



НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова

Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике



ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ-МЕХАНИКОВ

***4–14 СЕНТЯБРЯ 2026
СОЧИ, «БУРЕВЕСТНИК» МГУ***

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА
НИИ МЕХАНИКИ

РОССИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ
ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКЕ

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ-МЕХАНИКОВ YSM-2026

(4–14 сентября 2026 г., Сочи, «Буревестник» МГУ)

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2026

УДК 531/534(082)
ББК 22.2я431
В84

Ответственные редакторы и составители:

А. А. Афанасьев, А. А. Чернова, О. О. Иванов, Ю. С. Зайко

*Организаторы конференции выражают благодарность
за содействие и поддержку в проведении конференции
Евгению Анатольевичу Вылегжанину*

В84 **Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2026** (4–14 сентября 2026 г., Сочи, «Буревестник» МГУ) : Тезисы докладов / отв. редакторы и составители: А. А. Афанасьев, А. А. Чернова, О. О. Иванов, Ю. С. Зайко. – Москва : Издательство Московского университета, 2026. – III, 98, [1] с. : цв. ил. (рис., сх., граф., диагр., фот., табл.). – Электронное издание сетевого распространения.

ISBN 978-5-19-012477-4 (e-book)

Проведение Всероссийской конференции молодых учёных-механиков направлено на поддержание высокого уровня фундаментальных и прикладных исследований молодых ученых, сохранение и развитие научных школ и преемственности поколений в ведущих научных коллективах и генерировании инновационных идей. Цель конференции – сделать молодых ученых более коммуникабельными, расширить их научный кругозор, наладить научные связи между учеными 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 твердого тела, теоретическая механика, мехатроника и робототехника. Данный сборник содержит тезисы докладов в редакции участников конференции.

УДК 531/534(082)
ББК 22.2я431

ISBN 978-5-19-012477-4
(e-book)

© НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова, 2026
© Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике, 2026
© Издательство Московского университета, 2026

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 (ИПМ РАН, НИИ механики МГУ,
Москва)

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

Члены Научного комитета

А.К. Беляев (ИПМаш РАН, Уфа); А.М. Гайфуллин (ЦАГИ, Жуковский); Д.А. Губайдуллин (ИММ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань); А.Г. Кучумов (НТУ «Сириус», Сириус); Т.П. Любимова (ИМСС УрО РАН, Пермь); Н.В. Никитин (НИИ механики МГУ, Москва); А.Н. Нуриев (ИММ КФУ, Казань), А.Н. Павленко (ИТ СО РАН, Новосибирск); Н.А. Прибатурин (ИТ СО РАН, Новосибирск), Ю.О. Соляев (ИПРИМ РАН, Москва)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

А.А. Афанасьев (председатель Организационного комитета); О.О. Иванов (зам. председателя Организационного комитета); А.А. Чернова (ученый секретарь Организационного комитета); А.И. Андреева (ученый секретарь Организационного комитета); В.В. Веденеев, А.С. Виноградова, С.К. Вязьмина; Л.Р. Гареев; А.П. Голуб; Я.В. Демченко, Ю.С. Зайко, С.С. Попович; О.Г. Сутырин; И.М. Сыпченко; В.В. Терауд, А.М. Чайка

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Беляев А.К.</i>	7
ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ДИНАМИКА – ОТСУТСТВУЮЩЕЕ ЗВЕНО В ЭВОЛЮЦИИ ДИНАМИКИ	
<i>Гайфуллин А.М., Свириденко Ю.Н.</i>	8
ВИХРЕВОЙ СЛЕД ЗА ПАССАЖИРСКИМ САМОЛЕТОМ. ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	
<i>Горячева И.Г.</i>	9
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО- РЕЛЬС» В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕНИЕМ И ИЗНАШИВАНИЕМ	
<i>Губайдуллин Д.А., Шайдуллин Л.Р., Фадеев С.А.</i>	10
ОСАЖДЕНИЕ АЭРОЗОЛЯ В РЕЗОНАТОРАХ И ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА НА ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА	
<i>Кучумов А.Г., Селиванов Г.Д., Селезнев М.А., Пиль Н.Е., Хорошев Д.В., Кутузова А.М.</i>	11
РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ТРАНСКАТЕТЕРНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА	
<i>Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н.</i>	12
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ КРУПНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ	
<i>Никитин Н.В.</i>	13
ГЛОБАЛЬНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАСЧЁТЕ СИЛЬНО НЕУСТОЙЧИВЫХ СТРУЙ	
<i>Нуриев А.Н.</i>	14
МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ТЯГИ В ГИДРОУПРУГИХ БИОМИМЕТИЧЕСКИХ ПРОПУЛЬСИВНЫХ СИСТЕМАХ	
<i>Павленко А.Н.</i>	15
«УМНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ» ДЛЯ СВЕРХИНТЕНСИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ПРИ КИПЕНИИ И ИСПАРЕНИИ	
<i>Соляев Ю.О.</i>	17
РЕГУЛЯРНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ТРЕЩИН В ТЕОРИИ УПРУГОСТИ С УЧЕТОМ НЕЛОКАЛЬНЫХ И ГРАДИЕНТНЫХ ЭФФЕКТОВ	
<i>Абакарова М.А., Кравченко Д.С., Кустова Е.В.</i>	18
ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАКРОПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА К КИНЕТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ И МОДЕЛЯМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ	
<i>Абдуллин А.И.</i>	19
НЕФТЯНЫХ ПЛАСТАХ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МНОГОСТВОЛЬНЫМИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ	
<i>Аганин А.А., Аганин И.А., Давлетишин А.И.</i>	20
ДИНАМИКА ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В СФЕРИЧЕСКОМ КЛАСТЕРЕ В ПУЧНОСТИ ДАВЛЕНИЯ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ	
<i>Амелюшкин И.А., Кривопалова Е.В., Петров Д.А.</i>	21
АЭРОГИДРОМЕХАНИКА ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО ВОДЕ КОЛЕСА	
<i>Амелюшкин И.А., Кривопалова Е.В., Сутягина Е.Д.</i>	22
ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИКИ МАШУЩЕГО КРЫЛА	
<i>Андреева А.И., Афанасьев А.А.</i>	23
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫТЕСНЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПЛАСТАХ С НЕОДНОРОДНЫМ СТРОЕНИЕМ	

<i>Анисимов В.Д., Поздеева А.И.</i>	24
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ВИБРОРОБОТА В OPENFOAM В РАМКАХ FSI-ПОДХОДА С АНАЛИТИЧЕСКИМ ЭТАЛОНОМ	
<i>Афанасьев А.А., Андреева А.И., Веденеева Е.А., Вязьмина С.К., Головин А.П.</i>	25
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПИРАНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ОТЛОЖЕНИЯМИ СОЛИ ПРИ ЗАКАЧКЕ СУХОГО ГАЗА	
<i>Баймуратова А.Р., Васютина В.П., Нуриев А.Н.</i>	26
ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА КВАЗИПРОПУЛЬСИВНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАШУЩЕГО КРЫЛА	
<i>Белогривов Н.В., Котова Г.Ю.</i>	27
МОРФОЛОГИЯ ВЕЩЕСТВА КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ В ОКРЕСТНОСТИ ОБЛАСТЕЙ НН	
<i>Бесчеров Д.Е., Ереев М.Н., Марков А.С., Панов В.А., Свешников Д.Н.</i>	28
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ СВЯЗАННОГО РАСЧЕТА «ГИДРОДИНАМИКА – ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС – НДС – РЕСУРС» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ ANSYS	
<i>Вахтерова Я.А., Федотенков Г.В.</i>	29
ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ	
<i>Веденеев В.В.</i>	30
КАК ВОЗНИКАЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ? ЭВОЛЮЦИЯ КОНЦЕПЦИЙ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ	
<i>Вестяк К.В., Вахтерова Я.А.</i>	31
МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕМБРАНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	
<i>Вязьмина С.К.</i>	32
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО СМЕШЕНИЯ CO₂ С ВОДОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИФфуЗИОННОЙ МОДЕЛИ	
<i>Гарбуз М.А.</i>	33
БИФУРКАЦИИ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА С ВЕТРОТУРБИНОЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ ВЕТРА	
<i>Гареев Л.Р., Веденеев В.В., Иванов О.О., Трифонов В.В.</i>	34
ВИЗУАЛИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ЛАМИНАРНОГО УЧАСТКА СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ	
<i>Гвоздева В.А.</i>	35
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ТЕЛОМ	
<i>Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г.</i>	36
ФОКУСИРОВКА И КУМУЛЯЦИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТЕЛ С ГАЗОВЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ	
<i>Глуховский А. М.</i>	37
КРИТЕРИЙ ТЕКУЧЕСТИ РЕШЁТЧАТЫХ СТРУКТУР	
<i>Голуб А.П.</i>	38
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ ВНУТРИ СФЕРЫ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ	
<i>Гречко С.С.</i>	39
ИССЛЕДОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ПРИЕМИСТОСТИ СКВАЖИНЫ ИЗ-ЗА ОСАЖДЕНИЯ СОЛИ ПРИ ВРЕМЕННОЙ ОСТАНОВКЕ ЗАКАЧКИ ГАЗА	

<i>Губский В.В., Петров А.В.</i>	40
РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЯГИ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ В КОМПОНОВКЕ С ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ	
<i>Демченко Я.В., Иванов О.О.</i>	41
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АМПЛИТУДЫ КРУТИЛЬНЫХ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ОТ ДЛИНЫ ЦИЛИНДРА	
<i>Денисов М.И.</i>	42
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕДУКЦИИ РАЗМЕРНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАСТА ПРИ ОДНОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ	
<i>Душин Н.С.</i>	43
УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ СКОРОСТИ	
<i>Душин Н.С., Никифоров И.В.</i>	44
ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ТЕЧЕНИЯ В УЗЛАХ УЧЕТА РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА	
<i>Елкин В.Ю.</i>	45
АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ МОДАМ	
<i>Иванов О.О., Гареев Л.Р., Трифонов В.В., Веденеев В.В.</i>	46
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ, СОЗДАНЫХ МИНИСТРУЯМИ В ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ	
<i>Исмагилов Д.А., Гумеров Н.Н., Бегерестанова Л.Ж.</i>	47
ОПТИМИЗАЦИЯ КИНЕМАТИКИ РЫБОПОДОБНОГО ПЛАВАНИЯ	
<i>Калугин С.Т., Толоко Г.В.</i>	48
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА И ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ	
<i>Каргаев М.В.</i>	49
РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВИБРАЦИЙ ВЕРТОЛЕТА НА БАЗЕ МОДЕЛИ СОВМЕСТНЫХ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАСТЕЙ И ВТУЛКИ НЕСУЩЕГО ВИНТА НА УПРУГОДЕМПФИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ	
<i>Косьянчук В.В.</i>	50
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА В ВОЗДУХОЗАБОРНИКЕ СПУТНИКОВ ДЛЯ СВЕРХНИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ	
<i>Кравченко Д.С., Кустова Е.В.</i>	51
ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ХИМИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА	
<i>Краснопольский Б.И., Карипидис П.А., Быков Д.В., Арсалан М.</i>	52
ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ СИМУЛЯТОРА МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В СКВАЖИНАХ	
<i>Кузьмин М.А.</i>	53
ВЫСШИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ МЕТОДА АСИМПТОТИЧЕСКОГО ОСРЕДНЕНИЯ ПЛАСТИН	

<i>Култашев А.А., Амелюшкин И.А.</i>	54
КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПОЛЁТА В АТМОСФЕРЕ МАРСА	
<i>Ларкин Д., Еремин И.В.</i>	55
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ТРАКТЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ	
<i>Ларкин Д., Костюшин К.В.</i>	56
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	
<i>Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Волков С.М., Евдокименко И.А., Светоносов А.И., Чинак А.В.</i>	57
ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКОВ В ТВС С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ	
<i>Лонин К.А., Ереев М.Н., Козин А.В., Соловьев С.А., Патрушев В.Л.</i>	58
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ РУ	
<i>Лутхов А.И., Глаголев В.В.</i>	59
ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ НОРМАЛЬНОГО СЖАТИЯ	
<i>Лыкова А.В., Староверов О.А, Сивцева А.В., Ильиных А.В.</i>	60
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНООСНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ И КРУЧЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЦИКЛА НА ОСТАТОЧНЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
<i>Лыкова А.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э.</i>	61
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА	
<i>Майский А.В., Корнев Ю.В., Гилязова Р.Ф., Муромцев Д.Н., Карнет Ю.Н.</i>	62
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТА НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО НАНОИНДЕНТИРОВАНИЮ	
<i>Морковкина Е.А.</i>	63
ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СРЕД, ОСЛАБЛЕННЫХ СИСТЕМОЙ ЛОМАНЫХ ТРЕЩИН	
<i>Мустафин И.Н., Аганин А.А.</i>	64
СОВМЕСТНЫЙ КОЛЛАПС ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЛИНЕЙНОЙ, ПЛОСКОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИЯХ	
<i>Мухаметшин А.Р., Каменских А.А., Носов Ю.О.</i>	65
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА СФЕРИЧЕСКИЕ ОПОРНЫЕ ЧАСТИ МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ	
<i>Мухаметшин А.Р., Каменских А.А, Носов Ю.О.</i>	66
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТИФРИКЦИОННОЙ ПРОСЛОЙКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСЧЕТНОГО ОБЪЕМА	
<i>Некипелов В.С.</i>	67
МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНОГО ВИНТА С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ ЕГО ЛОПАСТЕЙ В РАМКАХ ВИХРЕВОЙ ТЕОРИИ И БАЛОЧНОЙ АНАЛОГИИ	

Некрасов О.О., Смородин Б.Л. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКАЯ КОНВЕКЦИЯ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КОНДЕНСАТОРЕ	68
Новов Д.Д. МЕТОД РАЗРЫВНЫХ СМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ТРЕЩИН	69
Огинов А.А., Копьев А.В., Зыбин К.П. ПЕРЕХОД МЕЖДУ ДИССИПАТИВНЫМ И ВЯЗКИМ ИНТЕРВАЛАМИ ПРИ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	70
Павлов Е.П., Исмагилов Д.А. ГИБРИДНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ OPENFOAM: ВНЕДРЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ БИБЛИОТЕК ДЛЯ ПЕРЕНОСА РАСЧЕТОВ НА GPU	71
Петров Д.А., Красницкий С.А., Гуткин М.Ю., Колесникова А.Л., Романов А.Е. УПРУГИЕ ПОЛЯ И ЭНЕРГИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ДИСЛОКАЦИИ В ШАРЕ	72
Петров Г.С., Сердюк Д.О. ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ПРЕДНАПРЯЖЁННОЙ ОРТОТРОПНОЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ БАЛКИ ЧОУ	73
Попович С.С. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ НАГРЕВ В ОБЛАСТИ ОТРЫВА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ПОТОКЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА	74
Попович С.С., Луцик В.Г. ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА МАХА НА КОЭФФИЦИЕНТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	75
Попович С.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА ДОЗВУКОВЫМ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ	76
Приказчиков Д.А. ОБОБЩЕНИЕ SOE-ПОДХОДА НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПЕРАТОРЫ ВЯЗКОУПРУГОСТИ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ	77
Прокопьев С.А., Любимова Т.П. СТРУКТУРА КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ С ЭФФЕКТОМ СОРЕ В ПЛОСКИХ СЛОЯХ С ГРАНИЦАМИ МАЛОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ	78
Ран М.А., Струкова В.И., Каменских А.А., Пустовалов Д.О. ДЕСТРУКЦИЯ ОТВЕРЖДЕННЫХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ	79
Ран М.А., Струкова В.И., Каменских А.А., Пустовалов Д.О. ТЕРМОВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ ПОСЛЕ АДДИТИВНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ С РАЗНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ПЕЧАТИ	80
Саньков М.А., Татусь Н.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛАСТИКА ПРИ 3D ПЕЧАТИ В КОСМОСЕ	81
Седова А.К. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ПУЗЫРЬКА В ЛИНЕЙНО-ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ	82
Сиваков Н.С., Усанов В.А., Логинов А.А. АНАЛИЗ ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ РАСПЛАВЛЕННОГО ПАРАФИНА	83
Сорока М.З., Касимов А.Р. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ПЕРИОДИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ	84

Сутырин О.Г., Мальшиев С.В.	85
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С НАКЛОННЫМ ГАЗОВЫМ КЛИНОМ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ	
Сытченко И.М.	86
АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДЗЕМНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ГАЗА В НЕОДНОРОДНЫХ СЛОИСТЫХ ПЛАСТАХ	
Сытченко И.М.	87
ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕНИЯ СОЛИ НА ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ПРИ ЗАКАЧКЕ В НЕОДНОРОДНЫЙ СЛОИСТЫЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ	
Толоко Г.В., Калугин С.Т.	88
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ, ОБУСЛОВЛЕННОГО НАЛИЧИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ МАССООБМЕНА	
Удалов А.С.	89
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОНИЦАЕМЫХ ТЕЛ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДАМИ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	
Усанов В.А., Гембаржевский Г.В., Сиваков Н.С., Рашковский С.А., Якуш С.Е.	90
ПАРАФИН КАК ОСНОВА ЛЕГКОПЛАВКОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ И УНОСА МАССЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА	
Хайрулин А.Р., Кучумов А.Г.	91
КИНЕТИКА ВЫСВОБОЖДЕНИЯ МОНОМЕРОВ И ОЛИГОМЕРОВ ПРИ БИОДЕГРАДАЦИИ ПОЛИМЕРНОГО СТЕНТА	
Халтурина Д.Д.	92
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ БЕГУЩИХ ВОЛН В УПРУГОМ ВОЛНОВОДЕ СИСТЕМОЙ ГИБКИХ ПЬЕЗОАКТУАТОРОВ	
Ходак А.С., Емельянов И.Г.	93
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ	
Цыденов Б.О., Деги Д.В., Барт А.А., Трунов Н.С., Суховило Н.Ю.	94
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ОСЕННЕГО ТЕРМОБАРА В ОЗ. ДОЛГОЕ (БЕЛАРУСЬ)	
Чернова А.А.	95
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЗАКАЧИВАЕМОГО ГАЗА НА ЗАПИРАНИЕ ПОТОКА СОЛЯМИ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ	
Шнейдер А.А., Шеремет М.А.	96
ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОЙ ДИССИПАЦИИ НА КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ КАНАЛЕ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ СТЕНКИ	
Шуган И.В.	97
ЗАДАЧА О РАЗРУШЕНИИ ПЛОТИНЫ	
Ярикова С.П.	98
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОННОГО РАЗМЫВА В ОКРЕСТНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ПРИЛИВНОЙ ТУРБИНЫ	

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ДИНАМИКА – ОТСУТСТВУЮЩЕЕ ЗВЕНО В ЭВОЛЮЦИИ ДИНАМИКИ

Беляев А.К.

Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург

e-mail: vice.ipme@gmail.com

Существует много разновидностей динамик. Основные виды динамик вместе с их рабочими частотами обсуждаются в докладе. Исторически, первой была динамика абсолютно твердого тела, которая характеризуется нулевыми собственными частотами. Динамика деформируемого твердого тела оперирует с так называемыми механическими частотами. Термодинамика также является видом динамики с частотами тепловых вибраций, значительно превышающими частоты механических колебаний. Динамика абсолютно твердого тела выводится из динамики деформируемого твердого тела, так как твердотельные движения присутствуют в теории колебаний. Уравнения динамики деформируемого твердого тела получаются из динамики твердого тела при представлении деформируемого тела периодической структурой элементарных систем с одной степенью свободы. Это означает, что динамика абсолютно твердого тела и динамика деформируемого твердого тела могут рассматриваться как две соседствующие динамики.

