частиц решаются одномерные задачи с плоскими волнами: об однородном движении плавящихся частиц при нестационарном изменении температуры неподвижного расплава, а также о стационарном движении при постоянной температуре, проявляющая свойство запираания, связанное с невозможностью перехода через скорость звука, аналогичная газодинамической задаче о точечном источнике.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 17-01-00037.

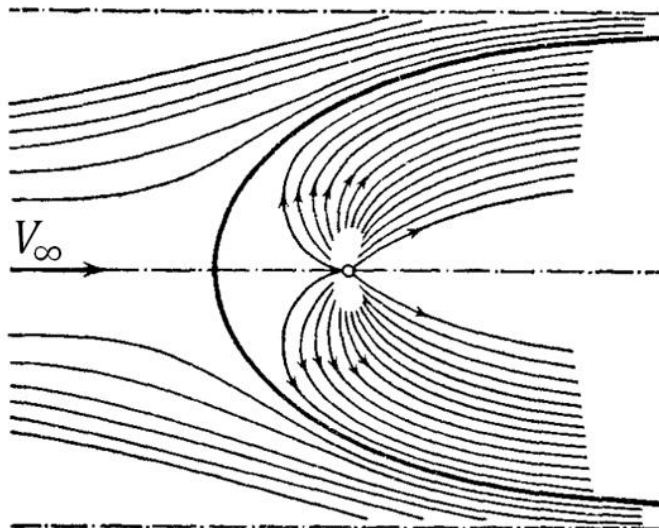


Рис. Схема обтекания источника

1. Голубятников А.Н. О взаимодействии плавящихся частиц о моделировании гравитации // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, 2011. №4 (3). С. 728-729.

2. Иванов О.О. К движению плавящейся частицы. // Вестник Московского университета. Сер. Математика. Механика, 2018 (в печати).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ

Ю.С. Зайко¹, О.О. Иванов¹, А.Д. Чичерина¹, В.В. Трифонов¹, А.И. Решмин¹, В.В. Веденеев^{1,2}

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

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

zayko@imec.msu.ru

Было создано компактное устройство, формирующее воздушную струю диаметром 0.12 м, которая остается ламинарной на расстоянии 5.5 диаметров от выхода из формирующего устройства при числах Рейнольдса около 10000 [1].

Первым этапом настоящей работы является теоретическое исследование развития малых возмущений в струе с профилями скорости, соответствующими экспериментальным в начальном сечении струи и нескольких сечениях, близких к началу струи. Пространственный анализ устойчивости показал, что существует две ветви растущих возмущений: первая ветвь порождается точками перегиба на профилях скорости, расположенными вблизи границы струи; вторая — точкой перегиба, расположенной недалеко от оси струи. При этом скорости роста возмущений, соответствующих первой ветви, значительно больше скоростей роста возмущений, соответствующих второй ветви. Однако, с удалением от выхода из формирующего устройства, возмущения, соответствующие первой ветви, становятся затухающими (происходит слияние двух точек перегиба на профиле скорости в одну). Тогда неустойчивость продолжает порождаться только второй ветвью. Диапазон частот растущих возмущений для обеих ветвей одинаков и соответствует частотам 0...14 Гц. Частоты наиболее быстро растущих возмущений для обеих ветвей также лежат в одинаковом интервале — от 4 до 6 Гц.

Достаточно большой диаметр и длинный ламинарный участок струи, создаваемой экспериментально, позволяют детально измерять характеристики течения и визуализировать его. Были проведены эксперименты по внесению в струю возмущений посредством колеблющейся с заданной частотой и фиксированной амплитудой полосы фольги. Визуализация течения показала, что при частотах, соответствующих теоретически полученному диапазону наиболее быстро растущих возмущений, струя разрушается ближе к выходу из формирующего устройства, чем при воздействии на струю возмущениями с частотами вне указанного диапазона. Были вычислены длины волн, возникающих в струе под воздействием возмущений, вызываемых колеблющейся полосы фольги. Эти длины волн хорошо коррелируют с длинами волн, полученными теоретически.

Исследование является первым шагом в экспериментальном изучении развития неустойчивости в затопленной струе круглого поперечного сечения и сравнении результатов с предсказаниями модальной теории устойчивости.

Работа поддержана РФФИ, проект №18-38-00745.

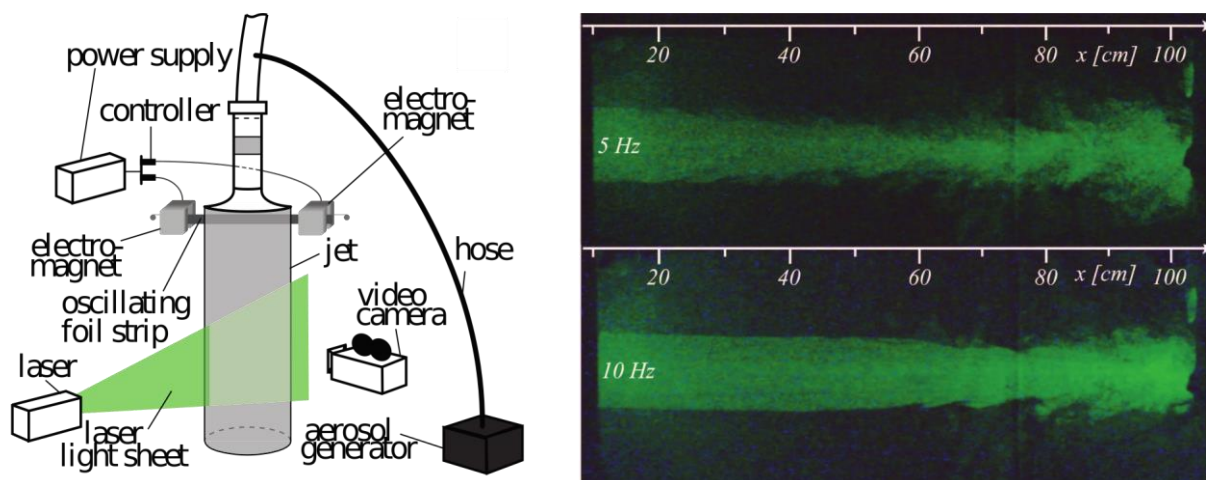


Рис. Схема устройства для внесения возмущений в струю и системы визуализации потока. Фотографии струи под воздействием возмущений с частотами 5 и 10 Гц.

1. J. Zayko, S. Teplovodskii, A. Chicherina, V. Vedeneev, A. Reshmin. Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers. 2018. Physics of Fluids, 30, 043603.

САМОПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ: ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Я.В. Калинин^{1,2}, И.А. Тарасова²

¹Кафедра теоретической механики ВолгГТУ, Волгоград

²Кафедра прикладной математики ВолгГТУ, Волгоград

jkv83@mail.ru

Одной из актуальных проблем развития современных транспортных средств, в том числе шагающих машин и роботов, является проблема интеллектуализации систем управления ими.

Принимается гипотеза о том, что реализуемые системой управления роботом законы являются оптимальными по тому или иному комплексному критерию оптимальности. Для удобства интерпретации человеком этих показателей и взаимодействия человека и робота их удобно сопоставлять с чертами характера человека [1, 2] и представлять как набор нечётко-логических описаний динамических характеристик робота.

Возможный вариант сопоставления «характера» и динамических характеристик робота приведён в таблице 1. В таком случае оптимизируемый комплексный критерий качества в самом простом случае может быть линейной аддитивной свёрткой динамических характеристик с весами.

Таблица 1 - Сопоставление «характера» и динамических характеристик робота

1. Энергетическая эффективность (уровень тепловых потерь)	W	Бережливость
2. Комфортабельность движения (среднеквадратическое ускорение)	a	Уравновешенность

Рассматривается задача самопланирования роботом своего движения в зависимости от его собственных динамических свойств как черт его «характера». Задача решается на примере реального шагающего робота «Ортоног», представленного на рисунке, с системой управления, использующей понятие «характера» [2], движущегося в среде с меняющимся по участкам вязким сопротивлением для двух показателей качества: энергетическая эффективность движения и комфортабельность на разных уровнях проявления черт «характера» получают различные законы движения, существенно отличающиеся по динамическим характеристикам и энергозатратам.



Рис. Шагающий робот "Ортоног"

Таким образом, «характер» робота, заложенный его систему управления влияет на характер его движения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 16-31-60042, 17-01-00675), гранта Президента РФ МК-1493.2017.1.

1. Калинин Я.В. О формировании «характера» мобильн. робота как элемента «интеллектуального» управления / Я.В. Калинин, Е.С. Брискин // Экстрем. робототехника 2015, Т.1 (1), С. 121–126.

2. Walking robot «character» as element of intelligent system / Е.С. Брискин, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов, Я.В. Калинин, А.В. Леонард, В.А. Серов, В.А. Шурыгин // Advances in Cooperative Robotics: Proceedings of the International Conference on CLAWAR 2016 (London, UK, 12-14 September 2016) / ed. by Mohammad O. Tokhi, Gurvinder S. Virk. – [Published by World Scientific Publishing Co.; printed in Singapore, 2016]. – P. 386–394.

К ВОПРОСУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ

Я.В. Калинин^{1,2}, М.В. Мирошкина¹

¹Кафедра теоретической механики ВолгГТУ, Волгоград

²Кафедра прикладной математики ВолгГТУ, Волгоград

jkv83@mail.ru

В настоящее время потребность в мобильных шагающих роботах достаточно велика. Одной из проблем развития шагающих машин и роботов является характер движения движителей: периодический разгон и торможение неуравновешенных шагающих движителей. Показано, что в таком случае непроизводительные потери энергии пропорциональны квадрату скорости движения корпуса робота, а необходимая для поддержания постоянной скорости движения мощность пропорциональна кубу скорости [1].

Представителем мобильных шагающих роботов является экспериментальный аппарат «Ортоног» (см. Рис.), разработанный сотрудниками кафедры «Теоретическая механика» ВолгГТУ и АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады». Шагающий аппарат с оригинальным ортогональным движителем, предложенным в теории проф. Н.В. Умновым и разработанный группой учёных под руководством проф. Е.С. Брискина, предназначен для отработки алгоритмов движения и новых конструктивных решений, отладки систем управления, демонстрации возможностей шагающих роботов по проходимости и преодолению препятствий.



Рис. Шагающий робот "Ортоног"

Энергетическая эффективность системы приводов движителей оценивается тепловыми потерями в двигателях, например, для двигателей постоянного тока пропорциональных квадрату развиваемых приводами сил и достигается минимизацией функционала H :

$$H = \alpha \int_0^{\tau} (F_1^2 + F_2^2) dt + \beta \int_0^{\tau} F_3^2 dt \rightarrow \min,$$

где α – коэффициент пропорциональности для потерь приводов курсового движения, F_1 – сила развиваемая приводом курсового движения механизма шагания, находящегося в фазе опоры на грунт, приложенная к корпусу; F_2 – сила, развиваемая приводом курсового движения механизма шагания, находящегося в фазе переноса, приложенная к корпусу, β – коэффициент пропорциональности для потерь привода вертикального перемещения переносимого движителя, F_3 – сила, развиваемая приводом вертикального перемещения переносимого движителя, приложенная к корпусу.

Таким образом, при согласованной работе системы приводов можно добиться минимума непроизводительных потерь энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-31-60042, 17-01-00675), гранта Президента РФ МК-1493.2017.1.

1. Лапшин, В.В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата / В.В. Лапшин // Известия РАН, МТТ. № 1, 1993 - С. 65–74.

ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ

Я.В. Калинин^{1,2}, М.В. Мирошкина¹, И.А. Тарасова²

¹Кафедра теоретической механики ВолгГТУ, Волгоград

²Кафедра прикладной математики ВолгГТУ, Волгоград

jkv83@mail.ru

Исследования по механике движения шагающих машин и роботов выявили недостатки, вызванные низкой энергетической эффективностью и сложностью алгоритмов управления их движением [1]. Обуславливается это нелинейностью механических процессов, протекающих при дискретном взаимодействии шагающего движителя с опорной поверхностью, процессами переноса движителей в новое положение относительно корпуса и т.д.

Проявление нелинейных эффектов вызывает необходимость генерирования в приводе курсового перемещения переменных во времени сил для обеспечения равномерного движения, что приводит к непроизводительным потерям энергии [2].

Одним из возможных вариантов снижения сил в приводе курсового перемещения может быть управление касательной жёсткостью в системе стопа-грунт за счёт переменной жёсткости этой системы.

Расчётная схема робота с такими движителями приведена на рис. а, где c_j – касательная жёсткость в системе стопа-грунт, F_j – касательная сила, действующая на движитель, λ_j – перемещение при касательной деформации грунта, Q – суммарная сила сопротивления движению, приложенная к корпусу робота, V – скорость движения корпуса робота.

Закон изменения касательной жёсткости в системе опорная стопа-двигитель показан на рис. б и может быть реализован с помощью известных схем механизмов с "мягкой" упругой характеристикой.

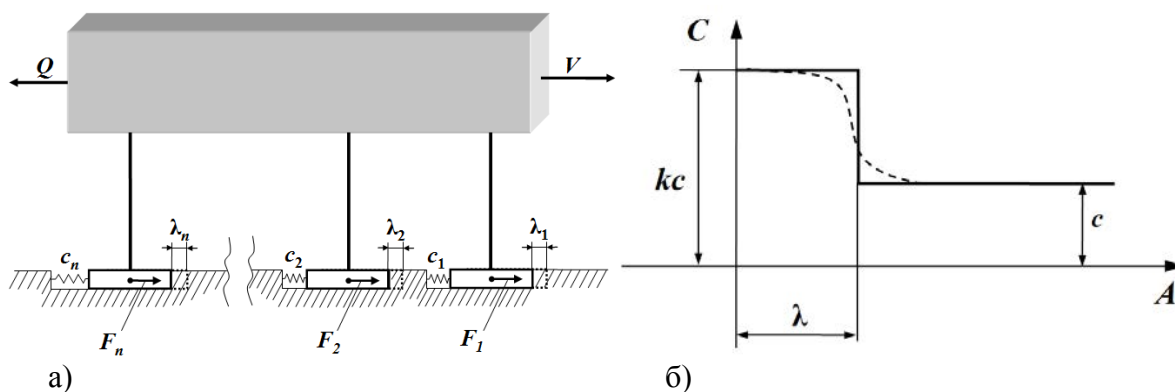


Рис. а – расчётная схема; б – закон изменения касательной жёсткости

Учёт и рациональное использование нелинейных эффектов при взаимодействии стопы робота с опорной поверхностью позволяет добиться существенного снижения непроизводительных потерь энергии (до 10-15%) и, таким образом, повысить энергетическую эффективность шагающих роботов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-31-60042, 17-01-00675), гранта Президента РФ МК-1493.2017.1/

1. Охоцимский Д.Е. Об одном способе рекуперации энергии при движении шагающего аппарата / Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, В.В. Лапшин // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. – 1986. №5, 36 с.

2. Брискин Е.С. Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин // Известия РАН. ТиСУ. – 2011. № 2, С.170–176.

АНАЛИЗ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗУБНОЙ ШИНЫ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

А.А. Каменских, Т.Н. Устрягова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
anna_kamenskih@mail.ru

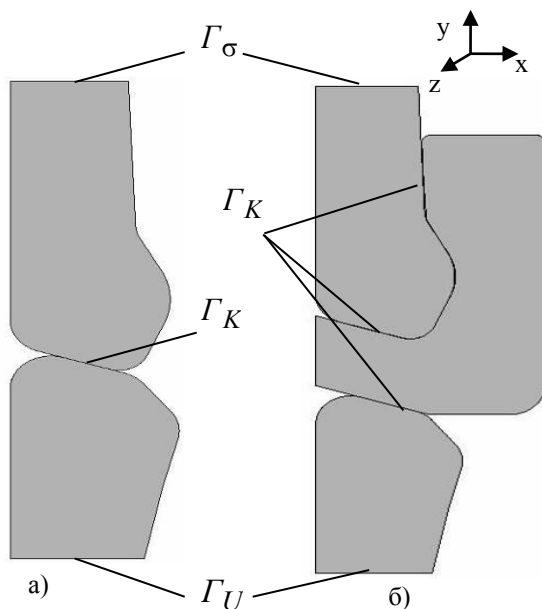


Рис. Расчетные схемы: а) контакта зубов;
б) контакт зубов через зубную шину

В современной медицине и биомеханике особое внимание уделяется проблемам повышения качества жизни населения. При этом большое количество научных исследований направлено на оптимизацию биомеханических узлов, математическое моделирование их деформационного поведения, а также исследования моделей материалов биомеханических конструкций и определяющих соотношений, описывающих их поведение в процессе деформирования. В данной работе рассмотрено деформирование зубной шины из этиленвинилацетат (Eva) *Drufosoft* при контактном взаимодействии с зубочелюстной системой человека.

Для определения свойств материала зубной шины на базе ФГБОУ ВО ПГНИУ была проведена серия натурных экспериментов. После обработки экспериментальных данных было установлено, что материал проявляет упругопластические свойства, построена диаграмма $\sigma - \varepsilon$, модуль Юнга для упругого участка составил $17,1 \pm 1,58$ МПа [1].

Для канонической геометрии зубов рассмотрено влияние свойств материалов зубной шины на деформирование контактного биомеханического узла в целом, а также на параметры зоны контакта в частности. Далее (Рис.) рассмотрено деформационное поведение материала Eva в классической конструкции зубной шины. Математическая постановка, ранее описана в [2], на Γ_K фрикционный контакт (проскальзывание, сцепление и отлипание). На границе Γ_U запрещены перемещения по координате y , к границе Γ_σ приложена сила физиологическая нагрузка и запрещен изгиб.

Для моделей с канонической геометрией установлено падение интенсивности напряжений в твердых тканях зубов при их контакте через протетическую конструкцию более чем в 5 раз, чем при контакте без зубной шины. Для модели контакта зубов не канонической формы установлено, что уменьшение интенсивности напряжений для зубов верхнего (более чем в 2 раза) и нижнего зубного ряда (в 0,8 раз) имеет количественное отличие. Для всех вариантов моделей установлены зависимости максимальных интенсивности напряжений в твердых тканях зубов и пластической деформации зубной шины от величины нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-48-590411 p_a.

1. Лохов В.А., Кучумов А.Г., Мерзляков А.Ф., Асташина Н.Б., Ожгихина Е.С., Тропин В.А. Экспериментальное исследование материалов новой конструкции спортивной зубной шины // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19. № 4. – С. 409–420.

2. Каменских А.А., Лесникова Ю.И. Численное моделирование контакта полупространства из этиленвинилацетата с зубом-индентором // Математическое моделирование в естественных науках. 2017. Т. 1. С. 22–26.

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ

А.А. Каменских

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
anna_kamenskih@mail.ru

В настоящее время существует большой выбор антифрикционных полимерных материалов российского и зарубежного производства, пригодных в той или иной степени для работы в условиях контактного деформирования в качестве антифрикционных покрытий и прослоек: композиционные материалы на основе фторопласта с различными нанонаполнителями, модифицированный фторопласт, сверхвысокомолекулярные полиэтилены и др. Контактные узлы с антифрикционными покрытиями и прослойками применяются во многих сферах, к таким конструкциям предъявляются повышенные требования относительно прочности, надежности и долговечности, а оптимизация выбора материалов антифрикционного слоя позволит повысить ресурс работы конструкции.

Для эффективного использования антифрикционных полимеров требуется анализ физико-механических, фрикционных, усталостных и эксплуатационных свойств материалов. На базе ПФИЦ УрО РАН д.ф.-м.н. Адамовым А.А. выполнена серия натурных экспериментов, направленная на определение свойств антифрикционных материалов, необходимых для построения математических моделей их поведения.

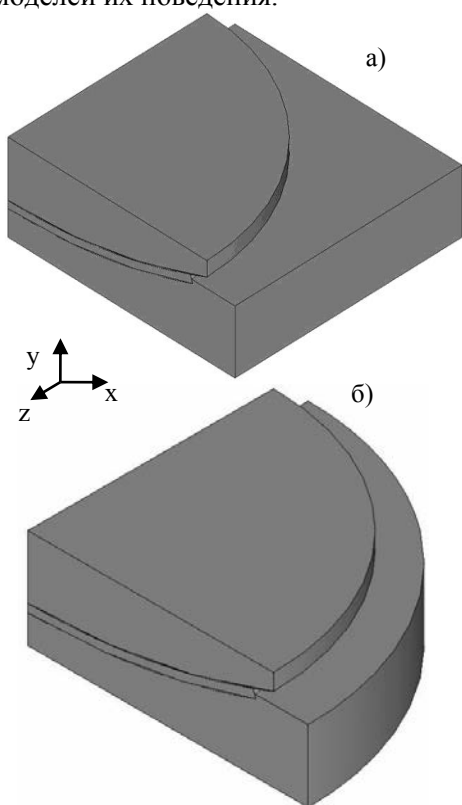


Рис. Модели сферической опорной части:
а) квадратная нижняя плита;
б) цилиндрическая нижняя плита

На примере сферической опорной части (см. Рис.) с разной геометрией нижней плиты исследовано влияния свойств материалов тонкого антифрикционного слоя на параметры зоны контакта в частности и деформационное поведение конструкции в целом. Реализована трехмерная задача контакта плит опорной части через антифрикционную прослойку с учетом фрикционных свойств материалов, модель включает три контактные поверхности с заранее не известной площадкой контакта и заранее не известным распределением зон контактных состояний [1, 2].

В рамках серии численных экспериментов установлены: зависимость распределения зон контактных состояний от уровня и вида нагрузки, распределение контактных давления и касательного напряжения для всех вариантов нагружения. При анализе результатов установлено резкое падение контактных напряжений у края прослойки (до 10% общей площади) при действии только вертикальных нагрузок. Зарегистрирована тенденция подъема контактного узла по боковой поверхности опорной части при росте горизонтальных усилий, действующих на конструкцию, что сопровождается негативными эффектами: уменьшением площади полного контактного сцепления поверхностей, ростом площадей скольжения и отлипания, увеличением (до 1.6 раза) максимальных уровней контактного давления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-08-00903 а.

1. Kamenskih A. A. and Trufanov N. A. Regularities Interaction of Elements Contact Spherical Unit with the Antifrictional Polymeric Interlayer // Friction and Wear. – 2015. – Т. 36, № 2. – Рр. 170-176.
2. Каменских А.А., Труфанов Н.А. Численный анализ напряженного состояния сферического контактного узла с прослойкой из антифрикционного материала // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – С 54 – 61.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ДРЕВЕСНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОГНЕЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАЖИГАНИЯ

Д.П. Касымов, М.В. Агафонцев, В.В. Перминов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
denkasymov@gmail.com

В лабораторных условиях исследованы условия загорания образцов древесины в результате теплового воздействия различного типа: 1) модельного низового лесного пожара, 2) тлеющих частиц коры сосны. Установлено влияние огнезащитных покрытий (огне-био защитная пропитка для древесины «ФУКАМ», огнезащитная пропитка с антисептическим эффектом для древесины «Pirilax»-Classic), средства защитное для древесины «СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ», а также огнезащитный состав «МИГ-09») на пожароопасные свойства древесины. Определены вероятность воспламенения и задержки загорания древесины в зависимости от размера и количества горящих частиц, наличия воздушного потока в зоне падения частиц, а также в зависимости от начальной температуры древесины.

В качестве метода диагностики использовалась ИК-термография. В настоящее время ИК метод наряду с методами теплового неразрушающего контроля, не нарушающими целостности контролируемых объектов и не вносящими возмущения в процесс, представляет высокотехнологическую область прикладных исследований, которая объединяет достижения в теории теплопередачи, ИК технологии и компьютерной обработки экспериментальных данных.

В качестве исследуемых образцов строительных материалов были использованы: ДВП, ДСП, стеновая панель МДФ, древесный массив из хвойных пород. Методика проведения эксперимента, характеристики огнезащитных составов, используемых в эксперименте, а также предварительные результаты представлены в работах [1-3]. Имеющиеся данные, а также дополнительные эксперименты позволят установить зависимости показателей пожарной опасности строительных материалов от условий применения и типа огнезащитного состава, а также разработать лабораторный метод бесконтактной ИК-диагностики и контроля пожароопасных свойств древесных строительных материалов.

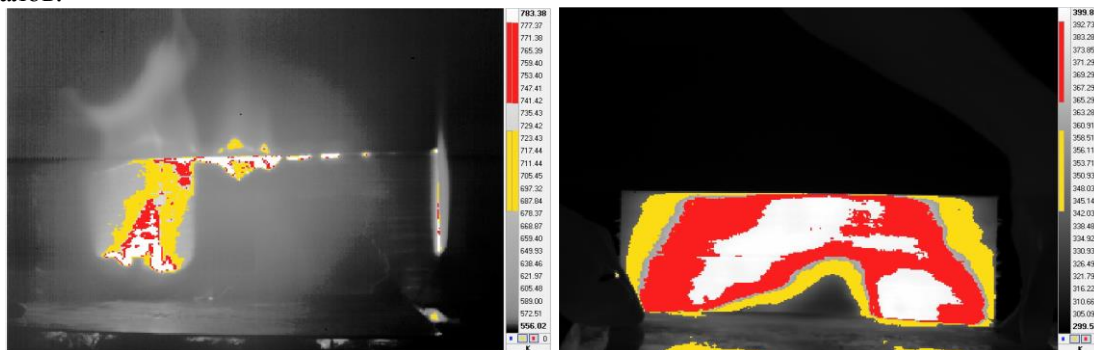


Рис. Анализ теплонапряженных участков на поверхности древесины: а – сосны; б – осины. Слева необработанная древесина, справа – с применением огнезащитной пропитки «ФУКАМ»

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ № МК – 3885.2018.8.

1. Д.П. Касымов, Е.Л. Лобода, А.С. Якимов, М.В. Агафонцев, Ю.А. Лобода. Экспериментальное и численное моделирование воспламенения модели деревянного ограждения при тепловом воздействии фронта природного пожара //XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России: в 2 ч. М.: ВНИИПО, 2017. Ч. 2: Горение и проблемы тушения пожаров: тез. докл. (5 июля 2017 г.). с. 201–204.

2. D. Kasymov, M. Agafontsev. Investigation of the Fire Hazard Characteristics of Wood Using Infrared Thermography //Proceedings of the 8th European Combustion Meeting. Dubrovnik, Croatia, 2017. p. 1484–1488. URL: <http://www.adriacombustioninstitute.org/ecm2017/> (дата обращения: 29.09.2017).

3. D.P. Kasymov, A.A. Paletsky, M.V. Agafontsev Small-scale investigation of the fire hazard characteristics of wood samples due to the different type of thermal impact while forest fires //9th INTERNATIONAL SEMINAR ON FLAME STRUCTURE, Novosibirsk, Russia (July 10–14, 2017). Book of Abstracts. p. 51.

ПРИМЕНЕНИЕ ИК-ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ УЧАСТКОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ДРЕВЕСИНЫ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ТЕПЛОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ОТ ПРИРОДНОГО ПОЖАРА

Д.П. Касымов, М.В. Агафонцев

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
denkasymov@gmail.com

В лабораторных условиях исследовано воздействие очага горения, смоделированного лесным горючим материалом (хвоя сосны), на плоские деревянные образцы различного сорта (сосна, осина, лиственница) с применением ИК-диагностики. В результате получены профили температуры на поверхности образцов древесины, определены теплонапряженные участки при воздействии модельного очага горения, имитирующего низовой лесной пожар слабой интенсивности.

В инфракрасной области характеристики поверхности образца регистрировались с помощью тепловизора JADE J530SB с применением оптического фильтра 2.5–2.7 мкм, который позволял измерять температуру в интервале 310–550 °С. Для регистрации температур в интервале 100–200 °С съемка производилась без оптического фильтра. Частота съемки составляла 50 кадров/сек. Влажность образцов контролировалась с помощью анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0.01 %, масса образцов – электронными весами AND HL-100. Схема проведения эксперимента рассмотрена в [1].

Для того чтобы определить теплонапряженные участки на поверхности образца древесины, с помощью программного обеспечения Altair, на термограмме поверхность образца покрывалась прямыми горизонтальными линиями. Расстояние между ними было фиксированное.

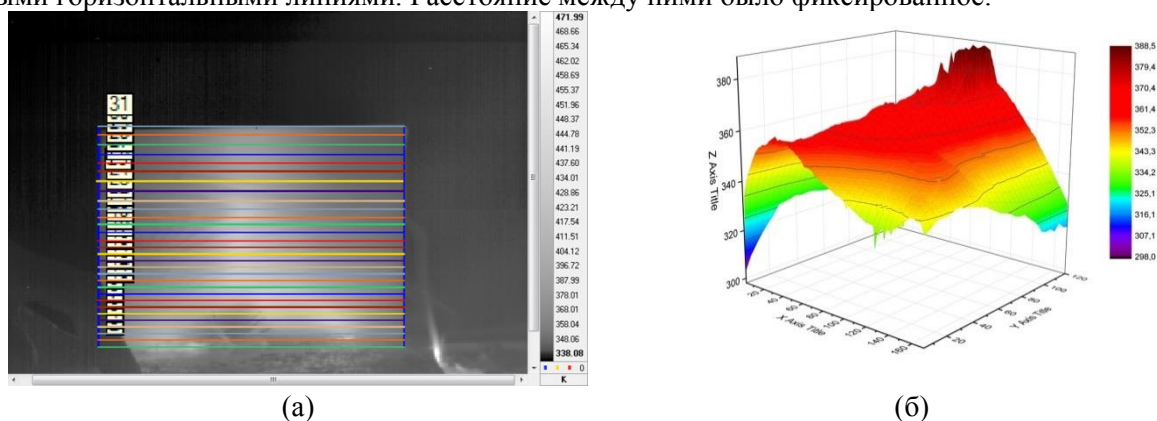


Рис. а – Термограмма поверхности образца древесины после воздействия фронта пожара с установленными инструментами измерения; б – график распределения температуры на поверхности исследуемого образца

Длина горизонтальных линий l соответствовала размерам исследуемого образца древесины. Для каждого отрезка был получен столбец температур, определенных в каждом пикселе соответствующей прямой. В результате, зная геометрическое положение прямых и значения температур, были получены графики распределения температуры на поверхности исследуемого образца, а также установлены теплонапряженные участки на поверхности моделей деревянных конструкций в результате воздействия фронта низового лесного пожара.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ № МК – 3885.2018.8.

1. Касымов Д.П., Лобода Е.Л., Якимов А.С., Агафонцев М.В., Лобода Ю.А. Экспериментальное и численное моделирование воспламенения модели деревянного ограждения при тепловом воздействии фронта природного пожара / В книге: XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России Материалы конференции. В 2-х частях. 2017. С. 201–204.

2. D. Kasymov, M. Agafontsev Investigation of the Fire Hazard Characteristics of Wood Using Infrared Thermography // Proceedings of the 8th European Combustion Meeting. Dubrovnik, Croatia, 2017. p. 1484–1488. URL: <http://www.adriacombustioninstitute.org/ecm2017/> (дата обращения: 29.09.2017).

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ГЛАВНОМ РАЗЪЕМЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1000

В.С. Каширин, А.В. Осинцев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
vskashirin93@gmail.com, avosintsev@yandex.ru

Разъемные соединения реактора обладают уплотнительными устройствами, обеспечивающими герметичность путем предотвращения утечки радиоактивного теплоносителя. Данная проблема особенно актуальна для первого контура реакторной установки, где есть риск нарушения герметичности и протечки радиоактивного вещества во внешнюю среду [1,4]. Нарушение герметичности может возникать вследствие дефектов поверхности, силовых и температурных деформаций [3]. Расчет методом конечных элементов позволяет провести анализ напряженно-деформированного состояния главного разъема реакторной установки ВВЭР-1000 при различных механических и температурных нагрузках. Простота экспериментального метода корреляции цифровых изображений позволяет валидировать данный расчет.

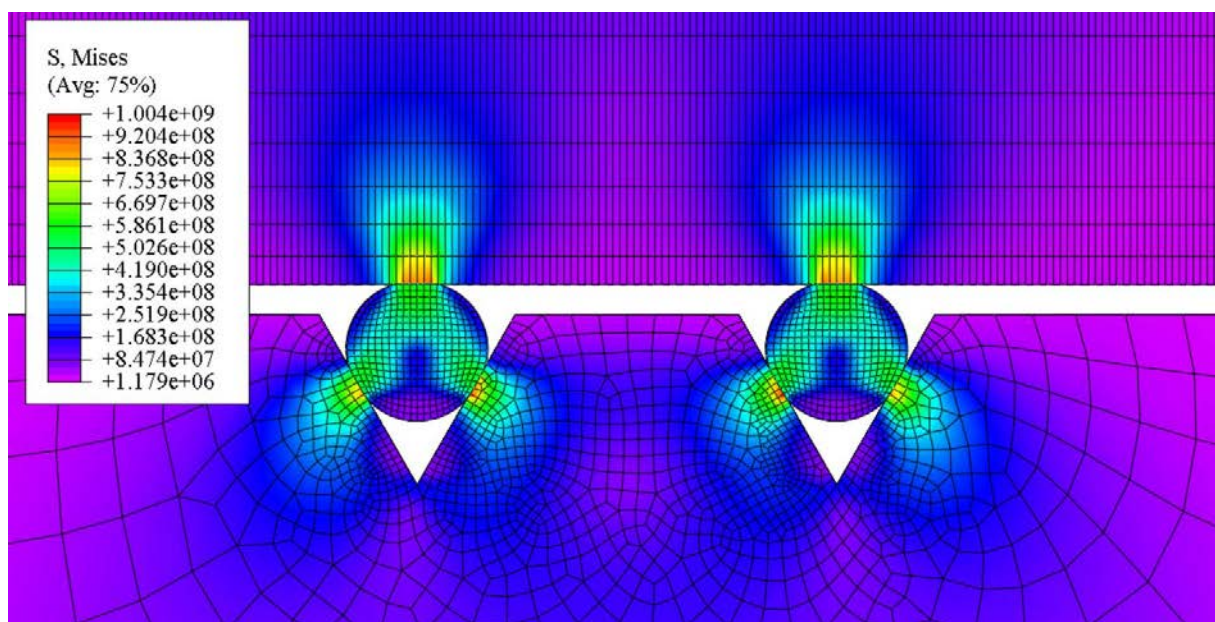


Рис. Интенсивность напряжений, возникающих в ГРП ВВЭР-1000

1. В. Г. Русьянов, В. П. Денисов, Ю. Г. Драгунов, А. В. Селезнев, С. Б. Рыжов, А. Е. Геронтьев, А. Г. Конюшков. — Москва: Академкнига, 2004. 134 с. Уплотнительные устройства разъемных соединений оборудования реакторных установок ВВЭР.
2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510с.
3. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От трибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352с.
4. Каширин В.С., Осинцев А.В., Моделирование контактных взаимодействий в главном разъеме реакторной установки типа ВВЭР. II Научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике», аннотация докладов, 2017. С.48.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАРДИОЛОГИИ С ПОМОЩЬЮ СВЯЗКИ ABAQUS-FLOWVISION

В.С. Каширин

ООО «Вычислительная инженерная платформа», Москва
Kashirin@flowvision.ru

Проект «Живое сердце» – международный проект SIMULIA, в который вовлечены инженеры, медики и ученые со всего мира для работы над реалистичной моделью сердца. Предполагается, что эта модель будет применяться в образовании, конструировании медицинских аппаратов, клинической диагностики реального сердца, а также тестировании уже существующих и будущих инновационных решений, призванных значительно улучшить жизнь человека, страдающего различными пороками сердца.

При разработке стенодов, искусственных клапанов или планировании операций на сердце, необходимо моделировать нагруженное состояние устройств и приборов в сложных нестационарных условиях [1]. Применение программных комплексов Abaqus-FlowVision позволяет наиболее точно предсказать поведение перспективного устройства под действием сложной гидродинамической нагрузки [2].

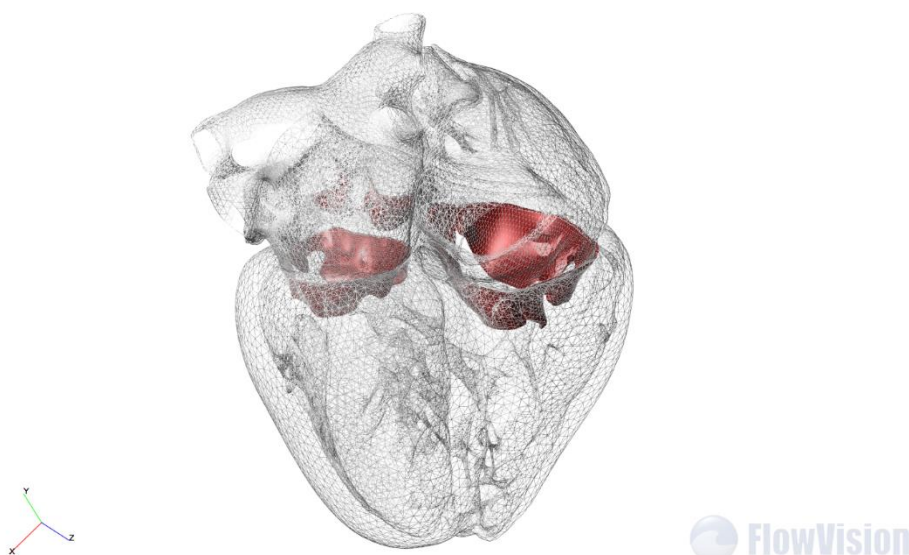


Рис. Модель «Живого сердца» с натуральными клапанами

1. Matteo Bianchi, Ram Ghosh, Gil Marom, Vladimir Kashirin, Oren Rotman, Praveen Sridhar, Karl D'souza, Wojtek Zietak, Danny Bluestein. "Fluid-Structure Interaction Simulation of Transcatheter Aortic Valve Performance in Living Heart Human Model". 13th World Congress on Computational Mechanics / 2nd Pan American Congress on Computational Mechanics (WCCM 2018).

2. Matteo Bianchi, Ram Ghosh, Gil Marom, Vladimir Kashirin, Oren Rotman, Praveen Sridhar, Karl D'souza, Wojtek Zietak, Danny Bluestein. Evaluation of transcatheter aortic valve performance in beating heart: a patient-specific numerical approach. The Conference on Advancing Analysis & Simulation in Engineering.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ОБОЛОЧЕК

А.Е. Киреева, В.Д. Кухарь, А.С. Сорвина

Тульский государственный университет, Тула
kirealena30@gmail.com

Важнейшем элементом кумулятивного заряда, во многом определяющую ее пробивную способность является кумулятивная облицовка (оболочка) (Рис.).

При этом повышение пробивного действия кумулятивного заряда существенно зависит от физико-механических свойств материала облицовки и технологии ее изготовления.

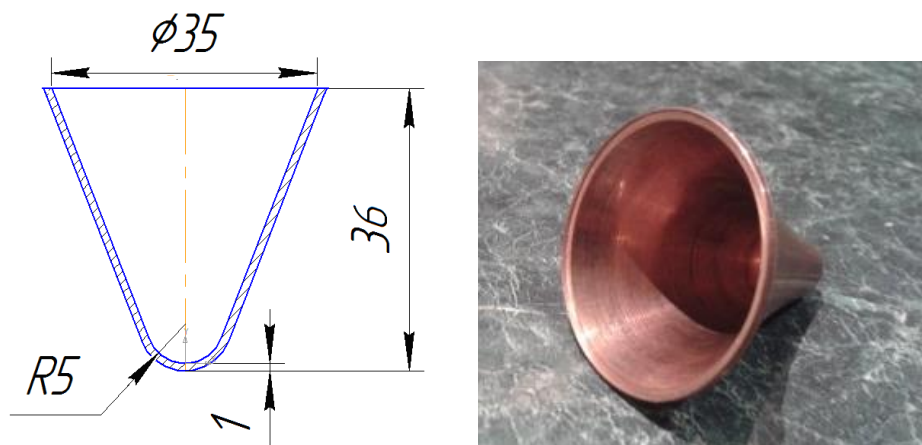


Рис. Коническая кумулятивная оболочка

В данной работе рассмотрены концепции получения конических кумулятивных облицовок на прессовом оборудовании за один переход.

С помощью программного комплекса QForm 2D/3D оценена реальная картина пластического формоизменения материала в процессе нагружения, исследовано напряженно-деформированное состояние во всем объеме обрабатываемой заготовки в любой момент времени, а также оценены силовые параметры и возможность разрушения материала в процессе нагружения. В процессе штамповки реализуются значительные степени деформации в стенке получаемой заготовки. Однако наличие высокого гидростатического давления во всем объеме заготовки позволяет осуществлять процесс деформирования без разрушения материала.

Рассмотрены варианты снижения силы процесса деформирования заготовки [1], за счет уменьшения коэффициента трения между заготовкой и инструментом, предварительного нагрева заготовки и одновременного предварительного нагрева заготовки и инструмента.

Установлено, что предварительный нагрев инструмента в интервале от 20°C до 800°C позволяет снизить силу процесса штамповки облицовки в 3–4 раза, а предварительный нагрев заготовки практически не влияет на силовые параметры процесса. Наибольшее влияние на величину технологического усилия, необходимого для выполнения процесса штамповки, оказывают условия трения на границе контакта заготовки и инструмента, так увеличение коэффициента трения μ от 0,1 до 0,5 ведет к увеличению силы процесса в 1,6 раз.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 16-48-710824 и гранта правительства Тульской области ДС/69 от 9.08.2017.

1. Киреева А.Е., Кухарь В.Д., Митин О.Н. Оценка силовых режимов штамповки заготовок кумулятивных облицовок малого калибра // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2017. Вып. 12. Ч. 2. С. 23–29.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА, ВОЗНИКАЮЩИХ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАСПАДА СПЕЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА ПРИ УЧЕТЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

С.Л. Дерябин, А.С. Кирьянова

ФГБОУ ВО УрГУПС, Екатеринбург

ASKiryanova@usurt.ru

Рассматриваются двумерные изэнтропические течения в условиях действия силы тяжести. В качестве математической модели используется система уравнений газовой динамики. Для постановки задачи о распаде специального разрыва в системе делается вырожденная замена переменных, а именно: зависимые и независимые переменные меняются ролями [1]. В новых переменных для системы ставится начально-краевая задача с данными на звуковой характеристике и дополнительным условием. Доказывается теорема существования и единственности поставленной начально-краевой задачи в окрестности звуковой характеристики. Численно моделируется закон движения звуковой характеристики, отделяющей волну разрежения от неоднородного покоящегося газа.

Далее решение строится в виде степенных рядов. Для определения коэффициентов рядов выписываются и интегрируются системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Анализ структуры коэффициентов рядов позволил доказать существование построенного решения в области от звуковой характеристики до границы газ-вакуум включительно. Для определения закона движения границы газ-вакуум выписывается квазилинейная система уравнений с частными производными, которая с помощью характеристического параметра сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Численно моделируется закон движения свободной границы, отделяющей волну разрежения от вакуума.

1. Баутин С.П., Дерябин С.Л., Мезенцев А.В., Чуев Н.П. Начально-краевые задачи для моделирования движения сплошной среды с особенностями на свободной границе // Монография. Новосибирск, 2015. 191 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАДКОЙ И ВИХРЕОБРАЗУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ В СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

kiselev.nick.a@gmail.com

Приведены результаты экспериментальных исследований коэффициентов теплоотдачи и сопротивления на гладкой и облученной поверхностях в следе за поперечно установленным цилиндром. Коэффициент сопротивления определялся путем непосредственного взвешивания моделей на однокомпонентных тензометрических весах, для определения коэффициента теплоотдачи применялся метод нестационарного теплообмена.

На расстоянии 796 мм от начала рабочего канала (длина 1080 мм, высота 30 мм и ширина 300 мм) поперек потока (параллельно нижней стенке) устанавливался цилиндр диаметром $d=8$ мм. Зазор между нижней стенкой и цилиндром менялся в диапазоне 0–21 мм (цилиндр устанавливался с зазором в 0–11 мм с шагом 1 мм и с зазором 21 мм). Локальные значения коэффициентов теплоотдачи определялись на расстоянии $x/d=0$ –20.625 от задней кромки цилиндра. Осредненные значения коэффициентов сопротивления определялись на участке $x/d=12.5$ –20.625 [1].

В экспериментах исследовались гладкая поверхность и поверхность с шахматной компоновкой лунок с продольным и поперечным шагами 8 и 9 мм (глубина лунок – 1 мм, диаметр пятна – 7.75 мм).

Получены следующие результаты. Значения коэффициента сопротивления гладкой поверхности c_{xsm}/c_{x0} , отнесенные к коэффициенту сопротивления гладкой поверхности в невозмущенном потоке c_{x0} менялись в диапазоне $c_{xsm}/c_{x0}=(-1.65)$ –(1.95) в зависимости от положения цилиндра и не зависели от числа Рейнольдса набегающего потока. Локальные значения интенсификации теплообмена на гладкой стенке менялись в диапазоне $St_{sm}/St_0=1.0$ –2.65.

Значения относительного коэффициента сопротивления облученной поверхности c_{xd}/c_{xsm} , менялись в диапазоне $c_{xd}/c_{xsm}=(-1.1)$ –(1.3) (увеличивались при уменьшении зазора). Локальные значения интенсификации теплообмена на облученной стенке варьировались в диапазоне $St_d/St_{sm}=0.8$ –1.55 и практически не зависели от положения цилиндра.

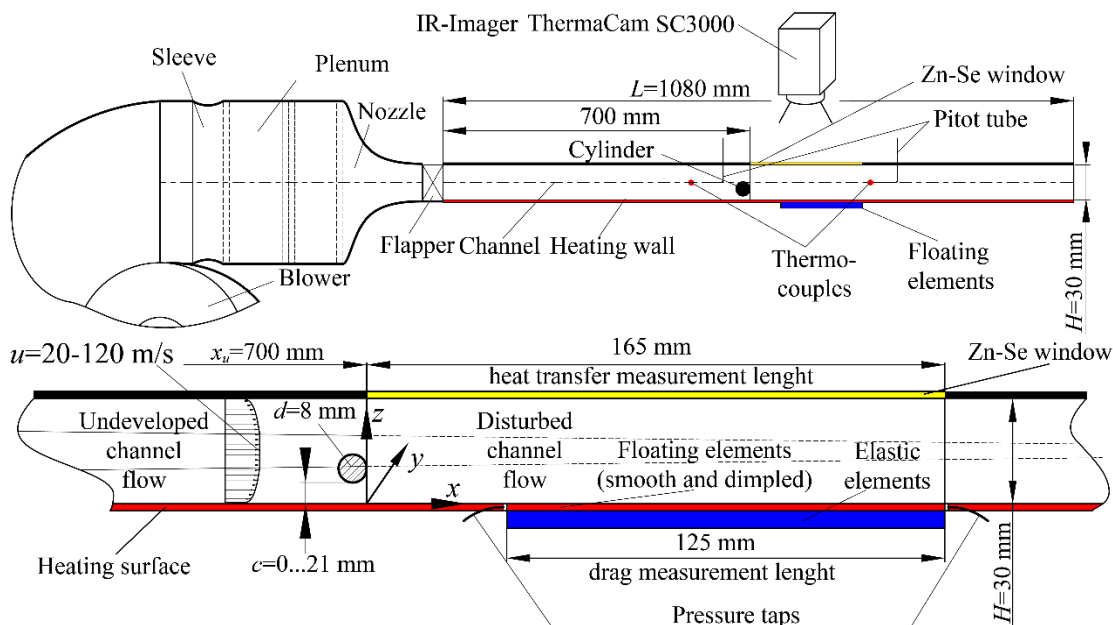


Рис. Схема канала

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-00413 и СП-4006.2018.1.

1. Experimental investigation of the influence of large-scale vortex structures on heat transfer and drag on a smooth wall / N. A. Kiselev, A. G. Zditovets, Y. A. Vinogradov, M. M. Strongin // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891, no. 012149. P. 1–8.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

kiselev.nick.a@gmail.com

Приведены результаты экспериментальных исследований коэффициентов теплоотдачи и сопротивления на гладкой поверхности в следе за поперечно установленным цилиндром. Коэффициент сопротивления определялся путем непосредственного взвешивания моделей на однокомпонентных тензометрических весах с учетом изменения статического давления на длине плавающих элементов. Для определения коэффициента теплоотдачи применялся метод нестационарного теплообмена с использованием ИК-камеры. На расстоянии 796 мм от начала рабочего канала (длина 1080 мм, высота 30 мм и ширина 300 мм) поперек потока (параллельно нижней стенке) устанавливался цилиндр диаметром $d=8$ мм. Зазор между нижней стенкой и цилиндром менялся в диапазоне 0–21 мм (цилиндр устанавливался с зазором в 0–11 мм с шагом 1 мм и с зазором 21 мм). Локальные значения коэффициентов теплоотдачи определялись на расстоянии $x/d=0-20.625$ от задней кромки цилиндра. Осредненные значения коэффициентов сопротивления определялись на участке $x/d=12.5-20.625$.

Получены следующие результаты. Значения коэффициента сопротивления гладкой поверхности c_{xsm}/c_{x0} , отнесенные к коэффициенту сопротивления гладкой поверхности в невозмущенном потоке c_{x0} , менялись в диапазоне $c_{xsm}/c_{x0}=(-1.65)-(1.95)$ в зависимости от положения цилиндра и не зависели от числа Рейнольдса набегающего потока. Минимальные значения $c_{xsm}/c_{x0}=-1.65\pm 0.07$ соответствуют $c=0$ мм (цилиндр расположен на стенке), максимальные значения $c_{xsm}/c_{x0}=-1.96\pm 0.06$ соответствуют $c=0$ мм (цилиндр расположен на оси канала). При дальнейшем увеличении зазора c величина c_{xsm}/c_{x0} начинает уменьшаться и достигает величины $c_{xsm}/c_{x0}=1.08\pm 0.03$ при $c=21$ мм, т.е. при удалении цилиндра от стенки его влияние на динамический пограничный слой на стенке в канале практически не существенно.

Стоит отметить существенную неоднородность в распределении коэффициента теплоотдачи для всех положений цилиндра (кроме случая $c=21$ мм): сначала St_{sm}/St_0 увеличивается от минимальных значений $St_{sm}/St_0=0.97-1.24$ (наблюдаемых непосредственно у задней кромки цилиндра) до максимальных значений $St_{sm}/St_0=1.91-2.64$ в зависимости от положения цилиндра. Положение максимума St_{sm}/St_0 соответствует точке присоединения потока и, в диапазоне $c=2-8$ мм, находится в хорошем соответствии с зависимостью, предложенной в работе [1] для течения на пластине.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-00413 и СП-4006.2018.1.

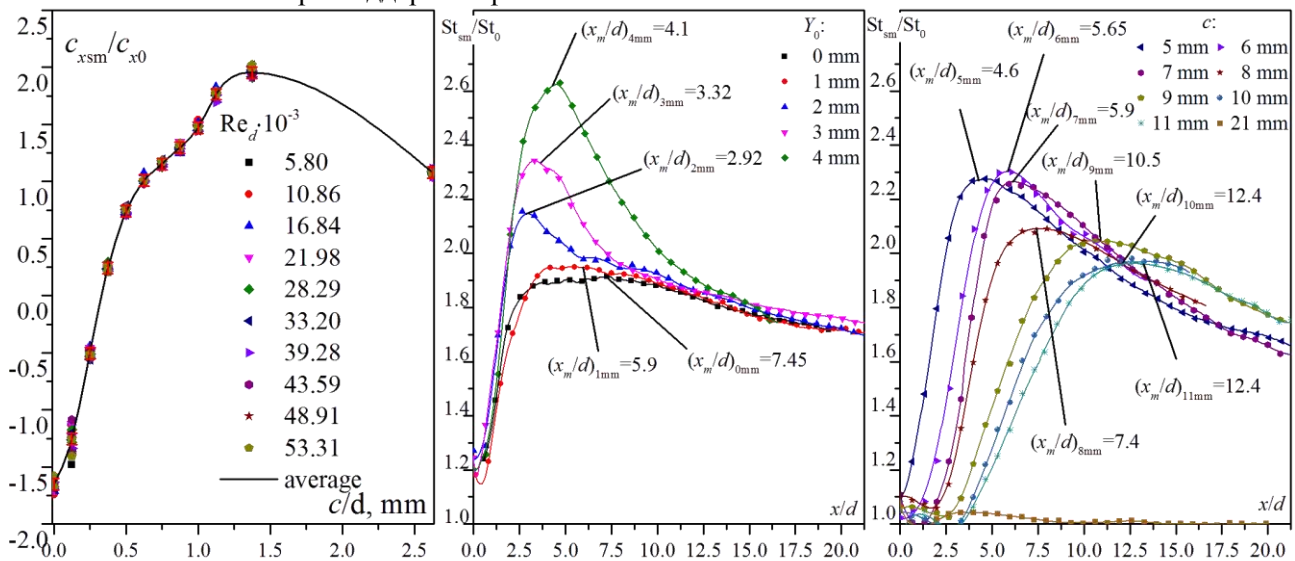


Рис. Результаты измерений

1. Suzuki K. et al. Study on a Turbulent boundary Layer Disturbed by a Cylinder-Effect of Cylinder Size and Position // Turbul. Shear Flows / ed. Durst F. et al. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991. Vol. 7. P. 119–135.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕОБРАЗУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

kiselev.nick.a@gmail.com

Представлены результаты экспериментальных исследований коэффициентов теплоотдачи и сопротивления на вихреобразующей поверхности в следе за поперечно установленным цилиндром. Коэффициент сопротивления определялся путем непосредственного взвешивания моделей на однокомпонентных тензометрических весах с учетом изменения статического давления на длине плавающих элементов. Для определения коэффициента теплоотдачи применялся метод нестационарного теплообмена с использованием ИК-камеры.

На расстоянии 796 мм от начала рабочего канала (длина 1080 мм, высота 30 мм и ширина 300 мм) поперек потока (параллельно нижней стенке) устанавливался цилиндр диаметром $d=8$ мм. Зазор между нижней стенкой и цилиндром менялся в диапазоне 0–21 мм (цилиндр устанавливался с зазором в 0–11 мм с шагом 1 мм и с зазором 21 мм). Локальные значения коэффициентов теплоотдачи определялись на расстоянии $x/d=0-20.625$ от задней кромки цилиндра. Осредненные значения коэффициентов сопротивления определялись на участке $x/d=12.5-20.625$. В экспериментах исследовалась поверхность с шахматной компоновкой лунок с продольным и поперечным шагами 8 и 9 мм (глубина лунок – 1 мм, диаметр пятна – 7.75 мм). Получены следующие результаты:

Значения относительного коэффициента сопротивления c_{xd}/c_{xsm} облученной поверхности при зазоре $c=21$ мм незначительно превышает значение увеличения сопротивления в невозмущенном потоке. Далее величина c_{xd}/c_{xsm} растет при уменьшении зазора c . Это, по-видимому, связано с тем, что величины коэффициентов сопротивления шахматных компоновок в невозмущенном потоке связаны с характерным взаимодействием лунок, расположенных в соседних рядах [1] – внесение крупномасштабных вихревых структур приводит к нарушению данного взаимодействия и увеличению коэффициента сопротивления.

Нанесение лунок приводит к увеличению неоднородности в поле коэффициентов теплоотдачи в следе за цилиндром в сравнении с гладкой стенкой. В первой части лунки (по направлению потока) наблюдается минимум коэффициентов теплоотдачи (по-видимому, вызванный наличием рециркуляционной зоны в этой области), у задней кромки наблюдаются максимальные значения коэффициентов теплоотдачи (область присоединения потока). При рассмотрении полей величин St_d/St_0 стоит отметить увеличение областей минимальных значений внутри лунок непосредственно за цилиндром (в области возвратных течений). Максимальные значения коэффициентов теплоотдачи при этом расположены при тех же значениях x/d , что и для гладкой стенки. Локальные значения интенсификации теплообмена на облученной стенке варьировались в диапазоне $St_d/St_0=0.9-3.2$ в зависимости от положения цилиндра.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-00413 и СП-4006.2018.1.

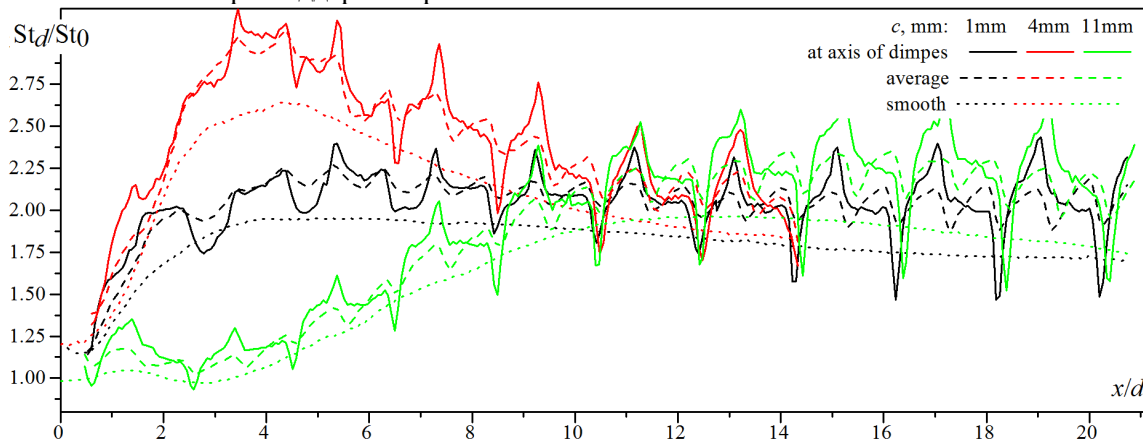


Рис. Результаты измерений

ДВУХТОЧЕЧНЫЕ ТРЕТЬИ СМЕШАННЫЕ КОРРЕЛЯТОРЫ СКОРОСТИ И ГРАДИЕНТА СКОРОСТИ В ОДНОРОДНОЙ ИЗОТРОПНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

А.В. Копьев¹, К.П. Зыбин^{1,2}

¹Физический институт академии наук имени П.Н. Лебедева, Москва

²НИУ «Высшая школа экономики», Москва

kopyev@lpi.ru

На основании колмогоровского закона «4/5» [1, 2] получены аналитические соотношения для тройных двухточечных корреляций градиентов скорости и скорости в однородной изотропной несжимаемой турбулентности. Соответствующий тензор корреляции может быть выражен через скорость диссипации, корреляционную функцию продольного приращения скорости второго порядка и новую скалярную функцию. Некоторые компоненты тензора не зависят от новой функции. Полученные аналитические результаты согласуются с данными прямого численного моделирования стационарной изотропной турбулентности. Новая скалярная функция может быть с большой точностью аппроксимирована в инерционном диапазоне масштабов постоянным значением, зависящим только от скорости диссипации. Обсуждается значение полученных корреляторов в теории турбулентного транспорта [3, 4].



Рис. Гравюра Леонардо да Винчи, изображающая возникновение турбулентного потока

Исследование выполнено во ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-11-01271).

1. Колмогоров А.Н. Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности // ДАН СССР, 1941, 32, 1, 19–21.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика, М: Физматлит, 2006, 736 с.
3. Il'yn A. S., Sirota V. A., Zybin K. P. Statistical properties of the T-exponential of isotropically distributed random matrices // J. Stat. Phys., 2016, 7, 709.
4. Казанцев А.П. Об усилении магнитного поля проводящей жидкостью // ЖЭТФ, 1967, 53, 5 (11), 1806–1813.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ИЗОТРОПНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ, ОСНОВАННАЯ НА ЛИНЕЙНОМ МЕХАНИЗМЕ

А.В. Копьев¹, К.П. Зыбин^{1,2}

¹Физический институт академии наук имени П.Н. Лебедева, Москва

²НИУ «Высшая школа экономики», Москва

kopyev@lpi.ru

Известно, что турбулентность характеризуется перемежаемостью, что проявляется, в частности, в развитии неізотропных нестационарных интенсивных мелкомасштабных вихревых структур [1]. В работе показано, что исходя из общих уравнений динамики жидкости, можно дать количественные оценки явлению раскручивания и вытягивания небольших жидких частиц из инерционного интервала изотропной турбулентности. Само явление, названное ранее пируэт-эффектом [2], раскрывает механизм образования интенсивных структур в мелкомасштабной турбулентности. На основании [3] в работе построена линейная стохастическая лагранжева модель, в которой получено кинетическое уравнение на функцию распределения квадрата косинуса угла между завихренностью и собственным вектором тензора скоростей деформации жидкой частицы, а также аналитически посчитаны асимптотики зависимости от времени этой величины при больших и малых временах [4]. Результаты находятся в хорошем согласии с результатами проведенных ранее экспериментов и численных расчетов [2, 5]. Проведенный анализ показывает, что линейные процессы, возможно, играют основную роль в некоторых процессах принципиально нелинейного явления изотропной турбулентности.

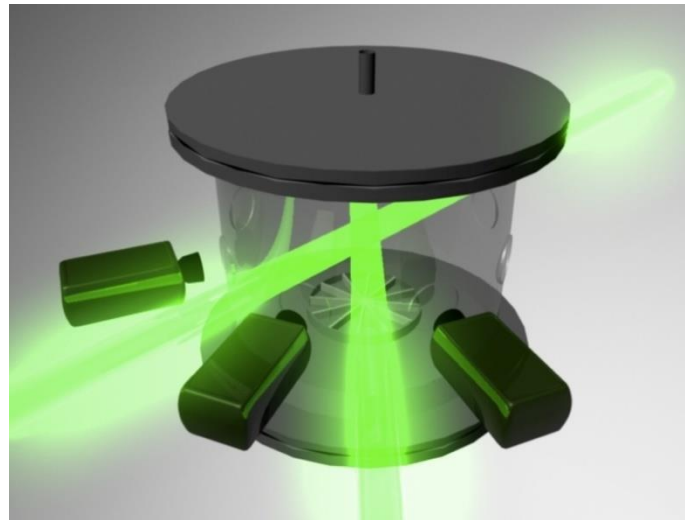


Рис. Установка для экспериментального исследования лагранжевых характеристик изотропной турбулентности [1]

Важность представленных результатов заключается в самом факте применимости линейной стохастической модели в принципиально нелинейном процессе турбулентности. Показано, что линейные эффекты возможно играют главную роль в пируэт-эффекте, который раскрывает механизм образования интенсивных вихревых структур в мелкомасштабной турбулентности.

Исследование выполнено во ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-11-01271).

1. Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение, М: Наука, 1986, 288 с.
2. Xu H., Pumir A., Bodenschatz E. The pirouette effect in turbulent flows // Nat. Phys., 2011, 7, 709.
3. Зыбин К.П., Сирота В.А., Ильин А.С., Гуревич А.В. Генерация мелкомасштабных структур в развитой турбулентности // ЖЭТФ, 2007, 132, 2 (8), 510–523.
4. Зыбин К.П., Копьев А.В. Теоретическая модель возникновения вихревых структур в изотропном турбулентном потоке, основанная на линейном механизме // Изв. РАН. МЖГ, 2018, 4, в печати.
5. Pumir A., Bodenschatz E., Xu H. Tetrahedron deformation and alignment of perceived vorticity and strain in a turbulent flow // Phys. Fluids, 2013, 25, 035101.

СВОЙСТВА ТЕНЗОРА СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ В СЛУЧАЙНЫХ НЕСЖИМАЕМЫХ ПОТОКАХ

А.В. Копьев

Физический институт академии наук имени П.Н. Лебедева, Москва
kopyev@lpi.ru

Рассматриваются свойства симметричной части тензора градиентов скорости, называемого тензором скоростей деформации, в развитом турбулентном потоке несжимаемой жидкости. На основании анализа численных данных [1, 2] обнаружена симметрия распределения тензора в однородном изотропном турбулентном потоке. Аналогичная симметрия получена аналитически для случая гауссового распределения скоростей [3].

Используя аналитическое выражение симметрии удастся показать, что функция распределения нормированного собственного значения тензора [4, 5] имеет универсальный характер в обоих случаях.

Показано, что искажение симметрии распределения для малоинтенсивных пульсаций может быть связано с влиянием гауссовой крупномасштабной силы (или иного стохастического источника, поддерживающего стационарность потока), поскольку имеет ярко выраженный гауссов характер.

Исследование выполнено во ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-11-01271).

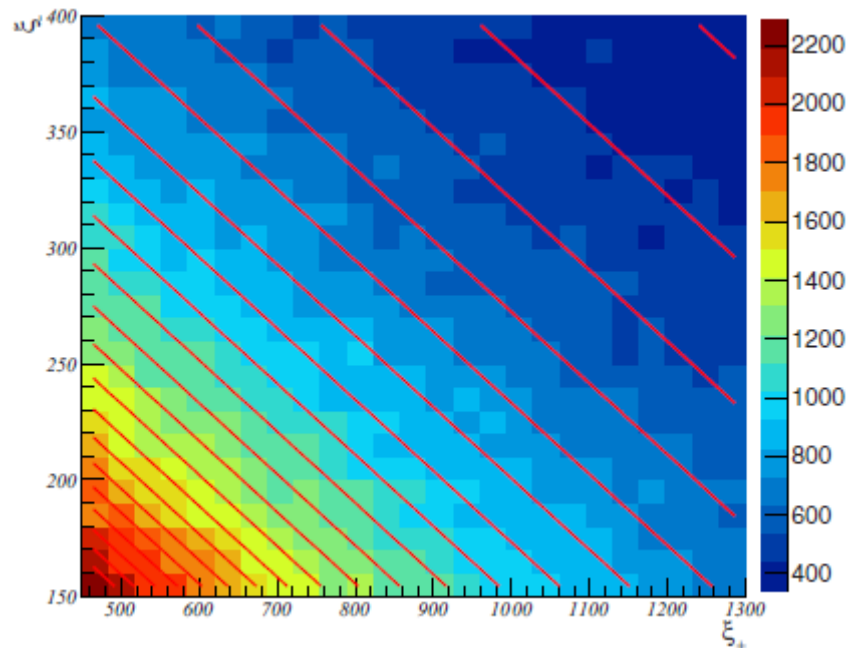


Рис. Численно полученная гистограмма специально введенных инвариантов тензора в изотропном турбулентном потоке [3]. Красные линии отражают наблюдаемую симметрию.

1. Perlman E., Burns R., Li Y., Meneveau C. Data Exploration of Turbulence Simulations using a Database Cluster // Supercomputing SC07, ACM, IEEE., 2007.
2. Li Y., Perlman E., Wan M., Yang Y., Burns R., Meneveau C., Burns R., Chen S., Szalay A., Eyink. G. A public turbulence database cluster and applications to study Lagrangian evolution of velocity increments in turbulence // Journal of Turbulence, 2008, т. 9, № 31.
3. Kopyev A. V. Degeneracy of velocity strain-rate tensor statistics in random isotropic incompressible flows // Phys. Rev. Fluids, 2018, т. 3, 024603.
4. Kerr R. M. Histograms of helicity and strain in numerical turbulence // Phys. Rev. Lett., 1987, т. 59, № 7, 783–786.
5. Lund T. S., Rogers M. M., An improved measure of strain state probability in turbulent flows // Phys. Fluids, 1994, т. 6, № 5, 1839–1847.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА О КОНТАКТЕ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО УДАРНИКА С ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТЬЮ

Е.А. Коровайцева

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
katrell@mail.ru

Рассматривается плоская симметричная нестационарная задача о контакте абсолютно твердого ударника с вязкоупругой полуплоскостью. Используются двумерные уравнения движения вязкоупругой среды при нулевых начальных условиях [1]. В одномерном уравнении движения ударника результирующая контактная сила выражается через напряжение на границе полуплоскости, начальные условия для ударника предполагаются ненулевыми. Рассматриваются два предельных случая условий контакта: жесткое сцепление и свободное проскальзывание. Показано, что для сверхзвукового этапа взаимодействия перемещения и напряжения на границе вязкоупругой полуплоскости совпадают для обоих случаев условий контакта. Выражение для результирующей контактной силы получено для двух типов ядер релаксации: двухпараметрического экспоненциального и ядра Колтунова. Рассмотрено три типа поверхностей, ограничивающих ударник: параболический, эллиптический и гиперболический цилиндры.

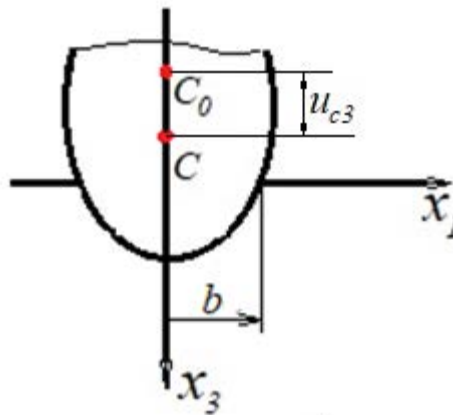


Рис. Геометрия области контакта

Решение уравнения движения ударника проводится численно методом Рунге-Кутты, для вычисления свертки в правой части уравнения используется метод прямоугольников. Численные исследования показали, что для сверхзвукового этапа взаимодействия временные зависимости перемещения и скорости ударника для всех типов поверхностей, ограничивающих ударник, практически совпадают. Наибольшее отличие проявляется для величин изменения радиуса и скорости расширения пятна контакта. Влияние вязкости на указанные параметры процесса контактного взаимодействия на рассматриваемом сверхзвуковом этапе пренебрежимо мало и может быть проиллюстрировано только при принципиальном (на два порядка) увеличении параметров уравнений границы ударника, характеризующих ее пологость.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 16-38-60074 мол_а_дк, 17-08-01146 а).

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

ГОРЕНИЕ ВСПЕНЕННОЙ ЭМУЛЬСИОННО-СУПЕНЗИОННОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ИЗООКТАНА И ЧАСТИЦ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ

А.М. Коршунов, А.Д. Голубков, Е.Е. Коршунова

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
korlex@yandex.ru

Одним из перспективных видов топлив, позволяющих использовать водонасыщенные углеводороды, является вспененная эмульсия [1, 2]. По своей сути вспененная эмульсия - это пена, состоящая из пузырей кислорода, диспергированных в эмульсии. В данной работе рассматривается процесс горения вспененной эмульсии в полукоткрытой трубке (рис. а), в состав которой входят микрочастицы древесного угля (рис. б). Использование частиц древесного угля позволяет регулировать скорость распространения пламени во вспененной эмульсии в достаточно широком диапазоне (рис. в). Важную роль при распространении пламени в пене играет процесс взрывного вскипания жидкой фазы [3]. С одной стороны, влияние микрочастиц древесного угля на скорость горения пены связано с тем, что горящие частицы угля способствуют повышению температуры во фронте пламени, а, следовательно, и интенсивности взрывного вскипания жидкой фазы. С другой стороны, частицы древесного угля ответственны за более тонкое диспергирование воды в процессе распада пены, что наоборот, приводит к росту потерь тепла из зоны горения. Конкуренция между этими процессами определяет немонотонный характер зависимости скорости распространения пламени от концентрации частиц угля (рис. в).

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда №17-19-01392.

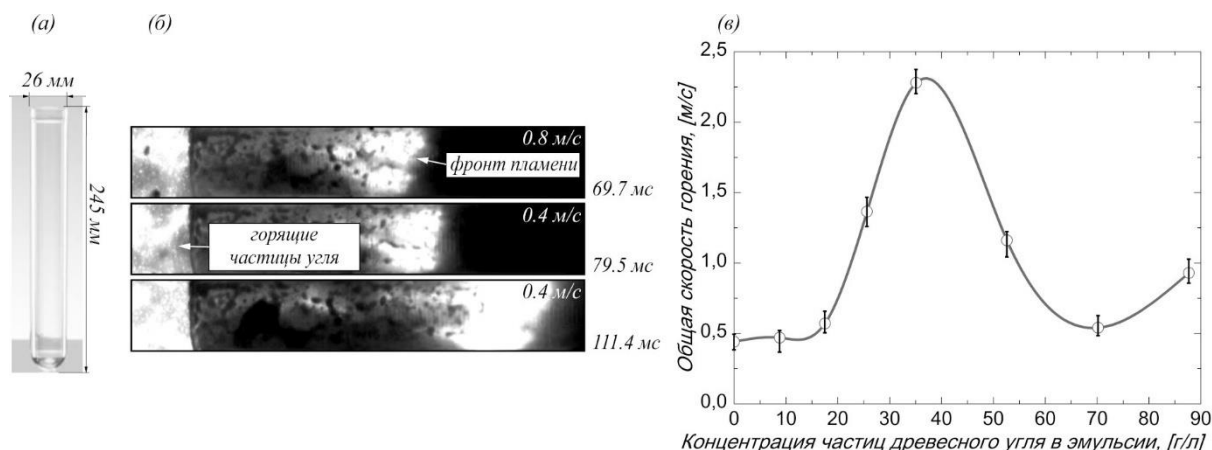


Рис. (а) Рабочая трубка, в которой осуществлялось измерение скорости распространения пламени.
(б) Структура зоны горения (время измеряется с момента воспламенения пены; мгновенные значения скорости пламени представлены для каждого момента времени). (в) Зависимость общей скорости горения от концентрации частиц древесного угля в эмульсии: пена была приготовлена с использованием изооктана (1 мл), воды (1.6 мл), детергента (0.9 мл), перекиси водорода (1.5 мл) и аммиачного раствора сульфата меди (0.7 мл, 1.05 моль/л), средний диаметр частиц древесного угля 67 мкм.

1. B. Kichatov, A. Korshunov, K. Son, E. Son. Combustion of emulsion-based foam //Combustion and Flame. 2016. Т. 172. С. 162–172.
2. B. Kichatov, A. Korshunov, A. Kiverin, E. Son, Methods for regulation of flame speed in the foamed emulsion // Combustion Science and Technology. 2017. Т. 189. №. 12. С. 2095–2114.
3. А.И. Леонтьев, Б.В. Кичатов, А.М. Коршунов. Горение вспененных эмульсий. Москва: Российская академия наук, 2017.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПРЕДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СДВИГОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Л.А. Костырева

АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», Москва
kostyle@inbox.ru

При моделировании в механике процессов, связанных с высокоскоростным нагружением, а также развитием в конструкциях больших деформаций вплоть до разрушения, на первое место выходят экспериментально-вычислительные методы изучения механических свойств материалов. Кроме того, в работах, посвященных исследованию предельных характеристик различных металлов и сплавов [1], показана существенная зависимость последних от вида напряженного состояния.

Сегодня наиболее широко используемым экспериментальным методом идентификации динамических свойств материалов является метод Кольского с использованием разрезного стрежня Гопкинсона и его разнородные модификации [2]. Данный метод покрывает диапазон скоростей деформаций $10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1}$ и в основном используется для построения диаграмм нагружения материала при динамическом сжатии и растяжении. Среди общего объема модификаций метода доля испытаний, на практике реализующих сдвиговое напряженно-деформированное состояние (НДС) в образцах, крайне важных для построения надежных критериев разрушения материалов, относительно мала, в особенности применительно к твердым металлам и сплавам.

Предлагаемый в работе способ испытаний на динамический сдвиг основан на классической схеме метода Кольского на одноосное сжатие, дополненной специальными переходниками из материала, близкого по свойствам к материалу мерных стержней, и исследуемым образцом в форме условного двутавра.

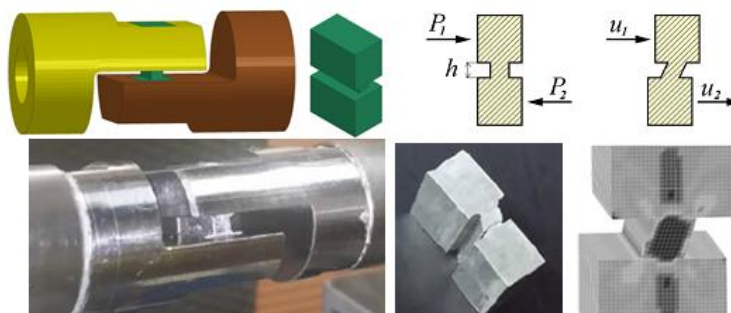


Рис. Испытание на динамический сдвиг: виртуальная модель и схема приложения нагрузок (вверху); практическая реализация эксперимента и сравнение с расчетом

Такая конструкция позволяет реализовать в рабочей области образца НДС, близкое к однородному вплоть до разрушения в режимах простого (по деформациям) и чистого (по напряжениям) сдвига. В процессе испытания регистрируются импульсы (деформации) с мерных стержней, по которым в последствии при помощи приведенных в работе соотношений восстанавливаются величины напряжений, деформаций и скоростей деформаций в образце. Так, величина сдвигового напряжения оказывается пропорциональной отношению площади поперечного сечения стержня к площади поверхности сдвига образца, что, в виду малости последней, позволяет достигать в нем предельных значений деформаций и исследовать процесс разрушения.

Большим преимуществом данного подхода является возможность альтернативного измерения деформаций видимой поверхности образца при помощи систем цифровой корреляции изображений DIC (Digital Image Correlation), использующих видеосъемку высокоскоростными камерами.

1. Carney K.S., DuBois P.A., Buyuk M., Kan S. Generalized Three-Dimensional Definition Description and Derived Limits of the Triaxial Failure of Metals // J. Aerosp. Engrg. 2009. Vol. 22. Issue 3. P. 280–286.

2. Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Linvinchuk S.Yu. Use of Hopkinson Method and its Modifications in the USSR and Russia // Proceedings of Hopkinson Centenary Conference. Cambridge. 2014. P. 69–100.

О РАЗВИТИИ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С УСРЕДНЕНИЕМ ПО АНСАМБЛЮ РЕАЛИЗАЦИЙ

Б.И. Краснопольский

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
krasnopolsky@imec.msu.ru

Моделирование турбулентных течений жидкости и газа, вероятно, является одной из наиболее распространенных прикладных задач математической физики, для решения которых применяются суперкомпьютеры. Использование вихреразрешающих методов позволяет получить высокую точность результатов моделирования, однако требует больших расчетных сеток и длительных расчетов по времени для набора турбулентной статистики. Одним из способов повышения эффективности таких расчетов является использование алгоритма расчета турбулентных течений, предложенного в [1] и [2], который сочетает традиционный подход на основе осреднения по времени с усреднением по ансамблю реализаций этого течения. Это позволяет уменьшить длину интервала набора статистики для каждой из реализаций и заменить один длительный расчет на расчеты нескольких более коротких интервалов интегрирования по времени.

Особенностью данного алгоритма является необходимость генерации множества некоррелированных статистически стационарных турбулентных полей, используемых в качестве начальных данных при осреднении. Простейшим способом решения данной проблемы является моделирование процесса перестроения течения и выхода на турбулентный режим для различных начальных данных. Этот подход на практике обеспечивает некоррелированность полей скоростей, но требует значительных вычислительных затрат, сокращая преимущества метода. В настоящей работе предлагается оптимизированный способ генерации начальных турбулентных полей, основанный на внесении случайных возмущений в процессе выхода течения на турбулентный режим. Обсуждается область применимости данного подхода и возможное ускорение расчета. Полученные оценки подтверждаются результатами численных расчетов, которые демонстрируют существенное расширение области применимости метода и 10-20% повышение эффективности расчетов в целом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-10075). Для расчетов использовалось оборудование Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

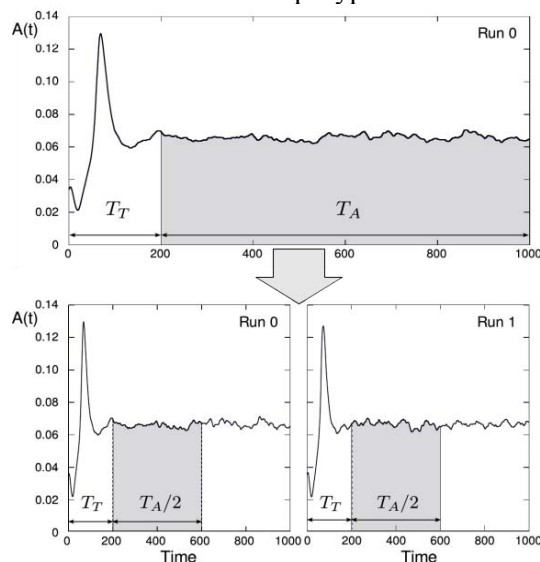


Рис. Пример распараллеливания вычислений по времени за счет моделирования нескольких реализаций

1. Makarashvili V., Merzari E., Obabko A., Siegel A., Fischer P. A performance analysis of ensemble averaging for high fidelity turbulence simulations at the strong scaling limit // *Computer Physics Communications*, vol. 219, p. 236-245, 2017. doi: 10.1016/j.cpc.2017.05.023.

2. Krasnopolsky B. An Approach for Accelerating Incompressible Turbulent Flow Simulations Based on Simultaneous Modelling of Multiple Ensembles // *Computer Physics Communications*, 2018. doi:10.1016/j.cpc.2018.03.023.

ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ РАСЧЕТА ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С УСРЕДНЕНИЕМ ПО АНСАМБЛЮ РЕАЛИЗАЦИЙ

Б.И. Краснопольский

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
krasnopolsky@imec.msu.ru

Рост потенциала высокопроизводительных вычислительных систем открывает новые возможности в плане разработки перспективных численных методов для решения задач математической физики. Одними из приложений, где оказываются востребованными высокопроизводительные вычисления, являются задачи моделирования турбулентных течений в рамках вихреразрешающих методов. В [1, 2] был предложен новый подход ускорения расчетов статистически стационарных турбулентных течений, основанный на комбинации осреднения по времени и по ансамблю независимых реализаций одного и того же турбулентного течения. Указанный подход позволяет сократить длительность расчета для каждого из состояний, и, в некотором смысле, распараллелить вычисления по времени.

В работах [1] и [2] были использованы различные стратегии для расчета множества состояний течения. В [1] предлагается проводить расчет каждого состояния независимо, и ускорять расчет за счет увеличения количества вычислительных устройств. В [2], наоборот, все расчеты выполняются в рамках одного запуска на заданном количестве вычислительных ресурсов, а ускорение времени решения задачи достигается за счет повышения вычислительной эффективности используемых численных методов. Вообще говоря, указанные публикации реализуют два предельных случая более общей схемы, сочетающей расчет нескольких состояний в рамках нескольких независимых расчетов. В настоящем докладе рассматривается обобщенная расчетная схема и предлагается критерий выбора оптимальной конфигурации расчета [3]. Предложенные теоретические оценки сопоставляются с результатами численных экспериментов, проведенных на примере задачи об обтекании турбулентным потоком массива кубов, расположенных на стенке плоского канала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-10075). Для расчетов использовалось оборудование Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

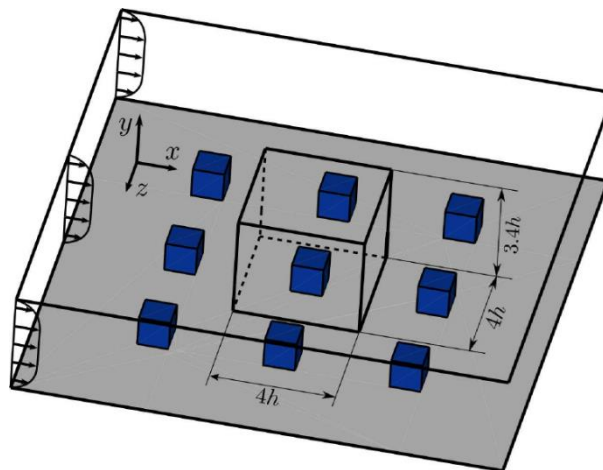


Рис. Схема расчетной области задачи обтекания массива кубов турбулентным потоком

1. Makarashvili V., Merzari E., Obabko A., Siegel A., Fischer P. A performance analysis of ensemble averaging for high fidelity turbulence simulations at the strong scaling limit // *Computer Physics Communications*, vol. 219, p. 236–245, 2017. doi: 10.1016/j.cpc.2017.05.023.
2. Krasnopolsky B. An Approach for Accelerating Incompressible Turbulent Flow Simulations Based on Simultaneous Modelling of Multiple Ensembles // *Computer Physics Communications*, 2018. doi:10.1016/j.cpc.2018.03.023.
3. Krasnopolsky B. Optimal strategy for modelling turbulent flows with ensemble averaging on high performance computing systems // *Lobachevskii Journal of Mathematics*, vol. 39, № 4, p. 533–542, 2018. doi: 10.1134/S199508021804008X.

ИЗМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

К.В. Курашкин

Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород
kurashkinkv@yandex.ru

Исследование нелинейных упругих свойств твердых тел с дефектами и неоднородностями мезоскопического масштаба представляет интерес для развития высокочувствительных методов нелинейной акустической диагностики, а также других приложений, например, акустического метода контроля остаточных напряжений в сварных соединениях [1]. В металлах структурная нелинейность связана с накоплением пластической деформации. При пластическом деформировании поликристаллического металла могут происходить накопление микродефектов, эволюция дислокационной структуры, фрагментация зерен, изменение текстуры, выделение новых фаз и некоторые другие процессы, которые заметно влияют на эффективные упругие свойства и скорости распространения упругих волн [2, 3]. Исследование влияния пластического деформирования на нелинейные упругие свойства металлических сплавов актуально для дальнейшего развития методов нелинейной акустической диагностики.

Нелинейные упругие свойства изотропного твердого тела полностью описываются тремя независимыми модулями упругости третьего порядка, например, l , m и n . В твердом теле одним из проявлений нелинейности упругих свойств является акустоупругий эффект – зависимость скорости распространения упругой волны от статического напряжения. Модули упругости l , m и n можно определить в результате акустомеханических испытаний образцов по зависимостям скоростей продольной и двух поперечных упругих волн от внешнего статического напряжения.

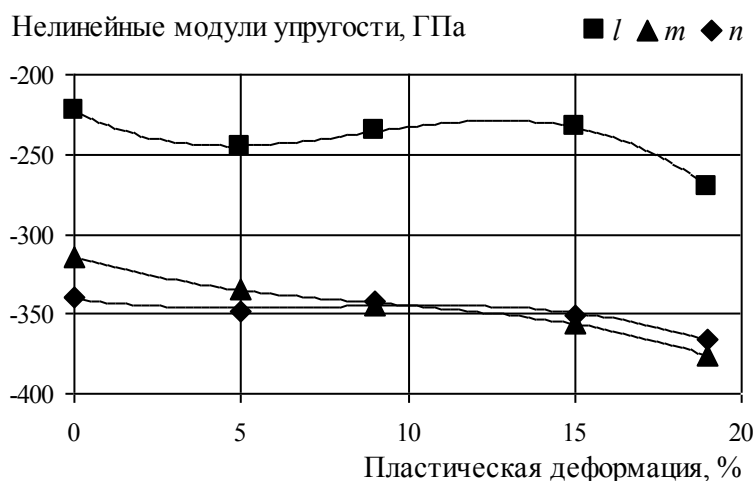


Рис. Зависимость нелинейных модулей от пластической деформации

Результаты акустомеханических испытаний образца из алюминиевого сплава показали, что при пластическом деформировании нелинейные модули упругости существенно изменяются, что объясняется накоплением структурной поврежденности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 гг. по теме № 0035-2014-0402, номер государственной регистрации 01201458047.

1. Курашкин К.В. Оценка напряжений в сварных соединениях с помощью акустического метода // Контроль. Диагностика. 2016. № 10. С. 52–56.

2. Гончар А.В., Мишакин В.В., Ключников В.А., Курашкин К.В. Изменение упругих характеристик метастабильной аустенитной стали при циклическом деформировании // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 4. С. 518–521.

3. Мишакин В.В., Гончар А.В., Курашкин К.В., Данилова Н.В. Исследование разрушения при статическом нагружении сварных соединений акустическим методом // Тяжелое машиностроение. 2009. № 7. С. 27–30.

БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИРУРГИЧЕСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ ПРИ ЛЕЧЕНИИ ЖЕЛЧНОКАМЕННОЙ БОЛЕЗНИ И ЕЁ ОСЛОЖНЕНИЙ

А.Г. Кучумов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kuchymov@inbox.ru

Желчь участвует в переваривании жиров и регуляции пищеварения. Динамика течения желчи зависит от эффективности работы желчного пузыря, играющего значительную роль в физиологии билиарной системы. Некоторые факторы, такие как беременность, прием некоторых лекарственных препаратов (влияющих на обмен холестерина и билирубина), ожирение, голодание, употребление жирной пищи, нарушения метаболизма, сахарный диабет и др. приводят к изменениям химического состава желчи, которая приобретает способность образовывать желчные камни (так называемая литогенная желчь). Другой причиной образования желчных камней является неправильная работа желчного пузыря на этапах наполнения и опорожнения.

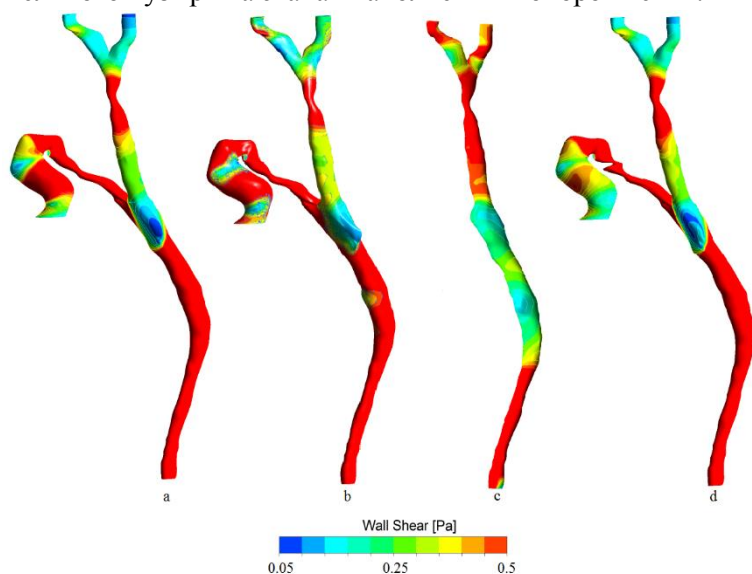


Рис. Распределение сдвиговых напряжений на стенке во внепеченочных протоках при опорожнении желчного пузыря: а – течение нормальной желчи, б – течение литогенной желчи, с – течение желчи в протоках после холецистэктомии, д – течение литогенной желчи в случае присутствия камня в пузырном протоке

Холецистэктомия (удаление хирургического желчного пузыря) – наиболее часто выполняемая операция при лечении желчнокаменной болезни. Тем не менее, следует отметить, что результаты операции не всегда успешны. Для анализа пост-операционных осложнений была разработана индивидуализированная модель течения желчи во внепеченочных желчных протоках с учётом взаимодействия «жидкость-твёрдое тело». Трёхмерная геометрия внепеченочных желчных протоков была создана на основе обработки МРТ изображений реальных пациентов. Была исследована реология желчи в норме и при патологии, а также выполнены исследования по нахождению механических свойств желчных протоков из эксперимента на раздувание. В результате

моделирования можно оценить распределение скоростей, давлений, сдвиговых напряжений в норме (рис. а), при патологии (рис. б), после удаления желчного пузыря (рис. с), при присутствии камня в пузырном протоке (рис. д). В работе представлены результаты индивидуализированного моделирования хирургических вмешательств (холецистэктомия, стентирование, закрытие передней брюшной стенки), которые легли в основу работы программного продукта по принятию решений в хирургии желчнокаменной болезни.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 16-08-00718 и гранта Государственное задание 2017-2019 шифр проекта 19.7286.2017/8.9.

1. Kuchumov A.G., Gilev V.A., Popov V.A., Samartsev V.A., Gavrilov V.A. Non-Newtonian flow of pathological bile in the biliary system: experimental investigation and CFD simulations // Korea–Australia Rheology Journal. 2014. Vol. 26. P. 81–90.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НЕСОВЕРШЕНСТВ ГЕОМЕТРИИ ВОЛОКНА ТИПА ПАНДА НА ЕГО ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТА С ОПРАВКОЙ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Ю.И. Лесникова, А.Н. Труфанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ant@pstu.ru

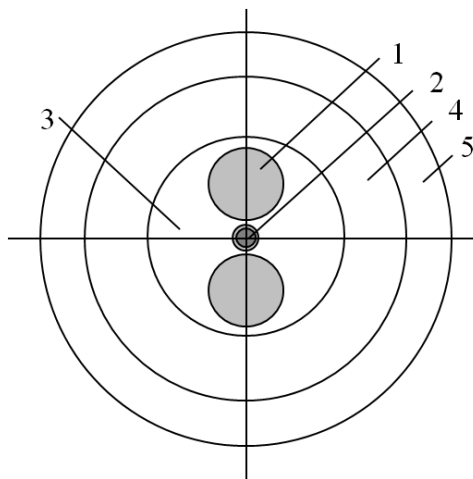


Рис. Схема поперечного сечения волокна.
1 – силовой стержень (SiO_2 , легированный B_2O_3 и P_2O_5), 2 – светопроводящая жила (SiO_2 , легированный GeO_2), 3 – основной материал волокна (SiO_2), 4 – внутреннее защитно-упрочняющее покрытие, 5 – внешнее защитно-упрочняющее покрытие.

В волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) в качестве чувствительного элемента используют одномодовое анизотропное волокно типа Панда (Рис.), способное сохранять поляризацию вводимого в него излучения. Для этого в конструкцию волокна включены специальные силовые элементы с отличным от остального материала коэффициентом температурного расширения. При охлаждении такого волокна после вытяжки формируются неоднородные поля остаточных технологических напряжений, которые в силу известных фотоупругих эффектов влияют на оптические характеристики светопроводящей жилы.

Процесс изготовления анизотропного волокна состоит из большого количества этапов, что с учетом несовершенства технологии производства приводит к отклонениям геометрических параметров его конструктивных элементов от проектных значений, что в свою очередь оказывает влияние на напряженное состояние и оптические характеристики в целом [1].

Известно также, что на характеристики чувствительного контура, обусловленные конструкцией и технологией изготовления,

используемого в нем волокна, оказывают существенное влияние тепловые и механические воздействия, которые вносят искажения в сигнал ВОГ и приводят к возникновению «кажущейся» угловой скорости.

В работе рассмотрен один из этапов производственного процесса изготовления ВОГ, так называемая "технологическая проба", при которой на оправку с натягом в один слой наматывается волокно и в условиях термоцикла в диапазоне от -60°C до 60°C осуществляется контроль соответствия проектным значениям оптических характеристик. Методами численного моделирования выполнен анализ влияния отклонений геометрических параметров конструктивных элементов анизотропного оптического волокна от проектных значений на его оптико-механические характеристики, с учетом контактного взаимодействия между оправкой и волокном, а также реологических свойств двухслойного полимерного защитно-упрочняющего покрытия, в котором в рассматриваемом диапазоне изменения температур происходят релаксационные переходы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-48-590660 p_a.

1. Труфанов А.Н., Труфанов Н.А., Семенов Н.В., Стрелкова Н.М. Влияние технологических несовершенств формы светопроводящей жилы на напряженное состояние и оптические характеристики оптоволокна типа PANDA // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.

ПОЛОСЫ ЧЕРНОВА – ЛЮДЕРСА В БИМЕТАЛЛИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ

Ю.В. Ли, С.А. Баранникова, Л.Б. Зуев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
jul2207@mail.ru

На протяжении последних десятилетий изучение процесса локализации пластической деформации на макромасштабном уровне является одной из наиболее сложных проблем, связанных с пластическим течением материалов.

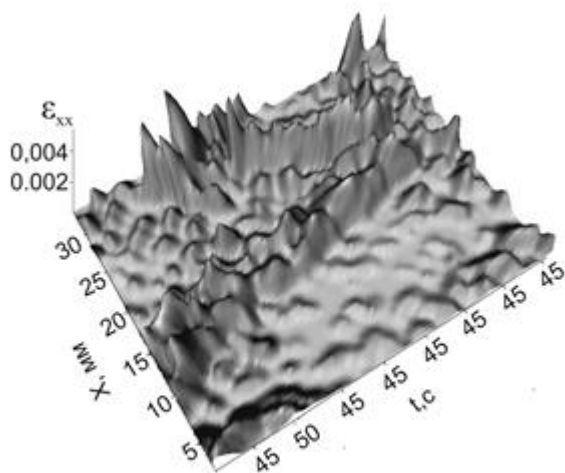
Деформационному поведению многослойных материалов при интенсивной пластической деформации посвящено ограниченное количество работ. К числу таких материалов относятся двухслойные металлические композиты – биметаллы, в том числе и антикоррозионные биметаллы, которые достаточно устойчивы к воздействию агрессивных сред и обладают высокими механическими характеристиками [1].

Проведенные исследования позволили определить основные закономерности распространения фронтов локализации пластической деформации в процессе растяжения биметалла марки Ст.3+12X18Н10Т.

Показано, что пластическая деформация биметалла начинается с зарождения фронтов полос Чернова-Людерса (ПЧЛ) в областях сопряжения биметалла на концентраторах напряжений, возникающих на границе раздела материалов. Анализ картин локализации пластической деформации показал, что ПЧЛ распространяются в основном и плакирующем слое материала с разными скоростями. Выявлено, что при зарождении ПЧЛ ее два фронта движутся в основном слое Ст.3 со

скоростями $V_1 = 0.8 \cdot 10^{-4}$ м/с и $V_2 = 2.3 \cdot 10^{-4}$ м/с. В верхнем плакирующем слое материала 12X18Н9Т распространяется только один фронт ПЧЛ со скоростью $V_2 = 2.4 \cdot 10^{-4}$ м/с, а в нижнем плакирующем слое 12X18Н9Т распространяются два фронта ПЧЛ в противоположных направлениях со скоростями $V_1 = 0.7 \cdot 10^{-4}$ м/с, $V_2 = 2.3 \cdot 10^{-4}$ м/с. Плакирующий слой нержавеющей стали толщиной 750 мкм приводит к сокращению площадки текучести биметалла, не подавляет образование ПЧЛ, приводит к увеличению скорости распространения фронтов ПЧЛ в основном слое и уменьшает распространение ПЧЛ во всех слоях биметалла.

Разрушение материала связано с неоднородным распределением пластической деформации в областях, связанных с формированием концентраторов напряжений в переходном слое между основным и плакирующим слоем материала.



Распространение полос Чернова – Людерса
в биметалле по длине образца

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-19-10025.

1. Трыков Ю.П., Сергиенко А.С., Гуревич Л.М., С.А. Булаева, Даненко В.Ф. Изменение микромеханических свойств биметаллической проволоки при деформировании // Известия Вологодского государственного технического университета / Волг. ГТУ. Волгоград. 2009. Т.59. № 11. С. 54.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЕТА И СОУДАРЕНИЙ ОСКОЛКОВ МЕТЕОРНОГО ТЕЛА

В.Т. Лукашенко¹, Ф.А. Максимов^{1,2}

¹Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

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

lukashenko-vt@yandex.ru

При полете в атмосфере метеорное тело со временем разрушается под воздействием увеличивающегося скоростного напора, а также нагрева. В случае, если метеорное тело является достаточно массивным, то оно может расколоться на отдельные фрагменты – осколки. Данные осколки затем продолжают свое движение в атмосфере совместно как группа тел.

Моделирование сверхзвукового полета группы осколков метеорного тела является актуальной проблемой вычислительной механики. При этом возникает необходимость рассматривать большое количество вариантов возможных систем осколков в зависимости от: 1) количества фрагментов, на которые распадается метеорное тело; 2) положения осколков по отношению друг к другу; 3) размеров, форм и плотности образующихся фрагментов. В связи с этим для моделирования динамики полета таких систем целесообразным представляется решать сопряженную аэродинамическую и баллистическую задачи, и авторами был разработан метод численного расчета [1].

Представленный метод оказалось возможным дополнить алгоритмом для моделирования соударений между отдельными телами. Если тела имеют простейшую форму, например для плоской задачи – форму круговых цилиндров с радиусами R_i и R_j , то будем считать, что между i -ым и j -ым

телом происходит абсолютно упругий удар при $\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} < R_i + R_j + C$, $C = const$.

При помощи данного подхода рассмотрена задача о сверхзвуковом полете двух осколков метеорного тела, изначально расположенных на одной линии вдоль вектора скорости. Так как лидирующее тело имеет большее сопротивление, то отстающее тело будет его догонять, постепенно втягиваясь в след лидирующего тела [2]. В результате тела столкнутся, обменяются импульсом и разлетятся. Со временем из-за меньшего аэродинамического сопротивления отстающее тело не только компенсирует разность скоростей тел, но и наберет скорость достаточную для того, чтобы опять догнать лидирующее тело, тела опять столкнутся, и процесс повторится (Рис.).

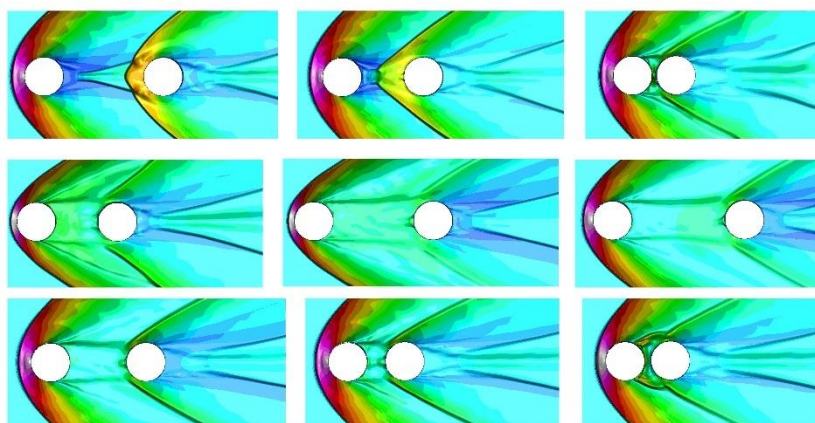


Рис. Изменение картины течения со временем при полете
двух осколков метеорного тела друг за другом (число Маха $M=6$)

Характер изменения амплитуды колебаний со временем позволяет предположить, что существует некоторое расстояние, которое является равновесным для системы в заданных условиях.

1. Лукашенко В.Т., Максимов Ф.А. Математическая модель разлета осколков метеорного тела после разрушения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Вып. 9

2. Барри Н.Г. Аэродинамика фрагментов метеорного тела. Эффект коллимации // Астрономический вестник. 2010. Т 44. № 1. С. 59–64.

ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ: УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ

В.Г. Луцик, М.С. Макарова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
mariia.makarova@gmail.com

Проведено численное исследование температурной стратификации при отсосе газа из турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковом потоке на проницаемой поверхности при наличии продольного градиента давления. Постановка задачи принималась, как в [1-3]. Исследовано совместное влияние чисел Прандтля и Маха набегающего потока, расхода отсасываемого газа, а также градиента давления на величину температурной стратификации как в ускоренных, так и замедленных потоках. За параметр ускорения (торможения) потока принималась величина:

$$K = \frac{v}{u_e^2} \frac{du_e}{dx}$$

С целью последующего сравнения результатов расчеты проводились при постоянном общем расходе отсасываемого газа для всех рассмотренных вариантов. Было показано, что наиболее сильно стратификация проявляется для газов с малыми значениями числа Прандтля в сверхзвуковом потоке с торможением. При этом наличие отрицательного градиента давления уменьшает величину стратификации по сравнению с безградиентным и заторможенным течением. Предельные значения разности температур между температурой торможения набегающего потока и средней температурой отсасываемого газа (величина стратификации) в заторможенном потоке превосходят таковые значения температурной стратификации для безградиентного потока на воздухе - на 10 К, на смеси He-Xe – на 70 К (Рис.).

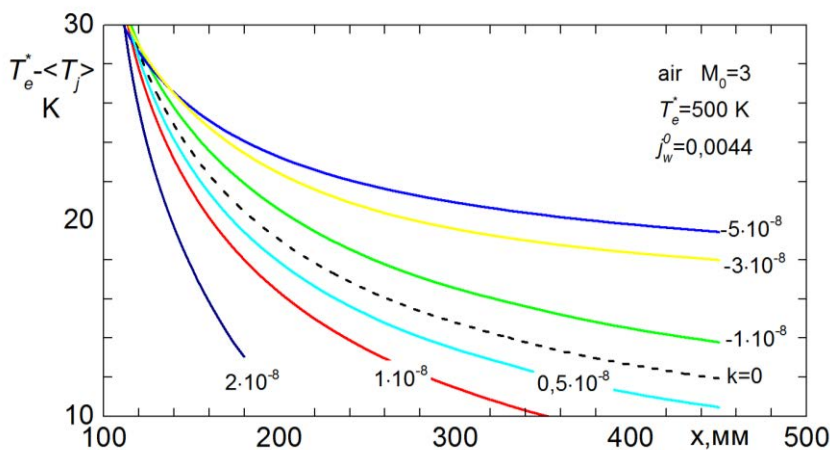


Рис. Изменение величины температурной стратификации по длине пористой пластины для ряда значений параметра ускорения (торможения) K (расчеты для воздуха)

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

1. Leontiev, A.I., Lushchik, V.G., and Makarova, M.S., Temperature Stratification under Suction of a Boundary Layer from a Supersonic Flow, J. High Temp., vol. 50, no. 6. pp. 739-743, 2012.
2. Lushchik, V.G., Pavel'ev, A.A. and Yakubenko, A.E., Three-parameter Model of Shear Turbulence, J. Fluid Dyn., vol.13, no. 3, pp. 350–360, 1978.
3. Leontiev, A.I., Lushchik, V.G., and Makarova, M.S., The Temperature Recovery Factor in a Boundary Layer on a Permeable Plate, J. High Temp., vol.55, no. 2., pp. 246-252, 2017.

ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ: УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ОТСОСА ГАЗА НА СТЕНКЕ

В.Г. Луцик, М.С. Макарова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
mariia.makarova@gmail.com

Методом газодинамической температурной стратификации (газодинамического энергоразделения) принято считать процесс перераспределения полного теплосодержания газового потока, который осуществляется без совершения газом внешней работы и при отсутствии теплообмена с окружающей средой. В задаче о совместном обтекании плоской пластины сверх- и дозвуковыми потоками с одинаковыми параметрами торможения со стороны сверхзвукового потока температура восстановления на стенке отличается от полной температуры газа, тогда как со стороны дозвукового потока данные величины практически идентичны. Возникает разность температур на стенке и, следовательно, тепловой поток, направление которого зависит от числа Прандтля Pr газа. При этом установлено, что вдув газа из дозвукового потока в сверхзвуковой уменьшает переданную тепловую мощность и стратификацию между потоками, в то время как отсос газа из сверхзвукового потока – увеличивает [1].

В рамках исследования данного метода применительно к плоской поверхности авторами была подробно рассмотрена задача внешнего обтекания проницаемой пластины потоком сжимаемого газа с организацией отсоса на стенке. Исследовано влияние чисел Прандтля и Маха набегающего потока на величину температурной стратификации, которая зависит от интенсивности отсоса газа [2]. Наиболее сильно стратификация проявляется для газов с малыми значениями числа Прандтля (смеси He-Xe, He-Ar). Было исследовано влияние ступенчатого отсоса различной интенсивности на величину температурной стратификации. Показано, что для ряда комбинаций пористых вставок различной длины с переменной интенсивностью отсоса можно получить значительную разность между средней температурой газа в пограничном слое и средней температурой отсасываемого газа.

Работа поддержана РФФИ (№14-19-00499).

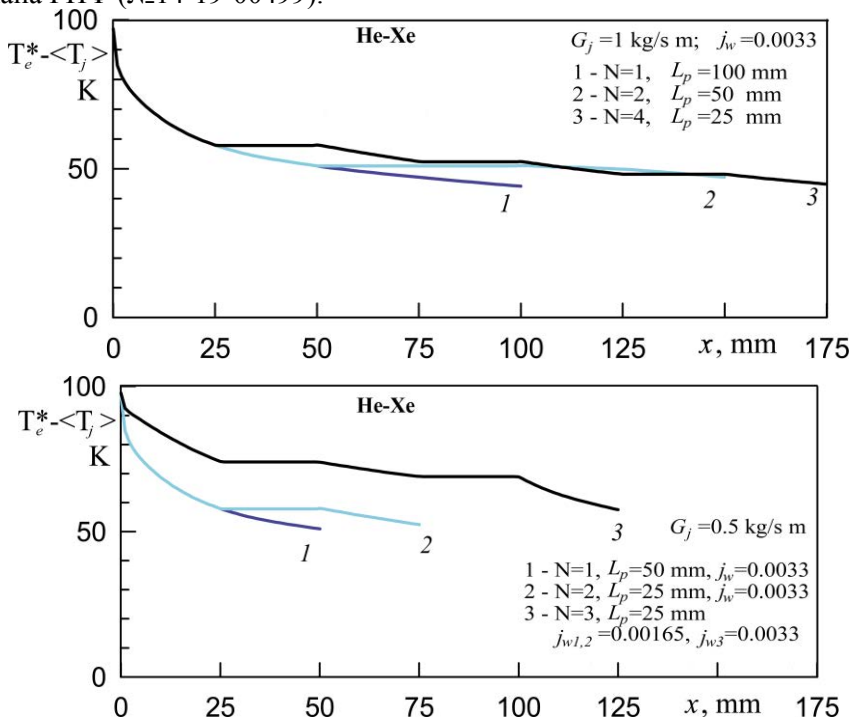


Рис. Изменение величины температурной стратификации по длине для ряда пористых вставок соответствующей длины и расхода отсасываемого газа

1. Leontiev, A.I., Lushchik, V.G., and Makarova, M.S., Temperature Stratification under Suction of a Boundary Layer from a Supersonic Flow, J. High Temp., vol. 50, no. 6. pp. 739-743, 2012.
2. Leontiev, A.I., Lushchik, V.G., and Makarova, M.S., The Temperature Recovery Factor in a Boundary Layer on a Permeable Plate, J. High Temp., vol.55, no. 2., pp. 246-252, 2017.

НЕЛИНЕЙНОЕ РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОГО ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ

А.Г. Макоед, П.Н. Конон

Белорусский государственный университет, Минск
anastasiya_makoed@rambler.ru

Струйные течения жидкости встречаются в различных технологических процессах. Так, процесс производства минеральной ваты дутьевым способом состоит в разрушении струи минерального расплава высокоскоростным газовым потоком со скоростью около 200 м/с. Чтобы увеличить интенсивность распада струй, предлагается повышать внешнее давление.

Теории струйных течений посвящено достаточно большое количество работ [1,2]. В книге [3] отражены исследования устойчивости капиллярных струй в линейном приближении, а также в нелинейном случае без учета внешнего воздействия. В данном исследовании рассматривается нелинейное развитие осесимметричных капиллярных волн, возникающих в струе жидкости при наличии переменного по времени внешнего давления после потери устойчивости. Исследования течения проводятся на основе приближения пограничного слоя в случае достаточно длинных волн, когда составляющие скорости зависят только от осевой координаты. Это позволяет перейти к изучению невязкого струйного течения. Решение полученной системы в относительной движущейся с фазовой скоростью волны системе координат ищется в виде разложения в ряд Фурье с членами до второго порядка включительно. Выведенные эволюционные уравнения исследуются численно методом Рунге-Кутты с постоянным шагом по времени при различных начальных возмущениях.

Наиболее неустойчивыми являются длинноволновые возмущения с $0 < \alpha < \alpha_{\text{опт}}$, где $\alpha_{\text{опт}} = 0.7$, что примерно соответствует максимально растущим возмущениям по линейной теории устойчивости. При начальных значениях времени и модах $0 < \alpha < \alpha_{\text{опт}}$ возмущения достаточно малы, и форма поверхности близка к гармонической. С ростом времени становится заметна роль второй гармоники на развитие возмущений. Колебания становятся нелинейными и видно образование второго максимума на длине волны. Наличие второго максимума поверхности определяет возможность образования капель разного размера, что наблюдается в действительности при распаде струй. С учетом полученных результатов можно сделать вывод о том, что с увеличением влияния внешнего давления время распада струи на капли, когда в ней появляются перетяжки, уменьшается, и возмущения развиваются более интенсивно. При волновых числах $\alpha_{\text{опт}} < \alpha < 1$ с ростом времени возмущения возрастают, но форма поверхности остается близка к гармонической. Если $\alpha > 1$, то течение становится устойчивым. С увеличением начального возмущения поверхности струи время распада уменьшается.

В результате исследований определены области неустойчивых возмущений, форма поверхности струи, продольная и радиальная составляющие скорости течения. Найдено время распада в зависимости от начальных возмущений поверхности и волнового числа. Следует отметить, что определение формы слоя позволяет вычислить ускорения точек поверхности, которые используются в формуле расчета диаметра струй при дутьевом способе образования минеральных волокон [4,5].

1. Шкадов В.Я., Маркова М.М. Нелинейное развитие капиллярных волн в струе жидкости // Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, №3, с.30–37.

2. Чесноков Ю.Г. Нелинейное развитие капиллярных волн в струе вязкой жидкости // Журнал технической физики, 2000, т.70, вып.8, с.31–38.

3. Шкадов В.Я. Некоторые методы и задачи теории гидродинамической устойчивости // Ин-т механики МГУ. Научн. тр. - М., 1973. Вып. 25. 192 с.

4. Кулаго А.Е., Конон П.Н. Определение ускорений точек поверхности возмущенной струи Сб. трудов ВНИПИ Теплопроект «Конструкция и строительство специальных сооружений». М., 1983. С. 39–48.

5. Конон П.Н., Макоед А.Г. Исследования струйных течений жидкости с учетом внешнего воздействия // Международный научно-технический журнал «Теоретическая и прикладная механика». Минск 2018. Вып. 33. С.426–429.

ВОЗМУЩЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ СЛОЕВ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ И МАССОВЫХ СИЛ

А.И. Ермоленко, А.Г. Макоед, П.Н. Конон

УО «Белорусский государственный университет», Минск
anastasiya_makoed@rambler.ru

В работе исследовано плоское движение тонких несмешивающихся слоев вязких жидкостей на внешней поверхности горизонтально расположенного, вращающегося с постоянной угловой скоростью цилиндра в поле сил тяжести и инерции. Подобного рода течения можно использовать при нанесении двухслойных покрытий на цилиндрические поверхности. Используя условие постоянства потока в окружном направлении [1], в работах [2,3] решена задача определения вида поверхностей двух слоев в случае установившегося движения жидкостей как на внутренней, так и на внешней поверхности вращающейся цилиндрической оболочки.

В данном исследовании получена общая трехмерная постановка задачи движения двух несмешивающихся слоев вязких жидкостей в поле центробежных, поверхностных и гравитационных сил.

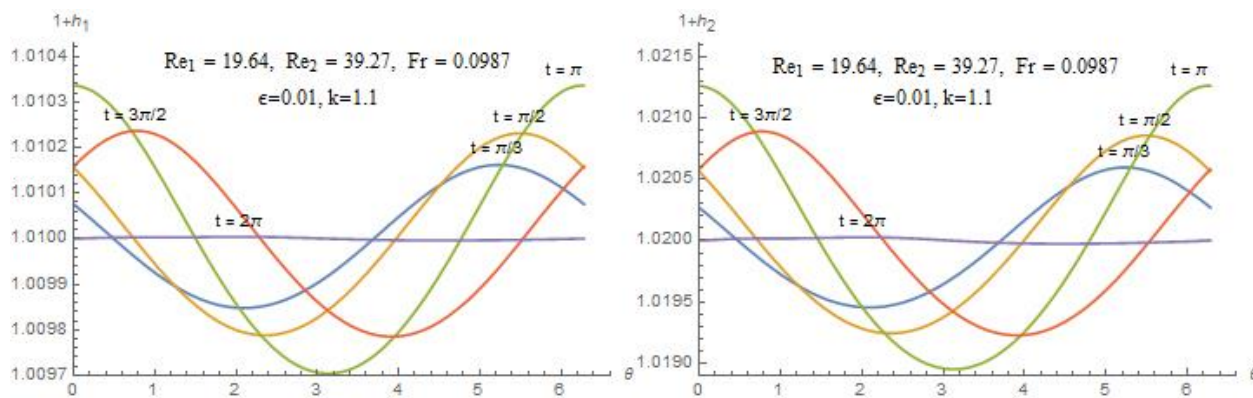


Рис. График зависимости $1+h_i$ от θ в разные моменты времени t

С помощью основных постулатов теории тонкого слоя [4] система уравнений, представляющая собой постановку двумерной нестационарной плоской задачи, была упрощена. В случае умеренного движения, пренебрегая инерционными членами уравнений Навье-Стокса, получены окружные и радиальные компоненты скорости, а также взаимосвязанная система уравнений эволюции наружного и внешнего слоев в гравитационном и поверхностном поле. Разработан и реализован численный метод ее исследования. Получены и проанализированы формы раздела слоев и свободной поверхности от длительного устойчивого состояния при медленном вращении до развития возмущений со временем и распада слоя при увеличении влияния центробежных сил.

Работа выполнена в рамках задания 2.48 ГПНИ Беларуси «Энергетические системы, процессы и технологии».

1. Hansen E. B., Kelmanson M. A. Steady, viscous free-surface flow on a rotating cylinder // Journal of Fluid Mechanics. V.272. 1994. P. 91–107.

2. Конон П.Н., Ермоленко А.И. Исследование двухслойного течения пленок вязких жидкостей на внутренней поверхности вращающегося цилиндра // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2016. № 1(32). С. 334–337.

3. Конон П.Н., Ермоленко А.И. Установившееся движение двух тонких плоских слоев вязких жидкостей на внешней поверхности вращающегося цилиндра // Международный научно-технический журнал «Теоретическая и прикладная механика». Минск 2017. Вып. 32. С. 46–51.

4. Пухначев В. В. Движение жидкой пленки на поверхности вращающегося цилиндра в поле тяжести // ПМТФ. 1977. №3. С. 78–88.

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕТОНКОГО СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА

А.В. Жук, А.Г. Макоед, П.Н. Конон

Белорусский государственный университет, Минск
anastasiya_makoed@rambler.ru

С целью изучения процессов центробежного литья металлов в работе исследовано неизоэтермическое плоское движение слоя вязкой жидкости на внутренней поверхности горизонтального вращающегося с постоянной угловой скоростью цилиндра в поле сил поверхностного натяжения, гравитации и инерции.

Решение изотермической задачи рассмотрено в [1–3]. Движение вязкой жидкости рассматривается в относительной полярной системе координат, связанной с вращающимся цилиндром, и описывается уравнениями Навье-Стокса с переменной вязкостью, энергии, неразрывности и неизвестной свободной поверхности. В уравнении энергии учтены конвективные составляющие и диссипативные члены. В случае достаточно быстрого вращения цилиндра получены уравнения первого приближения, подобные уравнениям пограничного слоя. Решения полученной системы ищется прямым методом с учетом граничных условий прилипания на поверхности цилиндра, отсутствия вязкого взаимодействия с окружающей средой на свободной поверхности и теплообменом по условиям 3-его рода.

В результате исследований получена и численно решена система дифференциальных уравнений в частных производных определения эволюции свободной поверхности плоского слоя конечной толщины при умеренных и больших числах Рейнольдса Re в поле центробежных сил с учетом изменяющегося температурного поля в жидкости. Проведены сравнения с экспериментами и результатами исследования изотермической задачи. Учет нелинейного взаимодействия возмущений позволил проследить за механизмом эволюции поверхности слоя. Основной причиной распада слоя на внутренней цилиндрической вращающейся цилиндрической поверхности является гравитационная неустойчивость, вызванная значительным влиянием силы тяжести по сравнению с центробежными силами.

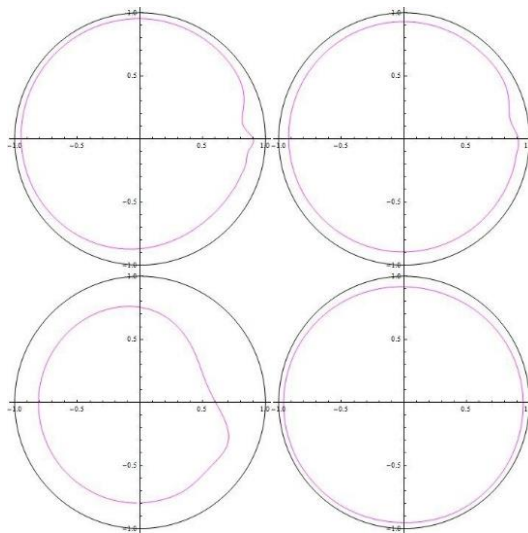


Рис.

Работа выполнена в рамках задания 2.48 ГПНИ Беларуси «Энергетические системы, процессы и технологии».

1. Епихин В.Е., Конон П.Н., Шкадов В.Я. О возмущенном движении слоя вязкой жидкости на поверхности вращающегося цилиндра // ИФЖ. 1994. Т.66, N 6. С. 689–694.

2. Пухначев В.В. Движение жидкой пленки на поверхности вращающегося цилиндра в поле тяжести // ПМТФ. 1977. N 3. С. 78–88.

3. Конон П.Н., Жук А.В. Напряжения на внешней и внутренней поверхности вращающейся цилиндрической оболочки частично заполненной жидкостью // Механика машин и механизмов. – 2013 №4(25). С.32–37.

МНОГОКРАТНОЕ МАХОВСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ ПРИ ДИФРАКЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА КЛИНЕ

А.Н. Максимов^{1,2}

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

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

and-21chuv@yandex.ru

Проблема дифракции ударной волны на клине, впервые описанная еще в XIX веке Махом, по сей день является не до конца изученной, несмотря на многочисленные экспериментальные, численные и теоретические исследования, проводимые в этой области. Самая полная на данный момент классификация различных автомодельных конфигураций регулярного и маховского отражения приведена в [1]. В зависимости от определяющих параметров задачи (числа Маха ударной волны, показателя адиабаты газа и угла клина) в расчетах и экспериментах [1] наблюдались различные конфигурации с ординарным, двойным и даже тройным маховским отражением.

В настоящей работе исследованы конфигурации, характеризующиеся отрицательным углом наклона отраженного скачка [2] (скачок расположен ниже траектории движения тройной точки). Численные расчеты выполнены с использованием TVD модификации явной схемы МакКормака [3]. Расчетная область повернута так, что горизонтальная ось направлена вдоль образующей клина, а падающая ударная волна наклонена на угол клина (Рис.). В начальный момент ударная волна проходит через вершину клина, и параметры течения определяются соотношениями Рэнкина-Гюгоньо на скачке. В процессе расчета поддерживаются граничные условия на левой и верхней границе, соответствующие движению ударной волны с известным числом Маха.

Обнаружен новый автомодельный режим многократного (четырёхкратного) маховского отражения, характеризующийся ветвлением ударно-волновых конфигураций (Рис.). Для умеренных значений числа Маха режим реализуется в газах с показателем адиабаты близким к единице. Выполнение условия автомодельности проверялось сравнением распределений параметров в различные моменты времени. Проведено исследование перехода от нового режима отражения к регулярному отражению при изменении угла клина. Определены границы существования конфигураций многократного отражения при изменении показателя адиабаты газа.

Работа выполнена под руководством П.Ю. Георгиевского при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 18-01-00793-а).

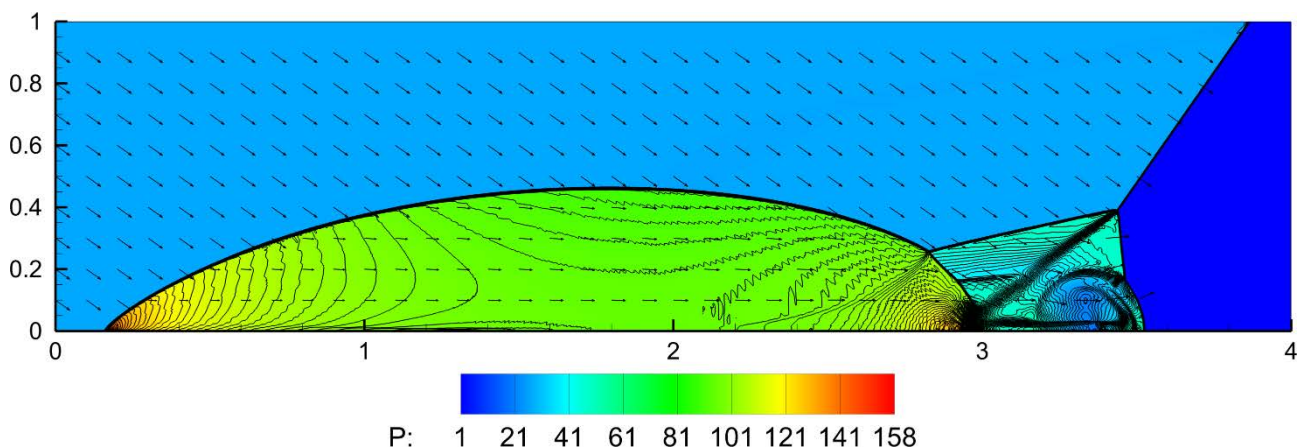


Рис. Многократное маховское отражение при дифракции ударной волны на клине

1. Семенов А.Н., Березкина М.К., Красовская И.В. Классификация разновидностей отражения ударной волны от клина. Части 1, 2. // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, № 4. С. 46–58.

2. Сильников М.В., Чернышов М.В., Гвоздева Л.Г. Аналитическое описание области существования тройных конфигураций с отрицательным углом наклона отраженного скачка // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, № 11. С. 30–34.

3. Максимов А.Н. Особенности применения TVD и FCT вариантов схемы МакКормака в задачах газовой динамики. В сб. Труды конференции-конкурса молодых ученых. 10-12 октября 2016 г. / Под редакцией А.Г. Куликовского, В.А. Самсонова. М.: Издательство Московского университета, 2017. С. 133 – 141.