Однако попытки вывести уравнения динамики деформируемого твердого тела из термодинамики и наоборот наталкиваются на огромные трудности моделирования. Сами трудности, возникающие при попытке связать термодинамику с динамикой деформируемого твердого тела, указывают на то, что они не являются соседями и между этими двумя теориями существует зазор, «резервирующий» место для некой новой динамики. Эта новая динамика является низкочастотным предельным случаем термодинамики и высокочастотным предельным случаем динамики деформируемого твердого тела. Новая динамика, заполняющая указанный зазор, будет называться высокочастотной динамикой, а соответствующие частоты – высокими частотами механических колебаний.

В докладе будут представлены методы моделирования высокочастотной вибрации, выведенные как из динамики деформируемого твердого тела, так и из термодинамики. Будет показано, какими новыми свойствами обладает высокочастотная динамика в сравнении с динамикой деформируемого твердого тела и термодинамикой. Также будут указаны границы высокочастотной динамики. Наконец, будут выведены граничные задачи высокочастотной динамики и предложены решения нескольких практических задач.



Рис. Высокочастотная динамика и ее место среди типов динамики.

1. Belyaev A.K. Combining continuous and discrete energy approaches to high frequency dynamics of structures. In: Selectic topics in structionics and mechatronic systems, A.K.Belyaev, A. Guran (eds). World Scientific Publishers, pp. 221-267, 2003.

ВИХРЕВОЙ СЛЕД ЗА ПАССАЖИРСКИМ САМОЛЕТОМ. ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Гайфуллин А.М., Свириденко Ю.Н.

Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский
e-mail: gaifullin@tsagi.ru

Сходящая с самолета вихревая пелена образует вихревой след. За летательным аппаратом с крылом большого удлинения след живет достаточно длительное время, за которое самолет успевает пролететь расстояние в несколько десятков километров. Интенсивность и время жизни вихревого следа в основном зависят от двух факторов: от самолета-генератора следа и от состояния турбулентной атмосферы. Чем крупнее самолет, тем интенсивнее след за ним и тем больше время его жизни. Чем интенсивнее атмосферная турбулентность, тем быстрее затухает циркуляция следа и сокращается время его жизни.

В докладе будут рассмотрены несколько задач, связанных с вихревым следом за пассажирским самолетом. Первая задача – определение характеристик вихревого следа за самолетом (см. рис.). В области вблизи самолета производится расчет характеристик течения с учетом задания довольно точной геометрии самолета и параметров горячей струи. В дальнем следе длинноволновые синусоидальные возмущения нарушают прямолинейность вихревых структур. По мере удаления от самолета амплитуда возмущений растет, затем вихри сталкиваются, образуя вихревые кольца. Разрушение вихревых колец завершает стадии развития интенсивного вихревого следа. Будут рассмотрены задачи о диффузии вихревого следа. При этом будет раскрыт физический механизм потери циркуляции вихревого следа по мере удаления его от самолета.

Вторая задача. В вихревой след от самолета может попасть другой самолет, летящий либо по той же траектории, например по глиссаде, либо при крейсерском режиме полета по соседнему эшелону. Расстояние между эшелонами всего 300 м. и в хорошую слаботурбулентную погоду вихревой след от крупного самолета может опуститься на такое расстояние. Известны случаи и катастроф, и повреждений при попадании самолета в вихревой след. В зоне влияния вихревого следа на самолет действуют дополнительные силы и моменты, зависящие от взаимного расположения самолета и вихревого следа. Поэтому вторая задача – определение этих дополнительных сил и моментов.

Вихревой след не видим, на современном этапе невозможно предотвратить попадание одного самолета в вихревой след другого самолета. Но, возможно обучить летный состав навыкам управления самолетом в зоне влияния вихревого следа или даже внутри вихревого следа. Третья задача – создание математической модели аэродинамики самолета, попавшего в вихревой след. Модель основана на применении искусственных нейронных сетей. Она работает в режиме реального времени и предназначена для авиационных тренажеров и пилотажных стендов. В настоящее время модель установлена на пилотажных стендах ЦАГИ, РСК МИГ и ФАЛТ МФТИ.

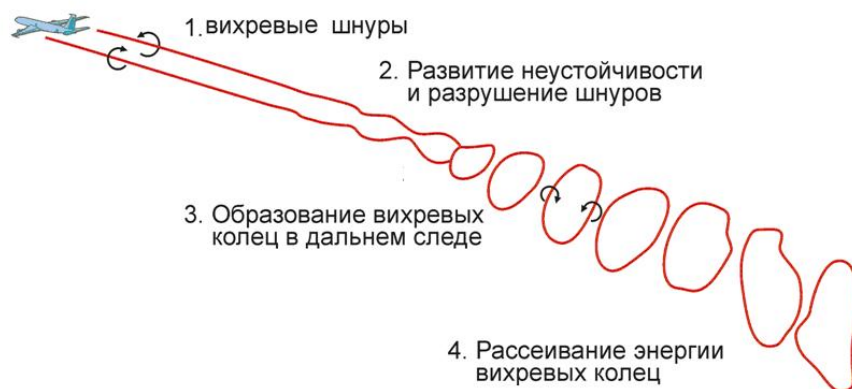


Рис. Вихревой след за самолетом.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО-РЕЛЬС» В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕНИЕМ И ИЗНАШИВАНИЕМ

Горячева И.Г.^{1,2}

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

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

e-mail: goryache@ipmnet.ru

Проблема управления трением и изнашиванием в системе «колесо-рельс» в условиях тяжеловесного движения является важной задачей, решение которой позволяет снизить потери энергии и повысить эффективность работы железнодорожного транспорта. Одним из инструментов, способствующих ее решению, является математическое моделирование. Использование его на стадии проектирования позволяет провести оценку влияния условий взаимодействия колес и рельсов на конкретном участке пути, механических и прочностных характеристик колес и рельсов, а также характерных нагрузочно-скоростных параметров взаимодействия колеса с рельсом на распределение контактных и внутренних напряжений, силу трения и процесс накопления в приповерхностных слоях взаимодействующих тел контактно-усталостных повреждений.

В докладе основное внимание уделено анализу влияния промежуточного слоя (модель модификатора трения) на распределение контактных и внутренних напряжений в условиях трения качения с проскальзыванием, а также моделированию зарождения контактно-усталостных повреждений в приповерхностных слоях колес и рельсов и оценке влияния на этот процесс остаточных напряжений (см. Рис.).

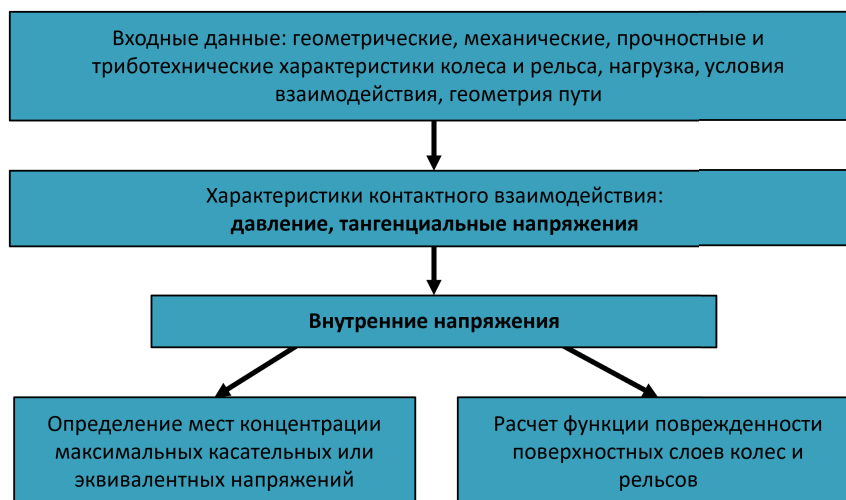


Рис. Этапы моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в колесах и рельсах.

На основе разработанных моделей [1,2] даны рекомендации относительно способов управления коэффициентом сцепления колес и рельсов, а также повышения их контактно-усталостной долговечности.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

1. Goryacheva I., Meshcheryakova A. Modelling of rolling contact fatigue under various interface conditions // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Год. 2024. Vol. 238. № 4. P. 360–369.

2. Горячева И.Г. Повышение эффективности работы системы «колесо-рельс» грузовых вагонов и рельсов в условиях тяжеловесного движения на основе управления трением и контактно-усталостным разрушением взаимодействующих тел // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». 2024. № 6. С. 1–8.

ОСАЖДЕНИЕ АЭРОЗОЛЯ В РЕЗОНАТОРАХ И ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА НА ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА

Губайдуллин Д.А., Шайдуллин Л.Р., Фадеев С.А.

Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань
e-mail: gubaidullin@imm.knc.ru

Геометрия резонатора определяет его резонансные частоты, добротность и нелинейные эффекты [1, 2]. Акустические течения повышают эффективность осаждения аэрозоля, что важно для очистки газов [3, 4]. Цель работы – сравнить эффективность резонаторов для осаждения мелкодисперсного аэрозоля.

Исследования проведены на экспериментальной установке с виброгенератором. Испытаны четыре резонатора: широкая труба ($R_1=0.05$ м), узкая труба ($R_2=0.018$ м), труба со скачком сечения (R_1, R_2) и квадратный канал ($D=0.4$ м). На одном конце устанавливался плоский поршень, противоположный конец герметично закрыт. В качестве рабочей среды использовался аэрозоль DEHS с микронным диаметром частиц.

Максимальное акустическое давление обнаружено в канале с наибольшей площадью поршня и его значение в 3 раза превышает давление в узкой трубе. При резонансе осаждение аэрозоля ускорено по сравнению с невозмущенной средой. Наименьшее время осаждения в широкой трубе, наибольшее в канале, из-за различий объёма и числа частиц. Введён критерий эффективности K для сравнения резонаторов с учётом геометрии [5].

Изучено влияние радиального градиента температуры на резонансные колебания газа в широкой трубе [6]. Рассмотрена закрытая цилиндрическая труба с объёмным источником тепла, постоянной температурой стенок и параболическим радиальным профилем температуры. Показано, что источник тепла уменьшает средний сток импульса из-за радиальной зависимости скорости, что вместе с температурной зависимостью вязкости усиливает резонансные колебания.

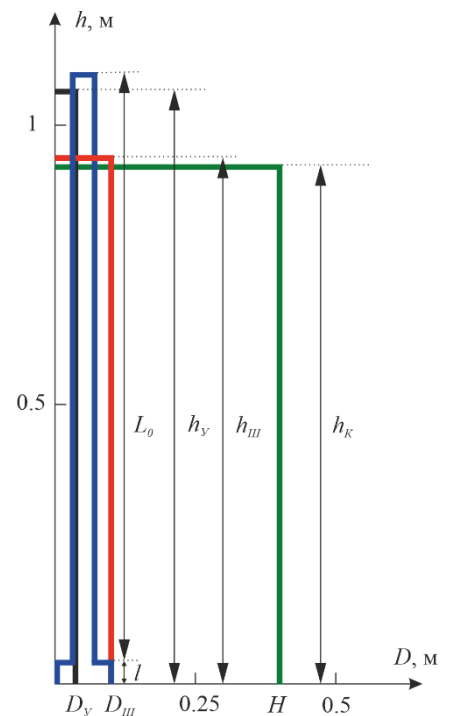


Рис. Геометрия резонаторов.

1. Lawrenson C.C., Lipkens B., Lucas T.S., Perkins D.K. and VanDoren T.W. Measurements of macrosound standing waves in oscillating closed cavities // J. Acoust. Soc. Am. 1998. Vol. 104. P. 623–636.
2. Cervenka M., Soltes M., and Bednarik M. Optimal shaping of acoustic resonators for the generation of high-amplitude standing waves // J. Acoust. Soc. Am. 2004. Vol. 136. P. 1003.
3. Yuen W.T., Fu S.C., Kwan J.K.C., Chao C.Y.H. // The use of nonlinear acoustics as an energy-efficient technique for aerosol removal // Aerosol Sci. Technol. 2014. Vol 48, No 9, P. 907–915.
4. Шайдуллин Л.Р., Губайдуллин Д.А., Фадеев С.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А. Вынужденные колебания газа и осаждение аэрозоля в замкнутых резонаторах разной геометрии // ТВТ. 2025. Т. 63, № 6. С. 736–742.
5. Fadeev S.A., Gubaidullin D.A., and Shaidullin L.R. Effect of the radial temperature gradient on resonant oscillations of gas in a closed tube / J. Acoust. Soc. Am. 2024. Vol. 156, No 6. P. 4123–4132.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ТРАНСКАТЕТЕРНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА

Кучумов А.Г.^{1,2}, Селиванов Г.Д.^{1,2}, Селезнев М.А.^{1,2}, Пиль Н.Е.^{1,2}, Хорошев Д.В.^{1,2},
Курузова А.М.²

¹ Научный центр генетики и наук о жизни Университета Сириус, Сириус

² Лаборатория биожидкостей ПНИПУ, Пермь

e-mail: kychymov@inbox.ru

Транскатетерная имплантация аортального клапана является эффективным методом лечения аортального стеноза, однако существующие протезы имеют ограниченный срок службы и не учитывают индивидуальную анатомию пациента. Разработка технологий параметрического проектирования, численного прогнозирования гемодинамики и аддитивного производства полимерных клапанов является актуальной задачей. Предложен алгоритм параметризованного построения геометрии стент-каркаса (варьируемые параметры: количество ячеек по вертикали K и горизонтали N, кривизна верхней части UB, диаметр WD и положение WP зоны сужения, длина прямой части SS) и створчатого аппарата. Для оценки гемодинамических характеристик использована связанная ALE FSI-постановка с моделированием крови как ньютоновской жидкости (плотность 1060 кг/м³, вязкость 0.0035–0.004 Па·с) и двухэлементной моделью Виндкесселя на выходе. Выполнено сопоставление гиперупругих моделей материала створок.

Показано, что выбор модели материала влияет на пиковые скорости (от 1.77 до 1.94 м/с), эффективную площадь открытия (EOA: 2.15 и 2.38 см² соответственно) и напряжения на створках. Для стент-каркаса корреляционный анализ выявил наибольшее влияние параметра K (0.59) и UB (0.42) на изгибную жесткость. Разработанный комплексный подход объединяет параметрическое проектирование, вычислительную гидродинамику и аддитивное производство, позволяя ускорить создание индивидуализированных ТИАК-протезов с прогнозируемыми механическими и гемодинамическими характеристиками.

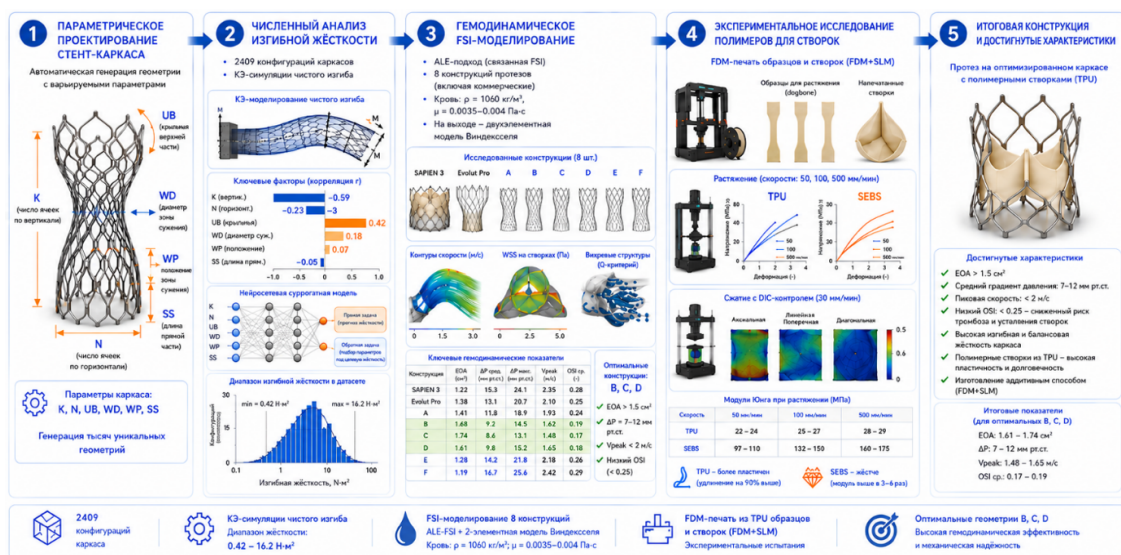


Рис. 1. Дизайн исследования.

Результаты получены при финансовой поддержке проекта, реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение № 27-03 от 07.07.2025).

1. Селезнев М.А., Селиванов Г.Д., Пиль Н.Е., Кучумов А.Г. Влияние конструкции протеза на гемодинамику при транскатетерной имплантации аортального клапана // Российский журнал биомеханики. 2026. Т. 30. № 1. С. 174–192.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ КРУПНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Любимова Т.П.¹, Лепихин А.П.², Паршакова Я.Н.¹

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

² Горный институт УрО РАН, Пермь

e-mail: lubimova@icmm.ru

Доклад посвящен моделированию гидродинамических режимов крупных водных объектов, характеризующихся вертикальной стратификацией водных масс. Анализ проводится на двух конкретных примерах. Первый пример касается расположенной в нижней части Камского водохранилища, в подпоре от Камской ГЭС, зоны слияния существенно различающихся по составу и плотности вод рек Сылва и Чусовая. Исследование гидродинамического режима этого участка Камского водохранилища очень важно, так как ниже зоны слияния рек Сылва и Чусовая располагается основной водозабор питьевой воды г. Перми (рис. 1). Высокая закарстованность водосборной территории р. Сылвы обуславливает не только повышенную жесткость ее воды, но и повышенную минерализацию и плотность по сравнению с водой р. Чусовой. Воды в зимний период. Натурные наблюдения и прямое численное моделирование в рамках трехмерного подхода выявили характерную особенность данного участка водохранилища – в зимний период, при малых расходах, водные массы характеризуются значительной вертикальной стратификацией: более плотные воды реки Сылвы, характеризующиеся повышенной жесткостью воды, располагаются вблизи дна, а менее плотные воды реки Чусовая вблизи поверхности. Это приводит к весьма специфическому гидрохимическому режиму. Более минерализованные, более плотные воды р. Сылва «подтекают» под менее плотные воды р. Чусовой, в свою очередь воды р. Чусовой «надтекают» на воды р. Сылвы. Соответственно ниже слияния рр. Сылвы и Чусовой, в том числе в районе размещения Чусовского водозабора г. Перми, наблюдается устойчивая двухслойная структура водных масс: в верхнем слое вода по своим свойствам близка к воде р. Чусовой, а в нижнем слое – к воде р. Сылва. Эту особенность было предложено использовать для снижения жесткости забираемой воды в зимний период.

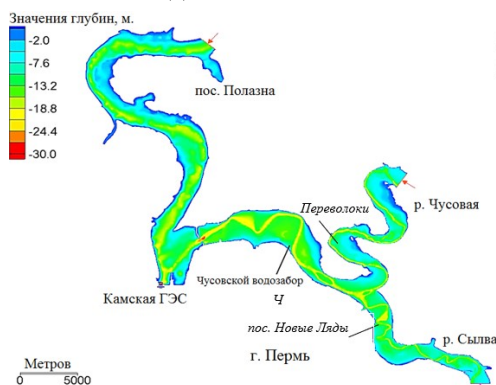


Рис. Зона слияния рек Сылва и Чусовая

Второй пример касается верхней части Камского водохранилища в зоне расположения крупнейшего в мире месторождения калийных и магниевых солей, характеризующейся пульсирующим характером формирования стратификации. Если в зоне слияния рек Сылва и Чусовая стратификация водных масс устойчива не менее 3-4 месяцев, то в верхней части Камского водохранилища, вблизи города Березники, как показали натурные наблюдения, стратификация водных масс может существенно меняться даже в течение суток. Данный объект является основным источником технического водоснабжения промышленных предприятий комплекса, поэтому для повышения его устойчивости принципиально

важно было установить причины и механизм формирования этих колебаний и разработать гидродинамические модели для их описания. Особенностью этого водоема является то, что в результате сочетания природных и техногенных факторов, в него происходит фильтрационная разгрузка высокоминерализованных рассолов. Если скорость течения достаточно велика, то происходит вертикальное перемешивание водных масс и распределение минерализации достаточно однородно по глубине. При уменьшении скорости течения происходит формирование вертикальной стратификации и минерализация воды в придонной области может на порядок превышать ее значения в поверхностном слое. Критерием, определяющим условия формирования устойчивой стратификации, является число Ричардсона или тесно связанное с ним плотностное число Фруда. Величина этого параметра зависит как от скоростного режима водного объекта, так и от распределения в нем плотности воды. При значениях плотностного числа Фруда, больших единицы, когда условий для формирования вертикальной стратификации водных масс нет, значимые колебания минерализации не наблюдаются. В то же время при плотностных числах Фруда, меньших единицы, стратификация формируется и оказывает принципиальное влияние на устойчивость водообеспечения.

ГЛОБАЛЬНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАСЧЁТЕ СИЛЬНО НЕУСТОЙЧИВЫХ СТРУЙ

Никитин Н.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: nvnikitin@mail.ru

В работе рассматриваются некоторые вопросы, связанные с численным моделированием пространственной эволюции сильно неустойчивых затопленных струй [1]. Подтверждено, что искусственные условия на выходной границе приводят к генерации ложных глобальных флуктуаций давления, которые могут инициировать возникновение глобальной неустойчивости. Представлены оценки и интерпретации, объясняющие механизм этого явления. Обнаружено, что глобальные флуктуации давления испускаются также из областей нелинейности. Этот эффект позволяет предсказывать положение границы нелинейности и области перехода к турбулентности в зависимости от амплитуды входных возмущений и ширины вычислительной области. Полученные в данной работе результаты могут быть распространены на другие сильно неустойчивые пространственно развивающиеся потоки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 25-19-00278.

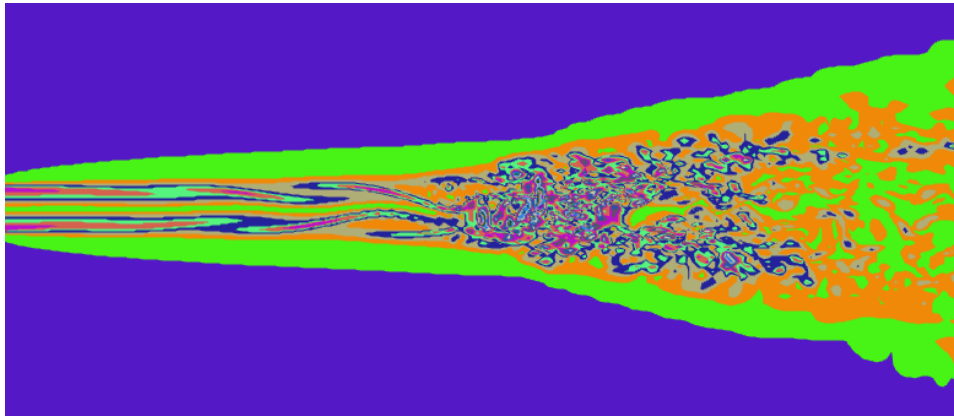


Рис. Визуализация численного расчёта перехода к турбулентности в затопленной струе.

1. Nikitin N., Popelenskaya N. Global pressure fluctuations in numerical simulation of spatially developing jets // Phys. Fluids. 2026. V. 38. № 5. 054115.

МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ТЯГИ В ГИДРОУПРУГИХ БИОМИМЕТИЧЕСКИХ ПРОПУЛЬСИВНЫХ СИСТЕМАХ

Нуриев А.Н.

Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального
Университета, Казань

e-mail: Artem.Nuriev@kpfu.ru

Гидробионты в ходе эволюции развили исключительно эффективные механизмы пропульсивного движения, однако перенос этих принципов в биомиметические роботизированные системы сдерживается неполным пониманием физики сложного гидроупругого процесса взаимодействия природного движителя с жидкостью. В настоящей работе проводится многоэтапный анализ механики пропульсивного биомиметического движения на базе современных аналитических и численных моделей.

На первом этапе, в рамках приближенного аналитического решения [1, 2] уравнений Навье–Стокса для колеблющегося жёсткого цилиндра, совершающего поступательно-вращательные колебания, устанавливается механизм формирования особого направленного течения, которое формируется в следе за колеблющимся телом и ответственно за формирование реактивной тяги (см. Рис.). На втором этапе, в рамках численного исследования влияния параметров колебания и формы тела на характеристики пропульсивного движения, устанавливаются факторы, позволяющие управлять этим течением и, как следствие, изменять направление пропульсивного движения колеблющегося тела. На третьем и четвертом этапах исследуется влияние упругости элементов тела на пропульсивные свойства. На основе вариационного принципа Даламбера–Лагранжа выводится система уравнений движения [3] биомиметического пловца с упругим хвостом в условиях упрощённого представления гидродинамического воздействия в виде следящей нагрузки и методом Ритца строится приближённое аналитическое решение. Его анализ дает возможность раскрыть физический механизм преобразования упругих колебаний хвоста в поступательное движение корпуса, позволяя качественно описать условия повышения генерации тяги. На четвертом этапе рассматривается интеграция всех составляющих механизма генерации тяги в численной гидроупругой модели пловца, приводится анализ ключевых характеристик движения такой системы.

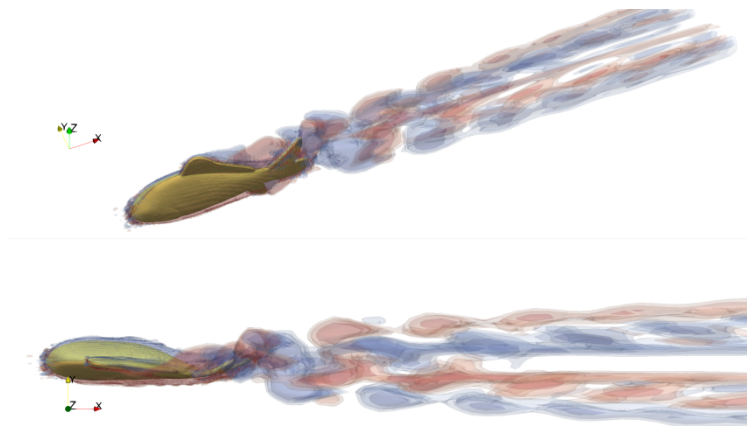


Рис. Течение за рыбоподобным пловцом.

1. Nuriev A.N., Egorov A.G. Asymptotic theory of a flapping wing of a circular cross-section // Journal of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 941. Art. A23.
2. Egorov A., Nuriev A., Anisimov V., Zaitseva O. Propulsive motion of an oscillating cylinder in a viscous fluid // Physics of Fluids. 2024. Vol. 36. No. 2. Art. 021908.
3. Paimushin V.N., Nuriev A.N. Dynamic model of an ornithopter with elastic high-aspect-ratio flapping wings // Russian Mathematics. 2026. Vol. 70. No. 2. P. 81–87.

«УМНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ» ДЛЯ СВЕРХИНТЕНСИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ПРИ КИПЕНИИ И ИСПАРЕНИИ

Павленко А.Н.

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

e-mail: pavl@itp.nsc.ru

Режимы высокоинтенсивного теплообмена при кипении и испарении находят сегодня все более широкое применение для целого ряда современных технологий, требующих отвода высоких и сверхвысоких плотностей теплового потока при относительно низких перегревах [1]. В лекционном докладе проводится всесторонний анализ текущего состояния развития методов интенсификации теплообмена и управления экстремальными процессами теплообмена при кипении и испарении в различных гидродинамических условиях. Обсуждаются пути, тенденции и критические аспекты эффективного использования режимов кипения и испарения для различных перспективных приложений в энергетике, микро- и силовой электронике, химической промышленности, криогенной технике (например, при ожижении природного газа, в дистилляционных и абсорбционных технологиях), в ракетной и авиационной технике, в металлургии. Новейшие и перспективные достижения в материаловедении, позволяющие создавать все более совершенные, “умные” покрытия, модифицированные тепловыделяющие/теплопередающие поверхности с иерархической структурой (например, см. на Рис.), служат и будут служить реальной основой для создания высокоэффективных систем охлаждения, теплообменников различного назначения в целом ряде важнейших современных практических приложений. В докладе на примере результатов новейших исследований [2–10] будет показано, что развитие комбинированных пассивно/активных методов интенсификации теплообмена при кипении и испарении на основе целенаправленного управления потоками жидкости и паро/газовой среды на микро- и макромасштабах является магистральным направлением в теплофизических исследованиях применительно к разработке вышеуказанных современных критических технологий.

Будут детально рассмотрены перспективные и проблемные вопросы, касающиеся разработки передовых методов охлаждения современной электроники с высокими и сверхвысокими тепловыми потоками (паровые камеры и микрокамеры, тепловые трубы, термосифоны). В этой связи акцентируется внимание к новым запросам теплофизиков на развитие технологий в материаловедении для создания заданных структур на теплопередающей поверхности с целью эффективного управления двухфазными потоками и процессами межфазного теплопереноса на микро- и наномасштабах. Рассматриваются особенности разработки методов увеличения критического теплового потока при одновременном увеличении коэффициента теплопередачи при развитом пузырьковом кипении, что критически важно для решения многих практических задач.

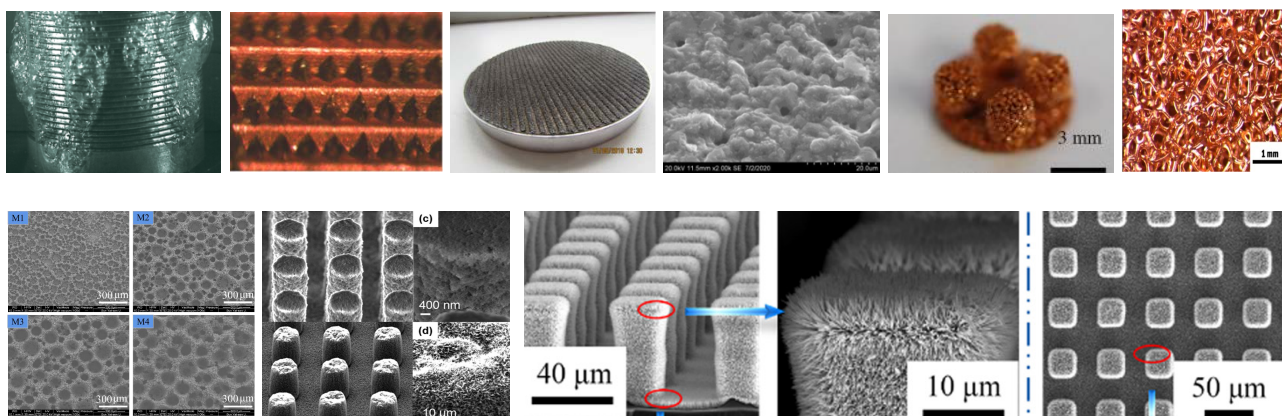


Рис. Микроструктурированные поверхности: горизонтальная микротекстура; микродеформируемое резание; капиллярно-пористые поверхности, созданные методом 3D-печати; микродуговое оксидирование; поверхности, полученные путем спекания частиц; супергидрофильные пористые металлические пены; электрохимическое травление; микро-наноструктурированные поверхности с иерархической структурой, полученные методами DRIE и гидротермального выращивания нанопроволок/электрофоретического осаждения наночастиц.

В докладе также будут обсуждены последние достижения в экспериментальных исследованиях механизмов кипения, кризисных явлений при кипении и испарении [11–15], ставшие возможными

благодаря появлению уникальных высокоточных установок с прецизионными измерениями, неинвазивной оптической диагностики с высокими пространственным и временным разрешениями, проведен анализ перспектив использования методов искусственного интеллекта (ИИ) при проектировании высокоэффективных инженерных поверхностей для интенсификации теплообмена при кипении и испарении в контексте разработки современного тепломассообменного оборудования и систем охлаждения с экстремальными тепловыми нагрузками.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-49-00133) в рамках российско-китайского исследовательского проекта, реализуемого в сотрудничестве с Национальным фондом естественных наук Китая (NSFC).

1. Volodin O.A., Shvetsov D.A., Serdyukov V.S., Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Enhanced boiling and evaporation of dielectric fluids on modified surfaces for immersion cooling of electronic components—a review // *Appl. Therm. Engin.* 2025. Vol. 277. Art. 127088.

2. Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Shvetsov D.A. The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in a thin horizontal liquid layer on a microstructured surface produced by 3D laser printing // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2020. Vol. 163. Art. 120488-1–120488-14.

3. Pecherkin N.I., Volodin O.A., Pavlenko A.N., Kataev A.I., Mironova I.B. Heat transfer enhancement experiments in R21 falling film over a bundle of MAO-coated horizontal tubes // *Intern. Comm. Heat Mass Transfer.* 2021. Vol. 129. Art. 105743

4. Starodubtseva I.P., Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N. Experiments and modeling on cryogenic quenching enhancement by the structured capillary-porous coatings of surface // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2021. Vol. 176. Art. 121388.

5. Швецов Д.А., Павленко А.Н., Брестер А.Е., Жуков В.И. Инверсия кривой кипения на микроструктурированных пористых покрытиях // *TBT.* 2023. Т. 61. № 2. С. 1–5.

6. Moharana S., Das M.K., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Experimental assessment of enhanced 2x3 semi-closed microstructure tube bundle as an alternative in shell and tube heat exchangers // *Appl. Therm. Engin.* 2023. Vol. 232. Art. 120966.

7. Zhukov V.I., Shvetsov D.A., Pavlenko A.N. Effect of shape and thermal conductivity of microstructured capillary-porous coatings on heat transfer during evaporation and boiling in thin horizontal liquid layers // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2024. Vol. 232. Art. 125937.

8. Das M.K., Moharana S., Laskar N., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer enhancement of different ribbing pitched semi-closed microstructure tube bundles fabricated by deformational cutting method // *Intern. J. Thermofluids.* 2024. Vol. 22. Art. 100695.

9. Pecherkin N.I., Volodin O.A., Das M.K., Pavlenko A.N., Kataev A.I., Mironova I.B. Heat transfer enhancement in falling liquid films on an array of horizontal tubes with plasma spray porous coating // *Appl. Therm. Engin.* 2025. Vol. 263. Art. 125288.

10. Shvetsov D.A., Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Heat transfer enhancement during boiling in horizontal layers of HFE-7100 on 2D modulated capillary-porous coatings // *Appl. Therm. Engin.* 2025. Vol. 263. Art. 125344.

11. Serdyukov V.S., Starinskiy S.V., Malakhov I.P., Safonov A.I., Surtaev A.S. Laser texturing of silicon surface to enhance nucleate pool boiling heat transfer // *Appl. Therm. Engin.* 2021. Vol. 194. Art. 117102.

12. Serdyukov V.S., Patrin G., Malakhov I.P., Surtaev A.S. Biphilic surface to improve and stabilize pool boiling in a vacuum // *Appl. Therm. Engin.* 2022. Vol. 209. Art. 118298.

13. Ateş A., Benam B.P., Mohammadlooey M., Çelik S., Serdyukov V.S., Surtaev A.S., Sadaghiani A.K., Koşar A. Pool boiling heat transfer on superhydrophobic, superhydrophilic and superbiphilic surfaces at atmospheric and sub-atmospheric pressures // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2023. Vol. 201. Art. 123582.

14. Malakhov I.P., Seredkin A.V., Chernyavskiy A.N., Serdyukov V.S., Mullyadzanov R.I., Surtaev A.S. Deep learning segmentation to analyze bubble dynamics and heat transfer during boiling at various pressures // *Intern. J. Multiphase Flow.* 2023. Vol. 162. Art. 104402.

15. Швецов Д.А., Павленко А.Н., Назаров А.Д., Михайлов А.В., Жуков В.И. Теплообмен при кипении в тонком слое диэлектрической жидкости HFE–7100 на капиллярно-пористых покрытиях // *TBT.* 2024. Т. 62. № 6. С. 865-876.

РЕГУЛЯРНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ТРЕЩИН В ТЕОРИИ УПРУГОСТИ С УЧЕТОМ НЕЛОКАЛЬНЫХ И ГРАДИЕНТНЫХ ЭФФЕКТОВ

Соляев Ю.О.^{1,2}

¹ Институт прикладной механики Российской академии наук, Москва

² Московский авиационный институт, Москва

e-mail: yos@iam.ras.ru

В классической теории упругости существует широкий класс задач, решения которых содержат сингулярные поля напряжений, деформаций и перемещений. Возникновение бесконечностей в большинстве таких решений следует считать результатом, не соответствующем физике рассматриваемых явлений, но следствием выбранной постановки задачи. В инженерной практике большинство таких задач удается регуляризовать, выбирая подходящую формулировку задачи, например, вводя скругления в зонах острых вырезов и т.п. Однако, для задач с трещинами, а также, например, для задач с дислокациями, классические подходы основаны на непосредственной работе с сингулярными решениями теории упругости. По сути, единственным подходом в механике разрушения, который позволяет устранить сингулярность в вершине трещины и учесть сглаженную («равновесную») форму раскрытия, является введение предположения о наличии когезионных сил сцепления на берегах трещины в рамках моделей Леонова-Панасюка-Дагдейла и Баренблатта [1].

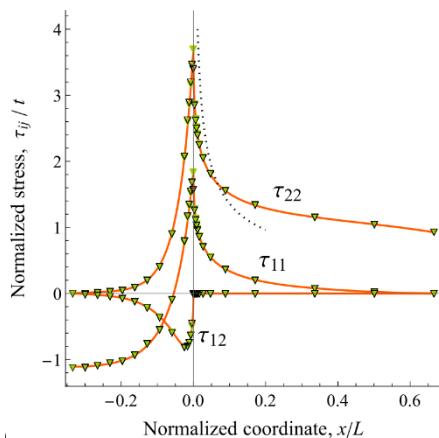


Рис. Распределение нормированных напряжений вблизи вершины трещины ($x < 0$ – поверхность трещины) в решении градиентной теории упругости [5]. Черный пунктир – классическое решение.

В последние десятилетия было показано, что альтернативным подходом к получению регулярных решений в сингулярных задачах теории упругости является использование неклассических нелокальных и градиентных теорий, которые предполагают, что напряжения в данной точке среды зависят от деформаций не только в этой точке, но и в некоторой ее окрестности [2-4].

В докладе обсуждаются различия, которые возникают в решениях для задач о трещинах в упругих телах при использовании различных неклассических теорий. Обсуждается возможность естественного учета эффекта когезионных напряжений (рис. 1), возникающих на берегах трещины, как следствия более сложной формулировки граничных условий в градиентной теории упругости. В то же время, обсуждается и возможность отсутствия таких когезионных эффектов в вариантах градиентных теорий со специальными определяющими соотношениями, а также в нелокальных теориях, которые предполагают выполнение стандартных граничных условий по напряжениям на берегах трещины. Обсуждаются преимущества, которые обеспечивает применение неклассических теорий по

сравнению с классическими подходами, а также методы идентификации возникающих дополнительных материальных констант.

1. Sinclair G.B. Stress singularities in classical elasticity//Appl. Mech. Rev. 2004. Vol. 57. P. 251-298.
2. В.В. Васильев, С.А. Лурье. Новый метод исследования прочности хрупких тел с трещинами // Деформация и разрушение материалов, 2019, Т. 9. С. 12-19.
3. M.Y. Gutkin, E.C. Aifantis. Dislocations in the theory of gradient elasticity // Scripta Materialia. 1999. Vol. 40. № 5. P. 559-566.
4. P.A. Gourgiotis, H.G. Georgiadis. Plane-strain crack problems in microstructured solids governed by dipolar gradient elasticity // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 57. № 11. P. 1898-1920.
5. Solyaev Y., Dobryanskiy V. Enriched C1 Finite Elements for Crack Problems in Simplified Strain Gradient Elasticity//International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2025. T. 126. С. E70081.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАКРОПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА К КИНЕТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ И МОДЕЛЯМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Абакарова М.А., Кравченко Д.С., Кустова Е.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

e-mail: masha.abakarova@gmail.com

Исследование чувствительности математических моделей неравновесных течений к параметрам физико-химических процессов критически важно для понимания роли отдельных процессов в эволюции макропараметров потока. Прямой анализ методом Монте-Карло требует слишком большого количества численных экспериментов, поэтому поиск более эффективных алгоритмов является актуальной задачей.

В данной работе для проведения глобального анализа чувствительности рассматривается поуровневая модель релаксации плазмы воздуха в послеразрядной зоне, разработанная в работе [1]. В ходе анализа была построена суррогатная модель на основе метода полиномиального хаоса [2] и вычислены индексы Соболя – показатели влияния каждого входного параметра на результат [3].

Исследуемая модель включает 20 физико-химических процессов: обмены колебательной энергией, диссоциация, рекомбинация, реакции Зельдовича, процессы с участием возбужденных состояний молекул, электронно-ионные реакции и гетерогенные процессы на стенке. Для выявления процессов, которые наибольшим образом влияют на макропараметры, использован аппарат бинарного анализа. Непрерывный анализ проведен для варьирования предэкспоненциальных факторов в законе Аррениуса для доминирующих реакций.

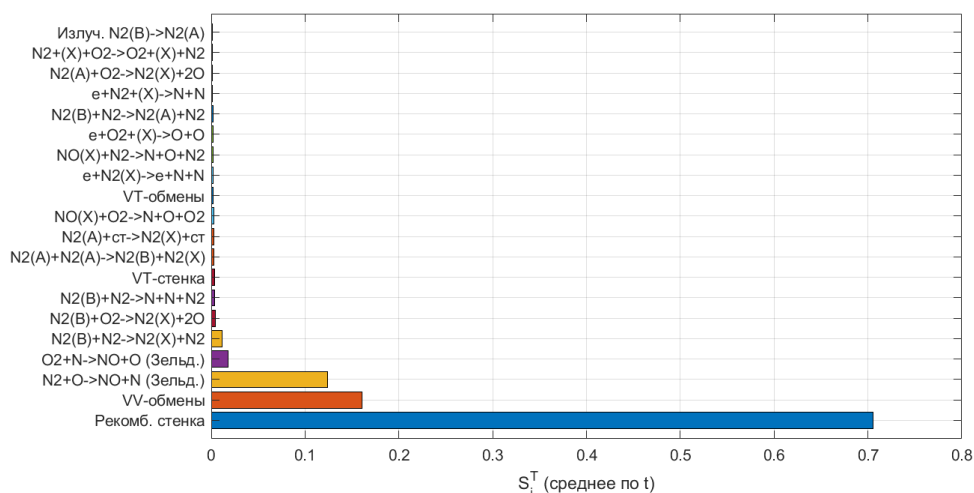


Рис. Полные индексы Соболя при анализе чувствительности поступательной температуры.

Анализ показал, что эволюция температуры определяется в основном четырьмя механизмами: рекомбинация на стенке, VV-обмены и реакции Зельдовича (см. Рис.). Непрерывный анализ подтвердил высокую чувствительность к предэкспоненциальным факторам в законе Аррениуса для реакций Зельдовича. Выделение ключевых реакций дает возможность упростить модель, исключив процессы с малым вкладом, что существенно сокращает вычислительные затраты. Предложенная методология может быть применена к другим задачам неравновесной кинетики.

Исследование поддержано СПбГУ в рамках проекта 116636233.

1. Мельник М.Ю., Шайхутдинова А.А., Кустова Е.В. Валидация моделей поуровневой колебательно-химической кинетики на примере задачи о релаксации воздуха в послеразрядной зоне // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2025. Т. 26. № 2. С. 69–84.

2. Aiken T.T. Detailed Modeling and Sensitivity Analysis of Nonequilibrium Thermochemistry in Shock-Heated Gases : Diss. / T.T. Aiken. – University of Colorado, 2023. – 239 p.

3. Панин И.И. Методы оценки точности показателей чувствительности Соболя на основе метамоделей. Дисс. Канд. Комп. Наук. — М.: ИППИ РАН, 2023.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В НЕФТЯНЫХ ПЛАСТАХ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МНОГООСТВОЛЬНЫМИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ

Абдуллин А.И.

Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань

e-mail: abdullin@imm.knc.ru

Разработка месторождений углеводородного сырья многоствольными горизонтальными скважинами (МГС) обеспечивает максимальную площадь контакта с продуктивным пластом, увеличивая область дренирования и снижая депрессию, что особенно важно для низкопроницаемых коллекторов и месторождений высоковязкой нефти. Моделирование неизо термической фильтрации к горизонтальной скважине в случае однородного пласта было рассмотрено в работе [1]. Сложность геометрии МГС и анизотропные свойства пласта делают принципиальным при моделировании учет трехмерной анизотропии, гидравлических потерь в стволах и интерференции потоков.

Для решения задачи неизо термической фильтрации к МГС предлагается использовать аппарат численного моделирования тепломассопереноса в анизотропной пористой среде с совместным решением уравнений потока в пласте и в стволах. В работе строится математическая модель тепломассопереноса в системе «пласт – многоствольная горизонтальная скважина», в которой учитывается эффект Джоуля-Томсона, адиабатического охлаждения, анизотропия проницаемости, влияние объема ствола скважины и различные конфигурации стволов. Модель основана на сопряжении трехмерной неизо термической фильтрации в нефтяном пласте и одномерного неизо термического течения флюида в основном и боковых стволах МГС. На основе подхода [2] и данной модели разработан численный метод решения обратной задачи, который позволяет одновременно оценивать фильтрационные и теплофизические параметры пласта по промысловым данным. Применение разработанной модели для интерпретации термогидродинамических исследований [3] скважин позволяет строить профиль притока вдоль горизонтального ствола и проводить оценку дебитов боковых стволов. Развитие направления связано с интеграцией в цифровые системы управления месторождениями.

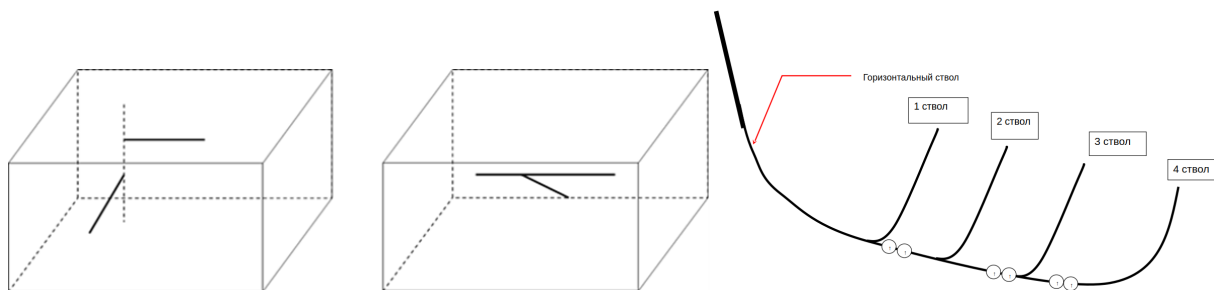


Рис. Схема МГС и места расположения приборов.

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

1. Khairullin M. H., Badertdinova E. R., Abdullin A. I. and Shamsiev M. N. Numerical solution of direct and inverse problems of heat transfer in oil reservoirs exploiting with horizontal well // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1158 (2019) 032009. IOP Publishing.

2. Abdullin A. I., Shamsiev M. N., Khairullin M. Kh. Numerical Well Test Analysis of Fractured Porous Reservoirs with Consideration of Stress-Sensitivity Effect // Lobachevskii Journal of Mathematics, 2021. 42, №9. Pp. 2077–2081.

3. Абдуллин А. И., Бадертдинова Е. Р., Хайруллин М. Х., Шамсиев М. Н., Назимов Н. А., Насыбуллин А. В. Технологии термогидродинамических исследований горизонтальных скважин для определения фильтрационных свойств пласта // Нефтегазовое дело, 2025. Т. 23. № 5. С. 63–73.

ДИНАМИКА ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В СФЕРИЧЕСКОМ КЛАСТЕРЕ В ПУЧНОСТИ ДАВЛЕНИЯ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Аганин А.А., Аганин И.А., Давлетшин А.И.
Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань
e-mail: aganin_aa@imm.ksc.ru

Динамика парогазовых пузырьков в жидкости представляет значительный интерес в связи с многочисленными проблемами и полезными применениями кавитации. В частности, воздействие кавитационных пузырьков может вызывать механическое повреждение, эрозию, износ и разрушение гидронасосов, клапанов и мембран, регулирующих потоки жидкости, гидротурбин, гребных винтов. Кавитационные пузырьки могут вызывать шум, вибрацию гидротехнического оборудования и т.д. Вместе с тем, кавитационные пузырьки могут способствовать очистке твердых поверхностей от загрязнений при производстве полупроводников, дроблению камней в почках фокусированными ударно-волновыми импульсами или высокоинтенсивным ультразвуком в медицине. Кавитация может быть полезной в сонохимии, где кавитационные пузырьки играют роль микрореакторов, для интенсификации химреакций как за счет высоких температур в пузырьках и их окрестности, так и посредством очистки поверхностей твердых реагентов или катализаторов и удаления с них окислов. Кавитацию используют при обеззараживании загрязненной воды и т.д.

Важной характеристикой динамики пузырьков является степень их сильного сжатия, поскольку сильное сжатие может приводить к высоким давлениям и температурам в пузырьках и их окрестности. Сильное сжатие пузырьков может вызывать появление в жидкости радиально расходящихся от пузырьков ударно-волновых импульсов, обладающих большим разрушительным потенциалом [1]. Известно, что наиболее высоких степеней сжатия пузырьков можно добиться в кластерах сферической формы [2].

В настоящей работе приводятся результаты исследований динамики воздушных пузырьков в сферическом кластере в воде в пучности давления стоячей волны. Кластер состоит из изначально одинаковых по размеру сферических пузырьков, центры которых расположены в узлах кубической сетки (один из узлов находится в центре кластера). Физические условия близки к тем, что соответствуют условиям реализации известного явления однопузырьковой сонолюминесценции (давление жидкости 1 бар, температура 20°C, начальный радиус пузырьков 5 мкм), при котором достигаются очень высокие степени сжатия пузырька. Частота возбуждения принята равной 20 кГц. Рассмотрены волны с амплитудой 1.025 и 1.125 бар. Число пузырьков в кластере варьируется от 57 до 179. Исследования выполняются до тех пор, пока один из пузырьков кластера не начнет разрушаться или сливаться с другим пузырьком. Исследования выполнены с применением математической модели [3], относящейся к классу дискретных моделей (particle-моделей). Данная модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно радиусов пузырьков, радиус-векторов положений их центров и амплитуд их малых деформаций пузырьков в виде сферических гармоник. По расстоянию между пузырьками данная модель имеет четвертый порядок точности. Ее достоверность подтверждается сравнением с рядом известных численных результатов и экспериментальными данными других авторов.

Показано, что взаимодействие между пузырьками кластера оказывает заметное влияние на их радиальные колебания и давление внутри них. Центральный пузырек кластера коллапсирует сильнее других. В окрестности первого коллапса несферичность пузырьков имеет выраженный максимум. Перемещения пузырьков в ходе одного периода возбуждения относительно малы. По мере уменьшения радиуса кластера и увеличения числа его пузырьков амплитуда радиальных колебаний пузырьков кластера, величина достигаемых в них максимальных давлений, величина максимальной амплитуды их несферических деформаций и их радиальные смещения в кластере возрастают, а величина минимального расстояния между пузырьками убывает.

Исследования выполнены за счет гранта РНФ № 25-21-00567, <https://rscf.ru/project/25-21-00567/>.

1. Aganin A.A., Mustafin I.N. Outgoing shock waves at collapse of a cavitation bubble in water // International Journal of Multiphase Flow. 2021. Vol. 144. Art. 103792.
2. Aganin A.A., Davletshin A.I. A particle model of interaction between slightly non-spherical bubbles // Appl. Math. Model. 2024. Vol. 126. P. 185–205.
3. Aganin I.A., Davletshin A.I. Effect of bubble-bubble interaction in spherical clusters under ultrasonic forcing // Lobachevskii J. Math. 2026. Vol. 47. No. 6 (in press).

АЭРОГИДРОМЕХАНИКА ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО ВОДЕ КОЛЕСА

Амелюшкин И.А.¹, Кривопалова Е.В.¹, Петров Д.А.²

¹ Центральный аэрогидродинамический институт им. Проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский (Мос. Обл.)

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва

e-mail: Daniel.Petrov.CFD@yandex.ru

Экспериментальное исследование, моделирование и управление аэрогидродинамическими процессами, сопровождающими движение по воде колеса с грунтозацепами представляет большой интерес в задаче создания быстроходного амфибийного транспорта. При движении колеса по воде подъемная сила создается за счет скоростного напора жидкости и эффекта ударов грунтозацепов о воду, вклад своеобразного эффекта Магнуса на межфазной границе жидкость-газ, направленного под воду, значительно уступает первым двум эффектам, а гидростатические силы становятся значительными лишь при существенном погружении – когда движущееся по воде цилиндрическое тело погружается на существенную глубину, то есть при малых скоростях. Аэрогидромеханические силы в значительной степени определяются формой и размером взаимодействующих с многофазной средой грунтозацепов, скоростью напора, глубиной погружения и рядом других параметров, прежде всего, безразмерных. В зависимости от них реализуются различные режимы аэрогидродинамических процессов: от гребного до возникновения изогнутого воздушного экрана и вспененной жидкостью между вращающимся твердым телом и жидкостью, по которой оно перемещается. В настоящей работе проведены расчеты аэрогидромеханических сил, действующих на движущиеся по воде колеса с грунтозацепами (рис.). Результаты моделирования вертикальной аэрогидромеханической силы качественно согласуются с экспериментальными данными [1], количественно согласуются рассчитанные значения минимальной угловой скорости вращения колеса, необходимой для его движения по воде с заданной скоростью. Показано влияние угла наклона грунтозацепов на подъемную силу, действующую на колесо при его движении по воде. Получены оценки минимальной скорости, при которой возможен бег по воде в зависимости от размеров в рамках приняты предположений [1] и экспериментальных результатов. Создана модель беспилотного водокатного транспортного средства (см. рис.) для движения по воде, снегу, льду, земле и в перспективе совершать подлеты, аппарат остается на плаву при остановке, стабилизатор необходим для устойчивого движения и управления по курсу. Установленные в передней части водные лыжи снижают затраты энергии при выходе на режимы глиссирования и аквапланирования.

Часть исследования выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-19-00430).

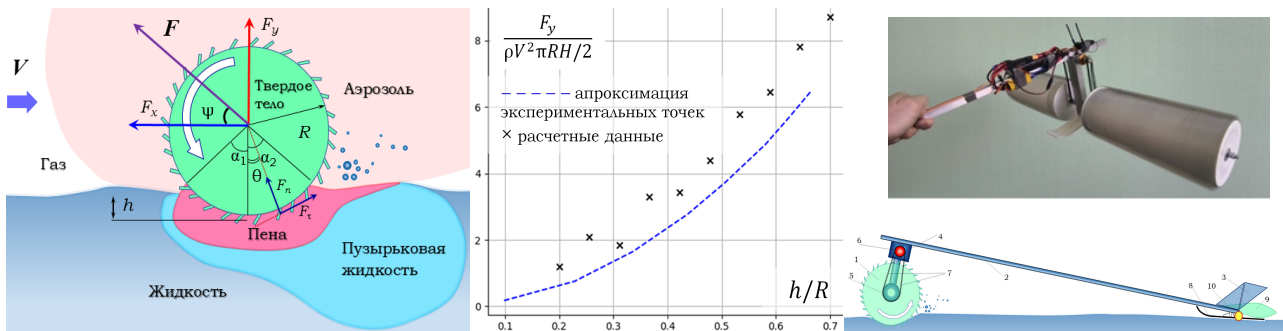


Рис. Слева – схема течения, в центре – результаты сравнения полученных в работе данных расчета с аппроксимацией полученных в работе экспериментальных точек, справа – фото модели и схема амфибийного аппарата, перемещающегося по воде в режиме ударов грунтозацепов вращающихся цилиндров о воду; 1 – два соосных цилиндра с грунтозацепами, 2 – хвостовая балка, 3 – руль направления, 4 – два мотора и управления, 5 – шкивы вала, 6 – шкивы моторов, 7 – ремень, 8 – лыжа, 9 – поплавок, 10 – колесное шасси.

1. Амелюшкин И.А., Кривопалова Е.В. Экспериментальные исследования процессов движения по воде на колесах // Материалы VI Отраслевой конференции ЦАГИ по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов. Жуковский, 2025. С. 197–205.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИКИ МАШУЩЕГО КРЫЛА

Амелюшкин И.А., Кривопалова Е.В., Сулягина Е.Д.

Центральный аэрогидродинамический институт им. Проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский (Мос. Обл.)

e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru

Разработка летательных аппаратов с машущим крылом представляет большой интерес. Преимущества таких аппаратов связаны со значительным снижением шума, высокой маневренностью и схожестью внешнего вида с объектами живой природы. Кроме того, маховые действия крыла приводят к изменению знака горизонтальной проекции аэродинамических сил при обтекании крыла, которая для самолета составляет около половины всего сопротивления обтеканию.

С целью управления процессами и предварительного проектирования летательных аппаратов с машущим крылом разработана модель аэродинамической тяги совершающего колебательные движения крыла, проведены параметрические исследования, показано влияние собственных частот колебаний нервюр на аэромеханическую тягу крыла при колебаниях лонжерона.

Выражение для силы тяги машущего крыла (без сгибания лонжерона), состоящего из стержней длины L_a на расстоянии z от оси, вокруг которых крыло совершает маховые действия (см. Рис., слева) с частотой $\theta/2\pi$ и углом отклонения лонжерона от горизонтали θ имеет следующий вид:

$$F = C \int_{z=0}^{z=L} \rho \left(\frac{z}{\cos\theta} \dot{\theta} \right)^2 L_a(z) \sin^2\psi(z) dz .$$

Здесь ρ – плотность среды, ψ – угол отклонения составляющих крыло стержней относительно плоскости, которая параллельна лонжерону и перпендикулярна скорости его перемещения относительно центра масс, C – коэффициент тяги машущего крыла. В расчетах предполагалось, что силы инерции и упругости значительно превосходят аэродинамические $\frac{\rho_s V^2 S}{2} < ELh \frac{\Delta\sqrt{s}}{\sqrt{s}}$. На Рис. В центре показано влияние частоты собственных колебаний нервюр на величину силы тяги и амплитуду углов ψ . Создана экспериментальная установка, позволяющая определять коэффициенты тяги машущих крыльев при различных частотах, настраивать собственные частоты колебаний и подбирать форму в соответствии с задачами максимизации тяги.

Изгиб лонжерона в «локте» необходим для увеличения подъемной силы, вызванного приближением движения лонжерона плоскопараллельному для увеличения подъемной силы, кроме того, сгибание снижает моменты сил, возникающие на крыле большого удлинения, понижая нагрузки на силовые элементы и их вес. Создана модель гибридного орнитоопера (см. Рис., справа), которая проходит испытания. Разработаны конструкции адаптивных крыльев [1] для улучшения взлетно-посадочных характеристик летательных аппаратов.