ДИНАМИКА КОЛЕСНОЙ ТЕЛЕЖКИ С РОТОРОМ САВОНИУСА

А.А. Мастерова^{1,2}

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

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

masterovaanya@yandex.ru

Ротор Савониуса – один из широко известных типов вертикально-осевых ветротурбин. Имеет узнаваемую S-образную форму. Его существенным недостатком является то, что он способен развить относительно малую скорость вращения. Вследствие этого генерируемая ротором мощность мала по сравнению с другими распространенными типами роторов, например, роторами Дарье или пропеллерного типа. Однако создаваемый ротором Савониуса крутящий момент относительно велик. Этот факт делает ротор пригодным для использования в качестве силового привода. Системы такого типа описаны, например, в [1].

В настоящей работе рассматривается механическая система, состоящая из тележки, на которой установлен ротор Савониуса. Тележка может двигаться вдоль неподвижной оси OX и находится в потоке воздуха, движущемся с некоторой скоростью вдоль OX . Ось ротора соединена с колесами тележки и приводит их в движение. Предполагается, что колеса тележки могут катиться по плоскости с проскальзыванием. Аэродинамическая нагрузка, действующая на систему, вводится аналогично работе [2].

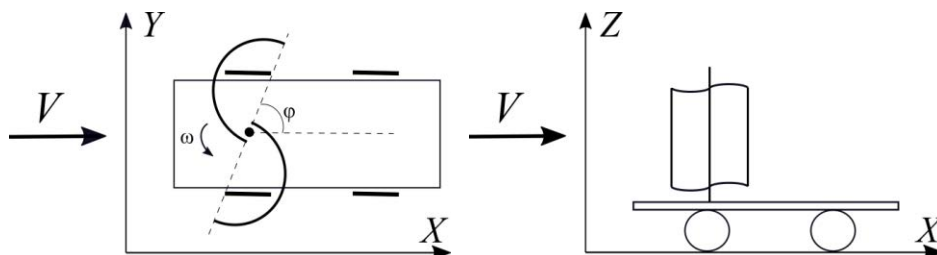


Рис. Тележка с установленным на ней ротором Савониуса (вид сверху и вид сбоку)

Получены условия существования и асимптотической устойчивости стационарного режима системы. Исследованы свойства движения тележки в зависимости от величины скорости ветра. Показано, что выбором соответствующих параметров системы, можно изменять направление движения тележки при фиксированной скорости ветра. Проведено численное моделирование системы.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (No. 17–08–01366, 18–01–00538).

1. Kassem, Y., Hüseyin, Ç. Wind Turbine Powered Car Uses 3 Single Big C-Section Blades.// Int. Conf. on Aeronautical & Manufacturing Engineering (ICAAME'2015), 2015, pages 42–45.

2. Klimina L.A., Masterova A.A., Selyutskii Yu. D., Hwang S.-S., Lin C.-H. On dynamics of a Savonius rotor-based wind power generator // Engineering Dynamics and Life Sciences (DSTA2017), 2017, pages 275–284.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЭЛАСТОМЕРОВ

Д.И. Меркулов, Д.А. Пелевина

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

Намагничивающийся эластомер (НЭ) – это композитный материал, состоящий из упругой (вязкоупругой) основы и диспергированных в ней ферромагнитных частиц нано- или микроразмера. В докладе рассматривается проблема неоднозначности деформации этих материалов в магнитном поле. Исследуются, в частности, такие особенности поведения сферических и тонких тел из НЭ, как наличие двух устойчивых положений равновесия при фиксированной конфигурации магнитного поля (бистабильность), а также существование трех устойчивых положений равновесия тонкого тела из НЭ при определенном расположении двух электромагнитных катушек относительно его оси (мультистабильность). Данные эффекты были теоретически изучены в [1] и [2], соответственно. Также в докладе представлены эксперименты, в которых обнаружено существование двух и более чем двух равновесных форм тонкого тела из НЭ в неоднородном магнитном поле. На рисунке изображен экспериментальный график зависимости относительного удлинения тонкого тела от тока в электромагнитной катушке. Рассматриваются различные методики экспериментального определения параметров моделей упругого тела (модель Нео – Гука, Муни – Ривлина) и вязкоупругого тела (модель Кельвина – Фойгта с учетом пластических деформаций). Исследуются зависимости данных параметров от величины магнитного поля и влияние этой зависимости на характер деформации тел. Силовым методом определены магнитные свойства НЭ. Предложены способы создания анизотропных тел из НЭ. Построена модель анизотропного тела и экспериментально найдены параметры модели.

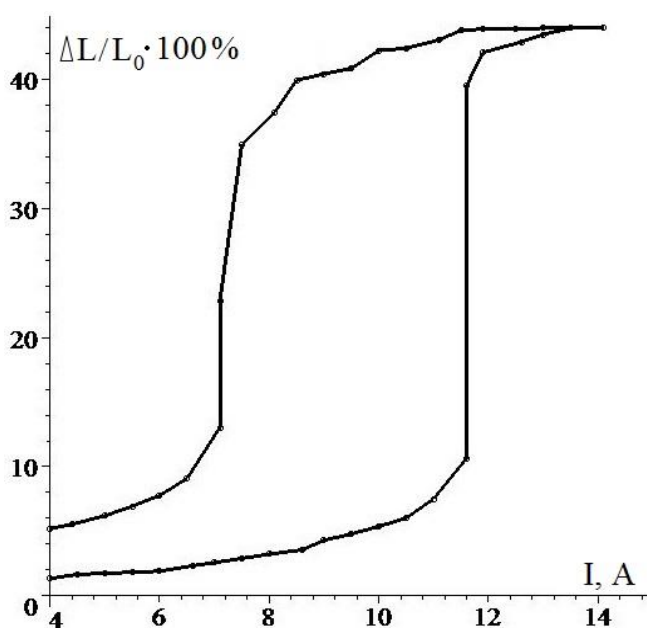


Рис. Экспериментальная зависимость относительного удлинения тонкого тела из НЭ от тока в катушке

Исследования поддержаны РФФИ (18-501-12011, 18-31-00066, 16-31-60091).

1. Naletova V.A., Pelevina D.A., Merkulov D.I., Zeidis I., Zimmermann K., Bi-stability of the deformation of a body with a magnetizable elastomer in a magnetic field // *Magnetohydrodynamics*, Vol. 52, 2016, No. 3, pp. 287–298.

2. D.I. Merkulov, V.A. Naletova, D.A. Pelevina, V.A. Turkov, Multi-stability of a body with magnetizable elastomer in a non-uniform magnetic field // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 431, 2017, pp. 123–125, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.011>.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЭЛАСТОМЕРОВ: МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Д.И. Меркулов, Д.А. Пелевина

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

Проблема неоднозначности равновесной формы тела из намагничивающегося эластомера (НЭ) в неоднородном магнитном поле исследована во многих работах. Так, наличие двух устойчивых положений равновесия тел из НЭ при фиксированной конфигурации магнитного поля (бистабильность) обнаружено экспериментально в [1] и изучено теоретически в [2]. Однако при определенном расположении двух электромагнитных катушек относительно оси тела из НЭ возможно существование трех устойчивых положений равновесия (мультистабильность). Данный эффект впервые предсказан теоретически в [3].

В предлагаемой работе рассматривается эксперимент, посвященный обнаружению трех равновесных форм тонкого тела из НЭ в неоднородном осесимметричном магнитном поле двух электромагнитных катушек. Для его выполнения была сконструирована экспериментальная установка, состоящая из стеклянной трубки, на которой расположены две электромагнитные катушки, и внутри которой деформируется, не касаясь стенок, вертикальное тонкое тело из НЭ. Ток в катушках циклически увеличивался и уменьшался, и при этом измерялась координата нижнего свободного торца тела. По этим данным строился график зависимости относительного удлинения образца от тока в катушках. Обнаружено существование диапазона токов, при которых возможны три устойчивых положения равновесия тонкого тела из НЭ. Показан гистерезис длины тела при циклическом квазистатическом изменении тока в катушках. Предполагалось, что упругие свойства НЭ подчинялись модели Муни-Ривлина. Коэффициенты упругости в данной модели определялись экспериментально путем растяжения образца из НЭ в горизонтальном положении.

Таким образом, экспериментально показана возможность мультистабильности тонких тел из НЭ в осесимметричном магнитном поле системы двух электромагнитных катушек.

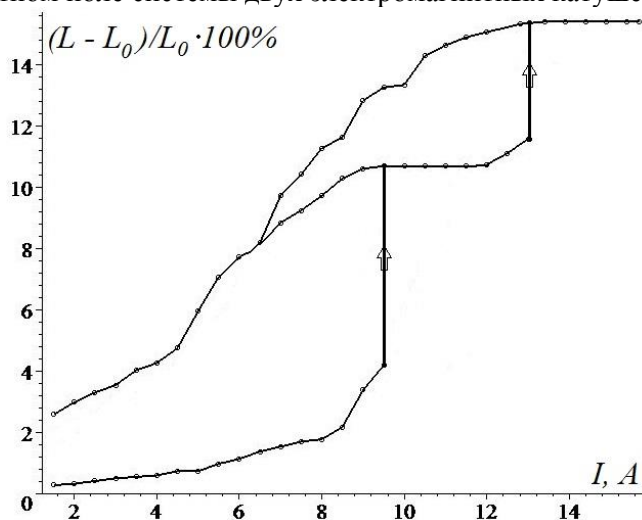


Рис. Экспериментальная зависимость относительного удлинения образца от тока в катушках

Исследования поддержаны РФФИ (18-501-12011, 18-31-00066, 16-31-60091).

1. Genoveva Filipcsei, Ildiko Csetneki, Andras Szilagyi, Miklos Zrinyi // Adv Polym Sci, Vol. 206, 2007, pp. 137–189. DOI 10.1007/12_2006_104

2. Naletova V.A., Pelevina D.A., Merkulov D.I., Zeidis I., Zimmermann K., Bi-stability of the deformation of a body with a magnetizable elastomer in a magnetic field // Magnetohydrodynamics, Vol. 52, 2016, No. 3, pp. 287–298.

3. D.I. Merkulov, V.A. Naletova, D.A. Pelevina, V.A. Turkov, Multi-stability of a body with magnetizable elastomer in a non-uniform magnetic field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 431, 2017, pp. 123–125, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.011>.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ, ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-MG-LI ЗА СЧЁТ ТЕРМООБРАБОТКИ

И.С. Месензова, Н.А. Павлов, А.Г. Маликов, А.М. Оришич, Е.В. Карпов

Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
mesenzova.i@yandex.ru

Развитие аэрокосмической промышленности связано с применением в конструкциях и различных изделиях современных высокопрочных алюминиевых сплавов. В настоящей работе описываются экспериментальные исследования по оптимизации процесса лазерной сварки для алюминиевого-литиевого сплава 1420. Исследованы различные режимы термообработки для получения неразъёмных соединений, выполненных лазерной сваркой, имеющие характеристики, близкие или равные основному сплаву.

Из листов сплава 1420 изготавливались образцы размером 5×10 см. Полученные образцы проваривались на автоматическом лазерном технологическом комплексе (АЛТК) «Сибирь-1», созданном в лаборатории №3 ИТПМ СО РАН.

Был определён оптимальный режим сварки, при котором не наблюдалось внешних дефектов швов: 2.7 кВт мощности излучения CO_2 -лазера, скорость перемещения излучения 4 м/мин, положение фокальной плоскости $\Delta f = -3$ мм.

Для термообработки были выбраны пять режимов закалки при различных режимах. Нагрев перед закалкой составлял 320, 400, 450, 490 и 530 °С, нагрев шёл со скоростью 5°С/мин, и образцы оставались при постоянной температуре в течение 30 мин. Образцы остывали в воде комнатной температуры, на воздухе и в печи, где происходила частичная гомогенизация образцов. Как видно из рисунка, оптимальной была выбрана температура закалки 490°С, при которой практически отсутствует разница между областью сварного шва и основным сплавом. Также, после трёх видов закалки при 490°С, образцы были искусственно состарены при пяти режимах: 8ч + 150 °С, 24ч + 120 °С, 10 ч + 120°С, 16ч + 170 °С и режим трёхступенчатого старения [1].

В результате были исследованы режимы термообработки сплава 1420, при котором получен экспериментально наблюдаемый факт значительного упрочнения образцов при применении процесса старения. Таким образом, полная термическая обработка позволила увеличить прочность сварного шва в 1.5 раза, приблизив ее к прочности основного сплава 1420 системы Al-Mg-Li и значительно превзойти прочность сплава в состоянии поставки с завода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект №17-79-20139.

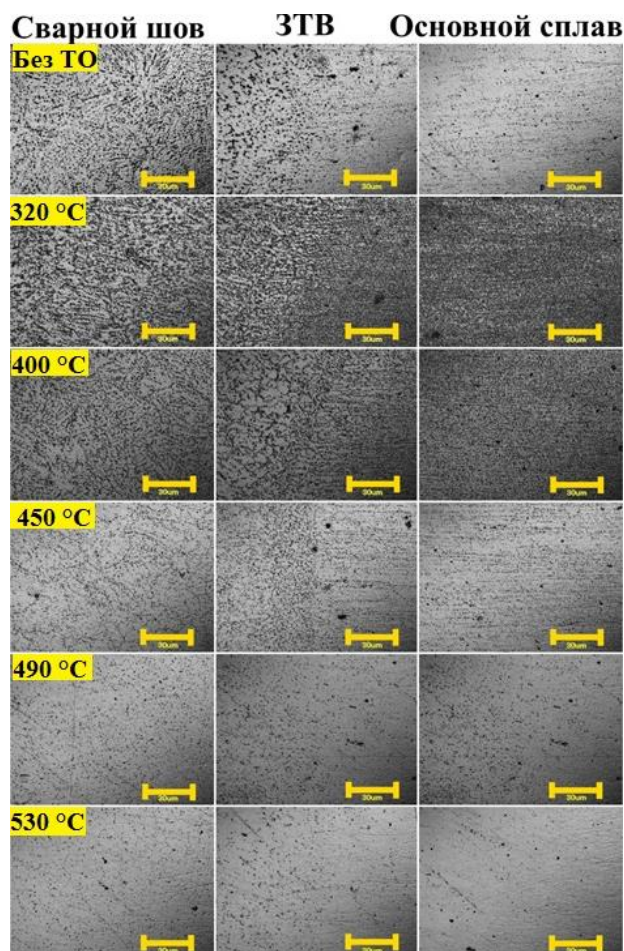


Рис. Микроструктура образцов, полученная на конфокальном лазерном микроскопе при различном значении температуры. На изображении присутствует масштабная метка 30 мкм.

1. Месензова И.С., Павлов Н.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Карпов Е.В. Оптимизация процесса лазерной сварки и последующей постобработки сварного шва алюминиевого сплава системы Al-Mg-Li для получения высокопрочных неразъёмных соединений // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск – Шерегеш, 16 - 22 марта 2018 г.) / под ред. В.В. Козлова. – Новосибирск, 2018. – С. 100–101.

РЕЖИМЫ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ И ПОВЕРХНОСТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

С.А. Михайленко, М.А. Шеремет

Механико-математический факультет Томского государственного университета, Томск
stepanmihaylenko@gmail.com

Конвективный теплообмен во вращающихся полостях имеет многочисленные инженерные приложения, включающие в себя пищевые и химические процессы, охлаждение электронного оборудования, проектирование роторных систем и многое другое [1]. Целью настоящего исследования является численное моделирование конвективно-радиационного теплопереноса в квадратной вращающейся полости при наличии источника энергии постоянного объемного тепловыделения.

Полость, заполненная теплопроводной ньютоновской жидкостью, прозрачной для излучения, вращается против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ξ_0 . Вертикальные стенки поддерживаются при постоянной температуре T_c , горизонтальные стенки считаются адиабатическими. Внутри полости находится тепловыделяющий источник. Стенки полости являются диффузно-серыми. Теплообмен излучением между стенками анализируется в приближении поверхностного излучения.

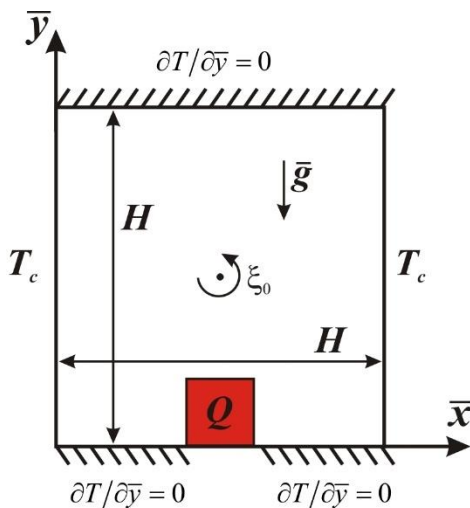


Рис. Область решения задачи

Определяющие уравнения Обербека–Буссинеска записываются в безразмерном виде в переменных «функция тока–завихренность–температура» с учетом вращения системы [2]. Для упрощения анализа радиационного теплообмена используется метод сальдо, где безразмерная плотность радиационного потока определяется с помощью плотности потока эффективного излучения на основе условия теплового баланса. Для решения сформулированной краевой задачи используется метод конечных разностей. Дискретное уравнение Пуассона для функции тока решается отдельно методом последовательной верхней релаксации, уравнения дисперсии завихренности и энергии решаются с применением локально-одномерной схемы Самарского.

Численные исследования нестационарных режимов естественной конвекции и поверхностного теплового излучения в замкнутой вращающейся полости проведены в широком диапазоне изменения определяющих параметров. Исследовано влияние чисел Рэлея, Тейлора и Остроградского, а также приведенной степени черноты ограждающих стенок на распределения изолиний функции тока и температуры, а так же на среднюю температуру внутри источника энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-20141).

1. You R., Li H., Tao Z. Experimental investigation on two-dimensional heat transfer and secondary flow in a rotating smooth channel // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. 113. P. 342–353.

2. Mikhaylenko S.A., Sheremet M.A. Convective heat transfer combined with surface radiation in a rotating square cavity with a local heater // Numerical Heat Transfer A. 2017. 72. 697–707.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

А.В. Мишин^{1,2}

¹Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича, Новосибирск

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск
aleksey-mishin94@mail.ru

Работа имеет отношение к проблемам теоретического описания гетерогенных сред.

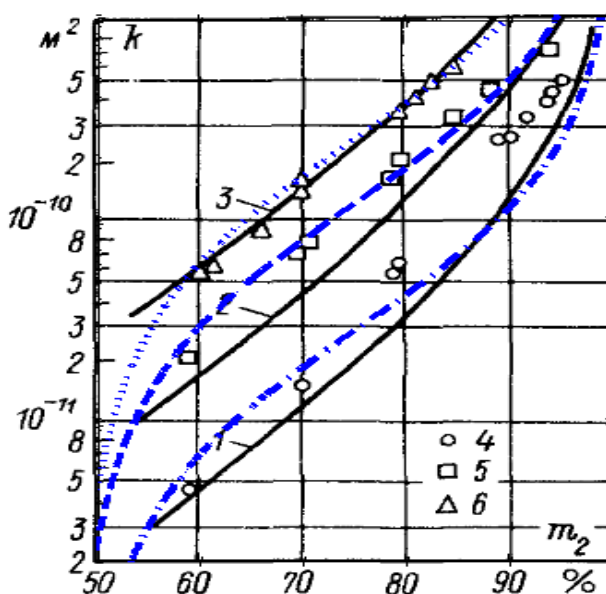
Представлен обзор методов, подчеркивающий специфику развития соответствующей области. На основе гипотезы о теле сравнения – тело сравнения есть эффективная среда – методом вариаций получены эффективные коэффициенты, а не вилка как ранее. Также показано, что статистические методы, а именно: метод условных моментов, теория эффективных модулей (одноточечное приближение и метод условных моментов) и обобщенное сингулярное приближение теории случайных функций на основе этой же гипотезы приводятся к идентичным эффективным коэффициентам. Такие же коэффициенты получаются методом самосогласования изначально. Анализ эффективных коэффициентов показал наличие фазового перехода в механических смесях (например, металл – диэлектрик), наличие несущей фазы,

Произведено асимптотическое разложение эффективных коэффициентов. Представлено сравнение с другими моделями, расчетами и экспериментом. Как один из важных моментов, в теории вязкоупругости сдвиговая вязкость совпадает с моделью Эйнштейна и современными результатами.

В рамках метода условных моментов описано поведение микронеоднородных систем с несущей жидкой, газовой фазой, переход от несущей жидкой фазы к несущей твердой фазе и, соответственно, описание сред с несущей твердой фазой. Описана фильтрация жидкой фазы, представлен вывод закона Дарси и его обобщение – закон Форхгеймера.

Рис. Проницаемость k медных волокнистых материалов для жидкости в зависимости от концентрации пористости m_2 ;

4, 5, 6 – экспериментальные данные; синие разрывные кривые – расчет по формулам настоящей работы



1. Хорошун Л.П. О математической модели неоднородного деформирования композитов // Прикладная механика. 1996. №5 Том 32. С. 22–29.

2. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.

3. Хорошун Л.П. Математические модели и методы механики стохастических композитных материалов // Прикладная механика. 2000. №10 Том 36. С. 30–62.

4. Снарский А.А., Женировский М.И. перколяционные эффекты в термоэлектрических неупорядоченных двухфазных средах // Термоэлектричество. 2007. №3. С. 65–81.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОРОЖДЕНИЯ МОД НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ

В.И. Бородулин¹, А.В. Иванов¹, Ю.С. Качанов¹, Д.А. Мищенко¹, R. Örlü², A. Hanifi², S. Hein³

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

²KTH Royal Institute of Technology, Linné FLOW Centre, Dept. of Mech, Stockholm

³Institute of Aerodynamics and Flow Technology, DLR, Göttingen

misch2005@yandex.ru

Настоящая работа направлена на изучение двух эффективных механизмов порождения в трехмерном пограничном слое на скользящем крыле мод неустойчивости поперечного течения (ПТ): локализованными вибрациями поверхности (1), а также за счет рассеяния на этих вибрациях вихрей набегающего потока (2). Исследование указанных задач восприимчивости проведено в рамках международного проекта RECEPT. Эксперименты проведены в пограничном слое экспериментальной модели с ламинаризованным крыловым профилем (угол скольжения 35° , хорда 0,8 м), которая была установлена в рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы МТЛ (КТИ, Стокгольм) под углом атаки -5° . В результате, в экспериментальном пограничном слое нарастание мод неустойчивости Толлмина-Шлихтинга было подавлено благоприятным градиентом давления, а моды неустойчивости ПТ, напротив, могли усиливаться вниз по потоку. Эксперименты проведены с использованием метода контролируемых нестационарных возмущений. Источник локализованных вибраций поверхности представлял собой вибрирующую на частоте f_s мембрану диаметром 6 мм. Мембрана была вмонтирована заподлицо с рабочей поверхностью экспериментальной модели на расстоянии ~ 130 мм от ее передней кромки. Двумерные вихревые возмущения потока генерировались вибрирующей на частоте f_v проволокой, которая была натянута параллельно передней кромке модели. Скорость набегающего потока составляла 10 м/с. Основные измерения выполнены однониточным датчиком термоанемометра.

Обнаружено, что оба исследуемых механизма восприимчивости приводят к достаточно эффективному порождению в пограничном слое пакетов трехмерных мод ПТ. В работе получены кривые нарастания амплитуд и фаз ПТ-мод, как порождаемых на частоте вибраций поверхности f_s , так и на комбинационных частотах $f_{sv\pm} = f_s \pm f_v$. Получены оценки количественных характеристик исследуемых механизмов – амплитуды и фазы коэффициентов «вибрационной» и «вибрационно-вихревой» локализованной восприимчивости. Результаты получены в широком диапазоне параметров.

Верификация расчетов, выполненных по линейной (локально-параллельной) теории устойчивости (ЛТУ) показала, что эта теория способна надежно описывать развитие ПТ-мод на частоте f_s (Рис. а). Тем не менее, она не в состоянии объяснить эволюцию ПТ-мод, порождаемых на комбинационных частотах $f_{sv\pm}$ (Рис. б). Анализ экспериментальных данных говорит в пользу того, что на частотах $f_{sv\pm}$ проявляется действие ранее не изученного механизма распределенной восприимчивости, связанного с рассеянием контролируемых вихрей набегающего потока на генерируемых вибрациями поверхности ПТ-модах. Изучение этого явления имеет большой научный и практический интерес.

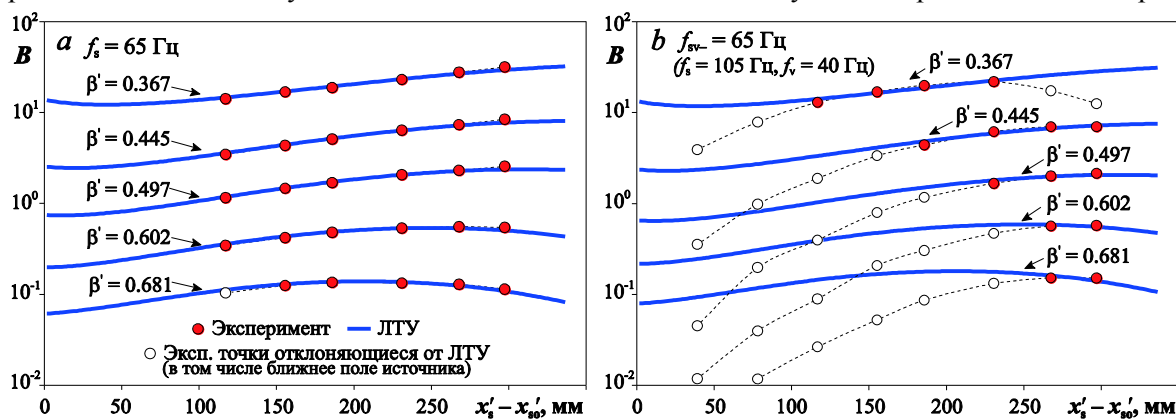


Рис. Кривые нарастания спектральных амплитуд мод неустойчивости CF: эксперимент и ЛТУ.

а – частота вибраций поверхности f_s ; б – частота разностной комбинационной моды f_{sv-} .

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ АЭРОВЗВЕСИ АЛЮМИНИЯ

К.М. Моисеева¹, А.Ю. Крайнов¹, Д.А. Крайнов^{1,2}

¹Физико-технический факультет Томского государственного университета, Томск

²Научно-образовательный центр И.Н.Бутакова, Томский политехнический университет, Томск

Moiseeva_KM@tk.ru

В настоящей работе численно решена задача искрового зажигания аэровзвеси порошка алюминия. Целью работы являлось определение критических условий зажигания порошка алюминия в зависимости от размера и массовой концентрации частиц. Постановка задачи основана на физико-математических постановках [1, 2].

Математическая постановка задачи определяется системой уравнений, записанной в цилиндрической системе координат, и состоящей из уравнений неразрывности для газа, сохранения импульса и энергии для газа и частиц, баланса массы кислорода и частиц в смеси, уравнений счетной концентрации частиц и состояния газа. В уравнениях, определяющих математическую постановку задачи, правые части, отвечающие за химическое взаимодействие газа и частиц, определяются через радиус алюминия в частице, слагаемые, определяющие инерционное и тепловое взаимодействие определяются через радиус самой частицы, состоящей из алюминия и оксидного слоя. Радиус частицы и радиуса алюминия, оставшегося в частице после выгорания, определялись согласно [2].

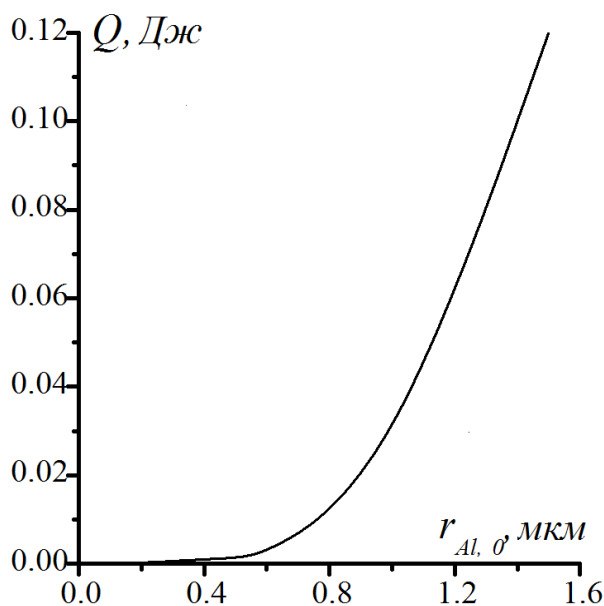


Рис. Зависимость минимальной энергии искрового зажигания от начального размера частицы алюминия.
Массовая концентрация порошка – 0.3 кг/м³

Задача решалась численно с использованием методов [3, 4]. Метод решения и выбор расчетной сетки соответствовали работе [1]. В расчетах варьировались начальный радиус частиц алюминия и начальная массовая концентрация порошка на единицу объема. Из расчетов определялась минимальная энергия искры, необходимая для зажигания и дальнейшего распространения фронта горения по аэровзвеси. Пример полученных результатов расчета представлен на Рис.

На Рис. представлена зависимость минимальной энергии искрового зажигания от начального размера частицы алюминия. Видно, что для радиуса частицы меньше 0.5 мкм минимальная энергия искрового зажигания стремится к одному и тому же значению.

В работе было выполнено исследование влияния массовой концентрации порошка на минимальную энергию искрового зажигания аэровзвеси алюминия. Получено, что увеличение массовой концентрации порошка приводит к уменьшению минимальной энергии искрового зажигания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

1. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли// Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 2. С. 61–70.
2. Порязов В.А., Крайнов А.Ю., Крайнов Д.А. Математическое моделирование горения пороха Н с добавлением порошка алюминия// Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 1. С. 93–101.
3. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976.
4. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной "собственного" давления// Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43. № 3. С. 500–510.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕРМОДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНЕЧНОМ ОДНОМЕРНОМ КРИСТАЛЛЕ

А.С. Мурачёв¹, А.М. Кривцов^{1,2}, Д.В. Цветков¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

andrey.murachev@gmail.com

Описание неравновесных тепловых процессов в системах с конечным числом частиц представляет особый научный и практический интерес, особенно благодаря активному развитию нанотехнологий [1]. Ранее было показано, что в случае мгновенного нагрева одномерного гармонического кристалла реализуются затухающие колебания кинетической температуры [2, 3]. В настоящей работе исследуются аналогичные процессы для одномерного гармонического кристалла с конечным числом частиц. Построено аналитическое решение, описывающее нестационарный тепловой процесс в системе. В работе показано, что через определённое время в конечном кристалле реализуется резкое увеличение амплитуды колебаний кинетической температуры (тепловое эхо).

Данное явление происходит периодически, с периодом, который зависит от размера кристалла, и каждое последующее тепловое эхо слабее предыдущего. Аналитически получено, что изменение кинетической температуры описывается бесконечной суммой функций Бесселя с кратными индексами, а тепловое эхо в термодинамическом пределе описывается функцией Эйри [4]. Найден новый интеграл движения, связывающий обобщённые температуры.

Показано, что в конечном кристалле дисперсия смещений, в среднем, возрастает в соответствии с параболическим законом до величины, пропорциональной числу частиц в кристалле, а затем уменьшается до почти нулевого значения. Таким образом, кристалл возвращается к состоянию, близкому к исходному состоянию. Чем больше частиц находится в кристалле, тем более выраженным является эффект возврата. Представлен аналитический анализ описанных выше явлений [4].

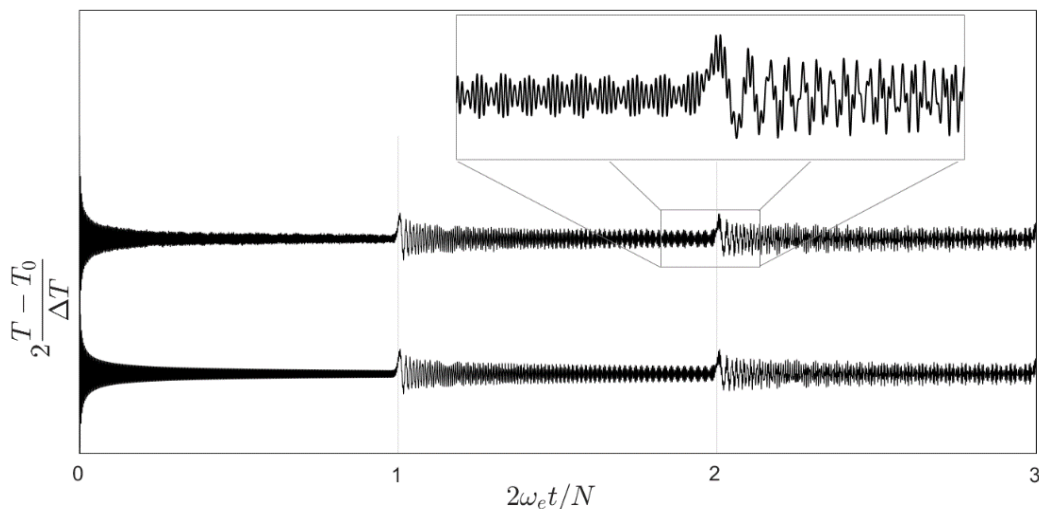


Рис. Колебания кинетической температуры в конечном кристалле. Численные (верхние) и аналитические (нижние) решения. Усреднение выполняется с использованием 100 численных экспериментов. Число частиц $N = 10^3$, t - время, ω_e - элементарная частота, T_0 - начальная температура кристалла, ΔT - скачок температуры.

1. Кривцов А. М., Морозов Н. Ф. О механических характеристиках наноразмерных объектов. Физика твердого тела. 2002. Т. 44. №12. С. 2158–2163.

2. Кривцов А. М. Колебания энергий в одномерном кристалле. Доклады академии наук. 2014. том 458, №3, С. 279–281.

3. Кривцов А. М. Распространение тепла в бесконечном одномерном гармоническом кристалле. Доклады академии наук. 2015. Т. 464, №2, С. 162–166.

4. А. М. Кривцов, А. С. Мурачёв, Д. В. Цветков. Нестационарные термо-диффузионные процессы в конечном одномерном кристалле. Чебышевский сб., 2018, 18:3.

ПЛОСКИЕ КОНТУРА С МАКСИМАЛЬНОЙ ТЯГОЙ В НЕИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ ПОТОКЕ

А.Р. Мустаев, Н.А. Остапенко

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
sentry-cod4@mail.ru

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

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 Θ , 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.

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 контур, соединяющий точки А и С, генерирующий ударную волну в своей точке излома и доставляющий максимум функционалу тяги. Взаимодействие сверхзвукового потока с 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 $\Theta/2$. В зависимости от числа Маха М невозмущенного потока и удлинения профилируемой кормовой части тела $\lambda = (X_C - X_A)/(Y_C - Y_A)$ построены области существования экстремалей, соответствующие разным Θ . Установлено, что каждому углу Θ в плоскости параметров (М, λ) отвечает ограниченная кривая, концы которой при $\lambda > 0.5$ соответствуют коническому профилю – отрезку прямой, соединяющему точки А и С. Между указанными точками при изменении, например, одного из параметров – числа М достигается максимум отношения $T = T_O/T_C$, где T_O – тяга оптимального, T_C – тяга конического контура, в некоторых случаях превышающий единицу на несколько десятков процентов. Точное решение соответствующей оптимизационной задачи в классе отрезков прямых значительно расширяет область существования "ударных" контуров и увеличивает их преимущество по сравнению с коническими контурами.

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 потока, несколько превышающее единицу: $M=1.01$) и выхода (X_C, Y_C). Для

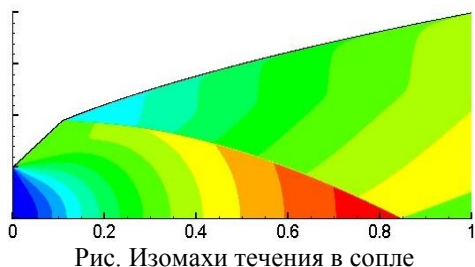


Рис. Изомахи течения в сопле

приближенного определения формы экстремали на отрезке $[X_B, X_C]$ рассмотрена задача об оптимальной форме указанного отрезка при моделировании потока в сопле на отрезке $[X_A, X_C]$ потоком от плоского 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 использованием построенного вычислительного кода, в котором использован метод Годунова, проведены параметрические расчеты течения в сверхзвуковой части сопла, состоящего из конического с углом Θ и параболического 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 отрезка параболы, может превышать на несколько процентов тягу эквивалентного сопла с прямолинейной стенкой.

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

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРНЫХ СИЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРНОГО ПЕРЕХОДА ГЦК-ОЦК

Н.Д. Муцак¹, Е.А. Подольская^{1,2}, А.Ю. Панченко^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

niky-m@yandex.ru

При описании механики кристаллических тел на микроуровне удобно использовать потенциалы взаимодействия, в частности, простейшие парные силовые (Ми, Морзе, Леннарда-Джонса), позволяющие решать широкий спектр задач, например, структурные переходы, образование трещин, разрушение, температурное изменение свойств материала. Одним из ограничений является неустойчивость равновесия ненапряженных неплотнупакованных структур. Данная работа посвящена моделированию структурного перехода ГЦК-ОЦК с использованием модифицированных парных силовых потенциалов, предложенных в [1]. Под структурным переходом понимается процесс изменения кристаллической структуры, которой невозможен без потери устойчивости с приобретением иных прочностных характеристик. Объектом исследования является бесконечный трехмерный бездефектный кристалл, имеющий гранецентрированную кубическую структуру.

Было проведено исследование устойчивости ГЦК структуры при конечных деформациях для потенциалов [1]. Алгоритмы аналитического, а также численного исследования приведены, например, в работе [2]. Получены зоны устойчивости в трехмерном пространстве деформаций, соответствующих растяжению/сжатию вдоль осей кубической симметрии ГЦК решетки, аналитически, а также методом молекулярной динамики (МД).

Построены кривые для одноосного нагружения вдоль одной из осей кубической симметрии и профили потенциальной энергии деформации на прямой деформирования, соединяющем ненапряженные ГЦК и ОЦК структуры. Показано, что в отличие от потенциалов Леннарда-Джонса, Ми и Морзе, предложенные потенциалы позволяют получить профили энергии с двумя ярковыраженными локальными минимумами, соответствующими ненапряженным ГЦК и ОЦК структурам.

Анализ показал, что результаты моделирования МД хорошо согласуются с теоретическими (Рис.). Кроме того, выявлено образование двухфазных состояний как механизма релаксации энергии вдоль одноосной линии сжатия ГЦК-ОЦК.

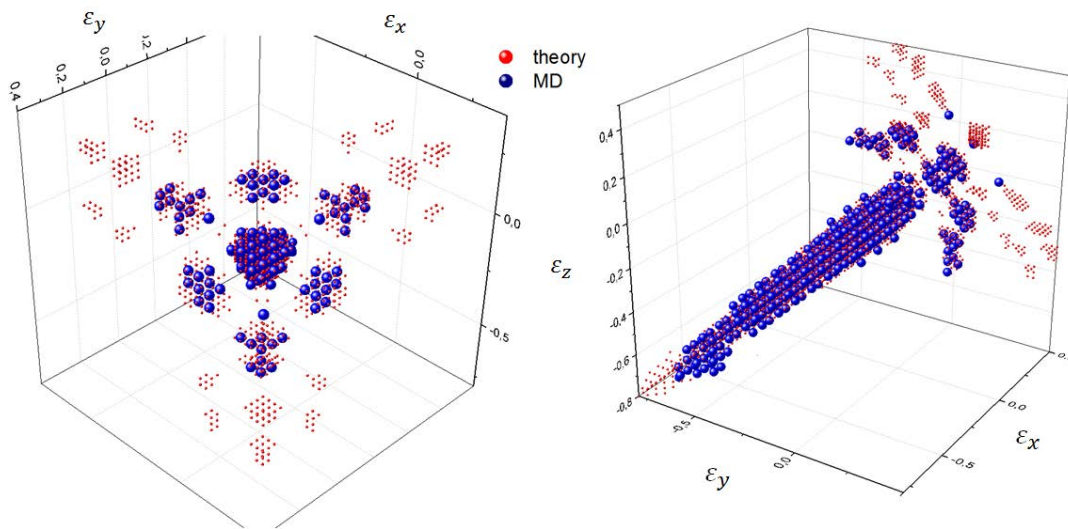


Рис. Теоретические и численные зоны устойчивости

1. Муцак Н.Д., Подольская Е.А. Построение и применение парных силовых потенциалов взаимодействия для моделирования структурного перехода ГЦК-ОЦК // Гагаринские чтения 2018. 2018. МАИ №. 4. С. 404-406.

2. Podolskaya E. A. et al. Loss of ellipticity and structural transformations in planar simple crystal lattices // Acta Mechanica. 2016. V. 227. №. 1. P. 185–201.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ КОНТАКТ ШТАМПА С ПОЛУПЛОСКОСТЬЮ ПРИ УЧЕТЕ АДГЕЗИИ

А.С. Оконечников¹, Д.В. Тарлаковский^{1,2}, Г.В. Федотенков^{1,2}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

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

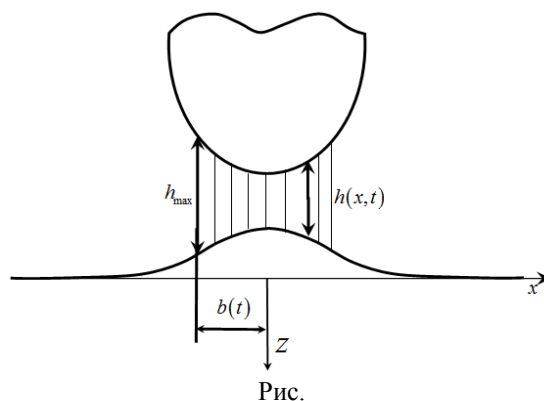
oas.mai@mail.ru

Рассматривается нестационарное взаимодействие жесткого выпуклого штампа с упругой изотропной полуплоскостью при учете межмолекулярного адгезионного поверхностного притяжения. Учет адгезионного притяжения в нестационарных контактных задачах очень важен в случаях, если материал контактирующих тел имеет небольшую плотность и сравнительно небольшие размеры.