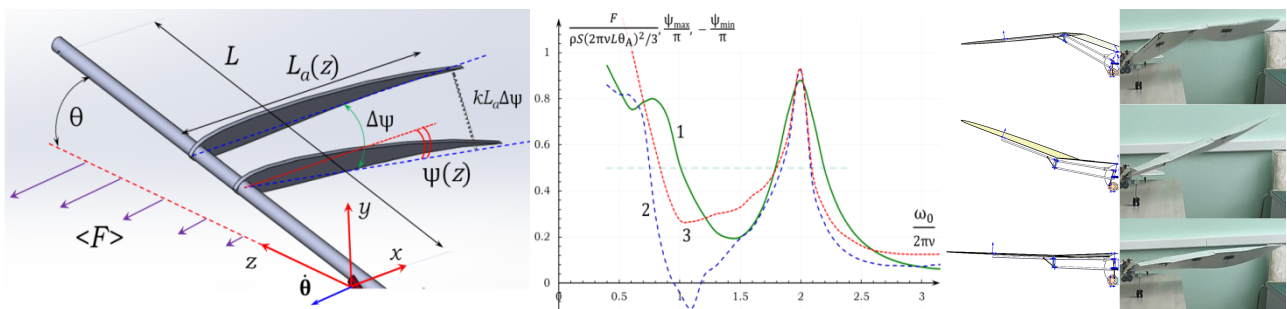


Рис. Слева – схема расчета динамики нервюр и тяги машущего крыла; в центре – влияние собственной частоты колебаний нервюр на средние значения силы тяги и амплитуды колебаний углов атаки машущего крыла: 1 – на среднюю безразмерную силу тяги, 2 – на максимальный средний угол отклонения нервюр вверх, 3 – на максимальное отклонение среднего угла отклонения нервюр вниз, горизонтальная пунктирная линия – угол 90° , превышение которого нежелательно; справа – кадры анимации и видеосъемки маховых действий орнитоопера, имитирующего лебедя.

1. Амелюшкин И.А., Дружинин О.В. Исследования и разработка адаптивных крыльев // Аэрокосмическая техника и технологии. 2025. Т. 3, № 4. С. 552–562. <https://doi.org/10.52467/2949401X-2025-3-4-552-562>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫТЕСНЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПЛАСТАХ С НЕОДНОРОДНЫМ СТРОЕНИЕМ

Андреева А.И., Афанасьев А.А.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: aandreeva@imec.msu.ru

Одной из задач рационального недропользования является исследование процессов вытеснения жидкости в геологических пористых средах. Такие задачи могут осложняться особенностями строения пластов. Например, низкопроницаемые включения могут служить барьером для течения жидкости, а высокопроницаемые пропластки – коллекторы – могут оказаться тупиковыми каналами, разрывающими соединение между скважинами. В настоящей работе исследуется влияние неоднородностей строения пластов на эффективность вытеснения жидкости. Неоднородность характеризуется тремя параметрами N_G , N_R и Υ , где N_G – песчанность пласта, N_R – количество пропластков, а Υ характеризует длину пропластка коллектора по сравнению с расстоянием между нагнетательной и добывающей скважинами. Показано, что более высокая эффективность вытеснения наблюдается при хорошей гидродинамической связности пласта, которая достигается, например, при малых значениях Υ , в этом случае пласт представляет собой слоистую структуру с чередующимися высокопроницаемыми и низкопроницаемыми пропластками (см. Рис. А). В работе [1] предложен метод оценки коэффициента эффективности вытеснения для подобных слоистых пластов. Похожая слоистая структура также наблюдается при больших числах N_R (см. Рис. Г). При малых значениях N_G вытеснение жидкости может не происходить вовсе (см. Рис. Д), а $N_G = 1$ соответствует однородному пласту, при котором нет барьеров для течения жидкости. Таким образом, максимальная эффективность вытеснения жидкости может достигаться в пластах с высокой гидродинамической связанностью, большим числом пропластков или в однородном случае.

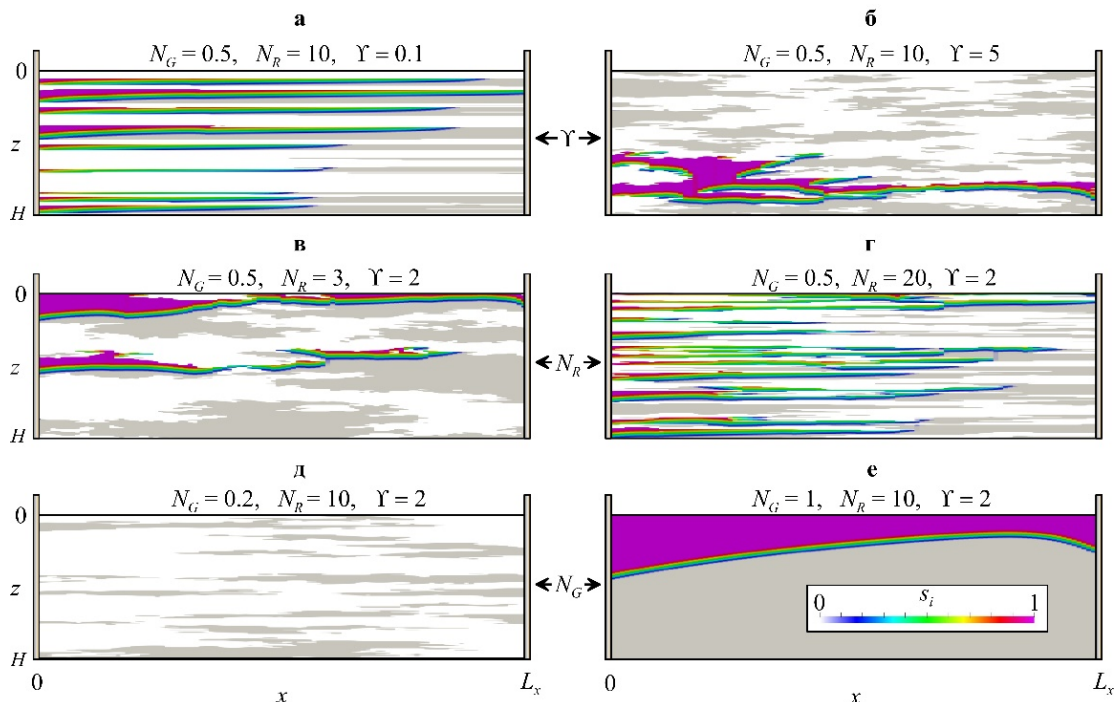


Рис. Модели неоднородных пластов при различных значениях N_G , N_R и Υ . Белые области соответствуют низкопроницаемым включениям.

1. Афанасьев А.А., Андреева А.И. Вытеснение тяжелой жидкости из слоисто-неоднородного пласта // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2025. Т. 4. С. 66–81.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ВИБРОРОБОТА В OPENFOAM В РАМКАХ FSI-ПОДХОДА С АНАЛИТИЧЕСКИМ ЭТАЛОНОМ

Анисимов В.Д., Поздеева А.И.

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Институт математики и механики имени Н.И. Лобачевского, Казань
e-mail: anvad96@bk.ru

В данном исследовании предлагается новый тестовый случай для верификации алгоритмов взаимодействия жидкости и деформируемого/движущегося тела (FSI). Задача моделирует биомиметическую пропульсивную систему: цилиндрический виброробот [1], колебания которого возбуждаются движением внутренней массы (ВМ). Направленное движение системы возникает за счет двустороннего взаимодействия с вязкой жидкостью, что аналогично принципу создания тяги машущим крылом [2].

Аналитическое решение [3], полученное методом асимптотических разложений, описывает установившийся режим самодвижения, определяя амплитуды колебаний корпуса, фазовые сдвиги и крейсерскую скорость, что дает эталон для прямого сравнения с численными результатами. Сочетание биомиметической физики, простой геометрии и полного аналитического решения делает задачу уникальным эталоном для валидации FSI-алгоритмов. Для верификации этих формул выполнено прямое численное моделирование в OpenFOAM с реализацией двухстороннего взаимодействия тела и жидкости (FSI) при характерных числах Рейнольдса $Re = 50-700$.

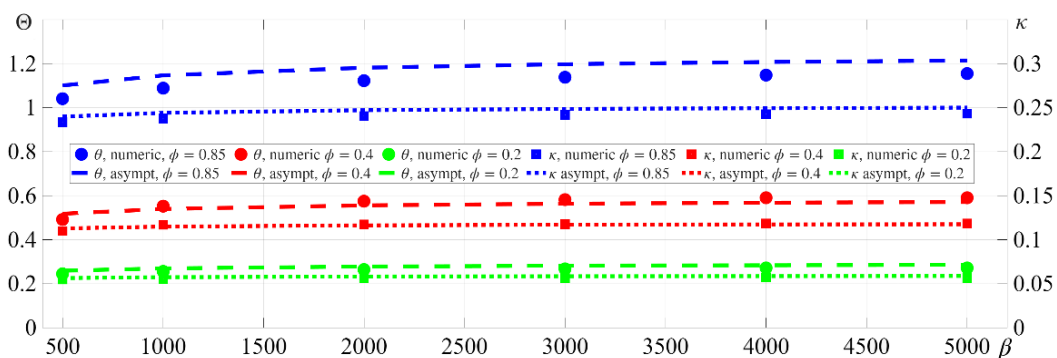


Рис. Зависимость амплитуд вращательных Θ и поступательных κ колебаний от безразмерной частоты колебаний β для различных амплитуд колебаний ВМ ϕ .

Сравнение численных и аналитических результатов (см. Рис.) показывают, что средние относительные погрешности составляют 2.15% для поступательной амплитуды κ и 4.71% для вращательной амплитуды Θ . Крейсерская скорость предсказывается со средней погрешностью 8.38% для всех тестовых случаев. Возрастание погрешности по скорости при больших амплитудах ВМ ($\phi = 0.85$) и высоких частотах ($\beta > 3000$) указывает на границы применимости линейной асимптотической теории и выделяет области, где необходимо высокоточное CFD-моделирование. Оба FSI-подхода дают согласованные результаты, подтверждая надежность численного подхода. А сама задача может рассматриваться как тестовый случай для верификации FSI-реализаций, разработки численных методов и в образовательных целях.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 22-79-10033П.

1. Egorov A., Nuriev A., Anisimov V. Optimization of the movement of a cylindrical vibration-driven robot in a viscous fluid // Lobachevskii J. Math. 2023. Vol. 44. P. 4438–4447.
2. Egorov A., Nuriev A., Anisimov V., Zaitseva O. Propulsive motion of an oscillating cylinder in a viscous fluid // Phys. Fluids. 2024. Vol. 36. № 2. Art. 021908.
3. Anisimov V.D., Egorov A.G., Nuriev A.N. Propulsive motion of cylindrical vibration-driven robot in a viscous fluid // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. 2024. Vol. 166. № 3. P. 277–296.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПИРАНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ОТЛОЖЕНИЯМИ СОЛИ ПРИ ЗАКАЧКЕ СУХОГО ГАЗА

Афанасьев А.А., Андреева А.И., Веденеева Е.А., Вязьмина С.К., Головин А.П.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: afanasyev@imec.msu.ru

Создание подземных хранилищ природного газа (ПХГ) часто предполагает закачку газа в водонасыщенные пласты. Часто ПХГ организуются в насыщенных солёной водой пластах. Закачка сухого газа в пласты, насыщенные солёной водой, сопровождается осложняющими факторами, связанными с возможностью появления в малой окрестности скважин фазы минералов соли, образующихся из-за испарения воды в газ. В поровом пространстве в зоне просушки соль выпадает в виде минералов галита, снижая пористость и проницаемость, что ограничивает расход газа через скважину и, таким образом, снижает ее эксплуатационные характеристики [1].

При математическом моделировании этого процесса зачастую пренебрегают всеми механизмами переноса среды за исключением конвективных потоков, описываемых законом Дарси. Однако, в таком приближении отложение соли имеет очень ограниченное влияние, так как концентрация минералов соли остаётся малой величиной, что противоречит данным наблюдений за скважинами и лабораторным исследованиям. Расширенные математические модели, учитывающие капиллярное давление, прогнозируют достижение высоких концентраций минералов соли, приводящих к полному запираанию потока газа [1]. В настоящей работе предпринята попытка получить экспериментальное подтверждение этого явления. Создан экспериментальный стенд, позволяющий проводить лабораторное моделирование отложения соли в насыщенных пористых средах (см. Рис.).

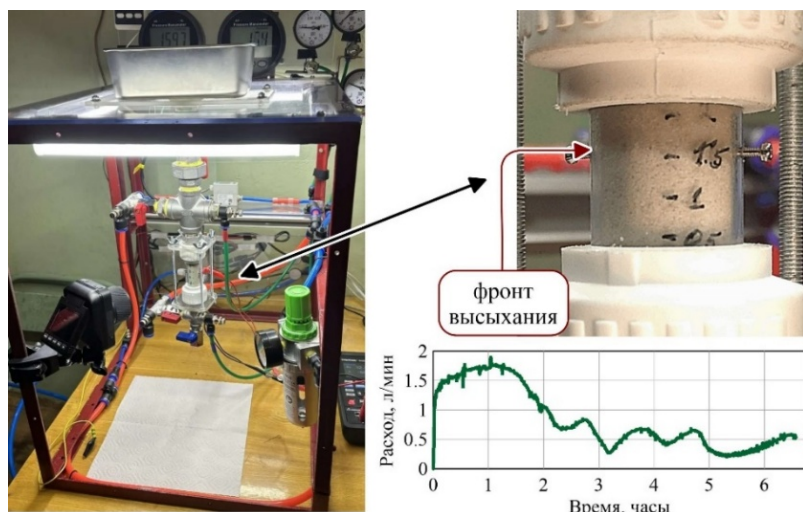


Рис. Фотография рабочей части экспериментального стенда и изменение расхода газа со временем.

В лабораторных условиях удалось воспроизвести многократное снижение расхода газа при отложении галита, но не полное запираание потока [2]. Впервые обнаружен квазипериодический режим запираания потока газа с интервалами временного снижения и повышения его расхода (см. Рис.). Анализ экспериментальных данных показал, что значительное влияние на процесс оказывает ещё один механизм переноса, связанный с молекулярной диффузией растворённой соли в воде, которая исключает возможность полного запираания среды минералами галита. Математическая модель процесса развита с помощью учёта дополнительных дисперсионных

членов, описывающих диффузию, что на качественном уровне позволило описать экспериментальные данные. Однако периодический режим снижения проницаемости не воспроизводится моделью. Обсуждаются возможные физические механизмы, приводящие к появлению такого режима.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-19-00380, <https://rscf.ru/project/26-19-00380/>.

1. Afanasyev A., Grechko S. CO₂ flow blockage in the near-wellbore zone: Fresh water stimulation against the salting-out effect // *Geoenergy Sci. Eng.* 2025. Vol. 254. Art. 214038.

2. Афанасьев А.А., и др. Экспериментальное исследование запираания водонасыщенной пористой среды отложениями соли при закачке сухого газа // *ПММ.* 2026. № 3 (в печати).

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА КВАЗИПРОПУЛЬСИВНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАШУЩЕГО КРЫЛА

Баймуратова А.Р.^{1,2}, Васютина В.П.², Нуриев А.Н.²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Институт авиации, наземного транспорта и энергетики, Казань

² Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Институт математики и механики имени Н.И. Лобачевского, Казань

e-mail: angelina.baimuratova@yandex.ru

Исследования эффективности природных колебательных движителей ведутся уже несколько десятилетий. Классическая потенциальная теория Wu (1971) [1] предсказывает КПД машущего крыла, близкий к 100%. Вопрос о достижимости таких показателей в вязкой жидкости остается открытым до сих пор. Расчёт КПД в вязкой жидкости осложнён тем, что традиционный показатель эффективности по Фрудру $\eta = T_{net} U / P_{in}$ (T_{net} – средняя чистая тяга, U – средняя скорость движения, P_{in} – средняя затрачиваемая мощность на самодвижение) требует определения чистой тяги T_{net} , которую невозможно отделить от сопротивления корпуса самоходного тела.

В настоящей работе исследование эффективности машущего крыла проводится в рамках прямого численного моделирования в диапазоне значений числа Рейнольдса $Re = 10^4 - 10^5$. Модель верифицирована по экспериментальным данным [2] при $Re = 40000$. Для анализа крейсерского режима использована квазипропульсивная эффективность $\eta_{QP} = (T + R) U / P_{in}$, где R – сила сопротивления тела при буксировке в выпрямленном состоянии [3]. При $T = 0$ выражение упрощается до $\eta_{QP} = R U / P_{in} = (R / T_{net}) \eta$, что даёт связь с эффективностью по Фрудру.

Расчёты выполнены в пакете OpenFOAM на основе метода конечных объёмов [4] в 2D и 3D постановках. Крыло моделировалось цилиндрическим телом с профилем NACA0012. Сравнение с экспериментом [2] даёт погрешность менее 5%. Квазипропульсивная эффективность η_{QP} в крейсерском режиме может достигать значений, близких к 100%, что подтверждает достижимость высоких показателей, предсказанных потенциальной теорией Wu (1971) [1], даже в вязкой жидкости.

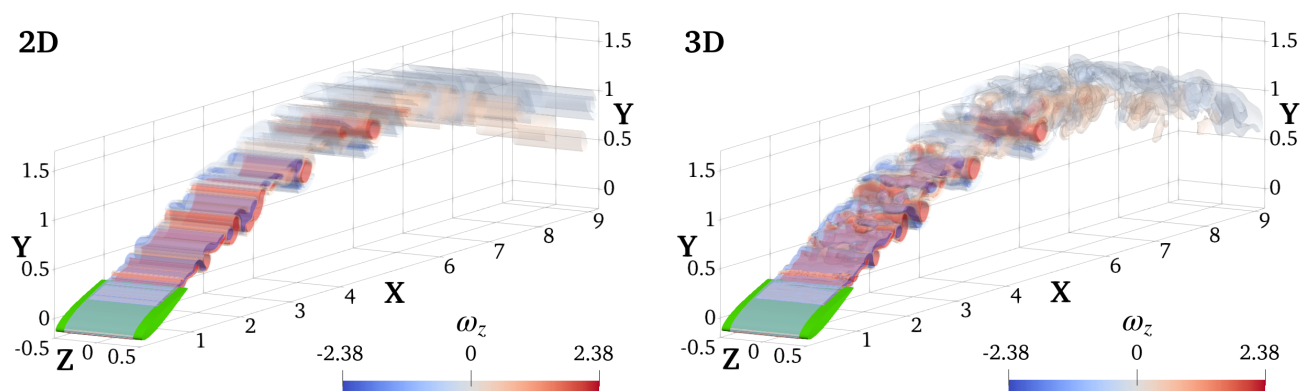


Рис. Мгновенные поля завихренности для 2D и 3D течений в крейсерском режиме при $U = 2.38$, $Re \sim 10^5$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-79-10033-П.

1. Wu T.Y. Hydromechanics of swimming propulsion. Part 2. Some optimum shape problems // Journal of Fluid Mechanics. 1971. Vol. 46. P. 521–544.
2. Read D.A., Hover F.S., Triantafyllou M.S. Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering // Journal of Fluids and Structures. 2003. Vol. 17. No. 1. P. 163–183.
3. Maertens A.P., Triantafyllou M.S., Yue D.K.P. Efficiency of fish propulsion // Bioinspiration & Biomimetics. 2015. Vol. 10. No. 4. Art. 046013.
4. Nuriev A.N., Baimuratova A.R., Zaitseva O.N., Zhuchkova O.S. The dependence of the propulsive characteristics of a flapping wing on its cross-sectional shape // 2023 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS), Moscow, Russian Federation, 2023, P. 135–138.

МОРФОЛОГИЯ ВЕЩЕСТВА КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ В ОКРЕСТНОСТИ ОБЛАСТЕЙ НН

Белогривов Н.В., Котова Г.Ю.

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

e-mail: nikita.belogrivov.99@mail.ru

Работа посвящена компьютерному моделированию погружения газового неоднородного сгустка в плотный слой нейтрального газа. Этот слой образуется при расширении области НН, находящейся в неоднородном облаке.