В представленной работе межмолекулярное адгезионное притяжение описывается с помощью известной модели Можи [1]. Согласно данной модели, если зазор между двумя соседними поверхностями меньше некоторого критического значения, то на поверхности тел действует постоянная сила адгезионного притяжения. При этом, в зоне контакта двух тел сила адгезионного притяжения отсутствует.

Имея ввиду особенность модели Можи, взаимодействие жесткого штампа с упругой полуплоскостью можно разбить на два различных этапа:

1) Штмп и упругая полуплоскость не контактируют, но на их поверхности действует сила адгезионного притяжения (Рис.).



2) Штмп находится в контакте с упругой полуплоскостью, на данном этапе необходим учет как контактных напряжений, так и сил адгезионного притяжения.

В рамках первого этапа взаимодействия, была поставлена следующая задача: в начальный момент времени минимальное расстояние между штампом и упругой полуплоскостью равно критическому значению зазора, при котором начинают действовать силы адгезионного притяжения. По мере движения штампа по некоторому известному закону на встречу упругой полуплоскости, носитель адгезионного притяжения расширяется. При этом на границы области адгезионного притяжения влияет как форма штампа, закон его движения, так и упругие деформации поверхности полуплоскости, вызванные адгезией. По этой причине, границы области действия адгезионной силы заранее неизвестны и подлежат определению.

Был разработан численно-аналитический алгоритм, основанный на принципе суперпозиции [2]. Данный алгоритм позволяет определить носитель адгезионного притяжения в различные моменты времени в зависимости от параметров процесса. Была показана существенная зависимость скорости расширения границ носителя адгезионного притяжения от скорости движения штампа, его формы, а также от силы адгезионного взаимодействия. Представлены графические результаты для первого этапа взаимодействия штампа и упругой полуплоскости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-08-00260 А).

1. Maugis D., Adhesion of spheres: The JKR-DMT transition using a Dugdale model // J. Colloid Interface Sci. 1992. 150 P. 243–269.

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

ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-CU-LI С ПОМОЩЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО CO₂-ЛАЗЕРА И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

Н.А. Павлов, И.С. Месензова, А.Г. Маликов, А.М. Оришич, Е.В. Карпов

Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
pna3894@gmail.com

Данная работа посвящена исследованию зависимостей механических характеристик сплавов авиационного назначения системы Al-Cu-Li 1441 и В-1461 от температуры закалки и режимов искусственного старения. Сварка производилась на автоматическом лазерном технологическом комплексе «Сибирь-1» собственного производства лаборатории №3 ИТПМ СО РАН. В рамках исследования изучались такие механические характеристики, как: прочность образцов на разрыв, предел текучести и величина относительного удлинения образцов при испытании на разрыв; измерялась микротвёрдость сваренных образцов в областях основного материала, зоны термического влияния (ЗТВ) и сварного шва. Также выявлялись закономерности в изменении микроструктуры образцов.

На основе более ранних исследований [1] были выбраны режимы закалки образцов после выдержки в течение 30 минут при температурах в диапазоне от 320 до 545 °С со скоростью нагрева до заданной температуры 5 °С/мин.

В результате были получены режимы термообработки сплавов 1441 и В-1461, при которых достигается прочность образца 0.92 и 0.9 относительно основного сплава для В-1461 и 1441 соответственно. Величина относительного удлинения образцов из сплава В-1461 после закалки на одном из режимов увеличилась, и превысила таковую у основного сплава на 6.6 %, а после искусственного старения, при достижении уровня прочности 0.92, величина относительного удлинения стала выше на 3 %.

Наблюдения на лазерном конфокальном микроскопе показали изменения микроструктуры образцов в области сварного шва и ЗТВ в зависимости от температуры закалки, вплоть до полного исчезновения границы сварного шва – основной материал сплава. На рисунке *а* для обоих сплавов наблюдается рост прочности при повышении температуры закалки в диапазоне 400–530 °С. Лучшим режимом по критерию прочности был выбран режим закалки при температуре 530 °С. Также на рисунке *б* видно, что для сплава В-1461 величина относительного удлинения растёт с ростом температуры закалки практически линейно, в то время как, для сплава 1441 однозначно выявить зависимость нельзя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект №17-79-20139.

1. Павлов Н.А., Месензова И.С., Маликов А.Г., Оришич А.М., Карпов Е.В. Оптимизация технологии лазерной сварки с использованием непрерывного CO₂-лазера, алюминий-литиевых сплавов системы Al-Cu-Mg-Li для получения высокопрочных сварных соединений // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых. Новосибирск, 2018. С. 116–117.

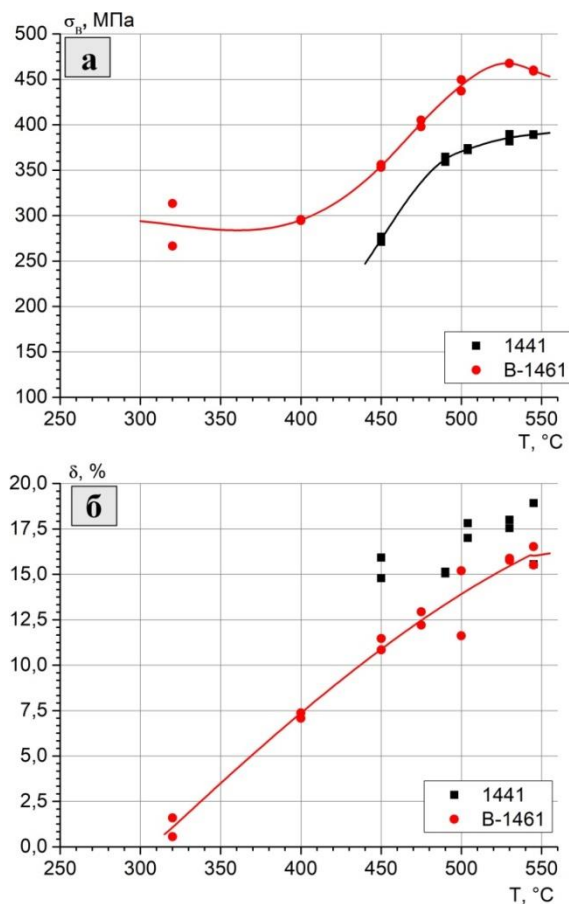


Рис. Графики зависимостей предела прочности σ_B (а) и относительного удлинения δ (б) от температуры закалки для сплавов 1441 и В-1461

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОПОДВИЖНОСТИ ЗУБОВ В НОРМЕ И ПРИ ПАТОЛОГИИ С ПОМОЩЬЮ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЗУБОЧЕЛЮСТНОЙ СИСТЕМЫ

О.И. Дударь¹, Н.Б. Асташина², Е.П. Рогожникова², С.Е. Пешин¹

¹Факультет прикладной математики и механики ПНИПУ, Пермь

²Стоматологический факультет ПГМУ, Пермь

sapeshin@yandex.ru

Эффективным способом сохранения зубов при заболевании пародонтитом является шинирование. В последние годы установлено, что конструкция шины должна обеспечивать микроподвижность, характерную для здоровых зубов. В данной работе, с помощью МКЭ, встроенного в пакет ANSYS, исследуется микроподвижность зубов в норме. В расчётах предполагается, что периодонт и ткани зуба являются упругими. Согласно данным литературы, средний модуль упругости зубных тканей на четыре порядка больше модуля упругости периодонта. Это обеспечивает возможность погружения зуба как жесткого целого в периодонт, то есть его микроподвижность.

На Рис. а приведён пример расчёта вертикальной микроподвижности здорового, премоляра при осевой нагрузке 15 Н. Видно, что зуб перемещается как жесткое целое на величину 35 мкм. Полученное значение осевого перемещения зуба на порядок меньше, чем такое же перемещение в расчете по Винклеровской модели для корня зуба в виде конуса [1] (170 мкм), и близко к экспериментальному значению осевого перемещения [2] (15-20 мкм при нагрузке 1-5 Н).

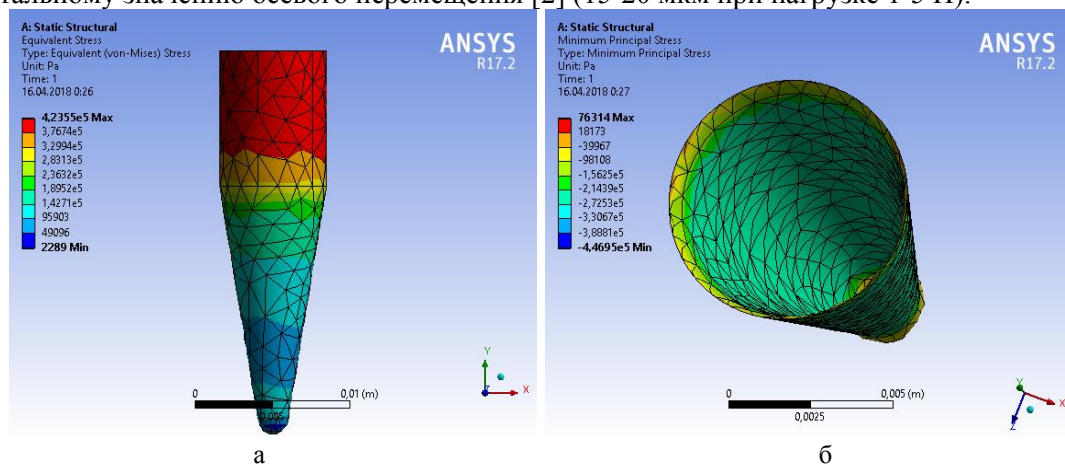


Рис. Перемещения зуба (а), давление в периодонте (б) при вертикальном нагружении здорового моляра

Важным параметром является давление в периодонте (-0,25 МПа на рис. б), которое при определенном значении запускает процесс резорбции. Такие же величины были определены для горизонтальной нагрузки 5 Н, действующей на здоровый премоляр (максимальное перемещение составило 21 мкм, давление -0,4 МПа).

Определялась также подвижность зубов при патологии (при заболевании пародонтитом). На первом этапе рассасывание межзубной альвеолярной перегородки приводит к уменьшению площади периодонта и, как результат, к увеличению подвижности и давления в периодонте. При уменьшении межальвеолярной перегородки премоляра на 4 мм (25% от высоты корня зуба) перемещение и давление составили 56 мкм и -0,40 МПа для вертикальной нагрузки, 77 мкм и -0,90 МПа для горизонтальной нагрузки. Увеличившиеся подвижность зубов и давление в периодонте при патологии приводят к ускорению процесса рассасывания костных тканей альвеолы. Полученные данные важны для анализа возможности остановки процесса резорбции с помощью шины, изготавливаемой из термопласта, пониженная жесткость которого позволяет сохранить микроподвижность зубов.

1. Дударь О.И., Костерина И.П., Майорова Л.В., Фатеева Н.А. Распределение жевательной нагрузки по зубному ряду при центральной окклюзии // Российский журнал биомеханики, Пермь. 2009, Т. 13, № 3 (45), С. 56–62.

2. Ряховский А.Н., Хлопова А.М. Биомеханика шинирования зубов. // Панорама ортопедической стоматологии 2004, № 1. С. 18–28.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ В ЖЕВАТЕЛЬНЫХ МЫШЦАХ И ВИСОЧНО- НИЖНЕЧЕЛЮСТНОМ СУСТАВЕ

С.Е. Пешин, О.И. Дударь

Факультет прикладной математики и механики ПНИПУ, Пермь
sapeshin@yandex.ru

При определении усилий в жевательных мышцах и в ВНЧС имеет место проблема статической неопределённости: в общем случае имеется шесть уравнений равновесия и порядка двадцати неизвестных усилий.

Сравнивается пять способов теоретического определения усилий в жевательных мышцах и реакции в височно-нижнечелюстном суставе (ВНЧС) с помощью упрощённой симметричной модели Канга [1]. Упрощённая модель предполагает определение только основных мышечных усилий: усилия в височной мышце и суммарного усилия жевательной и внутренней крыловидной мышц, а также величины и направления реакции ВНЧС. Рассматривалось два варианта упрощённой модели – без учёта действия мышц-открывателей и наружной крыловидной мышцы [1] и с их учётом. Для раскрытия статической неопределённости использовались пять теорий, основанных на следующих предположениях: 1) мышцы-синергисты функционально равноправны; 2) усилия в мышцах пропорциональны площадям их поперечных сечений; 3) усилия в жевательных мышцах должны обеспечивать минимальное значение реакции в суставе; 4) усилия в жевательных мышцах должны быть таковы, чтобы максимальное по мышцам напряжение было минимально возможным; 5) усилия в жевательных мышцах должны быть таковы, чтобы максимальное по мышцам отношение усилия к его максимальному значению было минимально возможным.

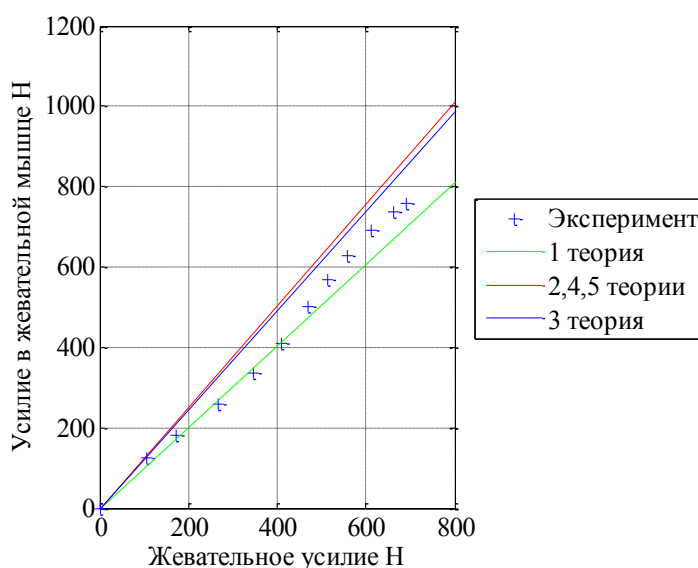


Рис. Суммарное усилие в жевательной и внутренней крыловидной мышцах в зависимости от величины жевательного усилия

Показана эквивалентность 2, 4 и 5 теорий в рамках используемой упрощённой модели. Показана необходимость учёта мышц-открывателей и наружной крыловидной мышцы. Сравнение результатов расчётов по различным теориям с экспериментальными данными Пруима [2] показали, что предложенная в работе [3] теория, основанная на предположении о функциональной равноправности мышц-синергистов, является предпочтительной (Рис.).

1. Kang Q.S., Updike D.P., Salathe Eric P. Theoretical prediction of muscle forces on the mandible during bite // J. of Biomechanical Engineering. 1990. Vol. 112. P. 432–436.

2. Pruim G.J., De Jongh H.J., Ten Bosh J.J. Forces acting on the mandible during bilateral static bite at different bite force levels // J. Biomech. 1980. Vol. 13. P. 755–763.

3. Дударь О.И., Бобина Д.И., Ляшкова А.И. Определение усилий в жевательных мышцах при центральной окклюзии // Журнал магистров. ПНИПУ Пермь. 2014. № 2 С. 190–199.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА МАНГО

А.В. Подоприсветов¹, В.Е. Павловский^{1,2}

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

²ФИЦ ИППМ имени М.В.Келдыша РАН, Москва

llecxis@gmail.com

Основные типы приводов для современных робототехнических устройств технологически производятся с известными либо хорошо прогнозируемыми характеристиками. Знание этих характеристик позволяет разработчикам, пользуясь теорией автоматического регулирования, рассчитывать согласованные параметры управления и программы формирования движений. Однако такие методы плохо адаптируются для работы с пневматическими приводами, которые обладают значительными и плохо прогнозируемыми упругостями, вызванными сжимаемостью воздуха в полостях пневмоцилиндров. Математическая модель, описывающая динамику пневматического привода, сложна для анализа. Эти обстоятельства затрудняют синтез управления традиционными средствами. Для построения системы управления манипулятором с пневматическими приводами используется нейронная система управления с обучением.

В качестве простой экспериментальной модели с трудно формализуемыми свойствами, позволяющей в наглядной форме реализовать управление на основе нейронной сети, выбран двухзвенный манипулятор, кинематическая схема которого представлена на Рис. Крепления звеньев и пневмоцилиндров представляют собой цилиндрические шарниры с одной степенью свободы. Положение системы определяется углами θ_1 и θ_2 , представленными на схеме. В работе реализуется динамическая модель манипулятора с пневматическим приводом и строится система квазистатического позиционного управления, основанная на нейросетях.

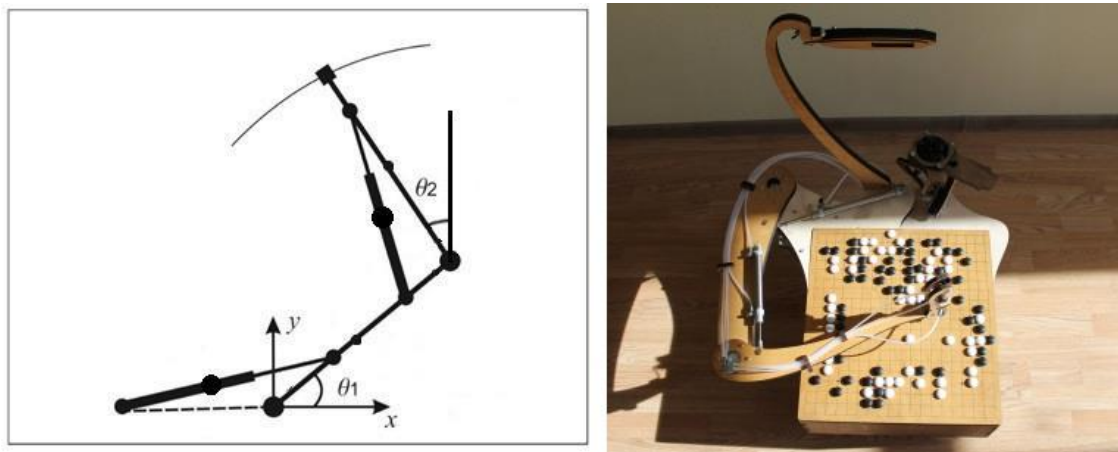


Рис. Манипулятор МанГо и его кинематической схема

Система управления представляет полностью связную нейронную сеть из 4-ех слоев. Входной слой нейросети получает начальные и целевые положения звеньев, в которые должна перейти система. На выходе нейронная сеть выдает вектор времен открытия клапанов пневматических цилиндров, которые переводят манипулятор из начального положения в целевое.

Для данной модели в среде Wolfram Mathematica построена и обучена нейронная система управления, которая позиционирует манипулятор с точностью менее 1 мм. Проведен сравнительный анализ с управлением, основанным на нейроподобном обучении, построенном в статье [2] для этого же манипулятора. В дальнейшем планируется реализовать данные алгоритмы на лабораторном прототипе робота и провести натурные испытания.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-08-01441 А.

1. Neural network-based adaptive tracking control of mobile robots in the presence of wheel slip and external disturbance force, Ngoc-Bach Hoang, Hee-Jun Kang, Neurocomputing, 2016, 0925-2312.

2. Квазистатическая модель манипулятора манго с нейроподобным управлением. В.Е.Павловский, А.В.Подоприсветов, В.С.Смолин. Тр. XIX Международной научно-технической конференции "Нейроинформатика-2017 Россия, Москва, 2-6 октября 2017. Ч.1, М.: НИЯУ МИФИ, (2017) с.50–59.

НОВАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ КЕРАМИК, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ МНОГООСНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

А.А. Попов, Н.Н. Берендеев, А.Н. Сысоев, М.С. Болдин, Е.А. Ланцев

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского
Научно-исследовательский физико-технический институт, Нижний Новгород
popov@nifti.unn.ru

В работе обсуждается новый экспериментально-расчетный метод оценки прочности и трещиностойкости современных конструкционных керамик, эксплуатирующихся в условиях многоосного напряженно деформируемого состояния. В качестве параметров, оказывающих наиболее существенное влияние на степень и вид напряженного состояния в образце, рассматривались геометрические характеристики оснастки, образца и начального дефекта (трещины).

В основе новой методики испытаний на прочность лежит методика испытаний на изгиб по схеме b3b [1], при которой плоский цилиндрический образец располагается на трех точках опоры, образующих равносторонний треугольник, и нагружается до разрушения с заданной скоростью (Рис.). Опорные шары в оснастке располагаются в направляющих, что по сравнению с классическим вариантом [1] позволяет существенно варьировать размер шаров. Предварительно нанесенные на поверхность образца трещины позволяют дополнительно оценить истинный коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} [2].

В качестве объекта исследования выступали мелкозернистые керамики на основе оксида алюминия и ультрамелкозернистые твердые сплавы на основе карбида вольфрама, полученные методом электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС, в иностранной литературе используется термин «Spark Plasma Sintering», SPS).

В работе сформулированы пределы применения предлагаемой методики для исследования изгибной прочности и вязкости разрушения мелкозернистых керамик. Показано, что максимальное растягивающее напряжение расположено на противоположной нагружающему шару поверхности образца. Проведен анализ влияния максимальных главных напряжений высоты образца при фиксированной опорной окружности, в ходе которого установлено, что геометрическая функция наиболее слабо меняется при уменьшении соотношения высоты образца к радиусу опорной окружности. Установлена зависимость коэффициента интенсивности напряжений от геометрических параметров исходного дефекта. Приведенные выше результаты были получены путем численного моделирования с применением метода конечных элементов.

Для объяснения полученных результатов для хрупких материалов был предложен критерий прочности напряженного состояния, в основе которого лежит расширенная модель Друкера-Прагера [3], где учитывается влияние степени многоосности напряженного состояния и знака главных напряжений. Установлено, что предложенный критерий прочности дает хорошее согласие экспериментальных результатов новой методики и методики стандартных испытаний на изгибную прочность и коэффициент интенсивности напряжений (для выбранных структурных состояний).

Результаты испытаний с использованием новой методики сопоставлены с данными измерения твердости и трещиностойкости по Палмквисту для исследуемых образцов.

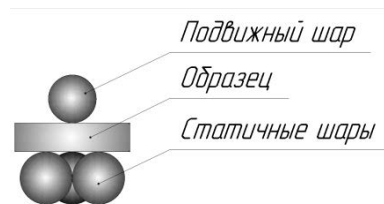


Рис. Схема нагружения b3b

1. Borger A., Supancic P. The ball on three balls test for strength testing of brittle discs: stress distribution in the disc // Journal of the European Ceramic Society. 2002. P. 1425–1436.

2. Strobl S., Rasche S. Fracture toughness testing of small ceramic discs and plates // Journal of the European Ceramic Society. 2014. P. 34.

3. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Brown University. 1952. P. 157–165.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

pss1@mail.ru

В технике хорошо известен эффект аэродинамического нагрева. Температура движущегося объекта в атмосфере близка к температуре торможения в результате перехода скоростного напора в теплоту. При сверхзвуковой скорости полета перед телом возникает головная ударная волна, за которой температура газа возрастает. При движении высокоскоростного потока в канале двигателя или в аэродинамической трубе обтекаемые поверхности разогреваются до температуры близкой к температуре торможения. Однако полного восстановления температуры до значения температуры торможения не происходит. Если стенка теплоизолирована, то температура пристенного слоя газа будет равняться температуре восстановления – в общем случае не равной температуре торможения. Мерой отклонения служит коэффициент восстановления температуры, показывающий долю энергии потока, переходящей в тепло на стенке.

Интенсивность теплообмена при сверхзвуковых скоростях течения оценивают по коэффициенту теплоотдачи (числу Стентона), который с учетом эффектов сжимаемости определяется отношением теплового потока в стенку к разности между температурой стенки и температурой восстановления. При определении коэффициента теплоотдачи в данном случае основной проблемой является нахождение температуры восстановления, поскольку её непосредственное определение в эксперименте затруднено. Предложена методика одновременного определения коэффициентов теплоотдачи и восстановления температуры в процессе запуска сверхзвуковой аэродинамической установки до выхода на равновесный тепловой режим [1]. Регистрируя термогазодинамические параметры сверхзвукового потока с частотой 1 Гц, можно вычислить тепловой поток на стенке с помощью решения одномерного уравнения теплопроводности для полубесконечного тела.

Экспериментальные исследования проводились на сверхзвуковом аэродинамическом стенде (Рис.) с использованием систем регистрации данных National Instruments, автоматизированных программ опроса и обработки показаний сенсорных устройств в среде LabView, термопар с термокомпенсацией, зондовых измерений, тепловизионных и оптических методов визуализации картины течения.

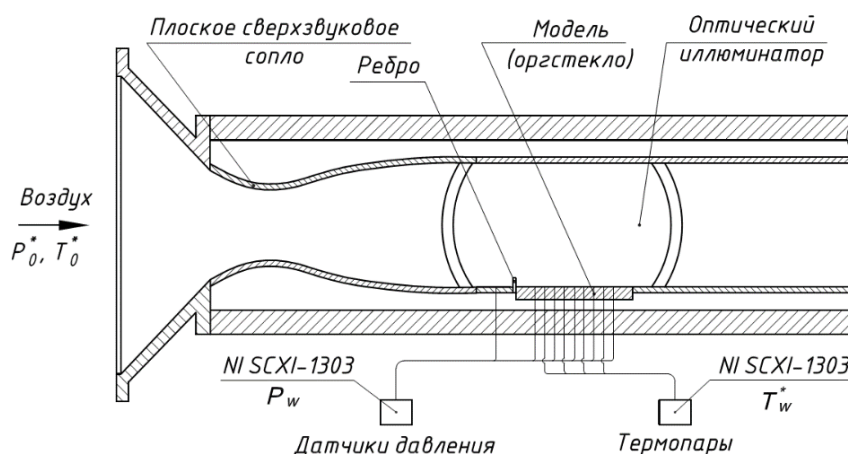


Рис. Схема проведения экспериментального исследования на сверхзвуковой аэродинамической установке

Работа выполняется за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00699).

1. Виноградов Ю.А., Попович С.С., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование коэффициента восстановления температуры и интенсификации теплоотдачи при течении на плоской стенке за ребром сверхзвукового потока сжимаемого газа. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. № 11. С. 55–75, DOI: 10.7463/1116.0849557.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА

С.С. Попович

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
pss1@mail.ru

Вследствие вязкой диссипации в пограничном слое сверхзвукового потока сжимаемого газа происходит перераспределение температуры торможения. В результате температура торможения во внутренней части пограничного слоя – температура восстановления – оказывается ниже, а во внешней части – выше, чем температура торможения в основном потоке (для газов с числом Прандтля меньше единицы) (Рис.). Определение температуры восстановления является одной из главных проблем при исследовании теплообмена сверхзвуковых потоков, поскольку ее непосредственное измерение в эксперименте затруднено. Для этого необходимо либо проведение длительных экспериментов на теплоизолированных моделях с достижением равновесного теплового режима, либо использование специальных методик математической обработки кратковременных экспериментов [1].

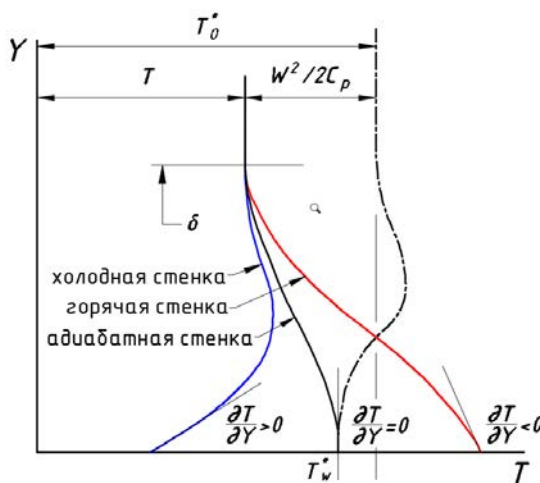


Рис. Тепловой пограничный слой при обтекании стенки сверхзвуковым потоком

Внешние воздействия (градиент давления, проницаемость стенки, число Прандтля рабочего тела, форма и рельеф поверхности, скачки уплотнения и отрывные течения) могут приводить как к повышению аэродинамического нагрева в локализованной области, так и к охлаждению стенки. Известен эффект снижения адиабатной температуры стенки до значений ниже термодинамической температуры при поперечном обтекании дозвуковым сжимаемым потоком цилиндра в области задней критической точки (эффект Эккерта-Вайзе). Для сверхзвуковых потоков снижение температуры восстановления фиксируется в следе за обтекаемым препятствием в виде клина, ребра или ступеньки.

Эффект перераспределения температуры торможения в пограничном слое сжимаемого газа вследствие вязкой диссипации газа в пограничном слое играет важное значение в задачах расчета аэродинамического нагрева поверхности, объяснении эффекта аэродинамического охлаждения в следе за плохо обтекаемыми телами, эффекта газодинамической температурной стратификации и некоторых других. Сложность измерения температуры торможения с помощью термопары, помещенной в сверхзвуковой поток, заключается в том же самом эффекте восстановления температуры при обтекании спая термопары, как и любого другого предмета в сверхзвуковом потоке. В результате перераспределения температуры в пограничном слое термопара измеряет не температуру торможения, а температуру восстановления, что может вносить значительную погрешность в измерения.

Работа выполняется при поддержке стипендии Президента РФ СП-631.2018.1.

1. Leontiev A.I., Popovich S.S., Strongin M.M., Vinogradov Y.A. Adiabatic wall temperature and heat transfer coefficient influenced by separated supersonic flow // EPJ Web of Conf. 2017. V. 159. P. 1–5. DOI: 10.1051/epjconf/201715900030.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ДЛЯ БЕЗОГНЕВОГО ПОДОГРЕВА И РЕДУЦИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

С.С. Попович, А.Г. Здитовец, Н.А. Киселёв, М.С. Макарова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

pss1@mail.ru

Снижение (редуцирование) давления газа на газораспределительных станциях (ГРС) от магистральных 50-120 бар до 6 бар в населенных пунктах приводит к существенному падению температуры газа (0.55 градуса на 1 бар). Процесс дросселирования приводит к образованию конденсата в виде газогидратов, обмерзанию регулирующих клапанов, запорной арматуры, приборов и трубопроводов. Для исключения эффекта гидратообразования на ГРС применяют системы подогрева газа. Блок подогрева представляет собой массивную конструкцию с котельной, на которой за счет сжигания части газа остальная часть подогревается.

В технике известен способ безмашинного энергоразделения газового потока, который может быть использован для осуществления безогневого подогрева и редуцирования давления газа [1]. В основе данного метода лежит тепловое взаимодействие между сверхзвуковым и дозвуковым потоками, разделенными теплопроводной перегородкой (Рис.). Газ с начальным давлением P_0^* и температурой T_0^* разделяется на 2 потока: дозвуковой, текущий, например, по центральному каналу, и сверхзвуковой – по кольцевому, или наоборот. За счет теплообмена через разделяющую потоки стенку на выходе из устройства мы получаем потоки с разными температурами. Часть газа, поступающая в профилированное сверхзвуковое сопло, теряет полное давление при разгоне и торможении в диффузоре и подогревается за счет теплообмена через стенку с дозвуковым потоком. Газ, подаваемый во второй канал, сохраняет полное давление и охлаждается за счет теплоотдачи через стенку к сверхзвуковому потоку. Интенсивность нагрева или охлаждения зависит от соотношения расходов по сверхзвуковой и дозвуковой стороне.

Эффективность устройства сверхзвукового безмашинного энергоразделения определяется прежде всего количеством теплоты, передаваемой через разделяющую потоки стенку, который зависит от коэффициента теплопередачи, площади поверхности теплообмена, начальной температуры торможения потока и адиабатной температуры стенки, обтекаемой сверхзвуковым потоком.

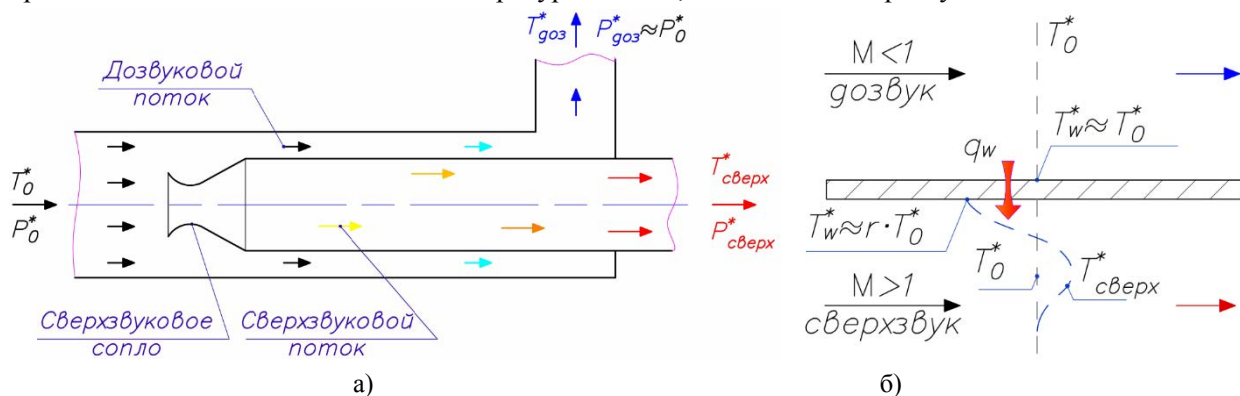


Рис. Принцип действия устройства безмашинного энергоразделения (а) и температурный напор между сверхзвуковым и дозвуковым потоками в устройстве (б)

Работа выполняется при поддержке гранта Фонда «НИР» компании «Иннопрактика» МГУ имени М.В. Ломоносова.

1. Vinogradov Y.A., Zditovets A.G., Leontiev A.I., Popovich S.S., Strongin M.M. Experimental research of shock wave processes influence on machineless gas flow energy separation effect // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 891. N. 012080. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012080.

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГИХ ТРУБОК КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ С ПРОТЕКАЮЩЕЙ ВНУТРИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

А.Б. Порошина, В.В. Веденеев

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
poroshina@imec.msu.ru

Исследования флаттера эластичных трубок при протекании через них жидкостей имеет приложение в различных областях. Например, изгибная неустойчивость может возникнуть в различных промышленных охладителях, включая охладители ядерных реакторов. Другим примером может служить потеря устойчивости и вибрации стенок сосудов в организме человека и животных [1]. Настоящая работа посвящена исследованию устойчивости течения степенной жидкости в упругих трубках конечной длины.

Трёхмерная система уравнений (уравнение Навье-Стокса для степенной жидкости и уравнение движения трубки), описывающая длинноволновые низкочастотные движения системы, сводится к одномерной системе уравнений путем интегрирования по поперечному сечению трубки.

Для бесконечно длинной упругой трубки показано, что неустойчивость, при которой сохраняется осесимметричность движения трубки, возможна лишь при показателе степенного закона $n < 0.611$. Однако, если неустойчивость будет конвективной, то она может не наблюдаться в реальности. Но если неустойчивость будет абсолютной, что возможно только при показателе степенного закона $n < 1/3$, то локализованные возмущения растут во всей области [2].

Для трубок конечной длины без учёта продольного натяжения задача исследовалась аналитически. Найденная граница неустойчивости совпадает с границей абсолютной неустойчивости для бесконечно длинных трубок. При учёте продольного натяжения численно было показано, что область неустойчивости уменьшается при увеличении значения продольного натяжения N .

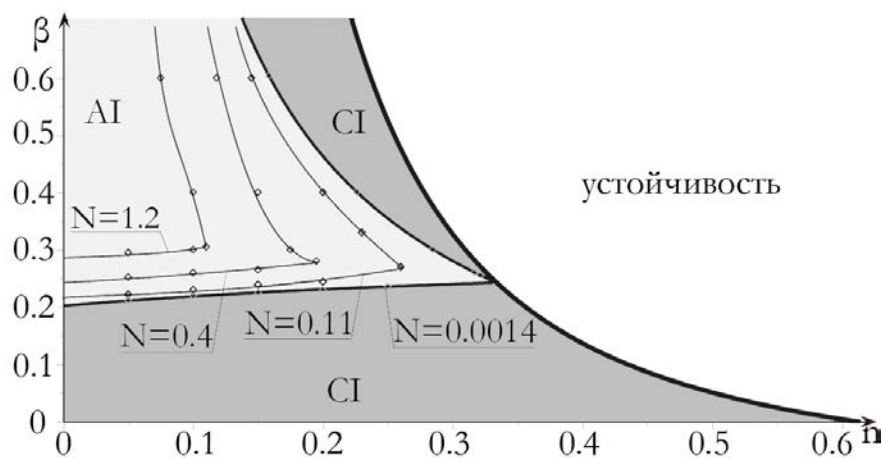


Рис. График зависимости радиальной жесткости трубки (β) от показателя степенной среды (n).
Область абсолютной (АИ) и конвективной (СИ) неустойчивости.

1. Grotberg J.B., Jensen O.E. Biofluid mechanics in flexible tubes// Ann. Rev. Fluid Mech. 2004.V. 36, p. 121–147.
2. 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. 2018. Т.300 С. 42–64.

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ АЦЕТАБУЛЯРНОГО КОМПОНЕНТА ЭНДОПРОТЕЗА ШЕЙКИ БЕДРА

Р.Д. Пряжеский³, О.А. Саченков^{1,2}, Е.В. Осовский⁴

¹Казанский федеральный университет, Казань

²Казанский национальный исследовательский технический университет, Казань

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

⁴Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск
gidropress3.01@mail.ru; 4works@bk.ru; Johny_IF@meta.ua

В клинической практике в виду наличия патологий форма вертлужной впадины деформируется – возникает дисплазия. В этом случае при проведении эндопротезирования можно выделить два основных подхода к протезированию: без остеотомии и с остеотомией. Второй способ подразумевает большую инвазию и сложность в проведении операции. Первый способ при недостаточном проценте покрытия ацетабулярного компонента эндопротеза может привести к нежелательным пост операционным последствиям (например, вывих). Настоящая работа посвящена получению аналитических решений для поля напряжений и перемещений при внедрении штампа с дефицитом покрытия в упругое пространство. За основу взяты методы, изложенные в работах Л.А. Галина (проведена попытка переноса решений модельных задач на задачи реальные). По выстроенным решениям проведены верификация расчетных моделей, разработанных ранее с привлечением МКЭ [1, 2], а также анализ ранее проведенных натурных испытаний для эндопротеза в сборе [3, 4].

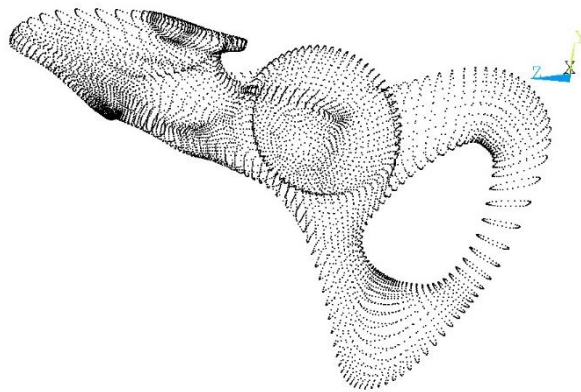


Рис. Конечно элементная модель тазобедренного сустава

Благодарности: Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-31-50068.

1. Закиров Р.Х., Зарипов Р.А., Коноплев Ю.Г., Митряйкин В.И., Саченков О.А. Диагностика асептического некроза головки бедренной кости с использованием спиральной компьютерной и магнитно-резонансной томографии и применение математического моделирования при планировании операции по эндопротезированию тазобедренного сустава // Практическая медицина. 2012. № 8-2 (64). С. 63–68.

2. Коноплев Ю.Г., Мазуренко А.В., Саченков О.А., Тихилов Р.М. Численное исследование влияния степени недопокрытия вертлужного компонента на несущую способность эндопротеза тазобедренного сустава // Российский журнал биомеханики. 2015. Т. 19. № 4. С. 330–343.

3. Коноплев Ю.Г., Мазуренко А.В., Саченков О.А., Тихилов Р.М. Экспериментальное исследование влияния степени недопокрытия вертлужного компонента на несущую способность эндопротеза // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18. № 3. С. 333–344.

4. Тихилов Р.М., Шубняков И.И., Мазуренко А.В., Митряйкин В.И., Саченков О.А., Кузин А.К., Денисов А.О., Плиев Д.Г., Бояров А.А., Коваленко А.Н. Экспериментальное обоснование установки ацетабулярного компонента с недопокрытием при эндопротезировании пациентов с тяжелой степенью дисплазии // Травматология и ортопедия России. 2013. № 4 (70). С. 42–51.

ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ИНВАРИАНТНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ С ПОДВИЖНЫМИ ГРАНИЦАМИ

Д.В. Тарлаковский¹, Г.В. Федотенков¹, Р.Д. Пряжевский²

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

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва
gidropress3.01@mail.ru

В данной работе рассматривается плоская нестационарная задача с подвижными границами. Построено аналитическое решение на различных режимах взаимодействия посредством функционально-инвариантного метода решений. В начальный момент времени полуплоскость считается недеформированной, закон внедрения штампа -произвольный. Форма штампа является гладкой. Внутри границы области контакта перемещения полностью определяются формой ударника и законом внедрения. Напряжения вне границы полагаются равными нулю. Решение указанной задачи сводится к решению краевой задачи Гилберта [1]. При постулировании однородности функций упругих потенциалов посредством метода функционально-инвариантных решений исходная задача сводится к краевой задаче Шварца. Найдены выражения для перемещений вне контактной области и напряжений непосредственно под штампом. Как частный случай, рассмотрен случай нестационарного внедрения клина в упругое полупространство.