Считается, что одним из механизмов возникновения новых звездных объектов является сжатие уже существующих неоднородностей под действием излучения массивных звезд [2]. Особый интерес представляет возможность появления кумулятивных струй, которые могут служить индикаторами механики звездообразования, так как они формируются на внешней по отношению к центральной звезде стороне слоя.

Данная работа посвящена исследованию состава вещества возникающих кумулятивных струй. Важно отметить, что формирование струй возможно при вторжении именно неоднородного газового облака в слой и только при наличии ускорения [3]. При взаимодействии уплотнения с ускоряющимся слоем сначала образуется полость, которая затем за счёт сил Архимеда схлопывается, образуя кумулятивную струю.

В результате моделирования получено, что ядро облака оседает на дне образующейся полости, а менее плотные слои сгустка частично попадают в кумулятивную струю. Данные расчетов не только качественно согласуются с работами [1], [4], но и впервые количественно определяют массу вещества облака, оказавшегося в струе.

Исследование поля азимутальной завихренности подтверждает, что вихревые структуры переносятся вместе с веществом: отрицательная завихренность концентрируется в ядре, а положительная – в струе. В работе также рассмотрены особенности деформации облака при погружении его в слой при наличии самогравитации.

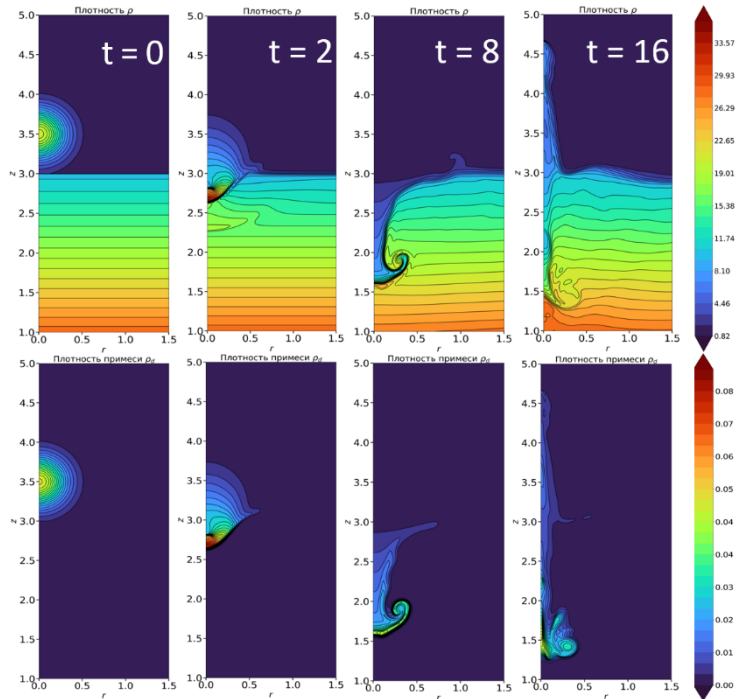


Рис. Изолинии плотности газа (вверху) и пассивной примеси (внизу) в различные моменты времени.

1. Краснобаев К.В. Перераспределение массы при проникании неоднородного уплотнения в ускоренно движущийся газовый слой // Прикладная математика и механика. 2024. Т. 88. № 6. С. 828–838.

2. Deharveng L., Schuller F., Anderson L. D. et al. A gallery of bubbles. The nature of the bubbles observed by Spitzer and what ATLASGAL tells us about the surrounding neutral material // A&A. 2010. Vol. 523. A6.

3. Kotova G.Yu., Krasnobaev K.V. Interaction of an accelerating layer with a cloud: formation of tails and cumulative jets // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2020. Vol. 492. P. 2229–2235.

4. Kotova G.Yu., Krasnobaev K.V. Hydrodynamic instabilities in the models of the formation of young stellar objects // Fluid Dyn. 2022. Vol. 57. № 1. P. 26–34.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ СВЯЗАННОГО РАСЧЕТА «ГИДРОДИНАМИКА – ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС – НДС – РЕСУРС» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ ANSYS

Бесчеров Д.Е., Ереев М.Н., Марков А.С., Панов В.А., Свешников Д.Н.

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

e-mail: bescherov@okbm.nnov.ru

Ресурс и эксплуатационная надежность оборудования реакторных установок (РУ) зависит от большого количества конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов. Одним из основных факторов, в значительной степени определяющих ресурс теплообменного оборудования РУ, является усталостное повреждение конструкционных материалов под воздействием термоциклических нагрузок. Данные воздействия являются следствием изменения давления и температуры теплоносителей в переходных режимах эксплуатации или следствием пульсаций температуры теплоносителей, обусловленных спецификой работы оборудования. Указанные процессы носят принципиально нестационарный, стохастический характер и оказывают негативное влияние на ресурс оборудования, истощение которого происходит при совместном действии механизмов мало- и многоциклового термоусталости [1].

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана методика, позволяющая проводить оценку влияния стохастических термоциклических нагрузок на ресурсные характеристики оборудования РУ. Численными методами с использованием программы для ЭВМ ANSYS и программами расчета ресурса последовательно решаются задачи: «гидродинамика – тепломассоперенос – напряженно-деформирование состояние (НДС) – ресурс».

Необходимым этапом расчета температурного состояния оборудования, функционирующего в условиях стохастических температурных пульсаций с использованием CFD программ, является этап верификации. С этой целью в гидродинамической лаборатории АО «ОКБМ Африкантов», оснащенной самыми современными средствами регистрации температур и скоростей, проведен большой объем методических экспериментальных исследований.

Для наиболее обоснованных и точных оценок долговечности при термопульсациях следует располагать экспериментальными данными о кинетике накопления усталостных повреждений при максимально возможных градиентах температур теплоносителей, соответствующих штатным параметрам РУ. Для решения указанной задачи в АО «ОКБМ Африкантов» проведены исследования кинетики накопления усталостных повреждений в материале экспериментальных моделей (см. Рис.) в результате нагружения температурными пульсациями случайного характера, обусловленными смешением теплоносителей с различной температурой, на уникальном, специально сконструированном стенде.

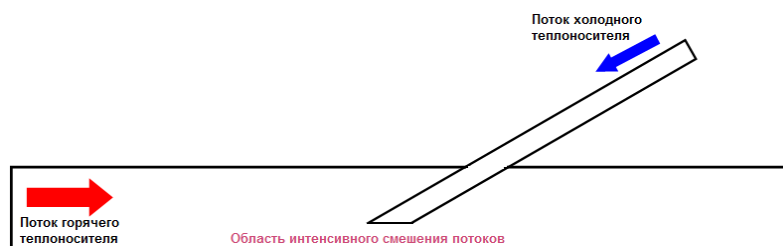


Рис. Конструктивная схема экспериментальной модели.

1. Бесчеров Д.Е., Большухин М.А., Будников А.В., Ереев М.Н., Лебедев В.В., Марков А.С., Панов В.А., Патрушев Д.Н., Свешников Д.Н., Скулкин Н.Г., Шишулин Д.Н. Отчет. Расчетно-экспериментальные исследования по развитию и верификации технологии анализа долговечности конструкций при воздействии стохастических термопульсаций. Этап 2017 г. – 130 с.

ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

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

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

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

e-mail: yana-vahterova@mail.ru

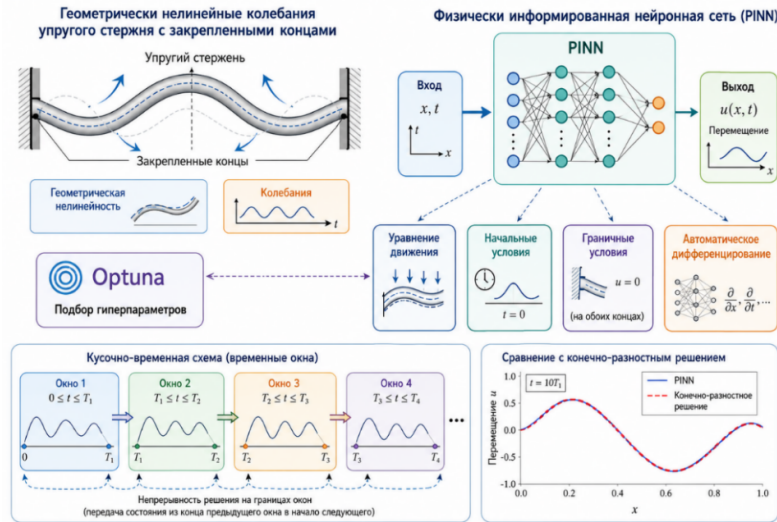


Рис. Схема применения физически информированной нейронной сети для моделирования геометрически нелинейных колебаний упругого стержня с закрепленными концами.

В работе исследуется применение физически информированных нейронных сетей (PINN) для моделирования нестационарных колебаний упругих элементов конструкций с учетом геометрической нелинейности. Такие задачи возникают в авиационных и машиностроительных системах при переменном нагружении, больших амплитудах и конечных перемещениях, когда линейные модели недостаточно точно описывают динамический отклик.

В качестве базовой постановки рассматриваются продольные колебания одномерного упругого стержня с закрепленными концами. Геометрическая нелинейность учитывается квадратичными членами по градиентам перемещений. Поле перемещений как функция координаты и времени аппроксимируется нейронной сетью, обучаемой по невязке уравнения движения и начальным условиям. Производные вычисляются автоматическим дифференцированием, а граничные условия вводятся непосредственно в аппроксимирующую функцию и выполняются тождественно.

Для повышения устойчивости вычислений задача приводится к безразмерному виду с выделением параметра, характеризующего вклад геометрической нелинейности. При его малых значениях процесс близок к линейному волновому, тогда как увеличение амплитуды начального возмущения заметно изменяет динамический отклик. Архитектура сети и параметры обучения подбираются с помощью библиотеки Optuna. Оптимизируются число скрытых слоев и нейронов, функция активации, скорость обучения, число коллокационных точек и веса, составляющих функционала потерь. Это сокращает ручную настройку и повышает точность решения.

Для расчета многоцикловых колебаний на больших временных интервалах применяется кусочно-временная схема, поскольку единая глобальная PINN может сглаживать быстроосциллирующую зависимость. Интервал разбивается на окна, а решения согласуются по перемещениям и скоростям.

Сравнение с классическим численным решением показывает, что PINN воспроизводит основные особенности геометрически нелинейных колебаний, а кусочно-временной подход повышает устойчивость расчета. Метод может быть распространен на пластины, оболочки, а также на прямые и обратные задачи идентификации параметров материалов и восстановления нестационарных нагрузок.

1. Vahterova Ya. Optuna-PINN: software code for hyperparameter optimization of physics-informed neural networks using Optuna // GitHub. 2026. URL: <https://github.com/yana-vahterova/Optuna-PINN>.

КАК ВОЗНИКАЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ? ЭВОЛЮЦИЯ КОНЦЕПЦИЙ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Веденеев В.В.^{1,2}

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

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

e-mail: vasily@vedeneev.ru

Классическим подходом к исследованию устойчивости сдвиговых течений (пограничные слои, следы, струи, слои смешения) является пренебрежение пространственной эволюцией течения. Тогда вопрос о линейной устойчивости течения сводится к решению задачи на собственные значения для уравнения Орра-Зоммерфельда. Граница устойчивости, например, для пограничного слоя Блазиуса, имеет характерный вид, показанный на рисунке [1].

Однако, дело иначе обстоит, если пространственной эволюцией основного течения не пренебрегается. Поскольку пограничный слой нарастает с увеличением расстояния от передней кромки, то как можно увидеть из рисунка, рано или поздно возмущение фиксированной частоты выйдет из зоны роста. Если вблизи передней кромки пластины запускать отдельные локализованные пакеты с фиксированной частотой, то они, пройдя через зону нарастания возмущения, в достаточном удалении затухнут. То есть в двумерном неплоскопараллельном течении каждое возмущение, имеющее фиксированную частоту, должно затухнуть далеко вниз по потоку.

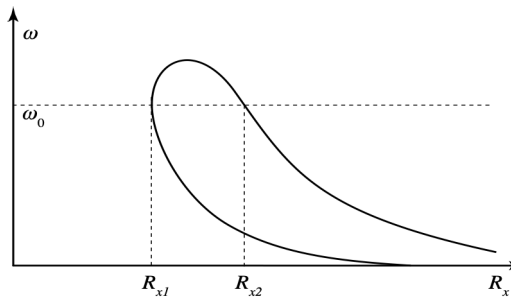


Рис. Качественный вид нейтральной кривой и область роста возмущения заданной частоты.

Эта идея полностью подтверждается при глобальном анализе устойчивости — т.е. анализе двумерного (или, вообще говоря, трёхмерного) течения без использования гипотезы плоскопараллельности. В этом случае все собственные частоты оказываются затухающими [2, 3], что, на первый взгляд, кажется парадоксальным. Действительно, как минимум в зоне роста плоскопараллельного приближения, создаваемые возмущения нарастают, что подтверждается многочисленными экспериментами [4].

Наращение возмущений, начально локализованных в пространстве, может быть объяснено лишь немодальным взаимодействием затухающих глобальных собственных мод. Такое взаимодействие традиционно объясняет рост возмущений в линейно устойчивых плоскопараллельных течениях — например,

в течении Пуазейля в круглой трубе. Оказывается, что этот же механизм объясняет и рост возмущений в широком классе “классических” течений, неустойчивых локально, но оказывающимися устойчивыми глобально, а ограниченный во времени и пространстве рост возмущений в линейной задаче объясняется немодальным взаимодействием затухающих глобальных собственных мод.

Предложенные идеи иллюстрируются на модельной задаче [5].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 25-19-00278).

1. Drazin P.G., Reid W.H. Hydrodynamic Stability. Cambridge University Press. 2004.

2. Rodriguez D., Tumin A., Theofilis V. Towards the foundation of a global modes concept. AIAA paper 2011-3603. 2011. 18 p.

3. Беляев К.В., Гарбарук А.В., Голубков В.Д. Расчет эволюции волн Толлмина-Шлихтинга на основе глобального анализа устойчивости // Математическое моделирование. 2023. Vol. 35. № 9. P. 45–60.

4. Boiko A.V., Westin K.J.A., Klingmann B.G.B., Kozlov V.V., Alfredsson P.H. Experiments in a boundary layer subjected to free stream turbulence. Part 2. The role of TS-waves in the transition process. // J. Fluid Mech. 1994. V. 281. P. 219 – 245.

5. Веденеев В.В., Гареев Л.Р., Зайко Ю.С., Экстер Н.М. Абсолютная и глобальная неустойчивость плоских затопленных струй // Изв. РАН. МЖГ. 2024. № 4. С. 3–17.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕМБРАНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Вестяк К.В., Вахтерова Я. А

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва
e-mail: vestyak@yandex.ru

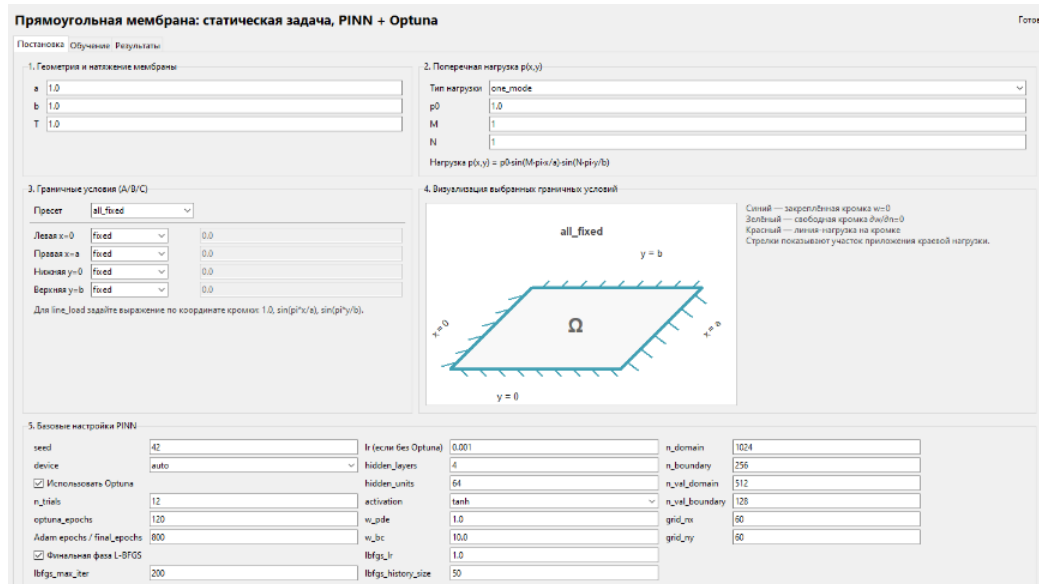


Рис. Интерфейс программы для моделирования статической деформации прямоугольной мембраны с применением PINN и Optuna.

В работе рассматривается стационарная краевая задача о деформировании тонкой прямоугольной мембраны, натянутой с постоянным усилием и нагруженной поперечной силой. Цель исследования — оценить возможности физически информированных нейронных сетей (Physics-Informed Neural Networks, PINN) для определения статического прогиба и сопоставить результаты с аналитическими решениями. Исследуются различные граничные условия: закрепление всех сторон, наличие одной или двух свободных кромок, а также нагрузка, приложенная вдоль границы области. Рассматриваются одномерная, равномерно распределённая, локализованная и сосредоточенная нагрузки.

Аналитические решения строятся методами математической физики. Для закреплённых сторон задача сводится к уравнению Пуассона и решается с использованием функции Грина и разложения по собственным функциям. Для свободных кромок спектральные представления изменяются с учётом соответствующих базисных функций и граничных условий. Численная реализация выполнена на Python с использованием PyTorch. Прогиб аппроксимируется полносвязной нейронной сетью, обучаемой путём минимизации невязок дифференциального уравнения и граничных условий. Производные вычисляются автоматическим дифференцированием. Подбор архитектуры сети, функции активации, скорости обучения и весовых коэффициентов проводится с помощью Optuna. Финальное обучение выполняется алгоритмами Adam и L-BFGS. Точность оценивается по среднеквадратичной, средней абсолютной и максимальной абсолютной ошибкам.

Результаты подтверждают эффективность PINN и возможность их дальнейшего применения к динамической задаче колебаний мембраны.

1. Вахтерова Я.А., Вестяк К.В. Моделирование колебаний прямоугольной мембраны с применением методов глубокого машинного обучения и физически информированных нейронных сетей // Материалы XXXII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова: Материалы симпозиума, Кремоньки, 18–22 мая 2026 года. – Москва: ООО «ТРП», 2026. – С. 44-45.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО СМЕШЕНИЯ CO_2 С ВОДОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИФфуЗИОННОЙ МОДЕЛИ

Вязьмина С.К.^{1,2}

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

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

e-mail: svetlana.viazmina@math.msu.ru

Подземная утилизация углекислого газа может быть осложнена конвективным смешением CO_2 с водой. Конвекционные ячейки могут иметь ширину всего несколько метров, в то время как подземное хранилище может простираться на несколько километров. Это различие в пространственных масштабах трудно устранить при численном моделировании подземных течений, поэтому требуется разработка эффективных подходов, аналогичных тем, которые используются при моделировании эффективной турбулентности. В данной работе представлен подход к численному моделированию конвективного смешения с использованием крупномасштабных сеток. Рассматривается двумерный участок пористой среды, насыщенной водой, расположенный под газовым плюмом. Модель основана на искусственном увеличении коэффициента молекулярной диффузии CO_2 в воде. Разрабатываются соотношения, описывающие изменения усиления этого коэффициента со временем с помощью рассмотрения трех известных стадий конвективного смешения. Для каждой стадии найдены составляющие кусочно-заданной функции, описывающей увеличение коэффициента диффузии. Модель тестируется на основе результатов двумерного численного моделирования смешения при различных числах Рэлея-Дарси. Таким образом, разрабатывается эффективная модель, в которой смешение рассматривается как подсеточный процесс. Этот подход проверяется путем сравнения результатов эффективной модели для тонкой (одномерной) пористой колонны с результатами двумерного моделирования. Проведена оценка диапазона значений числа Рэлея-Дарси, при котором представленная модель является наиболее точной, а также выявлены границы применимости модели, связанные с отсутствием ярко выраженных стадий конвективного смешения.