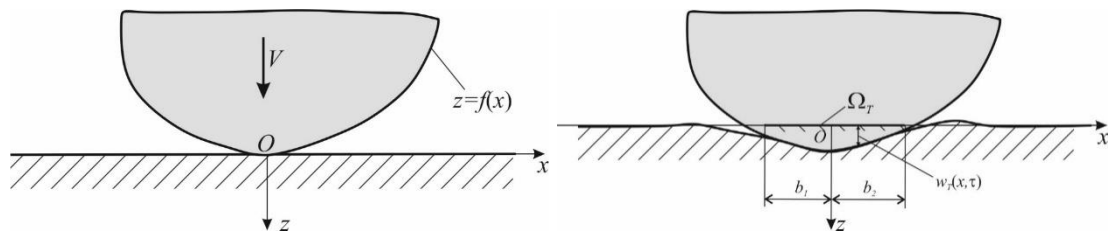


Рис. Расчетная схема внедрения

1. Ломунов А.К., Пряжевский Р.Д. Нестационарная контактная задача для абсолютно твердого гладкого штампа и упругой полуплоскости на дорелеевском интервале движения границ области взаимодействия. Проблемы прочности и пластичности, т. 79, № 1, С 5-15. РФФИ 16-38-50238 мол_нр, 16-08-00260 А.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА С ПОМОЩЬЮ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ

Е.А. Родина¹, С.П. Баутин^{1,2}

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург

²Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск

rodinaekan@gmail.com

Рассмотрена полная система уравнений Навье-Стокса в случае одномерного плоско-симметричного течения вязкого теплопроводного сжимаемого газа, с независимыми термодинамическими параметрами $\delta = 1/\rho$ – удельный объем, p – давление [1, 2]. Для неё поставлена начально-краевая задача с условием непротекания на границах $x=0$ и $x=\pi$ и условием теплоизоляции на этих же границах.

Решение данной начально-краевой задачи представляется в виде бесконечных тригонометрических рядов. Чтобы получить уравнения для коэффициентов рядов, каждое уравнение системы проецируется на свою систему базисных гармоник. Из-за того, что эти коэффициенты зависят только от одной переменной, данной процедурой задача построения всего решения сводится к решению бесконечной системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Чтобы численно построить решение полученной СОДУ, ограничиваем количество слагаемых рядов, а также упрощаем выражения в правых частях СОДУ, избавившись от двойных сумм. Данная СОДУ решается с помощью метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности. После нахождения коэффициентов рядов, их значения подставляются в исходное представление решения.

Полученное решение полной системы уравнений Навье-Стокса совпадает с результатами предыдущих исследований полученными в [1].

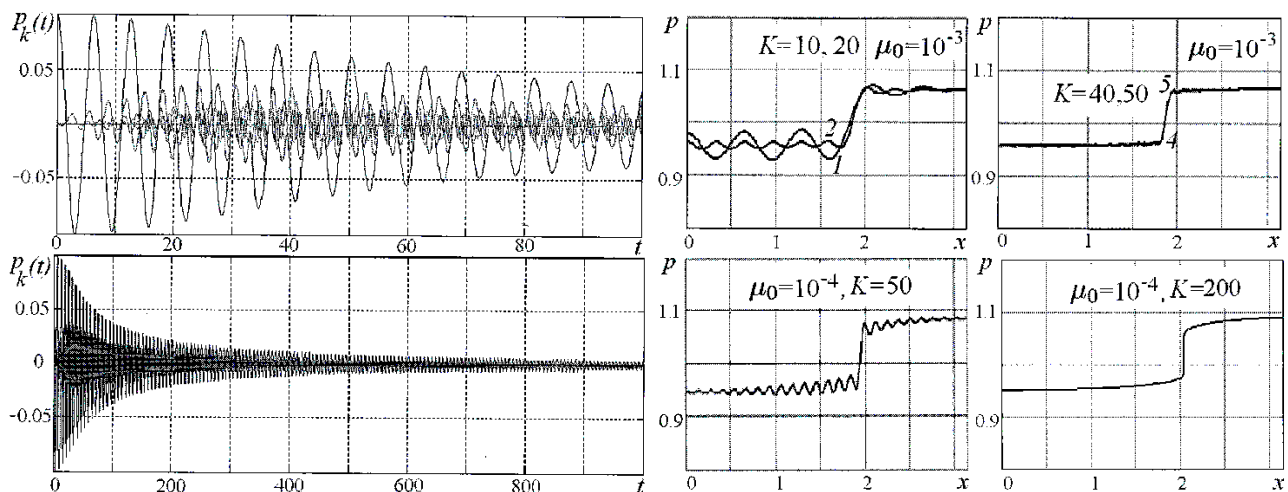


Рис. Слева – поведение коэффициентов тригонометрических рядов $p_k(t)$, справа – поведение расчетов течений при разном числе коэффициентов K и при разном значении коэффициента вязкости μ_0

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е., Скачков П.П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. Новосибирск: Наука; Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014.

2. Баутин С.П. Характеристическая задача Коши и её приложения в газовой динамике. Новосибирск: Наука, 2009.

ТЕРМОВИБРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПЛОСКОМ СЛОЕ ПРИ КРУГОВЫХ ВИБРАЦИЯХ

К.Ю. Рысин, В.Г. Козлов, А.А. Вяткин

ПГГПУ, Лаборатория вибрационной гидромеханики, Пермь
rysin@pspu.ru

Исследуется влияние круговых поступательных вибраций на тепловую конвекцию в тонком горизонтальном плоском слое с изотермическими границами различной температуры. Плоский слой подогревается сверху и совершает поляризованные по кругу вибрации в горизонтальной плоскости. Изучена граница возбуждения вибрационной тепловой конвекции в устойчиво стратифицированной в поле силы тяжести жидкости в зависимости от интенсивности вибраций, толщины слоя и разности температур границ слоя. Результаты исследований представлены на плоскости управляющих безразмерных параметров, гравитационного и вибрационного чисел Релея. Эксперименты выполнены на тонких слоях воды, а также этилового спирта. Случай вращающегося плоского слоя в осциллирующих силовых полях при равенстве частоты осцилляций и частоты вращения ранее был рассмотрен в работе [1].

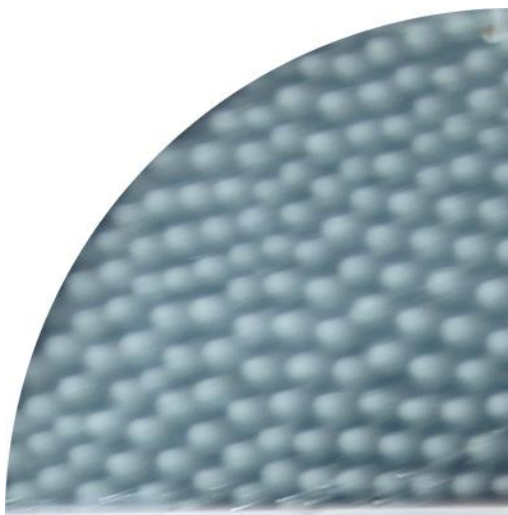


Рис. $T_{\text{ср}}=37.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Theta=18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{vib}}=6.1\text{ Гц}$, $b=4.1\text{ см}$, $R=6.8\text{ см}$, $h=0.29\text{ см}$ спирт.

Обнаружено повышение теплопереноса существенно ниже порога возбуждения «классической» вибрационной конвекции. Наблюдения показали, что в слое развивается система конвективных ячеек (см.рис.). Возрастание теплового потока наблюдается в ограниченной области частот. Предполагается, что развитие ячеистой вибрационной тепловой конвекции связано с возбуждением собственных колебаний устойчиво стратифицированной в поле силы тяжести жидкости. При высокочастотном вибрационном воздействии порог возбуждения тепловой конвекции близок к теоретически исследованному.

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки (проект РФ 3.9053.2017/БЧ).

1. Вяткин А.А., Иванова А.А., Козлов В.Г., Рысин К.Ю. Влияние тангенциальной составляющей силового поля на конвекцию во вращающемся плоском слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2017, том 53. № 2. С. 215–222.

АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОСАТЕЛЛИТОВ В ПРОЦЕССЕ КАПИЛЛЯРНОГО РАСПАДА ВЯЗКИХ СТРУЙ

А.А. Сафронов

ГНЦ ФГУП Центр Келдыша, Москва
a.a.safr@yandex.ru

Моделирование капиллярного распада струй вязких жидкостей является актуальной задачей для многих технических приложений. Одно из них – отвод низкопотенциального тепла в циклах космических энергетических установок нового поколения в процессе радиационного охлаждения специальным образом сформированного дисперсного потока, свободно распространяющегося в космическом пространстве [1]. Генерация капель осуществляется методом вынужденного капиллярного распада, а сбор остывшего рабочего тела – с помощью уловителя капель. К теплоносителю предъявляется требование низкой испаряемости. Все потенциально пригодные для использования в космосе рабочие тела имеют достаточно большую вязкость. Закономерности распада струй таких жидкостей при числе Онезорге, близком к единице, рассмотрены в работе [2], в которой получены зависимости размеров основных и спутных капель от волнового числа возмущения. Однако результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что капиллярный распад сильно вязких струй может сопровождаться образованием не только спутных капель, но и микросателлитов (или субсателлитов). При этом на одну основную каплю приходится несколько микросателлитов, масса которых может на несколько порядков отличаться от ее массы.

Ранее проводились исследования образования микросателлитов в процессе капиллярного распада струй маловязких жидкостей (например [3]). Однако из экспериментальных наблюдений известно, что процесс образования субсателлитов сложным образом зависит от числа Онезоге [4]. В представленной работе теоретически и экспериментально исследуется процесс образования микросателлитов при капиллярном распаде струй вязких жидкостей.

Микросателлиты образуются в области тонкого перешейка, соединяющего зародыши основной и спутной капель. При числе Онезорге, близком к единице, силы инерции пренебрежимо малы по сравнению с силами вязкости и поверхностного натяжения. Утончение струи происходит по автомодельной закономерности и слабо зависит от начальных условий. Эти закономерности рассмотрены в работе [5]. В представленной работе исследуется устойчивость автомодельных закономерностей вязкого утончения. Предложена теоретическая модель, позволяющая определить момент зарождения структуры зародышей микросателлитов на поверхности струи. Исследованы автомодельные закономерности отрыва зародыша микросателлита от струи. Объяснена фрактальная форма поверхности струи вблизи точки её разрыва. Проведено сравнение теоретически полученных результатов с экспериментом и численным расчётом.

1. А.А. Коротеев, А.А. Сафронов, Н.И. Филатов. Влияние структуры капельной пелены на мощность бескапильных космических излучателей и эффективность энергетических установок. Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54 № 5. С. 817–820. DOI: 10.1134/S0018151X16050175.

2. А.А. Сафронов. Особенности капиллярного распада струй жидкости при числах Онезога больше единицы // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90 №1. С. 176–185. DOI: 10.1007/s10891-017-1552-7.

3. Tjahjadi, M., Ottino, J. M., & Stone, H. A. (1992). Satellite and subsatellite formation in capillary breakup // Journal of Fluid Mechanics, V. 243, P. 297–317. 1992. DOI: 10.1017/S0022112092002738.

4. Campo D.L., Clasen C. The slow retraction method (SRM) for the determination of ultra-short relaxation times in capillary breakup extensional rheometry experiments // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. V. 165, Is. 23–24, December 2010, P. 1688–1699.

5. Jens Eggers. Stability of a viscous pinching thread // Physics of fluids, 24, 072103 (2012). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4732545>.

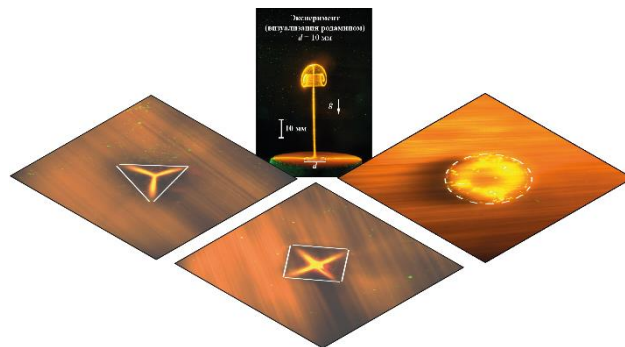
СТРУКТУРА КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, А.Н. Кондрашов, М.М. Гончаров

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
ivan-sboev@yandex.ru

В проведенном исследовании экспериментальными и численными методами изучен механизм развития теплового и гидродинамического пограничных слоев вблизи нагретых пластин различной форм и размеров. В частности, исследованы пространственная периодичность и временная эволюция локальных конвективных потоков в жидкости. Рассмотрены вопросы устойчивости пограничного слоя на этапе формирования конвективного факела.

Визуализация течения выполнялась при помощи флуоресцирующего красителя, в качестве которого использовался родамин. При появлении в полости конвективного течения красящее вещество поднималось вверх, позволяя наблюдать структуру потока. На рисунке справа изображены фотографии течений над нагревателем различной формы в плоскости лазерного ножа с длиной волны 532 нм.



Лабораторные исследования проводились лишь для качественного представления реального процесса развития конвективного течения. С целью обобщения результатов наблюдений и исследования количественных характеристик более сложных течений выполнялось численное моделирование в пакете COMSOL. Основным результатом исследования заключался в разработке теоретической модели, которая представляет собой комбинацию гармонических функций и позволяет описать структуру пограничного слоя исходя из граничных условий задачи.

Решение обсуждаемых в данной работе вопросов поможет лучше представлять механизмы передачи тепла от нагретых тел различной формы и способы организации конвективного течения в системах с локализованными источниками тепловыделения [1–3]. Кроме того, полученные результаты найдут применение в области проектирования современных систем охлаждения электронных устройств и компонентов, а также помогут обеспечить научно обоснованный выбор оптимальных параметров геометрических размеров теплообменных поверхностей и неизотермических технологических процессов [4–7].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-31-00165 мол_a).

1. Гибанов Н.С., Шеремет М.А. Влияние формы и размеров локального источника энергии на режимы конвективного теплопереноса в квадратной полости // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7 № 2. С. 271–280.

2. Kaminski E. Rise of volcanic plumes to the stratosphere aided by penetrative convection above large lava flows // Earth and Planetary Science Letters. 2011. Vol. 301. P. 171–178.

3. Cagney N. et al. Temperature and velocity measurements of a rising thermal plume // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2015. Vol. 16, no. 3. P. 579–599.

4. Lappa M. Some considerations about the symmetry and evolution of chaotic Rayleigh–Bénard convection: The flywheel mechanism and the “wind” of turbulence // Comptes Rendus Mécanique, 2011, Vol. 339, no. 9, P. 563–572.

5. Hattori T. et al. Prandtl number dependence and instability mechanism of the near-field flow in a planar thermal plume // J. Fluid Mech. 2013, Vol. 732, P. 105–127.

6. Keken P. E., Davaille A., Vatteville J. Dynamics of a laminar plume in a cavity: The influence of boundaries on the steady state stem structure // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. Vol. 14, no. 1. P. 158–178.

7. Kondrashov A., Sboev I., Dunaev P. Evolution of convective plumes adjacent to localized heat sources of various shapes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 103. P. 298–304.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ЛАМИНАРНОГО ОСЕСИММЕТРИЧНОГО КОНВЕКТИВНОГО ФАКЕЛА

И.О. Сбоев, К.А. Рыбкин, А.Н. Кондрашов, А.А. Старцев

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
ivan-sboev@yandex.ru

В ходе работы исследованы характеристики стационарного конвективного течения жидкости в цилиндрической полости, вызванного локализованным подогревом нижней границы. Опыты проводились с цилиндрическим слоем, у которого соотношение высоты к диаметру составляет $H/D = 1$ и 3 (рис.). Высота рабочего слоя выбиралась равной 40 мм. Снизу полость ограничивалась массивом из оргстекла толщиной 25 мм, а сверху – алюминиевой пластиной толщиной 7 мм, либо оставалась открытой. С боковых сторон слой жидкости окружался трубкой из оргстекла с толщиной стенок 3 мм. Прозрачность боковой границы позволила исследовать структуру конвективных движений методом PIV. Для этого в рабочую полость, заполненную дистиллированной водой (0.97 г/см³), вносились светоотражающие частицы (1.05 г/см³), а при помощи вертикального лазерного ножа с длиной волны 532 нм вырезалась плоскость в центре слоя. Подогрев выполнялся за счет медного нагревателя диаметром $d = 10$ мм, расположенного в центре нижнего основания. С внутренней стороны медный теплообменник приводился в контакт с резистором. Для измерения температуры нагревателя ΔT_1 внутри источника располагался спай дифференциальной термопары. Интенсивность подогрева поддерживалась постоянной за счет регуляции мощности тока, проходящего через резистор.

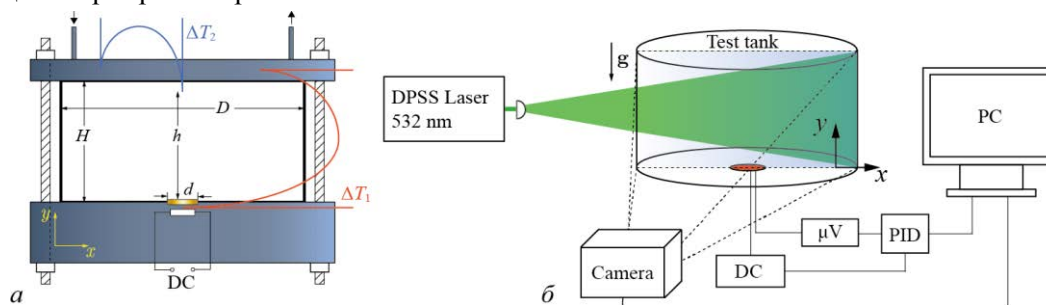


Рис. а - схема лабораторной модели, б - схема экспериментальной установки

Имеющиеся результаты в виде термограмм $\Delta T_2(t)$, зарегистрированных второй термопарой на высоте $h = 37$ мм над источником тепла, позволяют судить о длительности распространения теплового возмущения после включения источника тепла. Такой подход позволил исследовать зависимость времени достижения всплывающим конвективным факелом от степени подогрева. Однако существенное ограничение результатов этих исследований заключается в том, что, используя лишь сигнал термопары, нельзя получить представление о распространении факела раньше, чем он достигнет датчика температуры. Поэтому в ходе проведенного исследования уточнялась предлагаемая модель для скорости распространения конвективного факела [1]. Для этого применялась визуализация течения, которая позволила оценить продолжительность формирования конвективного течения и получить поправку для скорости распространения конвективной струи. Вместе с этим были исследованы характеристики установившегося течения при различных значениях управляющего параметра, в качестве которого использовалось число Рэлея Ra , а также для полостей с разным аспектным соотношением и граничными условиями на верхней стенке [2]. Кроме этого, на основе известной модели эволюции конвективного факела предприняты попытки обобщить теорию на случай течения в периодически изменяющемся инерционном поле.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-31-00165 мол_а).

1. Бабушкин И.А. и др. Развитие теплового плюма в узком вертикальном слое // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2015. Т. 2. № 34. С. 41–52.

2. Aminossadat S.M., Ghasemi B. A numerical study of mixed convection in a horizontal channel with a discrete heat source in an open cavity // European Journal of Mechanics - B/Fluids. 2009. Vol. 28. No. 4. P. 590–598.

ОСОБЕННОСТИ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ СЕРДЕЧНИКОВ ПУЛЬ С УДЛИНЕННОЙ ОЖИВАЛЬНОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТЬЮ С ЗАДАНЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Л.П. Семенова

Тульский государственный университет, Тула
LudmilaCemenova@yandex.ru

Особенности изготовления сердечников пуль с удлиненной оживальной головной частью обусловлены трудностями, связанными с достижением больших перепадов диаметра на торцевом участке тонкого цилиндрического стержня, при необходимости обеспечения высокой производительности, единообразия и требуемого качества изделия.

Наиболее эффективной для получения подобного рода деталей является операция обработки металлов давлением – выдавливание, позволяющая получать детали с достаточной точностью, практически без потерь материала и с требуемыми характеристиками.

Оценка деформируемости и прогнозирование разрушения заготовок проводилась на основе феноменологической теории разрушения [1]. Использование деформационной теории позволяет на каждом этапе деформирования определять среднее нормальное напряжение σ , показатель напряженного состояния η и приращение деформации de_i . Степень использования запаса пластичности Ψ представляется суммированием по приращениям с учетом влияния истории деформирования:

$$\Psi = \int (de_i) / (e_{ip}(\eta)),$$

если $\Psi \leq 0,33$, высокий эксплуатационный уровень, высококачественные изделия, предназначенные для эксплуатации в «жестких» условиях; $\Psi \leq 0,55$, хороший эксплуатационный уровень, качественные изделия, у которых существуют ограничения по нижнему пределу прочности, вязкости и долговечности; $0,55 < \Psi < 1$, низкий эксплуатационный уровень, изделия, которые не несут значительных нагрузок.

С помощью программного комплекса QForm 2D/3D оценена реальная картина пластического формоизменения материала в процессе выдавливания, исследовано напряженно-деформированное состояние во всем объеме обрабатываемой заготовки в любой момент времени, а также оценены силовые параметры и количество технологических переходов для получения изделия с высоким эксплуатационным уровнем.

Маршрутная технология изготовления сердечников пуль с удлиненной оживальной головной частью представлена на рис.

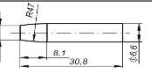
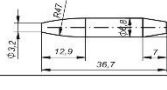
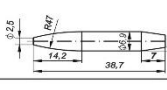
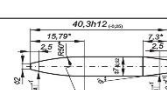
№ п/п	Наименование операции	Эскиз операции	Оборудование
1.	Заготовительная: Отрезка и калибровка		АБ1218
2.	Термохимическая: Отжиг на максимальную пластичность	1. Обжигание в растворе: трихлорид фосфора PCl_3 , 12Н.О ГОСТ 201-78 (80мл); изопропанол ИП-1 ГОСТ 8433-57 (4.5л); жидкое стекло Na_2SiO_3 , ГОСТ 8264-56 (10мл). Приблизительная температура – 300°С. 2. Промывка в ванне с водой, подогретой до температуры 40-50°С, в течение – 3 мин. 3. Сушка при температуре 120-140°С в течение – 30 мин. 4. Отжиг: нагрев полуфабриката в контейнере с циркулирующей жидкостью до температур 750°С-110°С, выдержка: 1 час; охлаждение в воде до 300°С, дальнейшее охлаждение на воздухе. 5. Травление и фрезерование полуфабриката. 6. Смыливание полуфабриката в растворе мыльной эмульсии 15-20мл мыла (60...70% ж.в.) и нагрев до 60...80°С продолжительность 4...5 мин. Сушка при температуре 150...200°С.	Агрегат АЭС-7200 СШОП 1.1.6/12 Специальная ванна с циркулирующей жидкостью, корзина сетчатая
3.	Штамповочная: 1-я штамповка		АБ1218
4.	Термохимическая: Отжиг на максимальную пластичность	См. П.2	
5.	Штамповочная: 2-я штамповка		АБ1218
6.	Термохимическая: Отжиг на максимальную пластичность	См. П.2	
7.	Штамповочная: 3-я штамповка		АБ1218
8.	Термохимическая: Отжиг на максимальную пластичность	См. П.2	
9.	Штамповочная: 4-я штамповка		АБ1218
10.	Термохимическая: Отжиг на максимальную пластичность	См. П.2	
11.	Штамповочная: 5-я штамповка		АБ1218
12.	Термохимическая: Отжиг + закалка	См. П.2 + Закалка: нагрев до температуры 790...810°С, выдержка 60 мин, охлаждение в воде	

Рис. Маршрутная технология холодного пластического формообразования сердечника с оживальной головной частью из стали У12А

1. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия. 1970. 229 с.

ОПИСАНИЕ ПЕРЕХОДА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ В ИДЕАЛЬНОМ КРИСТАЛЛЕ

Е.Б. Старобинский, Д.В. Цветков, А.М. Кривцов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
starobinskij.eb@edu.spbstu.ru

Рассматривается процесс перехода механической энергии в тепловую в нанокристалле без дефектов. Взаимодействие между частицами кристалла – нелинейное, учитывается влияние только ближайших соседей. Начальная температура кристалла задаётся случайными скоростями частиц с нулевым математическим ожиданием и равномерным распределением. Механическая энергия кристалла определяется энергией заданной на нём гармонической волны, после чего численно решается задача Коши для ячейки периодичности с последующим усреднением результатов по ансамблю реализаций [1].

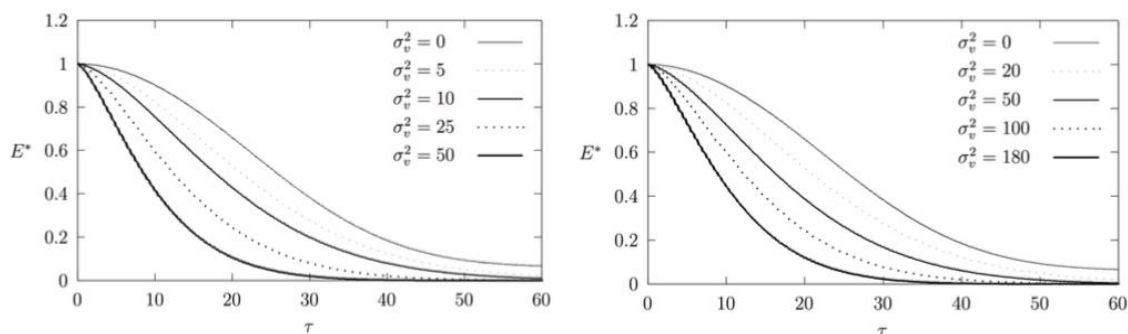


Рис. Графики изменения меры механической энергии от времени для стоячей (слева) и бегущей (справа) волн при различной начальной температуре в одномерном кристалле

Введение в модель идеального кристалла тепловых скоростей частиц приводит к необратимости распределения энергии волны между частицами, если тепловая энергия кристалла достаточно велика в сравнении с механической энергией [2]. В данной работе для реальных кристаллов показывается необратимость этого перехода, а также сохранение волной её первоначальной формы при уменьшающейся амплитуде. Убывание механической энергии со временем (Рис.) описывается модифицированным экспоненциальным законом, что позволяет определить коэффициент внутреннего трения кристалла и описать движение частиц с помощью уравнения продольных колебаний стрежня.

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

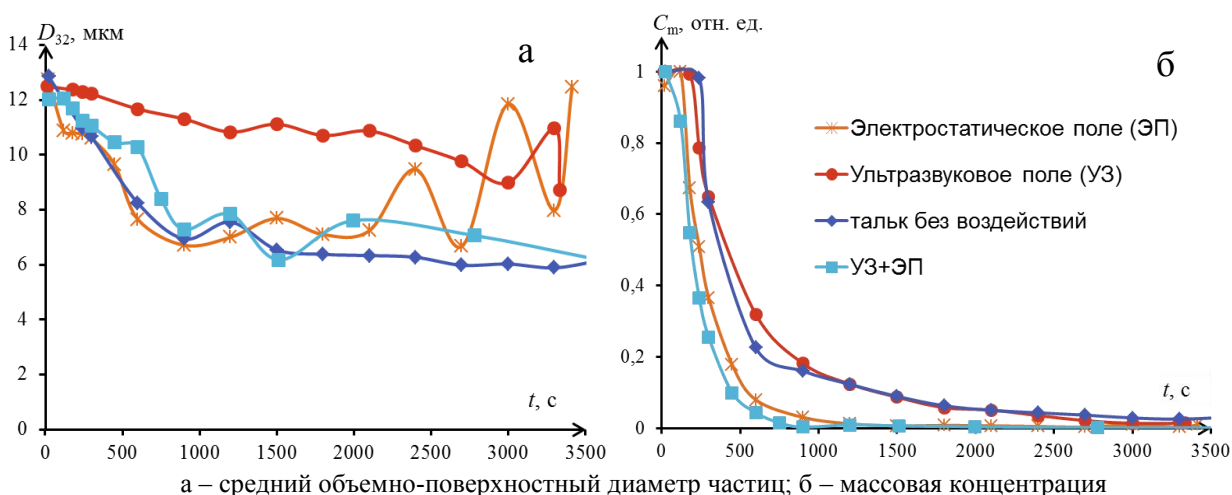
1. A. M. Krivtsov. Energy distribution in one-dimensional crystal. Dokl. Phys. 60 (9), page 407, 2015.
2. D. V. Tsvetkov, A. M. Krivtsov. Energy distribution in one-dimensional crystal. Proc. of XXIV ICTAM, pp. 2450–2451.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ПРИ КОМБИНИРОВАНИИ ВОЗДЕЙСТВИЙ ВНЕШНИХ ПОЛЕЙ

М.Ю. Степкина, О.Б. Кудряшова

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск
mabric@mail.ru

Мелкодисперсные порошки с размером частиц порядка 10^{-6} м являются весьма распространённым материалом, встречающимся в различных областях: фармацевтика, пищевая промышленность, электроника, сельское хозяйство, биотехнологическая наука и т.д. К тому же частицы таких размеров представляют собой побочный материал после проведения технологических испытаний в промышленности, природных катаклизмов, террористических актов, который длительное время остается в воздушной среде и представляет серьезную угрозу для живых организмов. Аэродисперсные системы могут представлять собой взвесь оксидов металлов, древесной и строительной пыли, органических соединений, микроорганизмов, бактерий и пр. В последнее время актуальным вопросом является устранения таких вредных образований из воздуха в короткие сроки. Работа направлена на осаждение взвешенных частиц различного физико-химического состава в воздушной среде при комбинировании влияния физических полей (ультразвукового и электростатического поля) в замкнутом экспериментальном объеме. Результаты экспериментальных исследований представлены в виде изменения дисперсных характеристик и массовой концентрации аэродисперсных частиц (Рис.).



а – средний объемно-поверхностный диаметр частиц; б – массовая концентрация
Рис. Зависимость характеристик аэрозоля талька без воздействий и при различных комбинациях влияния внешних физических полей

Установлено, что характеристики облака аэрозоля зависят от состава, концентрации и механизма осаждения [1]. Проанализирована эффективность осаждения аэрозольных образований различного типа при электростатическом и ультразвуковом способе осаждения в различных комбинациях. Ультразвуковое осаждение эффективно для частиц диаметром менее 20 мкм. Осаждение же электрофильтром мелкодисперсных частиц аэрозоля эффективно для относительно более крупных частиц [2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-10209).

Работа выполнена при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

1. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б., Ахмадеев И.Р., Шалунова К.В., Хмелев В.Н. Экспериментальное исследование динамики дисперсных характеристик аэрозоля при ультразвуковом воздействии // Ползуновский вестник. 2011. № 4-1. С. 176–180.

2. Степкина М.Ю., Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Скорости осаждения мелкодисперсных аэрозолей в акустическом и электрическом поле // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 3. С. 62–68.

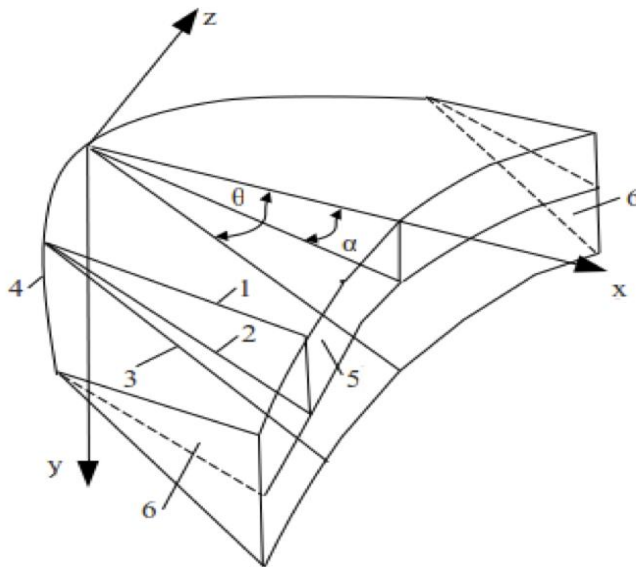
ВОЛНОЛЕТЫ НА ПЛОСКИХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ С МАКСИМАЛЬНЫМ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ КАЧЕСТВОМ

Н.А. Остапенко, С.С. Страдомский

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова
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 направлена по набегающему потоку и не возмущает его. Нижняя поверхность состоит из прямых, составляющих одинаковый угол α с невозмущенным потоком. Передняя кромка – кривая, расположенная в плоскости ударной волны, генерируемой нижней поверхностью и составляющей угол θ с направлением набегающего потока. Кроме



давления в модели взаимодействия потока с поверхностями волнолета присутствует локальный коэффициент трения, изменяющийся, как на пластине, независимо вдоль каждой хорды от передней к задней кромке. Экстремаль – распределение длины хорды волнолета в плане по размаху находится с использованием метода локальных вариаций, адаптированного к вариационной задаче с двумя изопериметрическими условиями. Показано, что при нормированных специальным образом S_y и S_x задача сводится к поиску минимума функционала S_x , зависящего от четырех параметров: α , M – числа Маха, C – тангенса угла, определяющего скос донного среза и m – параметра, характеризующего состояние пограничного слоя. Таким образом, в рамках применяемой модели экстремаль не зависит от числа Рейнольдса, а зависит только от состояния пограничного слоя. В качестве начального контура волнолета в плане принимался контур, состоящий из отрезков прямых, который, как показал анализ необходимых условий экстремума, ни при каких сочетаниях определяющих параметров не является экстремалью. Определена форма оптимального волнолета при отсутствии и наличии ограничений на длину и размах волнолета, а также на тепловой поток к передней кромке при различных комбинациях определяющих параметров и состояниях пограничного слоя. Установлено, что оптимальный волнолет может содержать боковые шайбы, а криволинейный участок передней кромки как при отсутствии ограничения на тепловой поток, так и при его наличии содержит точку перегиба. Показано, что при уменьшении угла α аэродинамическое качество у оптимальных волнолетов увеличивается, а форма меняется незначительно. Угол скоса донного среза волнолета слабо влияет на K . Рост числа Маха при сохранении состояния пограничного слоя приводит к значительному изменению формы оптимального волнолёта.

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

О СТРУКТУРЕ ТЕЧЕНИЯ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ С ЖИДКОСТЬЮ

С.В. Субботин, А.С. Кропачева

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
subbotin_sv@pspu.ru

Известно, что периодические возмущения во вращающейся жидкости распространяются в виде инерционных волн [1]. Эти волны существуют благодаря действию силы Кориолиса и широко распространены как в океанах, так и в жидких ядрах планет. В свою очередь колебания жидкости, обусловленные их распространением, могут приводить к возникновению интенсивных течений, изучению которых посвящена настоящая работа.

Экспериментальная установка представляет быстро вращающуюся вокруг горизонтальной оси кювету с цилиндрической полостью, заполненной маловязкой жидкостью. Для генерации волн скорость вращения меняется по гармоническому закону (либрации). Это приводит к возникновению осциллирующего движения в вязких пограничных слоях, в результате чего из мест соединения боковой и торцевых стенок цилиндра в объем жидкости распространяются инерционные волны. Обнаружено, что вблизи мест отражения волн от боковой стенки полости в пограничном слое Стокса возникает осредненное течение в виде осесимметричных тороидальных вихрей, скорость осредненного движения в которых пропорциональна квадрату амплитуды либраций. При определенных частотах либраций инерционные волны испытывают пространственный резонанс, формируя в объеме полости крупномасштабные осциллирующие структуры (так называемые инерционные моды, Рис.). Последние являются собственными модами колебаний жидкости для данной геометрии полости. Резонансное возбуждение инерционных мод не только модифицирует осредненное течение, но и увеличивает его интенсивность в несколько раз.

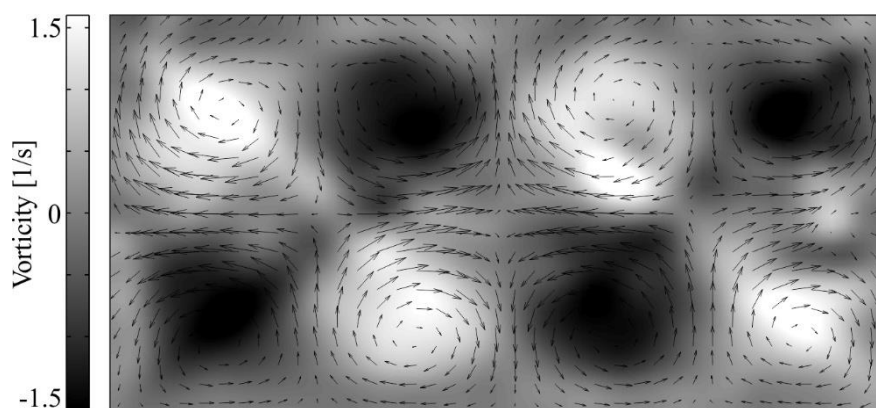


Рис. Мгновенный профиль скорости в осевом сечении полости при частоте либраций $\Omega = 1.28$

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (проект МК-1994.2018.1).

1. Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей. Л.: Гидрометеиздат. 1975. С. 304.

ОСРЕДНЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ЭЛАСТИЧНОЙ ПОЛОСТИ, ЗАЖАТОЙ МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ, СОВЕРШАЮЩИМИ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

С.В. Субботин¹, В.Г. Козлов^{1,2}, Р.Р. Сабиров²

¹Лаборатория вибрационной гидромеханики,

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

²Кафедра прикладной физики,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

subbotin_sv@pspu.ru

Двухжидкостные системы в виде эмульсий применяются во многих химических отраслях. В технологических процессах взвешенные капли жидкости подвергаются непрерывному изменению формы. Примером является ситуация, когда капля находится в осциллирующем сдвиговом потоке, что приводит к её периодическому сжатию и вытягиванию [1]. Если поверхность капли покрыта адсорбционной пленкой, межфазная граница оказывается тангенциально несжимаемой. Это означает, что в осциллирующем сдвиговом потоке такая капля одновременно с периодической деформацией будет совершать вращательные колебания. Исследованию структуры течения в модели такой капли посвящена настоящая работа.

Модель представляет собой кювету с эластичной упругой стенкой, совершающей вращательные колебания между двумя активаторами. В процессе колебаний в лабораторной системе отсчета форма полости остается неизменной. Обнаружено, что в области высоких безразмерных частот (толщина пограничных слоев мала по сравнению с размерами полости) и относительно малых амплитуд вибраций осциллирующее движение возбуждает осредненные крупномасштабные вторичные течения в виде двух пар согласованно вращающихся продольных вихрей (Рис.). С увеличением амплитуды азимутальное течение, возникающее на долю полупериода колебаний полости, изменяет структуру среднего течения. Последнее принимает форму двух тороидальных вихрей, ориентированных вдоль оси вибраций. Изменение структуры течения сопровождается изменением зависимости осредненной скорости жидкости в вихрях от относительной амплитуды вибрационного воздействия. В области низких безразмерных частот осредненное течение состоит из двух пар продольных вихрей, совершающих вращательные колебания вместе с полостью. При этом направление движения противоположно тому, что наблюдается в высокочастотном пределе.

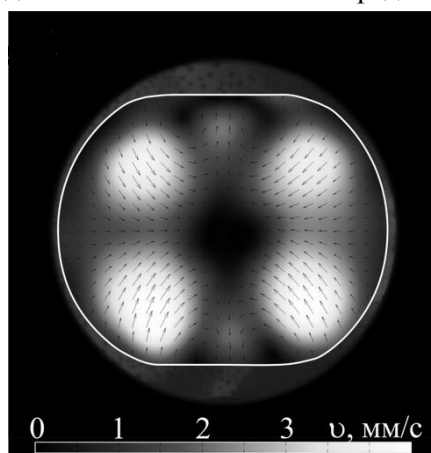


Рис. Поле осредненного течения в экваториальной плоскости при амплитуде $\Delta\varphi = 0.262$ рад, частоте $f = 4.0$ Гц и кинематической вязкости жидкости $\nu = 7.0$ сСт

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 16-31-60099 мол_а_дк).

1. Cavallo R., Guido S., Simeone M. Drop deformation under small-amplitude oscillatory shear flow // Rheol. Acta 2003. Vol. 42. P. 1–9.

ТРЕХМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ПЛОТНОСТИ В ГАЗАХ

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
sutyurin@imec.msu.ru

Эффект сильной перестройки фронта ударной волны, распространяющейся по ударной трубе, известен с 1954 года [1]. Аналогичное явление имеет место при распространении ударных волн от мощных взрывов [2]. Приповерхностный участок фронта волны обгоняет основной фронт волны, при этом формируется косая ударная волна, распространяющаяся по невозмущенному газу вдали от стенки. Ударно-волновая структура, обгоняющая основной фронт волны, получила название «предвестник». Перестройка течения обусловлена взаимодействием набегающей ударной волны с тонким слоем горячего газа, возникающим вблизи поверхности при прогреве последней излучением фронта волны. Подобный эффект крупномасштабной перестройки течения при наличии тонкой «тепловой иглы» лежит в основе идеи снижения волнового сопротивления затупленных тел при помощи локального энерговклада в набегающий сверхзвуковой поток [3]. Согласно предположению [4], с некоторого момента времени предвестник растет линейно и почти автомодельно, однако в [5] было показано, что на больших временных интервалах линейный характер роста нарушается за счет эффекта «запирания потока» и развития неустойчивостей внутри предвестника.

В настоящей работе на основе уравнений Эйлера численно исследуется трехмерная задача о взаимодействии ударной волны с продольным каналом газа пониженной плотности круглого, эллипсоидального или прямоугольного сечения. Применяется численный метод WENO-Z [6] высокого порядка аппроксимации. Детально описана структура формирующегося предвестника и показано, что в трехмерном случае неустойчивости сдвиговых слоев внутри последнего развиваются быстрее, чем в осесимметричном течении. Определена зависимость скорости роста предвестника от формы сечения канала и обнаружено, что длительность участка линейного роста предвестника зависит в первую очередь от наибольшего линейного размера сечения канала.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В. Ломоносова при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-01-00793).

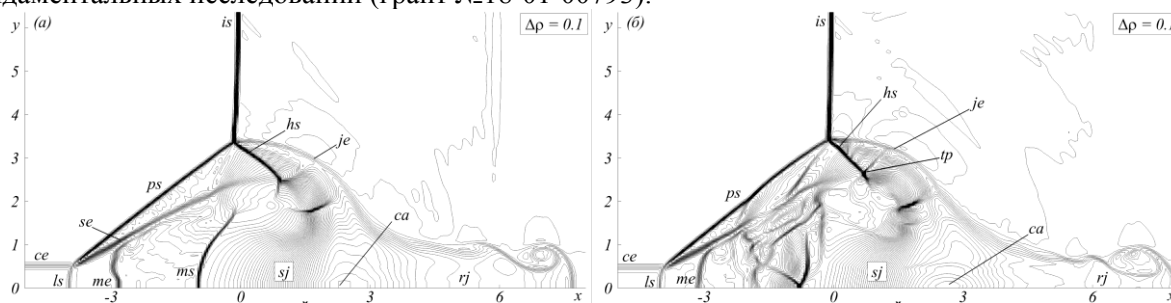


Рис. Структура предвестника в момент $t=7.6$: изолинии плотности. (а) двумерное осесимметричное течение, (б) трехмерное течение для тех же параметров. ls – лидирующий скачок; ps , hs – боковой и внутренний скачки предвестника; se – преломленная граница канала; je – граница высоконапорной струи; sj и rj – прямая и возвратная осевые струи; ca – область кумуляции высоконапорной струи

1. R.G. Shreffler, R.H. Christian Boundary Disturbances in High - Explosive Shock Tubes// Journal of Applied Physics. 1954. V. 25. № 3. P. 324–331.
2. М.А. Садовский, В.В. Адушкин Влияние нагретого пристеночного слоя на параметры ударной волны // Доклады академии наук СССР. 1988. Т. 300. № 1. С. 79–83.
3. П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин Сверхзвуковое обтекание тела при подводе тепла перед ним // Труды МИ АН СССР. 1989. Т. 186. С. 197–201.
4. В.И. Артемьев, И.Э. Маркович, И.В. Немчинов, В.А. Суляев Двумерное автомодельное движение сильной ударной волны над нагретой поверхностью // Доклады академии наук СССР. 1987. Т. 293. № 5. С. 1082–1084.
5. П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин Взаимодействие ударной волны с продольным слоем газа пониженной плотности // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 5. С. 125–132.
6. M.Castro, B. Costa, W.S. Don High order weighted essentially non-oscillatory WENO-Z schemes for hyperbolic conservation laws //Journal of Computational Physics. 2011. V. 230. №. 5. P. 1766–1792.

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ СХЕМ WENO ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

О.Г. Сутырин

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
sutyurin@imec.msu.ru

В докладе излагается методика применения конечно-разностной реализации численной схемы из семейства WENO (weighted essentially non-oscillating, [1]) для моделирования нестационарных течений совершенного газа с ударными волнами. Методы этого класса позволяют достичь произвольно высокого порядка аппроксимации решения и тем самым существенно сэкономить вычислительные ресурсы. Дополнительным достоинством этих методов (отраженном в их названии) является практически полное отсутствие осцилляций параметров решения вблизи газодинамических разрывов – ударных волн и контактных разрывов.

Описывается реализация разновидности метода WENO-Z [2] 5 порядка аппроксимации для моделирования плоских и осесимметричных двумерных, а также трехмерных течений совершенного газа в рамках уравнений Эйлера. Реализация включает в себя Рое-осреднение параметров газа между узлами сетки, характеристическую декомпозицию векторов состояния и потоков газа, а также процедуру Н-коррекции для подавления формирования «карбункулов» на фронтах ударных волн [3].

Работа выполнена в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В. Ломоносова при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-01-00793) и Министерства образования и науки РФ (договор №14.G39.31.0001 от 13.02.2017г.).

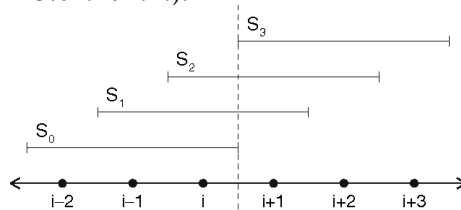


Рис. 1. Разностный шаблон WENO, используемый для вычисления потоков газодинамических величин между расчетными узлами. Шеститочечный шаблон (схема 5 порядка точности) состоит из нескольких соседних трехточечных шаблонов, каждому из которых присваивается свой вес в суммарной аппроксимации потока.

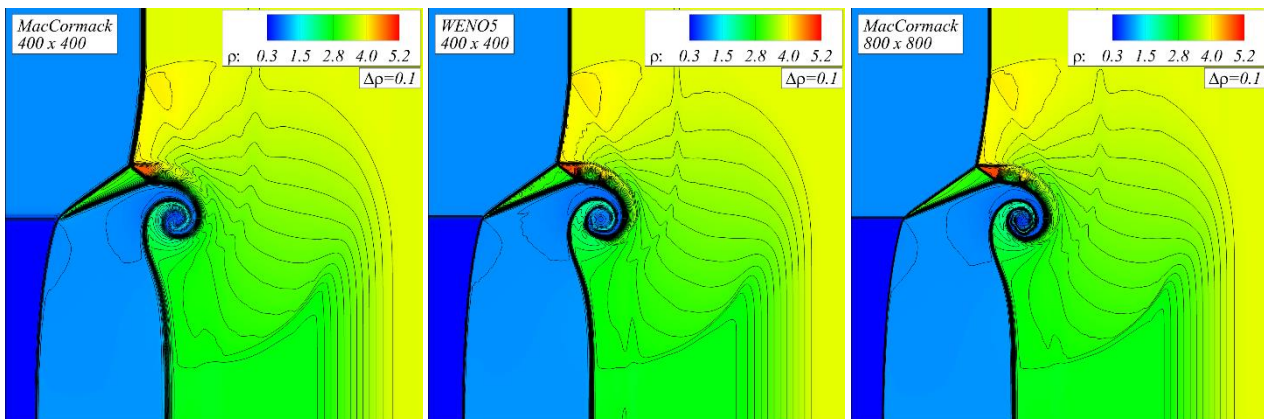


Рис. 2. Сравнение расчетов двумерной задачи Римана о распаде газодинамического разрыва методами Маккормака (TVD-модификация, 2-й порядок аппроксимации) и WENO (5-й порядок): поле плотности. На одной и той же сетке в 400x400 узлов метод WENO (посередине) дает существенно более точное разрешение элементов течения – ударных волн, тангенциальных разрывов и вихрей, чем метод Маккормака (слева). Примерно такое же разрешение достигается методом Маккормака на вдвое более подробной сетке (справа).

1. G.S.Jiang, C.W. Shu Efficient implementation of weighted ENO schemes // Journal of computational physics. 1996. V. 126. №. 1. P. 202–228.
2. M. Castro, B. Costa, W.S. Don High order weighted essentially non-oscillatory WENO-Z schemes for hyperbolic conservation laws // Journal of Computational Physics. 2011. V. 230. №. 5. P. 1766–1792.
3. R. Sanders, E. Morano, M.C. Druguet Multidimensional dissipation for upwind schemes: stability and applications to gas dynamics // Journal of Computational Physics. 1998. V. 145. №. 2. P. 511–537.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ИСПЫТАНИЙ В ТЕЧЕНИЕ ДНЕЙ И НЕДЕЛЬ

В.В. Терауд

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
ИПУ имени В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва
ldrnww@gmail.com

Любая теория требует верификации. Экспериментальные исследования помогают не только проверить имеющиеся теоретические предсказания, но и найти новые явления. Все материалы изменяют свои характеристики под действием температуры. Одним из изменений механических характеристик при повышении температуры является появление существенной ползучести материала. В этих условиях нагруженный материал увеличивает деформацию с течением времени. Основоположником изучения данного направления можно считать [1].

При высокой температуре испытаний возникают сложности: во-первых, со стабилизацией температуры во всем объеме печи в течение продолжительного времени, во-вторых, измерение параметров нагретого образца. В-третьих, с обеспечением пожарной безопасности, а также и др. сложности.

Первая задача обычно решается блоком управления печи. Частой встречающейся особенностью промышленных печей является расположение термопар вблизи нагревательных ТЭН-ов. Это приводит к невозможности поддержания точной температуры на образце. Рассматривая температуру образца в длительном промежутке времени можно обнаружить влияние сквозняков в комнате, долго открытых дверей, изменение комнатной температуры и др. Более точное поддержание температуры возможно при непосредственном контакте образца с термопарой. Т.е. при установке каждого образца к нему прикрепляются термопары, соединенные с блоком управления.

Измерение параметров нагретого образца наиболее целесообразно получать бесконтактным способом [2]. Идея метода состоит в периодическом фотографировании образца через кварцевое смотровое окно. Из эксперимента получают несколько сотен фотографий, в зависимости от деформации образца и частоты съемки. После этого их необходимо обработать, получив метрические данные и построить соответствующие графики.

Для обеспечения пожарной безопасности и возможности контроля над ходом протекания эксперимента в течение нескольких недель удобно, во-первых, иметь видеодоступ, основанный, например, на web-камерах, а во-вторых, удаленного управления процессом нагрева и/или резервным отключением нагрева, например, на основе умных розеток TP-Link. Все электронные приборы следует включать через ИБП.

Таким образом, при длительных экспериментах следует использовать комплексный подход при организации испытаний. Наиболее существенным является возможность удаленного контроля и управления ходом протекания эксперимента.

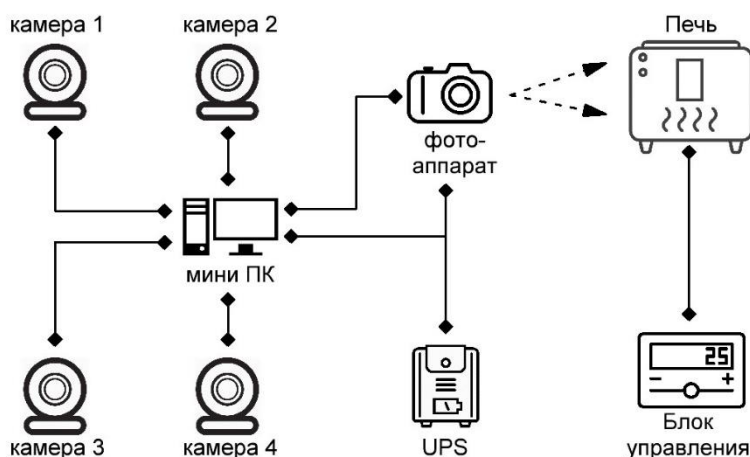


Рис. Блок-схема организации длительных экспериментов.

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 753 с.

2. Локощенко А.М., Терауд В.В. Исследование методом фоторегистрации локализации деформации в цилиндрических образцах при высокотемпературной ползучести // Деформация и разрушение материалов. 2013 г. № 11. (№ 289/2013). С. 43–46.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КАНАЛЕ С МАЛЫМИ УГЛАМИ РАСКРЫТИЯ

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

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

trifonovvl@mail.ru

Проведены экспериментальные и расчетные исследования характеристик течения в коническом диффузоре с малыми углами раскрытия. На вход в диффузор подавалось развитое турбулентное течение. Расчет проводился с использованием трехпараметрической модели турбулентности [1]. Расчеты проводились, при числах Рейнольдса на входе в диффузор от 1000 до 10000 и с углами раскрытия меньше 4° . В зависимости от угла раскрытия в расчетах, течение в диффузоре происходило, при положительном, отрицательном или нулевом продольном градиенте давления. Получены характеристики течения на выходе диффузора, а также в различных сечениях вдоль диффузора. Результаты расчетов сравнивались с ранее полученными экспериментальными данными для диффузоров с углами раскрытия $\sim 0.6^\circ$ и $\sim 1.2^\circ$ [2], получено хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных.

Экспериментальные и расчетные данные показали, что в диффузоре, после начального участка, формируется турбулентное течение. Параметры турбулентного течения на выходе из диффузора определяются только числом Рейнольдса и не зависят от условий на входе, пока эти условия достаточны для формирования турбулентного течения.

Расчеты показали, что при увеличении длины диффузора турбулентное течение затухает и плавно переходит в ламинарное.

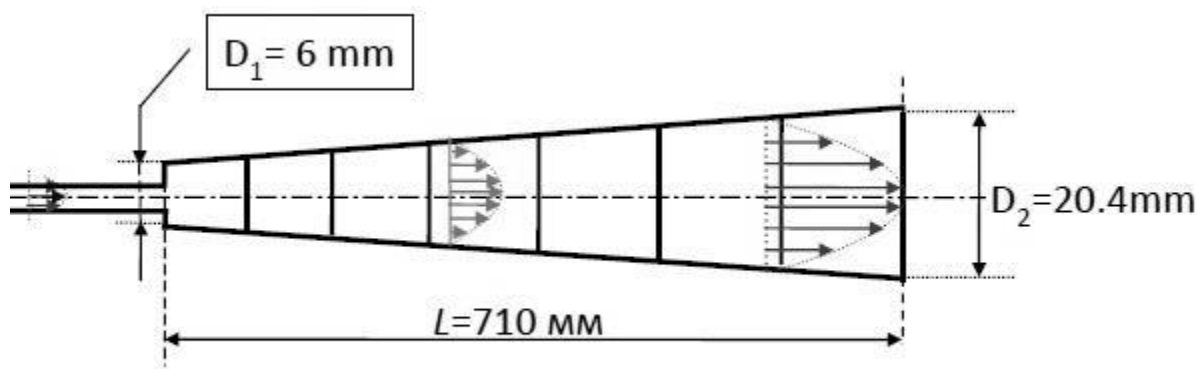


Рис.

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

2. A.I. Reshmin, V.V. Trifonov, S.Kh. Teplovodskii. Turbulent flow in a conical diffuser with a small divergence angle at Reynolds numbers less than 2000 // ASME 2014, FEDSM2014-21597.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИГИДРОКСИБУТИРАТА

П.М. Тюбаева¹, А.А. Ольхов^{1,2}, А.А. Попов^{1,2}

¹Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва

²Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва

polina-tyubaeva@yandex.ru

В настоящее время большой практический интерес представляет разработка и исследование нетканых волокнистых материалов медицинского назначения на основе биополимеров. Одним из наиболее перспективных методов получения нетканых материалов с высоко развитой поверхностью является электроформование (ЭФВ). Целью данной работы было рассмотрение особенностей структуры ультратонких волокон на основе поли-3-гидроксibuтирата (ПГБ), которые формируют слой материала, и установление закономерностей их влияния на физико-механические свойства.

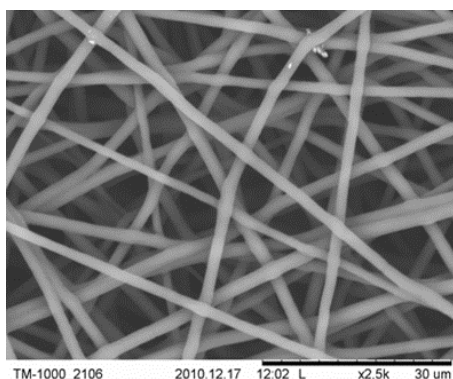


Рис. Микрофотография нетканого
волокнистого материала, полученного
методом ЭФВ

Исследование позволило обобщить несколько ключевых факторов, обуславливающих структурную организацию в материале на уровнях: макроструктуры – укладки и взаимного расположения в пространстве элементов нетканого полотна (волокон); микроструктуры – ориентации полимерных молекул в материале.

В исследовательской работе рассматривались различные параметры, характеризующие структуру нетканого материала и в значительной степени обуславливающие его физико-механические и химические свойства, что было подтверждено в ходе экспериментальной работы. Среди базовых показателей структурной организации в материале были выделены в качестве определяющих: удельная плотность волокон структуры, γ ; индекс ориентации волокон, ϕ ; материалоемкость - средняя плотность (масса единицы объема), δ . На основании полученных экспериментальных данных все образцы нетканого материала на основе ПГБ, получаемые методом ЭФВ в установленном интервале технологических параметров, допустимо разделить на три группы, достоверно описывающие свойства структуры материала: равномерное распределение волокон, среднее и хаотичное.

Анализ механических характеристик материала свидетельствует об увеличении эластических свойств полимерного материала по сравнению с пленочными аналогами, что важно при формировании качества изделий медицинского назначения. В работе были установлены зависимости между параметрами структуры материала и показателями разрывной нагрузки, прочности, относительного разрывного удлинения, модуля упругости, что позволило сделать вывод о возможности задавать значения механических свойств еще на стадии изготовления нетканого материала.

Полученный и обработанный массив данных подтверждает высокую перспективность и эффективность производства технологичных наномодифицированных защитных, фильтрующих, перевязочных текстильных материалов для медицинских целей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РЭУ им. Г.В. Плеханова.

1. Филатов Ю. Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс). М.: Нефть и Газ, 1997.

2. Olkhov A.A., Tyubaeva P.M., Staroverova O.V., Mastalygina, E.E. Popov A.A., Ischenko A.A., Iordanskii A.L. Process optimization electrospinning fibrous material based on polyhydroxybutyrate // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1736. doi: 10.1063/1.4949673.

3. Ольхов А.А., Тюбаева П.М., А. В. Лобанов, О. А, Мокеров, С. Г. Карпова, А. Л. Иорданский Надмолекулярная структура ультратонких волокон полигидроксibuтирата, модифицированных комплексом железа (III) с тетрафенилпорфирином // Вестник технологического университета 2017. Т.20. №17.

О ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПО ВРЕМЕНИ РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ ОДНОМЕРНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

А.Н. Голубятников, Д.В. Украинский

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва
d.v.ukrainskiy@gmail.com

Рассматривается одномерное адиабатическое движение с плоскими волнами совершенного идеального газа в лагранжевых переменных. При этом уравнения движения сводятся с использованием массовой переменной к системе с квадратичной нелинейностью. Решение ищется, в частности, в виде рядов для закона движения газа и давления по степеням косинуса от временной переменной с коэффициентами, зависящими от массы. Для построения ряда требуется задать три первых коэффициента. Все остальные коэффициенты вычисляются рекуррентным образом по заданным при условии ненулевой производной первого коэффициента ряда для закона движения. Преимуществом данного подхода перед разложением решения, например в тригонометрический ряд Фурье, является именно конечность алгебраических рекуррентных соотношений, связанных только с вычислением производных по массе. Проводятся численные расчеты, которые показывают высокую сходимость ряда при определенных ограничениях на производные от задаваемых коэффициентов. Дальнейшим обобщением развитого подхода является представление решения в виде суммы одного ряда по степеням косинуса и произведения синуса на другой аналогичный ряд. При этом условием рекуррентной разрешимости является неравенство нулю разности квадратов производных первых членов, указанных выше рядов. Развивается соответствующий вычислительный процесс. Приводятся примеры, не содержащие особенностей.

Работа частично поддержана РФФИ (проект 17-01-00037).

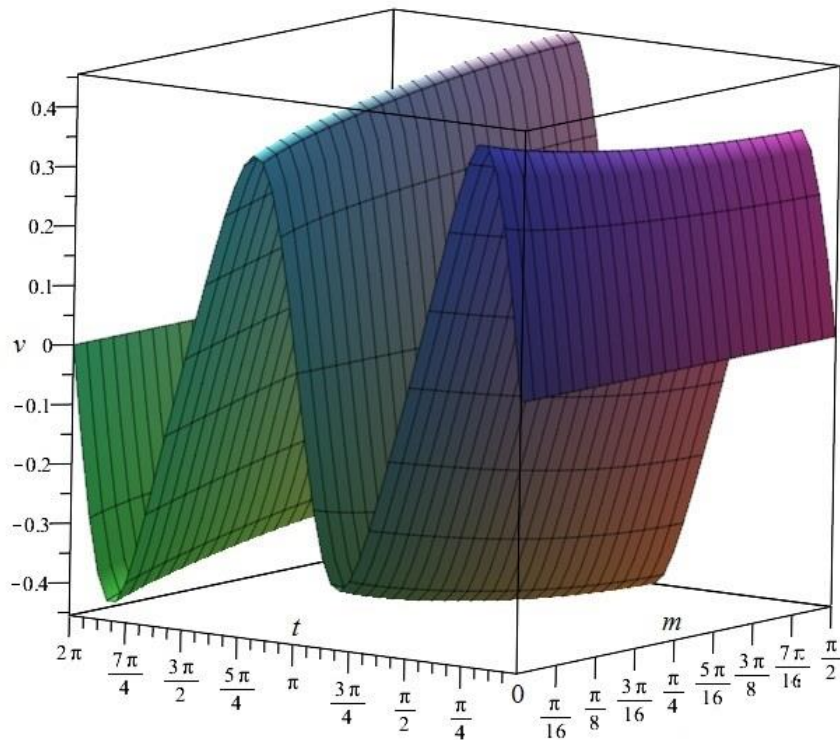


Рис. Пример графика скорости потока на периоде

АНАЛИЗ ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ О РАСШИРЕНИИ ОБЛАСТИ НII

А.С. Федченко (Гаврилова)

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
asfedchenko@ya.ru

Рассматриваются приближенные решения задачи о расширении области горячего ионизованного водорода, окружающего звезду с температурой порядка 10 000 К, в среду с заданным распределением плотности. Движение ионизованного газа считается изотермическим. Из-за сильного взаимодействия вещества и излучения вводится и обосновывается предположение о существовании баланса между поглощаемой и излучаемой средой энергией – в отличие от классической задачи о сильном взрыве, когда справедливо предположение о сохранении полной энергии движущегося газа.

Для данной задачи были получены аналитические решения в случае сферически симметричной задачи (с использованием метода Черного) и в случае осесимметричной задачи (с использованием метода Компанейца). Полученные в первом случае результаты хорошо согласуются с данными, полученными численным путем в работе [3].

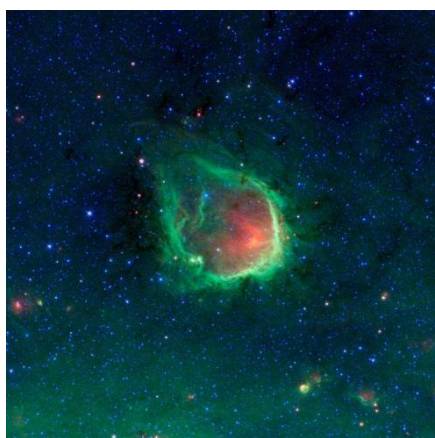


Рис. Туманность RCW120

Проводится обобщение решения, полученного методом Компанейца, на случай расширения области НII в неоднородном газе. Решалась осесимметричная задача. Для определения формы ударной волны было получено нелинейное уравнение в частных производных и найдено его аналитическое решение. Установлены отличия полученного решения от решения задачи о точечном взрыве в неоднородной атмосфере. С использованием данного решения были проведены оценки времени развития неустойчивости Рэлея-Тейлора, исходя из данных об ускорении ударной волны. В результате определены характерные масштабы и массы уплотнений, возникающих при расширении области НII в неоднородном газе.

Найденные приближенные решения задачи о расширении области НII представляют интерес, поскольку позволяют определить основные характеристики движения – размер области НII, ее возраст, массу сжатого ударной волной слоя газа, параметры неоднородностей на периферии области НII – не прибегая к решению полной системы уравнений радиационной газовой динамики.

Результаты, полученные в ходе исследования расширения областей НII, применены для изучения вопросов звездообразования. В качестве примера на Рис. изображена область НII, на периферии которой были обнаружены молодые звездные объекты. В работе показано, что эти объекты могли образоваться за время эволюции области НII в сжатом ударной волной газе под действием самогравитации.

1. А.С. Компанец Точечный взрыв в неоднородной атмосфере // Доклады Академии наук СССР. 1960. Т. 130, №5, С. 1001–1003.
2. К.В. Краснобаев, Г.Ю. Котова, Р.Р. Тагирова Двумерные неустановившиеся движения фотоиспаряемых газовых оболочек // Сборник "Проблемы современной механики: к 85-летию со дня рождения Г.Г. Черного. Изд-во Моск. ун-та изд-во "Омега-Л". Институт механики МГУ. 2008 . С. 191–206.
3. Zavagno A. et al. Triggered star formation on the borders of Galactic HII region RCW 120 // Astronomy & Astrophysics. 2007. Т. 472. №3 . С. 835–846.
4. Kim J.G., Kim W.T., Ostriker E.C. Disruption of Molecular Clouds by Expansion of Dusty HII Regions // The Astrophysical Journal. 2016 . Т.819 . №.2. С.137.
5. Torii et al. Cloud-cloud collision as a trigger of the high-mass star formation: a molecular line study in RCW 120 // The Astrophysical Journal. 2015 . Т. 806 . №.1 . С. 7.

БЕЗМАШИННОЕ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ

Д.Е. Хазов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
dkhazov@mail.ru

В работе рассмотрен новый вид безмашинного энергоразделения, основанный на отсосе «холодных» слоёв пограничного слоя при высокоскоростном течении газа в канале с проницаемыми стенками. На базе уравнений Навье-Стокса, дополненных уравнениями неразрывности, энергии, а также к-ε модели турбулентности построена математическая модель устройства, реализующего данный вид энергоразделения. Задача рассматривалась в осесимметричной постановке.

При использовании экспериментальных данных [1, 2] проведена валидация математической модели. На основе разработанной модели проведены параметрические исследования. Проанализирован широкий диапазон режимов течения: от непроницаемой стенки до асимптотического отсоса. Показано влияние начального числа Маха, а также молекулярного числа Прандтля на величину энергоразделения.

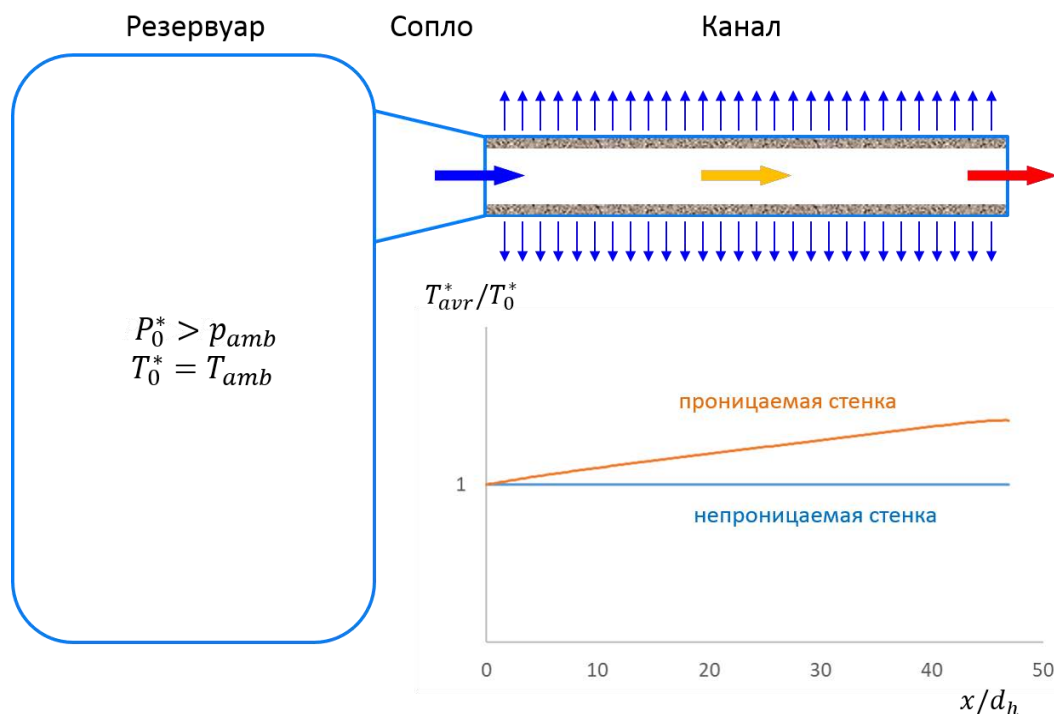


Рис. (а) Расчетная схема устройства; (б) Относительная среднемассовая температура потока

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект № 14-19-00699.

1. Yu A. Vinogradov, A. G. Zditovets, and M. M. Strongin. Experimental investigation of the temperature stratification of an air flow through a supersonic channel with a central body in the form of a porous permeable tube. *Fluid Dynamics*, 48(5):687–696, 2013.

2. А. И. Леонтьев, А. Г. Здитовец, Ю. А. Виноградов, М. М. Стронгин, Н. А. Киселёв, Д. Е. Хазов. Энергоразделение воздушного потока в комбинированном канале с проницаемыми стенками. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых "XXXIII Сибирский теплофизический семинар", посвященный 60-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Тезисы докладов, ISBN 978-5-89017-049-1, стр. 46–46. Институт теплофизики СО РАН Новосибирск, 2017.

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ

Д.Е. Хазов, Ю.А. Виноградов

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
dkhazov@mail.ru

В докладе представлены детали численного моделирования нового вида безмашинного энергоразделения, основанного на отсосе «холодных» слоёв пограничного слоя при высокоскоростном течении газа в канале с проницаемыми стенками. На базе уравнений Навье-Стокса, дополненных уравнениями неразрывности, энергии, а также k-ε модели турбулентности построена математическая модель устройства, реализующего данный вид энергоразделения. Численное моделирование проводилось при использовании пакета ANSYS Fluent. Задача рассматривалась в осесимметричной постановке. Разработано и протестировано специальное граничное условие вдува-отсоса на стенке.

При использовании экспериментальных данных [1, 2] проведена валидация математической модели. На основе разработанной модели проведены параметрические исследования. Проанализирован широкий диапазон режимов течения: от непроницаемой стенки до асимптотического отсоса. Показано влияние начального числа Маха, а также молекулярного числа Прандтля на величину энергоразделения.

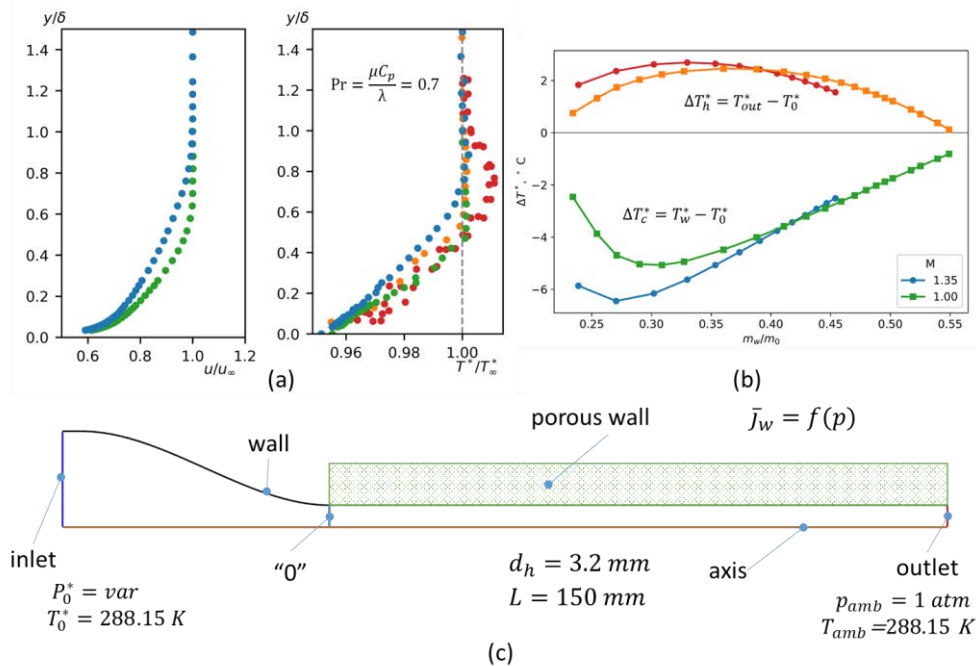


Рис. (а) Профили скорости и полной температуры в сжимаемом пограничном слое; (б) количественный эффект энергоразделения; (с) расчётная схема устройства энергоразделения

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект № 14-19-00699.

1. Yu A. Vinogradov, A. G. Zditovets, and M. M. Strongin. Experimental investigation of the temperature stratification of an air flow through a supersonic channel with a central body in the form of a porous permeable tube. Fluid Dynamics, 48(5):687–696, 2013.

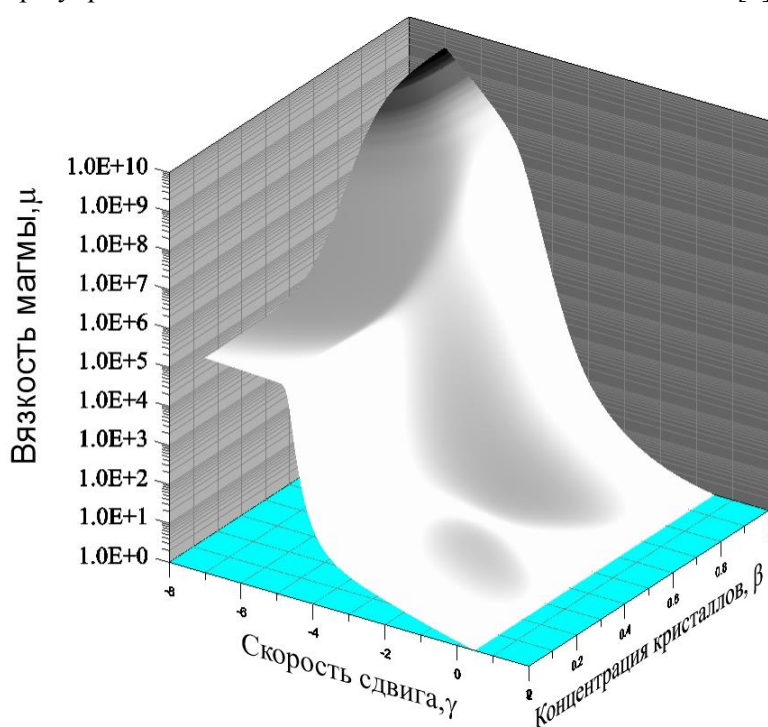
2. А. И. Леонтьев, А. Г. Здитовец, Ю. А. Виноградов, М. М. Стронгин, Н. А. Киселёв, Д. Е. Хазов. Энергоразделение воздушного потока в комбинированном канале с проницаемыми стенками. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых "XXXIII Сибирский теплофизический семинар", посвященный 60-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Тезисы докладов, ISBN 978-5-89017-049-1, стр. 46–46. Институт теплофизики СО РАН Новосибирск, 2017.

О ВЛИЯНИИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ СВОЙСТВ МАГМЫ НА ТЕЧЕНИЕ В КАНАЛЕ ВУЛКАНА

Ю.Д. Цветкова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
jultsv@gmail.com

Традиционно течение магмы в канале вулкана описывается в рамках одномерных или квазиодномерных моделей с учетом зависимости вязкости от концентрации кристаллов и растворенной воды, температуры, возможности проскальзывания магмы вдоль стенок канала, неравновесной кристаллизации, оттока газа сквозь магму и в окружающие породы. В таких моделях профиль скорости считается параболическим и производится осреднение параметров поперек канала. Однако, за счет переменности свойств магмы поперек канала профиль скорости может существенно отличаться от параболического. Результаты расчетов по квазидвумерной модели сравниваются с одномерными. Показано существенное отличие как локальных характеристик, так и интегральной зависимости расхода магмы от давления в очаге. Ранее исследовалось влияние оттока тепла в породы при упрощенной постановке для ньютоновской жидкости [1].



Определяющее влияние на динамику вулканического извержения оказывает эволюция вязкости при подъеме магмы по каналу вулкана. При больших концентрациях кристаллов магма проявляет неньютоновские свойства, ее вязкость μ зависит от скорости сдвига $\dot{\gamma} = -\partial V / \partial r$ (см. Рис.), так же наблюдается проскальзывание магмы по стенкам канала [2].

Полученные профили скорости существенно отличаются от параболических, что имеет заметное влияние на интегральные характеристики расхода и давления в очаге. Особенно заметны отличия при больших концентрациях кристаллов в очаге.

Существенное различие в профилях скорости магмы на поверхности скажется и на морфологии лавового

купола. При малых расходах магма извергается как твердое тело, что соответствует выдавливанию обелисков, с ростом расхода лава будет выдавлиаться в виде отдельных узких потоков, а при высоких расходах кристалличность магмы незначительна, она проявляет ньютоновские свойства и растекается по подстилающей поверхности. Все подобные режимы наблюдались при извержениях реальных вулканов [3].

Работа выполнена по теме госзадания № АААА-А17-116021110194-7.

1. Цветкова Ю.Д. Течение магмы в канале вулкана с учетом неравновесной кристаллизации и теплообмена с окружающими породами, Изв. РАН. Механика жидкости и газа, № 5, 2010, стр.30-4-
2. Caricchi L, Burlini L, Ulmer P, Gerya T, Vassalli M, Papale P. Non-Newtonian rheology of crystal-bearing magmas and implications for magma ascent dynamics. Earth and Planetary Science Letters №264 (3), 402-419, 2007.
3. Watts R. B., Herd R. A., Sparks R. S. J. & Young S. R., Growth patterns and emplacement of the andesitic lava dome at Soufrie`re Hills Volcano, Montserrat. The Eruption of Soufrie`re Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999. Geological Society, London, Memoirs, 21, 115–152, 2002

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРИВОДОВ ДИСКРЕТНО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДВИЖИТЕЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Н.Г. Шаронов

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград
sharonov@vstu.ru

Рассматриваются мобильные роботы с несколькими однотипными произвольно расположенными [1] движителями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью: роторно-ортогональный [2], заклинивающе-поворотный [3], якорно-тросовый [4] движители. Для каждого из них определены возможные области применения, поставлены некоторые задачи управления движением, приведены полученные результаты исследований.

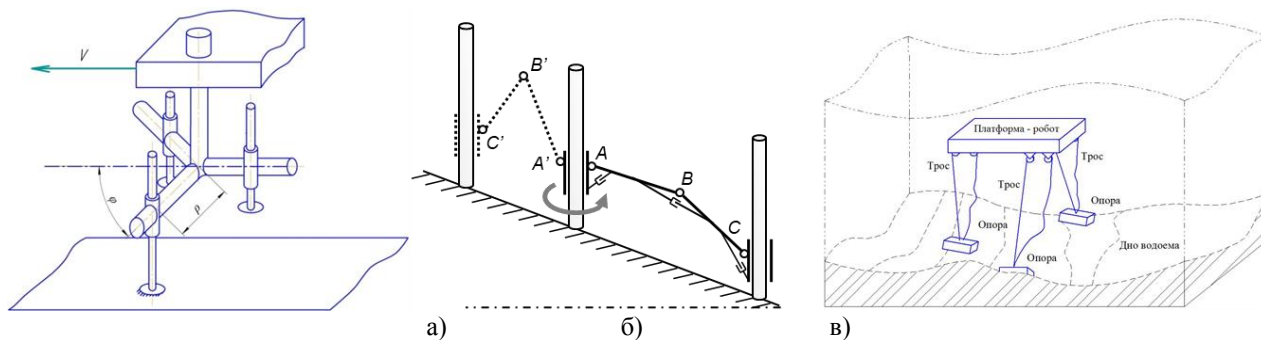


Рис. Роторно-ортогональный (а), заклинивающе-поворотный (б), якорно-тросовый (в) движители

Особенность роторно-ортогонального движителя состоит в том, что основным приводом курсового движения является привод, совершающий в маршевом режиме вращательное движение [2]. Роторно-ортогональный движитель является развитием ортогонально-поворотного движителя шагающей машины «Ортоног» [5].

Робот с поворотнo-заклинивающим движителем может перемещаться по вертикальному или наклонному столбу за счет периодического заклинивания одной из втулок и скольжении другой. Если с одной из втулок связать стержень с управляемой длиной и возможностью его поворота вокруг своей оси, то реализуется возможность и вращательного движения в пространстве [3].

Для перемещения груза в плотных средах рассматривается использование якорно-тросовых движителей, взаимодействующих с неподвижным грунтом посредством «якорей», положение которых изменяется дискретно за счет их управляемого переноса в новое положение. Применение такого типа движителей [4] позволяет осуществлять непрерывное перемещение под водой платформы с положительной плавучестью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-01-00675а).

1. Управление движением группы шагающих машин при перемещении моногруза / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов // Искусственный интеллект. 2007. №4. 408–415.

2. Development of Rotary Type Movers Discretely Interacting with Supporting Surface and Problems of Control Their Movement / Е.С. Брискин, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов, С.С. Фоменко, Я.В. Калинин, А.В. Леонард // ROMANSY 21: Springer, 2016. P. 351–359.

3. Об энергетически эффективных режимах движения роботов с поворотнo-заклинивающими движителями / Брискин Е.С., Шаронов Н.Г., Барсов В.С. // Мехатроника, автоматизация, управление. Москва, 2018.

4. Об особенностях управления движением мобильных роботов с движителями якорно-тросового типа / Брискин Е.С., Серов В.А., Шаронов Н.Г., Пеньшин И.С. // Экстремальная робототехника. 2017. № 1. С. 336–343.

5. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е.С. Брискин, И.П. Вершинина, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 3. С. 168–176.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНОГО ЭЛЕКТРОФОРЕЗА И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Е.А. Франц^{1,2}, В.С. Шелистов¹, Г.С. Ганченко¹

¹Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Краснодарский филиал), Краснодар

²Кубанский государственный университет, Краснодар

shelistov_v@mail.ru

В докладе рассматривается задача движения заряженной микрочастицы с ионоселективной поверхностью в неограниченном объёме, заполненном раствором электролита, под воздействием внешнего электрического поля. В литературе рассмотрены аналогичные задачи для проводящих и диэлектрических частиц, в частных случаях выведены простые формулы типа формулы Гельмгольца-Смолуховского, описывающие зависимость скорости частицы от напряжённости поля. Экспериментально известно, что эта зависимость является линейной при слабых полях (равновесный электрофорез), а при увеличении напряжённости становится ближе к квадратичной (неравновесный электрофорез).