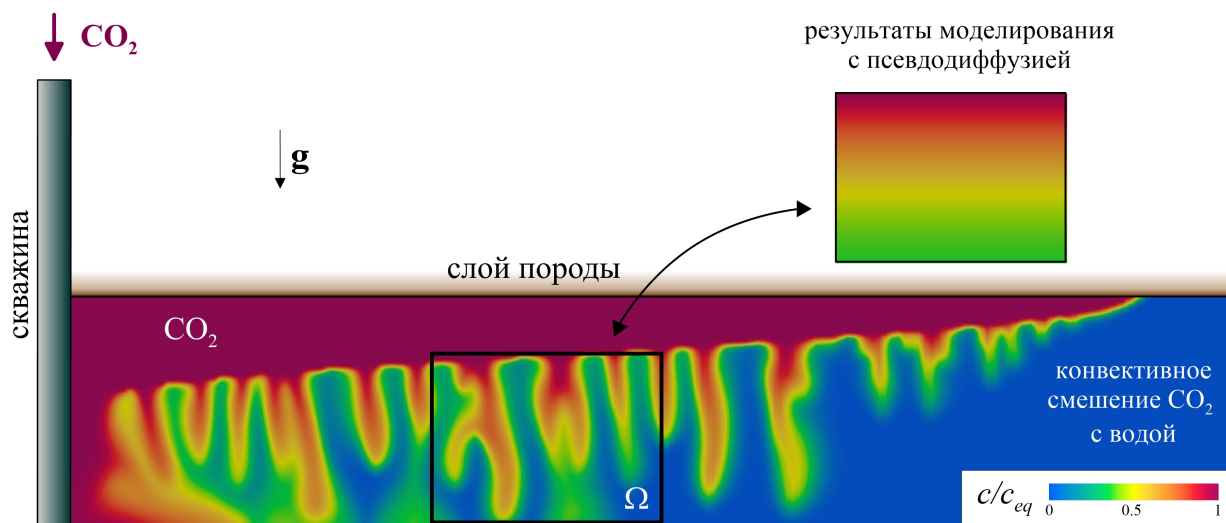


Рис. Пример моделирования распределения растворенного CO_2 , закачанного через вертикальный ствол скважины. В докладе рассматривается область Ω однофазного течения под плюмом CO_2 .

БИФУРКАЦИИ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА С ВЕТРОТУРБИНОЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ ВЕТРА

Гарбуз М.А.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: misha-garbuz@yandex.ru

Исследуется движение шагающего аппарата с пропеллерной ветротурбиной на горизонтальной плоскости в стационарном ветре [1]. Динамика описывается автономной системой второго порядка с цилиндрическим фазовым пространством, близкой к гамильтоновой. При параметрах, обеспечивающих движение против ветра, анализируется влияние скорости потока на фазовый портрет. Показано, что при малых скоростях существуют два равновесия (седло и устойчивый фокус), причём равновесие при нулевом угле всегда является седлом. С ростом скорости ветра фокус теряет устойчивость через бифуркацию Андронова–Хопфа. Далее возникает пара новых равновесий (седло и неустойчивый фокус), которые затем сливаются с исходными. При больших скоростях неподвижные точки исчезают, и система переходит к предельным циклам, соответствующим движению против или по ветру.

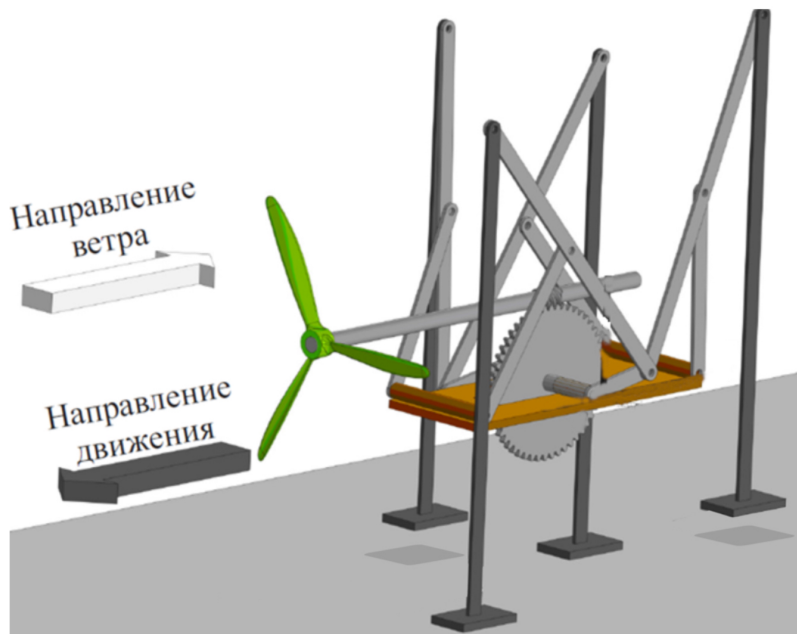


Рис. Общая схема механической системы.

1. Garbuz M., Klimina L., Samsonov V. Wind driven plantigrade machine capable of moving against the flow // Applied Mathematical Modelling. 2022. Netherlands. V.110. P.17–27.

ВИЗУАЛИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ЛАМИНАРНОГО УЧАСТКА СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ

Гареев Л.Р., Веденеев В.В., Иванов О.О., Трифонов В.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: gareev@imec.msu.ru

Затопленные струи широко используются в технологических устройствах и промышленных процессах. Режим течения струи (ламинарный или турбулентный) определяет характеристики тепло- и массопереноса. В отличие от течений, ограниченных стенками, струи сильно неустойчивы — их критическое число Рейнольдса обычно не превышает $Re = 50$. Следовательно, положение начала ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) является важным параметром течения, но его нахождение — задача неоднозначная [1].

Как правило, положение ЛТП определяется по началу резкого уменьшения осевой скорости, увеличения уровня пульсаций скорости и расширения спектра. Измерения чаще всего проводят термоанемометром [2], а также используют другие дорогостоящие методы получения мгновенных полей скорости (PIV) или визуализации структуры течения оптическими методами, термографией или TSP. Все эти методы либо требуют высокоточного оборудования, тщательно откалиброванного, либо экспериментально чрезвычайно трудоёмки. В настоящей работе предлагается простой неинвазивный метод определения длины начального ламинарного участка L_{lam} струйного течения, основанный на продольной визуализации течения лазерным ножом, видеозаписи камерой бытового уровня и постобработке с использованием открытых библиотек Python.

Предлагаемая методика верифицируется на экспериментах с затопленной струёй воздуха с удлинённым ламинарным участком [3]. Диаметр струи составляет $D = 0.12$ м, число Рейнольдса $Re_D \approx 5400$. Рассматривается как невозмущённая струя, которая сохраняет ламинарность до $L_{lam} \approx 6D$, так и струя под воздействием внешних возмущений. Поток засеивался глицериновым аэрозолем и освещался продольно непрерывным зелёным лазерным ножом. Визуализированное течение записывалось камерой смартфона, установленного на штативе параллельно плоскости ножа. Для каждого режима возбуждения струи записывалось видео длительностью около 30 с; затем выполнялось осреднение кадров для получения единой карты яркости $b(x, y)$ (рис. Слева). По значениям $b(x, y)$ из диапазона $\Delta y = 1.35D$ [4] вычислялся локальный индикатор распыливания струи $B(x)$, по аналогии с толщиной потери импульса. По достижении порогового значения $B_t(x)$ фиксировалась длина ламинарного участка (рис. Справа). Проведено сравнение L_{lam} , полученных предложенным методом и термоанемометрией для различных случаев возбуждения струи. Показано хорошее соответствие, и, как следствие, применимость нового метода.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-19-00278.

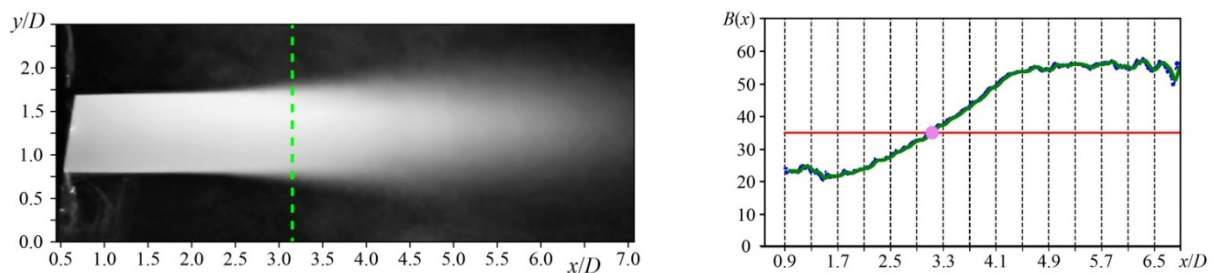


Рис. Осредненный кадр струйного течения, возмущенного внешними воздействиями, и вычисленный по нему интеграл $B(x)$. Зелёной линией слева и розовой точкой справа отмечена координата ЛТП при $B_t(x) = 35$.

1. Sato H. The stability and transition of a two-dimensional jet // J. Fluid Mech. 1960. Vol. 7. P. 53–80.
2. Kachanov Yu.S. On the resonant nature of the breakdown of a laminar boundary layer // J. Fluid Mech. 1987. Vol. 184. P. 43–74.
3. Zayko J., Teplovodskii S., Chicherina A., Vedeneev V., Reshmin A. Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers // Phys. Fluids. 2018. Vol. 30. Art. 043603.
4. Гареев Л.Р., Иванов О.О., Веденеев В.В., Ашуров Д.А. Влияние амплитуды вносимого стационарного возмущения на его немодальный рост в ламинарной затопленной струе // ПМТФ. 2024. Т. 65., № 1. С. 70–74.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ТЕЛОМ

Гвоздева В.А.

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

e-mail: gvozdevava@my.msu.ru

Исследование взаимодействия ударных волн с препятствиями актуально для задач аэродинамики и тестирования численных методов [1, 2]. Целью работы является численное моделирование взаимодействия плоской ударной волны с выпуклым гладким телом в покое газе.

Рассматривается задача набегающей ударной волны на тело. Газ предполагается невязким и нетеплопроводным. Тело предполагается симметричным. При взаимодействии волны и тела возникает отражённая ударная волна.

Процесс моделируется системой уравнений Эйлера, которая решается численно с помощью схемы Мак-Кормака 2-го порядка точности [1]. Устойчивость счёта обеспечивается условием Куранта-Фридрихса-Леви [3]. На внешней границе параметры определяются приходом ударной волны. До волны газ покоится, за волной параметры рассчитываются по соотношениям Ранкина-Гюгонио. На поверхности тела реализуются условия непротекания.

В результате моделирования получены распределения давления, плотности и скорости (см. Рис.1.). Полученные результаты соответствуют известным данным [2].

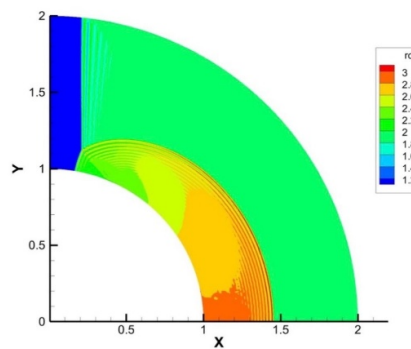


Рис.1. Распределение плотности при фиксированных M и γ .

Работа выполнена при поддержке Механико-математического факультета МГУ.

1. Гвоздева В.А. Численное моделирование взаимодействия ударной волны с телом // Материалы Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2026». Москва, 2026.

2. MacCormack R.W. The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // AIAA Paper. 1969. No. 69-354.

3. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. 1928. Vol. 100.

ФОКУСИРОВКА И КУМУЛЯЦИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТЕЛ С ГАЗОВЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Георгиевский П.Ю.¹, Левин В.А.^{1,2}, Сутырин О.Г.¹

¹ Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: georgi@imec.msu.ru

Ранее в [1] для сверхзвукового обтекания затупленных тел был отмечен кумулятивный эффект возникновения аномальных пиковых всплесков давления и плотности в точке торможения при столкновении с газовыми неоднородностями пониженной плотности, локализованными в набегающем потоке. В [2] при исследовании взаимодействия падающих ударных волн с газовыми пузырями пониженной и повышенной плотности обнаружены эффекты фокусировки вторичных ударных волн в малом объеме на оси симметрии течения. В [3] показано, что при взаимодействии головной ударной волны с газовыми неоднородностями в набегающем на тело сверхзвуковом потоке именно эффекты фокусировки в ряде случаев могут приводить к формированию кумулятивных струй, оказывающих импульсное воздействие на поверхность тел.

В докладе изложены результаты цикла исследований сверхзвукового обтекания тел при наличии газовых неоднородностей различных типов в набегающем потоке. Численное моделирование выполнено на основе уравнений Эйлера для нестационарных течений идеального совершенного газа с осевой симметрией. В начальный момент времени (после установления стационарного сверхзвукового обтекания тела) в некоторой области набегающего потока перед головной ударной волной задаются либо области пониженной или повышенной плотности в виде газового пузыря (с резкими или размытыми границами), либо области повышенного давления, возникающие при мгновенном энерговыделении в области газового пузыря (с резкими или размытыми границами).

Обсуждаются эффекты фокусировки и кумуляции, которые реализуются в результате взаимодействия неоднородностей с головной ударной волной и ударным слоем за ней. Определяется импульсное воздействие на поверхность тела для различных случаев.

Исследования по неоднородностям плотности выполнены в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, а по взрыву в набегающем потоке – в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024).

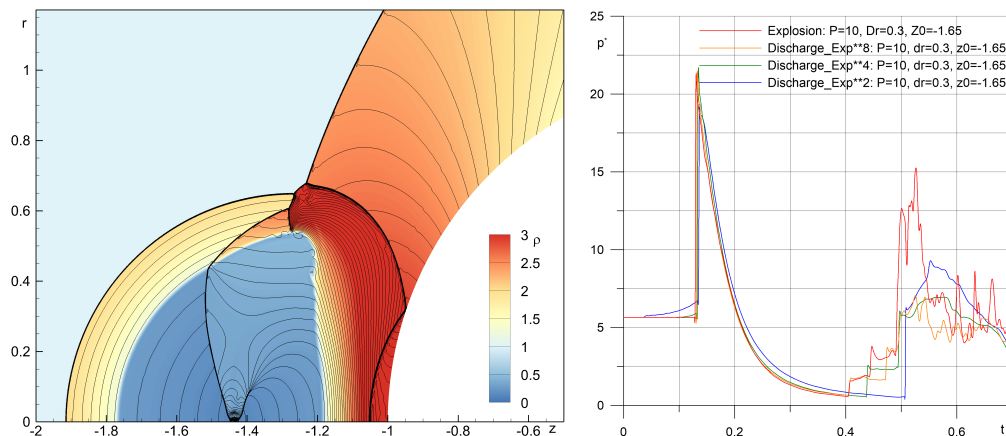


Рис. Эффект фокусировки и «двойное» импульсное воздействие при взрыве газового пузыря перед головной ударной волной при сверхзвуковом обтекании тела.

1. Georgievskii P.Yu., Levin V. A. Unsteady Interaction of a Sphere with Atmospheric Temperature Inhomogeneity at Supersonic Speed // Fluid Dynamics. 1993. Vol. 28. No. 4. P. 568–574.

2. Georgievskiy P.Yu., Levin V.A., Sutyurin O.G. Interaction of a shock with elliptical gas bubbles // Shock Waves. 2015. Vol. 25. No. 4. P. 357–369. <http://link.springer.com/article/10.1007/s00193-015-0557-4>

3. Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г. Фокусировка и кумуляция при взаимодействии ударных волн и движущихся со сверхзвуковой скоростью тел с газовыми пузырями // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. Т. 2: Механика жидкости и газа. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. С.328–330.

КРИТЕРИЙ ТЕКУЧЕСТИ РЕШЁТЧАТЫХ СТРУКТУР

Глуховский А. М.

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

e-mail: andrei.glukhovskii@math.msu.ru

Решётчатые структуры – конструкции, представляющие собой стержни, скреплённые посредством узловых соединений. Преимущества, получаемые от использования таких материалов таковы: малый вес, высокая прочность, низкая теплопроводность, простота изготовления, возможности демпфирования и поглощения энергии. Перечень задач, решаемых посредством использования решётчатых конструкций, чрезвычайно широк [1].

Задача получения параметров жёсткости кубической решётчатой структуры и её эффективного аналога решена в работе [2]. Тем не менее, в решётчатых структурах в ходе нагружения могут возникать зоны образования пластических деформаций. В представленном докладе проводится анализ поведения плоской квадратной ячейки, моделируемой балочной теорией Тимошенко, подвергнутой нагружению периодическими граничными условиями. В ходе исследования строится поверхность текучести как для случая геометрически-линейной модели, так и геометрически-нелинейной. Результаты получены в ходе численного эксперимента (рис. 1) и подтверждены с помощью аналитического исследования. Показано, что учёт геометрической нелинейности активирует эффект дилатансии.

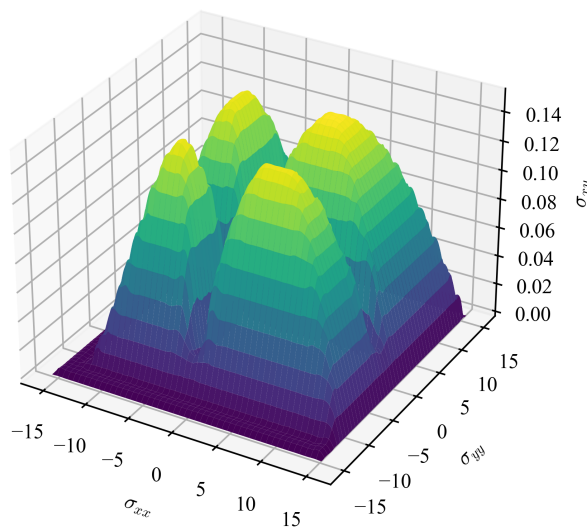


Рис. 1 Поверхность текучести квадратной решётки, полученная в ходе численного эксперимента для геометрически-нелинейного сценария деформирования.

1. Gibson L.J., Ashby M.F. Cellular Solids: Structure and Properties. 2nd Edition. Cambridge University Press, 1999. 532 p.

2. Глуховский А. М., Федулов Б. Н. Сравнительный анализ методов определения упругих свойств метаматериалов с использованием прямоугольных периодических ячеек // Механика композиционных материалов и конструкций. 2025. Т. 31. Вып. 4. С. 535–555.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ ВНУТРИ СФЕРЫ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

Голуб А.П.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: holub.imech.g@lecturer.msu.ru

Исследуется динамика подвешенного маятника со сферической полостью, частично заполненной идеальной жидкостью. Пример использования данных систем в практических задачах приведён в [1]. Предполагается, что движение происходит в вертикальной плоскости (на рисунке указан вид сбоку). Учитывается сила лобового сопротивления, действующая на оболочку маятника. Для моделирования колебаний жидкости в полости, используется феноменологическая «маятниковая» модель.

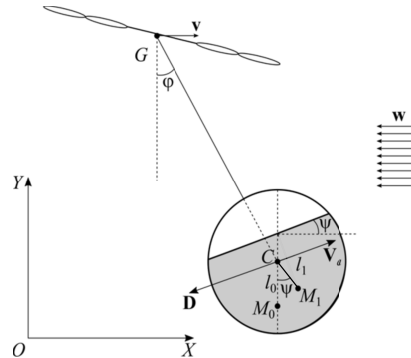


Рис.1 Маятник в потоке среды (вид сбоку).