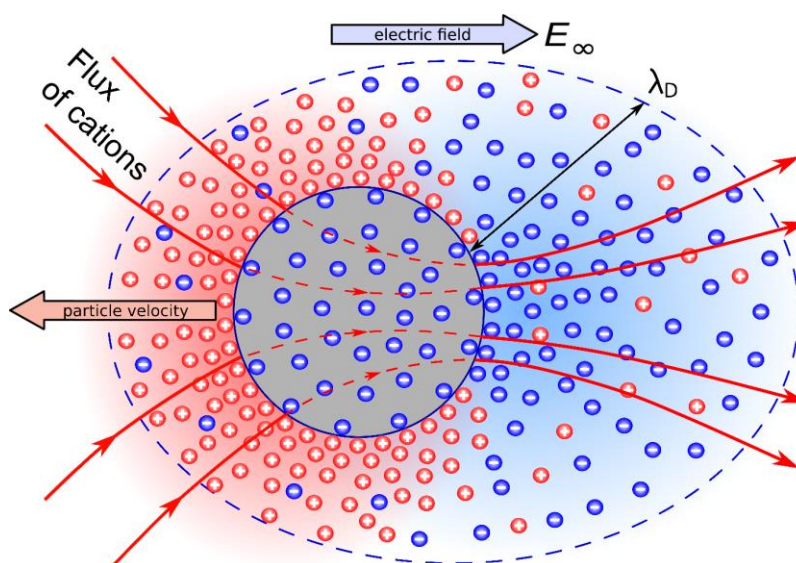


Рис. Схематическая иллюстрация решаемой задачи [1]. Поверхность частицы полагается идеальной катионообменной мембраной. Увеличение напряжённости внешнего поля E_∞ приводит к нарушению симметрии распределения ионов, а в конечном итоге – к неустойчивости (на рисунке не показана)

Для решения задачи применяется численное моделирование, которое для слабых и сильных полей дополняется асимптотическим анализом. Аналитически выводится упрощённая зависимость скорости частицы от напряжённости поля [1], которая отличается от формулы Гельмгольца-Смолуховского. Численно показывается смена режимов электрофореза (от равновесного к неравновесному) при увеличении напряжённости поля. Выводятся основные характеристики поведения электролита – распределения электрического потенциала, заряда и концентрации соли, а также поле скоростей в окрестности частицы. Полученные результаты качественно подтверждаются известными экспериментальными данными как для слабых, так и для умеренных полей. Для очень сильных полей в предложенной авторами модели проявляется разновидность электрокинетической неустойчивости, в результате чего решение с постоянной скоростью движения частицы перестаёт существовать.

В работе также оцениваются перспективы применения найденных режимов поведения частицы для решения технологических задач, описываемых в литературе: конструирования микронасосов, концентрирования и сепарации биологических объектов и т.п.

Работа выполнена в интересах проектов РФФИ (16-08-00643-а) и РНФ (17-79-10343).

1. Frants E.A., Ganchenko G.S., Shelistov V.S., Amiroudine S., Demekhin E.A. Nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule for weak and moderate external electric fields // Physics of Fluids. 2018. Vol. 30. № 022001. DOI: 10.1063/1.5010084.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА В ОКРЕСТНОСТИ ПОЛУПРОНИЦАЕМОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ

Е.А. Франц^{1,2}, В.С. Шелистов¹, Г.С. Ганченко¹

¹Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Краснодарский филиал), Краснодар

²Кубанский государственный университет, Краснодар

shelistov_v@mail.ru

В докладе рассматривается задача движения заряженной микрочастицы с ионоселективной поверхностью в неограниченном объёме, заполненном раствором электролита, под воздействием внешнего электрического поля. Такое движение имеет перспективы применения в промышленности, биологии и медицине: для создания микронасосов, микросепараторов и других элементов миниатюрных приборов – «лабораторий на чипе» [1]. Исследование такого движения является достаточно сложной задачей из-за наличия эффектов, связанных как с электрофорезом (собственно движением частиц), так и с электроосмосом (движением среды). Наличие неустойчивостей, приводящих к вихреобразованию (которые характерны для электроосмотических течений), порождает интересные эффекты – например, интенсивное перемешивание – но одновременно снижает КПД электрофореза за счёт перераспределения подводимой энергии.

Численное моделирование задачи позволило выявить зависимость критического значения напряжённости внешнего поля, при котором движение электролита теряет устойчивость, от размеров микрочастицы. В отличие от схожей задачи об устойчивости течения в мембранной ячейке [2], эта зависимость не является монотонной и имеет максимум для частиц диаметром порядка 30 мкм. Неустойчивость приводит к стохастическому движению электролита, схожему с турбулентностью. Окрестность более крупных частиц оказывается подвержена неустойчивости целиком; для более мелких частиц зона неустойчивости сносится потоком и проявляется позади них. В последнем случае также отмечается нарушение монотонности зависимости скорости электрофореза от напряжённости поля вблизи критического значения последней.

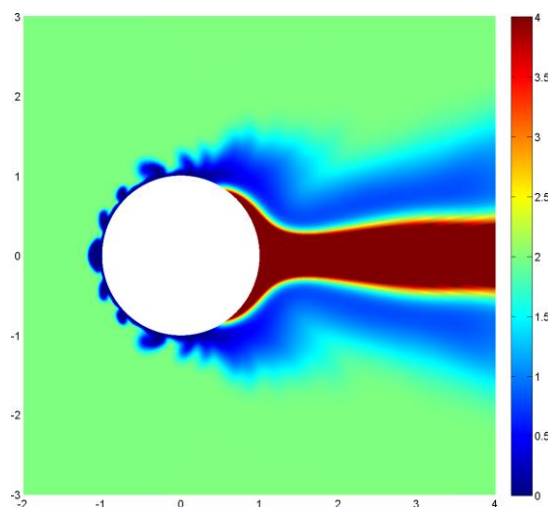


Рис. Мгновенное распределение соли около микрочастицы (диаметр около 43 мкм) в закритической области.
Единица расстояния – радиус частицы. Равновесная концентрация принята за 2,
а максимальная превосходит её в 944 раза.

Расчёты также показывают, что при большой напряжённости поля происходит накопление соли в узкой области за частицей. Неустойчивость практически не влияет на этот эффект.

Работа выполнена в интересах проектов РФФИ (16-08-00643-а) и РНФ (17-79-10343).

1. Frants E.A., Ganchenko G.S., Shelistov V.S., Amiroudine S., Demekhin E.A. Nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule for weak and moderate external electric fields // *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30. № 022001. DOI: 10.1063/1.5010084.

2. Demekhin E.A., Nikitin N.V., Shelistov V.S. Direct numerical simulation of electrokinetic instability and transition to chaotic motion // *Physics of Fluids*. 2013. Vol. 25. № 122001. DOI: 10.1063/1.4843095.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ В УСЛОВИЯХ ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ И ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА С КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНОЙ

А.С. Шишаева^{1,2}, В.В. Веденеев¹, М.М. Симоненко¹, А.А. Синявин¹, Г.Б. Сушко², А.А. Аксенов²

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

²ООО «Тесис», Москва

anastasiashishaeva@rambler.ru

Сверхзвуковое обтекание элементов конструкции потоком газа может иметь сложную и неоднозначную структуру из-за наличия отрывных областей и скачков уплотнения. В ряде случаев возможен гистерезис, проявляющийся в зависимости итоговой картины течения от предыстории его развития. В области гистерезиса при одних и тех же физических параметрах и граничных условиях могут реализовываться различные устойчивые картины обтекания.

Важной особенностью течений с гистерезисом является то, что при внесении в области гистерезиса разового возмущения нужной мощности структура течения изменяется и не возвращается к предшествующей структуре после исчезновения возмущения.

Работа посвящена исследованию управления потоком в условиях гистерезиса. Исследования проводятся с использованием численного моделирования в программных комплексах Abaqus и FlowVision на двух задачах: колебании упругой пластины в сверхзвуковом потоке и сверхзвуковом обтекании осесимметричного тела с кольцевой каверной.

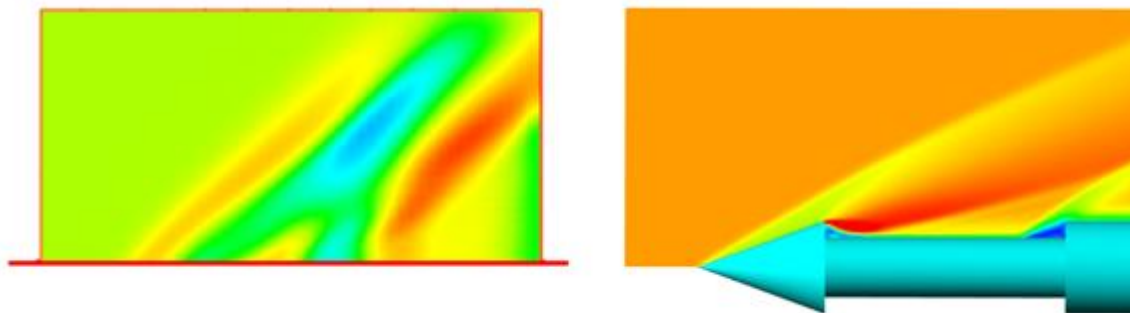


Рис. Распределение числа Маха при обтекании упругой пластины (слева) и тела с каверной (справа)

Колебания упругой пластины можно условно разделить на три основных вида: простой одномодовый флаттер с одной независимой частотой, резонансный флаттер с двумя кратными частотами и непериодический флаттер с двумя или более некрatными частотами. Гистерезис реализуется в области резонансного и непериодического флаттеров, содержащих более одной независимой частоты [1]. Внесение кратковременного возмущения в области гистерезиса приводит к развитию колебаний другого вида.

Течение в кольцевой каверне осесимметричного тела при сверхзвуковом обтекании может быть двух видов: с открытым и замкнутым режимами [2]. На определенном интервале соотношений между длиной и глубиной каверны в зависимости от предыстории реализуются либо замкнутый, либо открытый режим. При наличии каверны сопротивление обтекаемого тела с замкнутым режимом течения в каверне может существенно превышать сопротивление аналогичного тела с открытым режимом течения. Внесение кратковременного возмущения в уже сформировавшееся течение позволяет изменить режим течения в каверне и тем самым увеличить или уменьшить сопротивление тела.

Исследования проводились в рамках проекта РФФИ 18-01-00404 и госбюджетных тем АААА-А16-116021110201-2 и АААА-А16-116021110196-1 НИИ механики МГУ.

1. Shishaeva A.S., Vedeneev V.V., Aksenov A.A., Sushko G.B. Transonic panel flutter in accelerating or decelerating flow conditions // AIAA Journal, 2018, V. 56(3), P. 1-14.

2. Шишаева А.С., Симоненко М.М., Гувернюк С.В., Аксенов А.А. Численное моделирование аэродинамического гистерезиса при сверхзвуковом обтекании осесимметричного тела с каверной в программном комплексе FlowVision // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2017, Т. 18(1).

ГИСТЕРЕЗИС ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА С КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНОЙ

А.С. Шишаева^{1,2}, А.Ф. Зубков¹, М.М. Симоненко¹, А.А. Синявин¹, А.А. Аксенов²

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

²ООО «Тесис», Москва

anastasiashishaeva@rambler.ru

Представлены результаты экспериментального и численного исследования сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной прямоугольного сечения.

В ходе экспериментов осуществлялось непрерывное изменение протяженности каверны при различных фиксированных углах атаки, а также непрерывное изменение угла атаки при фиксированной протяженности каверны. На основе данных визуализации и измерения давления изучена эволюция структуры обтекания каверны, включая режимы перестройки структуры на границах переходной области. В области исследованных диапазонов изменения угла атаки и относительной протяженности каверны определены границы переходной области, в которой возникают гистерезисные явления. Результаты весовых испытаний показали, что при наличии каверны сопротивление обтекаемого тела с замкнутым режимом течения в каверне может существенно превышать сопротивление аналогичного тела с открытым режимом течения. Экспериментально установлено, что в области гистерезиса возможно принудительное переключение с замкнутого режима обтекания каверны к открытому режиму [1].

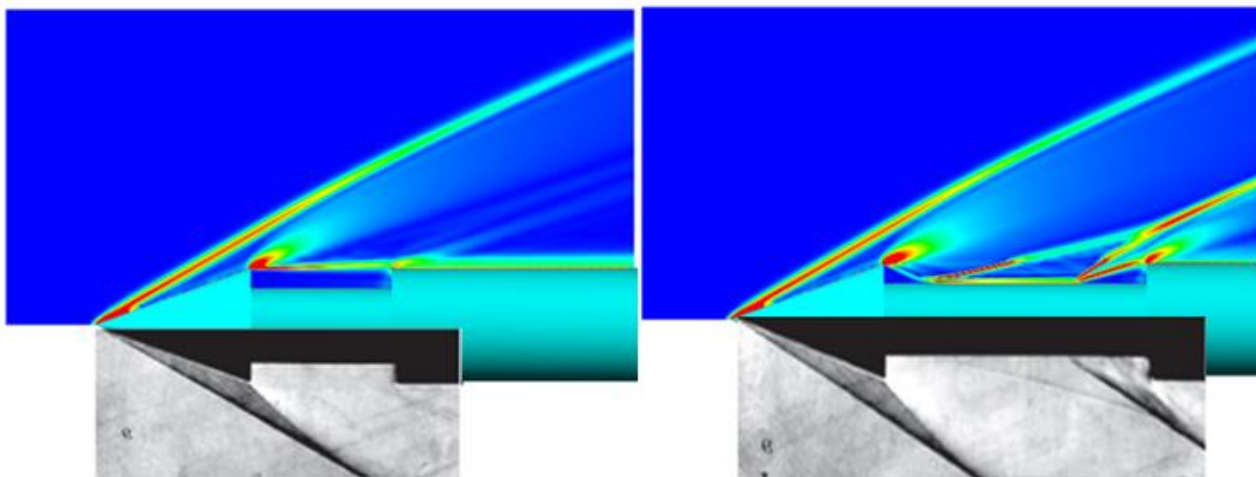


Рис. Открытая (слева) и замкнутая (справа) картины течения в каверне, полученные в расчете и эксперименте

Численное моделирование сверхзвукового осесимметричного обтекания тела с кольцевой каверной выполнено с использованием программного комплекса FlowVision. Проведено исследование сходимости задачи по расчетной сетке, определена оптимальная модель турбулентности. Выполнено сравнение с экспериментом. Исследовано влияние скорости изменения длины каверны на характер изменения течения. Проиллюстрирован механизм перестройки режимов течения в каверне при непрерывном изменении ее длины. Дана оценка протяженности области гистерезиса при сверхзвуковом обтекании тела с каверной. Показано, что внесение кратковременного возмущения в уже сформировавшееся течение позволяет изменить режим течения в каверне и тем самым увеличить или уменьшить сопротивление тела [2].

Исследования проводились в рамках госбюджетной темы АААА-А16-116021110201-2 НИИ механики МГУ.

1. Гувернюк С. В., Зубков А. Ф., Симоненко М. М. Экспериментальное исследование сверхзвукового обтекания осесимметричной кольцевой каверны //Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 3. С. 670–679.

2. Шишаева А. С., Симоненко М. М., Гувернюк С. В., Аксенов А. А. Численное моделирование аэродинамического гистерезиса при сверхзвуковом обтекании осесимметричного тела с каверной в программном комплексе FlowVision //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2017.Т.18(1).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ СНИЖЕНИЯ НАГРУЗКИ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ФЛАТТЕРЕ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ

А.С. Шишаева^{1,2}, В.В. Веденеев¹, Г.Б. Сушко², А.А. Аксенов²

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

²ООО «Тесис», Москва

anastasiashishaeva@rambler.ru

На сегодняшний день известно два основных вида сверхзвукового флаттера закрепленной с двух сторон пластины: связанный и одномодовый. Связанный флаттер достаточно подробно изучен и хорошо описывается поршневой теорией [1]. Математическое исследование одномодового флаттера появилось относительно недавно [2]. При этом, одномодовый флаттер представляет большую опасность для летательных аппаратов, поскольку возникает на низких сверхзвуковых скоростях и приводит к большим нагрузкам на их элементы конструкции.

Работа посвящена поиску путей снижения опасной нагрузки при флаттере упругой жестко закрепленной с двух сторон пластины. Исследования проводятся с использованием численного моделирования в программных комплексах Abaqus и FlowVision.

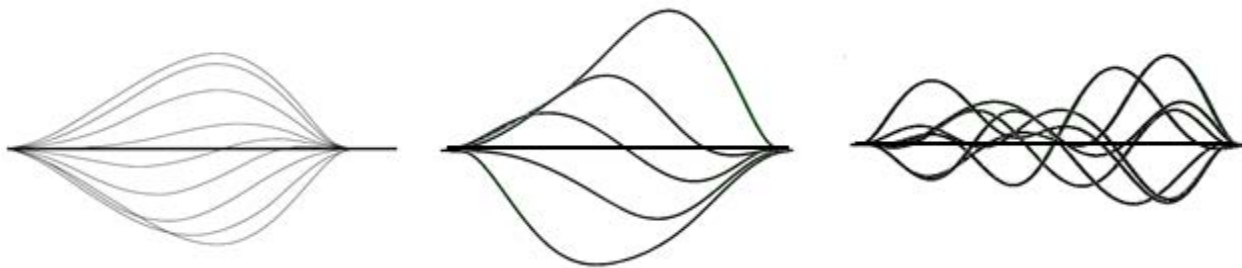


Рис. Форма пластины при простом одномодовом флаттере (слева), резонансном флаттере (в центре) и неперiodическом флаттере (справа)

Одномодовый флаттер пластины, можно условно разделить на три основных вида: простой одномодовый флаттер с одной независимой частотой, резонансный флаттер с двумя кратными частотами и неперiodический флаттер с двумя или более некрatными частотами [3]. Наиболее опасными являются резонансный и неперiodический флаттер. Возможны два варианта снижения ущерба от реализующегося флаттера: прохождение опасного участка на большом ускорении, не позволяющем развиваться наиболее опасным видам флаттера, или управление колебаниями за счет внесения возмущения.

В данной работе проведены исследования колебаний пластины в потоке, ускоряющемся и замедляющемся с разной интенсивностью, определены различия поведения пластины при разных значениях ускорения и замедления и определены значения ускорения и замедления потока, при которых не происходит развитие опасных видов флаттера. Также, проведено исследование влияния кратковременного возмущения на колебания пластины при постоянном и переменном внешнем потоке газа. Получено, что внесение возмущения приводит к изменению частоты колебаний и в ряде случаев, к развитию колебаний другого вида. Что, в свою очередь, позволяет предотвращать развитие наиболее опасных видов флаттера.

Исследования проводились в рамках проекта РФФИ 18-01-00404.

1. А.А.Мовчан. О колебания пластинки, движущейся в газе // Известия АН СССР. ПММ., 1956, Т. 20, Вып. 2., С. 211–222.

2. В. В. Веденеев. Предельные циклы колебаний при одномодовом флаттере пластины// ПММ. 2013. Т. 77. Вып. 3. С. 355–370.

3. Shishaeva A. S., Vedeneev V. V., Aksenov A. A., Sushko G. B.. Transonic panel flutter in accelerating or decelerating flow conditions// AIAA Journal, 2018, V. 56(3), P. 1–14.

ДИАГНОСТИКА ТЕПЛООБМЕНА В ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ

А.А. Шкуратенко

Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет), Москва
shkuratenko.anna@mail.ru

Дальнейшее развитие ракетно-космической техники (РКТ) и, в частности, ее перспективного направления – гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА), тесно связано с созданием новых теплозащитных материалов (ТЗМ), способных защитить конструкцию от термохимической и механической эрозии. Для использования таких материалов в конструкции ГЛА необходимо знать спектр свойств, таких как: термостойкость, износостойкость, излучательные и каталитические свойства и др. [1].

Каталитические и излучательные свойства материалов однозначно определяются компонентным составом, физико-химическими характеристиками, кристаллической структурой, пористостью, напряженным состоянием, глубиной пробега излучения и другими характеристиками. При этом следует иметь в виду, что в процессе интенсивного аэродинамического нагрева эти свойства изменяются.

Все сказанное выше, предполагает проведение комплексных экспериментально-теоретических исследований с целью изучения каталитических и излучательных свойств материалов. При этом такие исследования должны проводиться в условиях реального полета как для отдельных химических элементов, так и их композиций.

Каталитические свойства поверхности ТЗМ характеризуется константой скорости поверхностной рекомбинации, k_w . Для экспериментального определения этого параметра, изготавливается калориметры охлаждаемого и неохлаждаемого типа, поверхность теплоприёмного элемента которого покрывается тонким слоем (510 мкм) термостойкого композиционного материала, подвергающегося исследованию.

Проведенный анализ показал, что из всех возможных технологий формирования на поверхности калориметра таких покрытий, наилучшей является низкотемпературная газодинамическая технология.

В свою очередь, излучательные свойства поверхности ТЗМ характеризуются интегральной излучательной способностью, ε_w . Для её определения на стенде МАИ используется автоматизированная инфракрасная тепловизионная система серии М-9200 («MIKRON infrared, INS com.», USA, Рис. 1) Температурное поле поверхности теплоприёмного элемента калориметра с тонким слоем теплозащитного покрытия, представлено на Рис. 2.



Рис. 1. Общий вид инфракрасной тепловизионной камеры М-9200 [2]

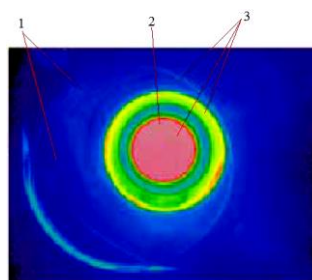


Рис. 2. Температурное поле на торцевой поверхности теплоприёмного элемента калориметра с покрытием: 1 – охлаждаемая державка, 2 – торцевая поверхность теплоприёмного элемента, 3 – температурное поле модели

По результатам обработки эксперимента интегральная излучательная способность покрытия на поверхности теплоприёмного элемента калориметра определялась с использованием соотношения, $\varepsilon_w = (T_{w,R}/T_{w,ист})^4$, где $T_{w,R}$ – радиационная температура при наличии подсветки от высоко-температурного набегающего потока, $T_{w,ист}$ – истинная температура поверхности образца.

1. Никитин П.В., Шкуратенко А.А. Влияние каталитически активной поверхности на интенсивность конвективного теплообмена // Труды МАИ. 2016. № 88.

2. Никитин П.В., Сотник Е.В. Катализ и излучение в системах тепловой защиты космических аппаратов // Янус-К. 2013. 336с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПЕНЫ С ЛОКАЛЬНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

Н.Д. Шмакова¹, Е.В. Ерманык¹, С.Ф.А. Сантуччи^{1,2}

¹Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

²École normale supérieure de Lyon, Лион, Франция

shmakova@hydro.nsc.ru

В повседневной жизни мы часто используем материалы, относящиеся к так называемой «мягкой материи» (soft matter). Так, например, шоколадный мусс, пена для бритья или строительная пена являются представителями широкого класса материалов с многомасштабной двухфазной структурой (газовые пузырьки в жидкой фазе) и имеют двойственное механическое поведение: твердые вещества в состоянии покоя, и жидкости, при воздействии напряжений, превышающих некоторый критический уровень. Такие специфические реологические свойства позволяют использовать пены в различных областях применения, от продуктов пищевой, косметической и фармацевтической промышленности до крупномасштабных промышленных процессов в области нефтедобычи и восстановлении почв. Таким образом понимание закономерностей, позволяющих осуществлять контроль течений пен в гетерогенных средах, представляется чрезвычайно важным [1 – 4].

Мы исследуем фундаментальные закономерности течения пен экспериментально в упрощенной модельной постановке. Эксперименты проводятся в ячейке Хеле-Шоу, представляющей собой простейшую модель трещины, образующейся, например, в процессе гидроразрыва пласта.

Исследовано течение пены в зависимости от нескольких параметров: величины и формы

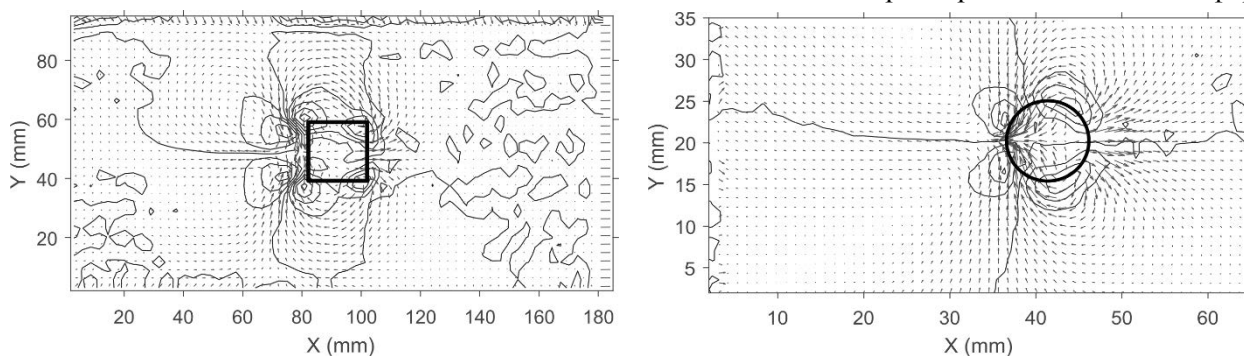


Рис. Контуры завихренности и поле возмущений скорости для квадратного и круглого препятствий

препятствия, помещенного в ячейку и локально сужающего ее зазор, и количества жидкости в пене. На Рис. показано поле скорости (за вычетом скорости равномерного потока на входе в ячейку, направленного справа налево), демонстрирующую рециркуляцию, характеризующуюся наличием квадрупольного возмущения, а также ускорение пены вниз по течению от препятствия, что напоминает т.н. эффект «отрицательного следа» в течении за всплывающими воздушными пузырьками в вязкоупругих жидкостях [5].

Анализ экспериментальных данных показал, что интенсивность рециркуляционных течений зависит как от высоты препятствия, так и от свойств самой пены (сухая – жидкая): скорость потока вниз по течению от препятствия выше для сухой пены. Также было показано влияние горизонтального размера препятствия и его формы: в зазоре над квадратным препятствием возникают дополнительные особенности в виде вихрей на углах [6].

Работа выполнена при поддержке гранта МОН РФ № 14.W03.31.0002.

1. Weaire D., Hutzler S. The Physics of Foams // Oxford University Press, 1999.
2. Cantat I., Cohen-Addad S., Elias F., Graner F., Hohler R., Pitois O., Rouyer F. and Saint-Jalmes A. Foams, Structure and Dynamics // Oxford University Press, 2013.
3. Dollet B., Graner F. Two-dimensional flow of foam around a circular obstacle: Local measurements of elasticity, plasticity and flow // J. Fluid Mech., 2007, V. 585 P. 181.
4. Stevenson P. Foam Engineering: Fundamentals and Applications // Wiley, 2012.
5. Hassager O. Negative wake behind bubbles in non-newtonian fluids // Nature, 1979, V. 279 P. 402.
6. Chevalier, T., J. Koivisto, N. Shmakova, Alava M.J., Puisto A., Raufaste C., Santucci S. Foam flows through a local constriction // J. Phys. Conf. Ser., 2017, V. 925, P. 012025.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕМОДИНАМИКИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ХИРУРГИЧЕСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ ПРИ ВРОЖДЕННОЙ ПАТОЛОГИИ ЛЕГОЧНОГО КРОВОТОКА У ДЕТЕЙ

М.И. Шмурак¹, М.Р. Камалтдинов², А.А. Породииков³

¹Факультет прикладной математики и механики ПНИПУ, Пермь

²ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления
рисками здоровью населения», Пермский край

³ФГБУ «Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии имени С.Г. Суханова» Минздрава РФ, Пермь
shmurak2007@yandex.ru

Нарушение легочного кровообращения – это сопутствующая патология при врожденных пороках сердца у детей (отсутствие межжелудочковой перегородки, тетрада Фалло, коарктация (сужение) аорты). Частота встречаемости врожденных пороков сердца в России возросла до 15 на 1000 родившихся живыми. По данным ВОЗ детская смертность от сердечно-сосудистых заболеваний в возрасте 0–4 лет в России ежегодно составляет около 8000 человек. Врожденные пороки сердца у детей нарушают в первую очередь кровоснабжение легких, что ведет к неравномерному их росту и недостаточному насыщению крови кислородом. Оперативное вмешательство по устранению врожденных пороков сердца может проводиться уже на третьи сутки после рождения ребенка [1]. Решение о схеме оперативного лечения, принимается, как правило, экспертным путем, что несет некоторую субъективность оценки.

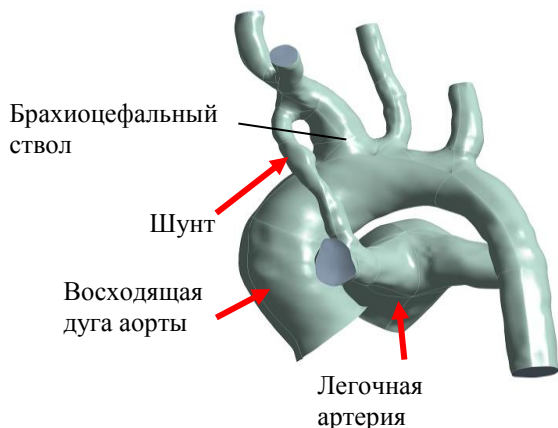


Рис. 3D геометрия системно-легочного шунтирования
у младенца с атрезией легочной артерии

Существует несколько сценариев оперативного вмешательства, которые позволяют перераспределить кровоток. Одним из наиболее распространенных методов устранения патологических изменений является использование модифицированного Блелок-Таусиг шунтирования (системно-легочный анастомоз). Для объективизации этой процедуры необходимо применять методы биомеханического моделирования, в результате чего можно судить о степени восстановления нормального кровоснабжения.

На основе изображений, полученных из МСКТ (мультиспиральная

компьютерная томография) с контрастом, была построена индивидуализированная биомеханическая модель системы «аорта–легочная артерия–шунт» для анализа гемодинамики в данной области.

Проведено гидродинамическое исследование кровообращения у ребенка (возраст 9 дней) с врожденным пороком сердца (атрезия легочной артерии) после оперативного лечения с использованием системно-легочного шунтирования. Получены основные гемодинамические параметры (скорость, давление, расход, Q_s/Q_p , OSI, WSS, TAWSS и т.д.), которые позволяют проанализировать эффективность оперативного вмешательства.

1. Синельников Ю.С., Орехова Е.Н., Шехмаматьев Р.М., Породииков А.А., Комарова Е.В., Зинченко А.А., Рамалданов К.Р. Случай успешной радикальной коррекции тетрады Фалло с аномальной передней нисходящей артерией, отходящей от правой коронарной артерии // Детские болезни сердца и сосудов. 2016. Т. 13. №. 4 С. 243–248.

РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА ПРИ НАЛИЧИИ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ В КОНТАКТЕ

А.Г. Шпенев

Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
kel-a-kris@list.ru

Композиты на основе углеродного волокна, прежде всего, известны в качестве конструкционных материалов благодаря своей прочности и жёсткости. Однако существует область применения, в которой они также показывают перспективные результаты – это разнообразные узлы трения. В данной работе будут рассмотрены материалы на основе углеродного волокна и углеродной (либо керамической (карборундовой)) матрицы. Эти материалы благодаря высоким показателям теплопроводности, теплоёмкости и устойчивости к высоким температурам используются при изготовлении тормозных дисков авиатранспорта и высокоскоростного железнодорожного транспорта. Одной из главных задач при внедрении этих материалов является увеличение их износостойкости и таким образом продление ресурса эксплуатации тормозных дисков. Увеличение скорости и массы транспортных средств ведёт к ужесточению температурно-нагрузочных условий при трении тормозных дисков, а повышение требований к безопасности транспорта вызывает необходимость увеличения коэффициента трения при работе углеродных композитов.

При работе авиационных тормозных дисков нередко имеет место явление термоупругой неустойчивости, при котором происходит концентрация поверхностных давлений и температур на ограниченных участках поверхности трения. Это приводит к существенному нагреву рабочей поверхности (более 1000°C). Хотя такие температуры не приводят к потере рабочих свойств материала, перегрев поверхности может вызвать дополнительное увеличение износа композита. Влияние температуры на скорость изнашивания углеродных композитов исследовано мало из-за технических трудностей и носит выраженный немонотонный характер.

Попытки увеличить прочность и коэффициент трения композитов применением более жёсткого углеродного волокна приводят к ещё большему увеличению скорости изнашивания материала. Для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик фрикционных композитов необходимы модели трения и изнашивания соответствующих материалов в условиях высоких нагрузок и температур, которые в данный момент развиты крайне слабо (в отличие от теорий прочности волокнистых композитов). В работе построена модель теплового воздействия на поверхность композитного материала в процессе его износа абразивными частицами. Рассмотрено влияние структуры матрицы и волокна композита на процесс выхода абразивных частиц износа из поверхности трения материала. Исследовано влияние условий трения (контактных давлений и температур) на силу трения и скорость изнашивания.

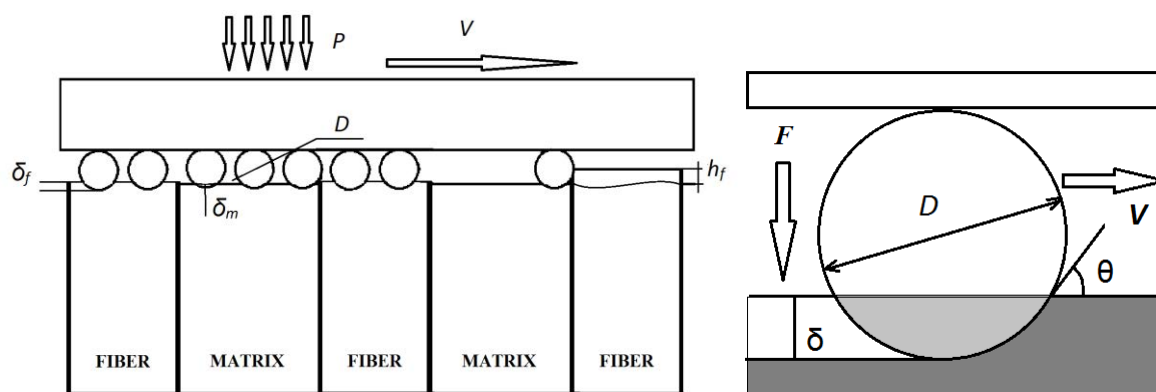


Рис. Схема изнашивания волокнистого композита в присутствии абразивных частиц

Работа выполнена при поддержке ФАНО (Пер. № АААА-А17-117021310379-5), и частичной поддержке РФФИ (проект № 17-58-52030).

1. Shpenev A.G., Kenigfest A.M., Golubkov A.K. Theoretical and experimental study of carbon brake discs frictionally induced thermoelastic instability//Shpringer Proceedings Phys. 2016. Vol. 175. P. 551–559.

ДИНАМИКА ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ В ЗАПОЛНЕННОМ ЖИДКОСТЬЮ КОНТЕЙНЕРЕ ПРИ ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ ВИБРАЦИЯХ

В.Д. Щипицын

Лаборатория вибрационной гидромеханики,
Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
schipitsyn@pspu.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования вибрационной динамики твердых одиночных и множественных включений в форме эллиптических цилиндров в заполненном вязкой несжимаемой жидкостью прямоугольном контейнере, совершающем поступательные гармонические колебания (Рис.).

Изучаются особенности поведения тел в зависимости от их относительного размера и плотности, количества тел в объеме жидкости, расстояния между телами и стенкой при различных значениях безразмерной амплитуды и частоты вибраций. Эксперименты проводятся в постановке, ранее описанной авторами в работе [1].

Для выяснения природы взаимодействия тел с границами полости и друг с другом, а также построения траекторий колебаний тел, проводится скоростная видеосъемка процесса с его последующей кадровой обработкой и анализом. С целью изучения структуры осредненных сдвиговых колебаний жидкости применяется P.I.V. методика.

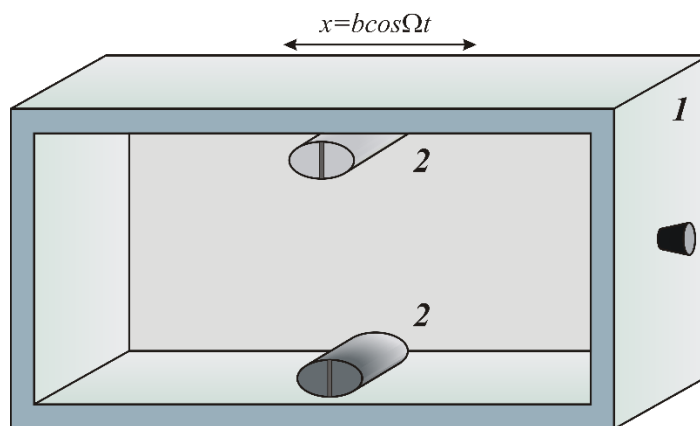


Рис. Схема кюветы: 1 – прямоугольная полость; 2 – эллиптический цилиндр

При проведении исследования, наряду с осциллирующим движением тела, особое внимание уделено осредненным эффектам, возбуждаемым в результате колебаний тел в жидкости. В частности, изучению вибрационной подъемной силы, действующей на твердые эллиптические включения в непосредственной близости от твердых границ.

Эксперименты проводятся как с тяжелыми, так и с легкими эллиптическими цилиндрами. Особое внимание уделяется телам с плотностями, мало отличающимися от плотности жидкости, поскольку пробные эксперименты показали, что вибрационная подъемная сила, действующая на тела с относительной плотностью близкой к единице, имеет определенно другую природу, не связанную с инерционными колебаниями включения относительно жидкости.

Результаты исследований обобщаются на плоскости управляющих безразмерных параметров. Исследование проводится при варьировании в широком диапазоне безразмерной частоты и амплитуды вибраций полости. Особое внимание уделено предельному случаю низких безразмерных частот, когда размеры тел оказываются сравнимы с толщиной вязкого пограничного слоя Стокса.

Полученные результаты исследования могут найти активное применение в разработке эффективных методов управления твердыми включениями в вязкой жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект 18-71-00122).

1. V.D. Schipitsyn, V.G. Kozlov. Oscillatory and Steady Dynamics of a Cylindrical Body Near the Border of Vibrating Cavity Filled with Liquid // Microgravity Sci. Technol. (2018) 30: 103–112.

ЗАДАЧА КОШИ ДЛЯ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ПОТОКЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ЗАВИХРЕННОСТИ В КРИТИЧЕСКОМ СЛОЕ

В.Ф. Копьев¹, С.А. Чернышев¹, М.А. Юдин^{1,2}

¹Центральный аэрогидродинамический институт, Московский комплекс, Москва

²Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный

mikleudin@ya.ru

Данная работа является продолжением работ, посвященных неустойчивости цилиндра в циркуляционном потоке жидкости [1, 2] и нацелена на более подробное изучение сдвиговой неустойчивости, возникающей в задаче. Сдвиговая неустойчивость представляет большой интерес, так как является причиной неустойчивости трехмерных вихрей, и по-видимому отвечает за турбулилизацию вихревого кольца при больших числах Рейнольдса [3]. Исследование данной неустойчивости в трехмерных задачах представляет большие трудности. Задача о неустойчивости цилиндра радиуса a при обтекании его потоком жидкости с угловой скоростью $U_0(r)$, ограниченными стенками внешнего кожуха радиуса R (Рис.), представляется наиболее простой, в которой может быть выявлена сдвиговая неустойчивость, связанная с потоком энергии из критического слоя к колебаниям системы.

Ранее была решена задача о собственных колебаниях цилиндра в циркуляционном потоке жидкости [2]. Однако, собственные колебания не определяют полностью динамику этой системы, поскольку ее спектр содержит не только дискретную, но и непрерывную часть. В частности, представляет интерес начальная задача, решение которой является суперпозицией возмущений всего спектра.

Для исследования течения в области между цилиндрами используется аппарат поля смещения $\varepsilon(r, t)$.

Возмущение поля завихренности пропорционально радиальной компоненте поля смещения $\delta\Omega = -\varepsilon^r \frac{\partial \Omega_0(r)}{\partial r}$. Решение задачи Коши для поля смещения в кольце $a < r < R$ выписывается в общем

виде с помощью преобразования Лапласа. Для частных случаев (случай малой завихренности), интегралы могут быть вычислены точно. Таким образом, может быть построена зависимость завихренности от времени во всем течении.

Показано, что установление колебательного режима сопровождается перестройкой течения вблизи критического слоя. При этом поле смещения жидких частиц имеет сильно изрезанный характер и нарастающую по времени амплитуду.

Полученное решение для поля завихренности позволяет рассчитать поток энергии. Расчет потока энергии может быть проведен не только в случае малой монотонной завихренности, но и в точной постановке для течения с завихренностью обратно пропорциональной расстоянию до оси цилиндра.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №16-01-00746).

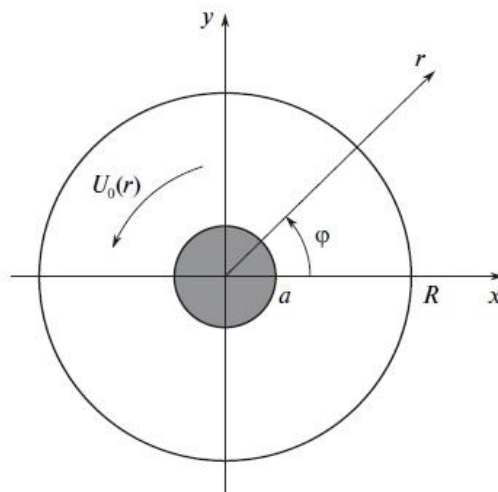


Рис. Цилиндр в ограниченном циркуляционном потоке

1. Копьев В.Ф., Чернышев С.А. Неустойчивость колеблющегося цилиндра в циркуляционном потоке несжимаемой жидкости // Изв. РАН МЖГ. 2000. № 6. С. 78–92.

2. Копьев В.Ф., Чернышев С.А., Юдин М.А. Неустойчивость цилиндра в циркуляционном потоке несжимаемой идеальной жидкости. // Прикладная математика и механика. 2017. Т. 81 № 2. С. 216–229.

3. Копьев В.Ф., Чернышев С.А. Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука. // Успехи физических наук. 2000. Т. 170 № 7. С. 713–742.

Научное издание

***ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ-МЕХАНИКОВ***

(4 – 14 сентября, 2018 г.; Сочи, "Буревестник" МГУ)

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Публикуется в авторской редакции с оригинал-макета,
подготовленного в НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова.

Подписано в печать 03.08.2018
Печать офсетная

Формат 60х84 1/8
Усл. печ. л. 20

Бумага офсетная №1
Тираж 150 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