Чтобы описать динамику жидкости внутри полости, выделим в жидкости часть, которая участвует в колебаниях поверхности, и часть, которая не участвует в них. Поведение первой части будем имитировать с помощью математического маятника (так сказать, «жидкого осциллятора» [2]), точка подвеса которого находится на пересечении вертикальной прямой, проходящей через центр полости, и плоскости поверхности жидкости в невозмущенном состоянии. Будем считать, что вторая часть жидкости совершает квазистационарное движение [3], т.е. во все время движения занимает положение, отвечающее состоянию равновесия при текущем положении маятника. Длина «жидкого осциллятора» определяется таким образом, чтобы собственная частота осциллятора совпадала с частотой первой моды собственных колебаний жидкости в полости вблизи состояния равновесия.

Проведена серия экспериментов в аэродинамической трубе А-10 НИИ механики МГУ, по результатам которых удалось идентифицировать описанные выше величины. Исследовано, как жидкость влияет на движение маятника в потоке среды. Как изменяется амплитуда и частота колебаний в зависимости от уровня жидкости в сосуде. Проведено сравнение численного моделирования и экспериментальных результатов. Предложена улучшенная модель для описания движения жидкости внутри сферы.

Работа выполнена в рамках госзадания Московского Университета.

1. Голуб А.П., Зудов В.Б., Локшин Б.Я., Селюцкий Ю.Д. О робастной стабилизации движения квадрокоптера с подвешенным грузом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25. № 9. С. 490-500. DOI: 10.17587/mau.25.490-500.

2. Moriello L., Biagiotti L., Melchiorri C., Paoli A. Manipulating Liquids with Robots: A Sloshing-Free Solution // Control Engineering Practice. 2018. V. 78. P. 129-141. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.06.018.

3. Колесников К.С. Динамика ракет. М.: Машиностроение. 1980. 376 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ПРИЕМИСТОСТИ СКВАЖИНЫ ИЗ-ЗА ОСАЖДЕНИЯ СОЛИ ПРИ ВРЕМЕННОЙ ОСТАНОВКЕ ЗАКАЧКИ ГАЗА

Гречко С.С.^{1,2}

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

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

e-mail: grechkoss@my.msu.ru

Эффект высаливания при эксплуатации газовых скважин при геологическом размещении углекислого газа в водонасыщенных пластах является одной из ключевых проблем. Закачка сухого газа в минерализованный пласт сопровождается испарением пластовой воды, что в свою очередь приводит к осаждению соли (галита) в поровом пространстве призабойной зоны. Этот эффект высаливания снижает проницаемость среды и, как следствие, приемистость скважины. В настоящей работе исследуется влияние периодов временной остановки скважины, которые могут быть связаны с проведением ремонтных работ или отсутствием поставляемого для захоронения газа, на снижение приемистости или последующую возможность возобновления закачки. Фильтрация рассматривается в осесимметричной одномерной постановке с учетом фазовых превращений и капиллярных эффектов, которые играют существенную роль в текущей проблеме.

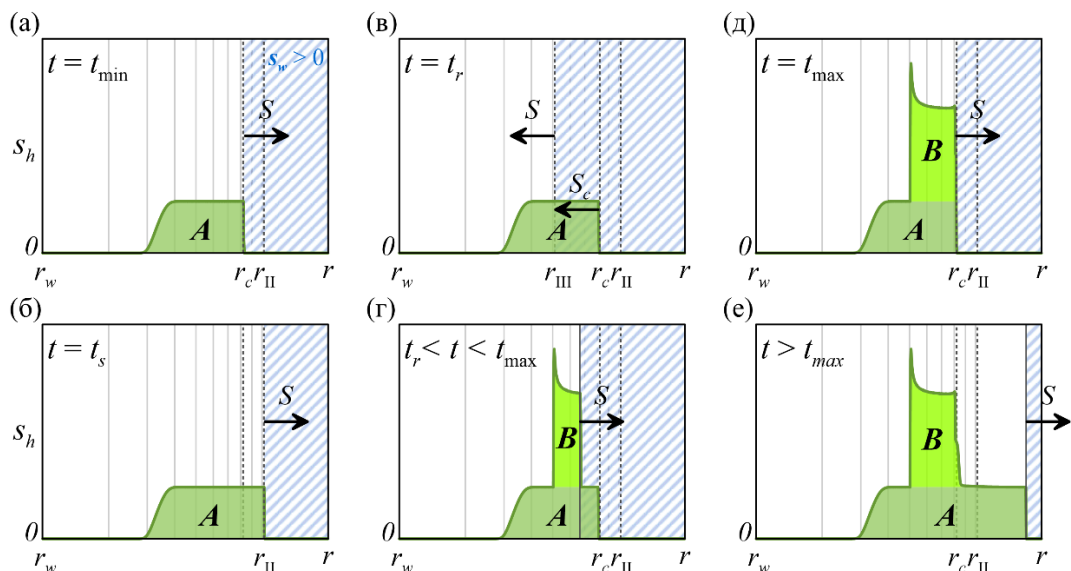


Рис. Распределение насыщенности галита s_h в последовательные моменты времени. Фронт S показывает границу между высохшей зоной ($s_w = 0$) у скважины при малых r и влажной зоной ($s_w > 0$) при больших r . Ось r – логарифмическая.

В качестве меры запираания поток в пористой среде используется скин-фактор. Численное моделирование выполнено для случая сверхкритического режима закачки газа, характеризуемого капиллярным числом Ca [1]. Показано, что остановка скважины и возобновление закачки приводят к локализации отложений галита и значительному снижению проницаемости в сравнении с непрерывной закачкой. Предложена методика оценки прироста скин-фактора, основанная на представлении отложений в виде суммы части, образующейся при непрерывной работе, и части, обусловленной простоем. Показано также, что задача обладает подобием: для фиксированного пласта прирост скин-фактора определяется лишь отношением длительности простоя к моменту его начала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-19-00380, <https://rscf.ru/project/26-19-00380/>.

1. Afanasyev A., Grechko S. CO2 flow blockage in the near-wellbore zone: Fresh water stimulation against the salting-out effect // 2025 Geoenergy Sci. Eng. 254, 214038. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.214038>.

РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЯГИ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ В КОМПОНОВКЕ С ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Губский В.В., Петров А.В.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Московская область
e-mail: verict@mail.ru

Для изучения сложных особенностей взаимодействия винта с планером летательного аппарата в настоящее время используются экспериментальные методологии, базирующиеся на применении работающих имитаторов силовых установок. В первую очередь, это относится к ЛА нетрадиционных аэродинамических схем, отличающихся нестандартным расположением винтомоторной силовой установки. Расчетные методы также используются для определения взаимной интерференции винта и элементов планера, чаще всего снижающей эффективность всей системы. Однако следующим этапом необходимо проводить глубокую интеграцию и оптимизацию взаимного положения для получения уже положительного эффекта от интерференции.

Основной методической проблемой при испытаниях моделей в малоразмерных аэродинамических трубах (АДТ) является несоответствие чисел Рейнольдса в условиях АДТ и полета. Это влияет на выбор режимов работы имитатора и подбор величин скорости потока, при которых обеспечивается подобие аэродинамических характеристик винта. При этом необходимо обеспечить моделирование основных критериев подобия, таких как коэффициент нагрузки на ометаемую винтом площадь и относительная поступь винта. Для этой цели проводятся специальные методические испытания, которые призваны получить набор исходных данных для разделения сил и моментов на воздушном винте и планере ЛА. Отдельным вопросом стоит задача снижения вредного влияния температуры на показания весовых элементов. Более сложное взаимодействие элементов возникает при проведении испытаний моделей с выпущенной механизацией крыла, отклоненными органами управления, отказом двигателя, вблизи экрана [1]. В продолжении этой работы рассмотрен способ снижения вредной интерференции путем оптимизации силовой установки толкающего типа и фюзеляжа летательного аппарата [2].

В результате выполнения работы, показано что тяга толкающего винта при его размещении в заторможенном потоке за фюзеляжем может быть увеличена на 20-25%, а модификация формы кормовой части фюзеляжа уменьшает его сопротивление до 20%. Также показано что усовершенствованная технология проведения испытаний моделей с воздушными винтами повышает точность измерений сил и моментов на воздушном винте на 13-15%, расширяет рабочий диапазон испытаний по числам Маха и Рейнольдса и увеличивает допустимое время непрерывного эксперимента на 30%.

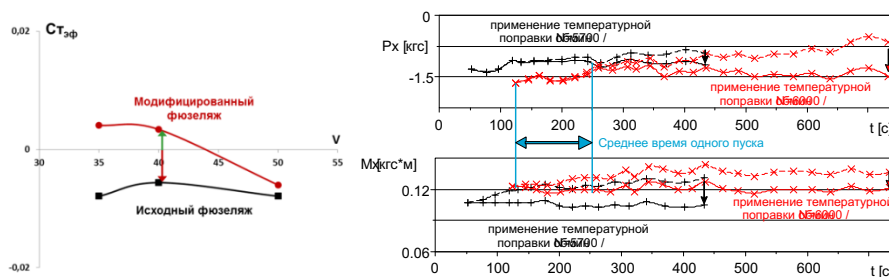


Рис.1 Эффективность системы фюзеляж-толкающий винт и влияние температуры на показания тяги в эксперименте.

1. Алесин В.С., Губский В.В., Павленко О.В. Численное исследование влияния формы фюзеляжа на тягу толкающего воздушного винта // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 6 (78). С. 3.
2. Губский В.В., Петров К.А. Расчётная оценка влияния распределенной электрической силовой установки на аэродинамические характеристики самолета на взлетнопосадочных режимах // Материалы XXXV научно-технической конференции по аэродинамике ЦАГИ 2025 г. Жуковский, 2025. С. 45-46.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АМПЛИТУДЫ КРУТИЛЬНЫХ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ОТ ДЛИНЫ ЦИЛИНДРА

Демченко Я.В., Иванов О.О.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: demchenko@imec.msu.ru

В последние годы всё более актуальными становятся работы по созданию новых типов ветрогенераторов, в том числе основанных на явлении резонансных аэроупругих колебаний цилиндра, вызванных дорожкой Кармана (VIV), которая образуется позади плохообтекаемых тел при обтекании их поперечным потоком газа или жидкости [1, 2]. В нашей работе [3] экспериментально исследовалась система, состоящая из круглого цилиндра конечного размаха, закрепленного на консольной балке. Данная конфигурация рассматривалась, например, в статье [4], где исследовались классические поперечные колебания при различных длинах цилиндра. Однако мы экспериментально показали в такой экспериментальной системе наличие, помимо классических поперечных колебаний, ранее не исследованного крутильного типа колебаний, рассмотрев конфигурацию с фиксированной длиной цилиндра. Этот тип колебаний вызван резонансом аэродинамических сил с вращательными колебаниями цилиндра, в котором балка совершает крутильные движения. Для такой экспериментальной системы в силу конечности длины цилиндра и наличия открытых торцов важное значение играет влияние концевых эффектов на колебания, а также на структуру течения в следе за цилиндром. В работе [4] авторы изучали поведение поперечных колебаний и течения в следе при различных концевых условиях, меняя длину цилиндра, в частности, показав, что чем меньше длина цилиндра, тем больше амплитуда колебаний. В настоящей работе было экспериментально исследовано влияние длины цилиндра на амплитуду крутильных колебаний (см. Рис.). Также был обнаружен ранее не исследованный режим незатухающего смешанного типа VIV, когда резонанс наступает в результате одновременного возбуждения поперечных и крутильных VIV.

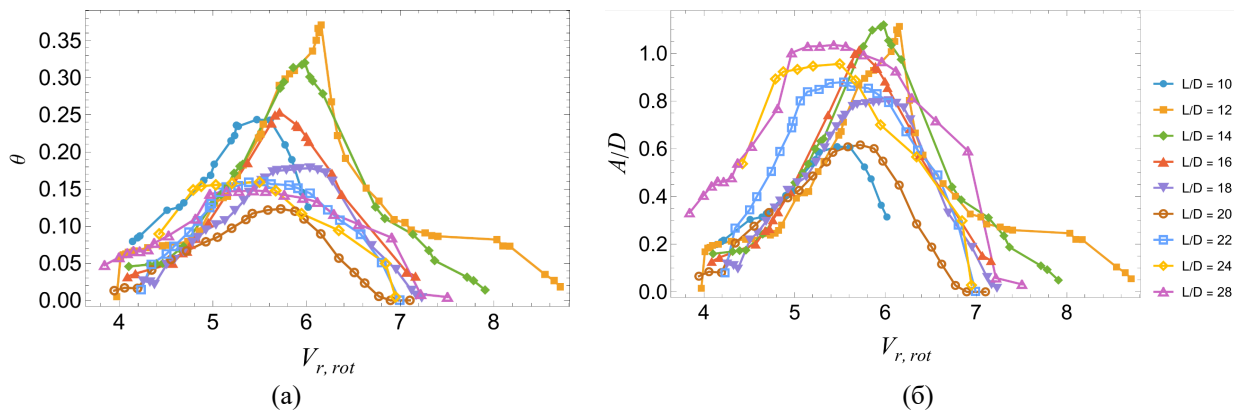


Рис. Зависимость амплитуды угла поворота θ и (б) безразмерной амплитуды A/D колебаний цилиндра от безразмерной скорости $V_{r, rot}$ для различных относительных удлинений цилиндра L/D .

1. Bernitsas, M. M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y., Garcia, E. M. H. VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2008. Vol. 130. №4. Art. 041101.
2. Williamson, C. H. K., Govardhan, R. Vortex-induced vibrations // Annual Review of Fluid Mechanics. 2004. Vol. 36. P. 413–455.
3. Demchenko, Y., Ivanov, O., and Vedenev, V. Experimental investigation of rotational vortex-induced vibrations of a circular cylinder attached to an elastic beam // Journal of Fluids and Structures. 2025. Vol. 133. Art. 104266.
4. Azadeh-Ranjbar, V., Elvin, N., Andreopoulos, Y. Vortex-induced vibration of finitelength circular cylinders with spanwise free-ends: Broadening the lock-in envelope // Physics of Fluids. 2018. Vol. 30. №10. Art. 105104.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕДУКЦИИ РАЗМЕРНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАСТА ПРИ ОДНОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Денисов М.И.^{1,2}

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

²НИИ Механики МГУ имени М.В. Ломоносова

e-mail: maxim2802@yandex.ru

Гидродинамический расчет фильтрационных процессов в водонасыщенных пластах на детализированных трехмерных сетках требует значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет проведение многовариантных расчетов, например, адаптацию модели к истории разработки или анализ рисков. Перспективным способом снижения вычислительных затрат является редукция размерности численной модели. При этом упрощенная модель должна воспроизводить ключевые фильтрационные свойства пласта и обеспечивать их быстрый анализ [1].

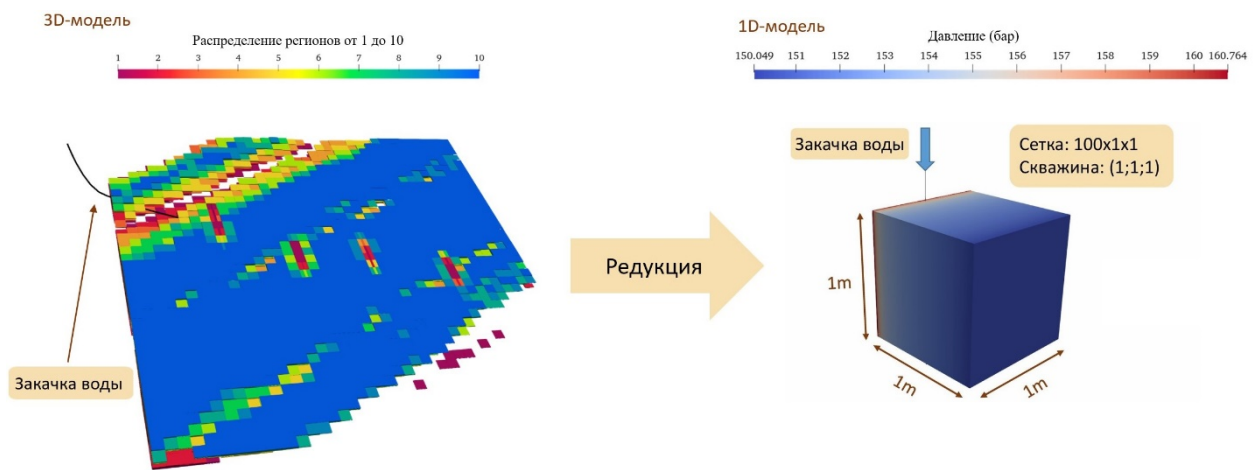


Рис. Схема редукции размерности пласта.

В работе рассматривается построение и сравнение диагностических кривых трехмерной неоднородной и одномерной редуцированной модели геологического пласта при однофазном изотермическом течении. Для этого в пласте в характерный момент времени выделяются регионы по распределению давления с последующим осреднением их параметров (см. Рис.). Данный подход позволяет рассчитать эффективные коэффициенты гидродинамической проводимости T_g между регионами и распределение объемов V_i , которые затем используются для настройки одномерной модели.

Показано, что существует инвариантная относительно числа регионов и характерного времени универсальная кривая, являющаяся аналогом диагностической кривой и определяемая произведением $T_g \cdot V$ от эффективного расстояния до скважины Ω . Это расстояние представляет собой объем пласта, вовлеченного в фильтрацию. В логарифмических координатах наклон этой кривой однозначно соответствует режиму течения (радиальный, линейный, сферический). Доказано, что данная кривая позволяет восстанавливать фильтрационные свойства исходной модели без потери значимой информации. Сравнение диагностических кривых подтверждает корректность предложенного подхода.

1. Per Arne Slotte, and Carl Fredrik Berg. Lecture notes in well-testing // Department of Geoscience and Petroleum NTNU.

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ СКОРОСТИ

Душин Н.С.

Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр РАН, Казань
e-mail: ndushin@bk.ru

Понимание процессов переноса импульса и энергии в отрывных турбулентных течениях и способов управления ими имеет ключевое значение для решения задач интенсификации теплообмена в энергетическом и технологическом оборудовании. Высокую актуальность в этой области имеют работы, в которых изучается влияние на отрыв потока различных способов внешнего воздействия. Однако очевидно, что локальные методы воздействия на поток сложно внедрить в реальные устройства. Возможным вариантом решения сложившейся проблемы является использование наложенных продольных пульсаций скорости, которые можно реализовать путем периодического изменения расхода рабочей среды или обнаружить их как следствие влияния факторов различной природы. В докладе рассматривается несколько ключевых аспектов, связанных с изучением периодического изменения скорости газа на отрыв потока в канале с дискретной шероховатостью.

В докладе мы будем отталкиваться от результатов визуализации течения в широких диапазонах изменения частоты и амплитуды внешнего воздействия, которые показали существование нескольких типов течения, кардинально отличающихся от привычной картины течения в стационарных условиях [1]. Далее рассмотрим вопросы создания обоснованной классификации выявленных режимов течения, установления границ между этими режимами и обсудим возможность связи выявленных границ с особенностями спектра естественных частот пульсаций скорости в окрестности точки отрыва течения в стационарном случае. Не углубляясь подробно в механизмы формирования течения на каждом из выделенных режимов рассмотрим интересные физические эффекты, показывающие возможность значительного сокращения длины отрывной области, интенсификации массообмена и удвоения частоты пульсаций скорости, по отношению к частоте внешнего воздействия. В заключительной части доклада будет продемонстрирован эффект перестройки кинематической структуры отрывного течения на стационарном режиме, получаемый за счет изменения высоты выступов в канале (подробности см. в [2]) и проведены параллели с эффектами, полученными при внешнем воздействии на поток.

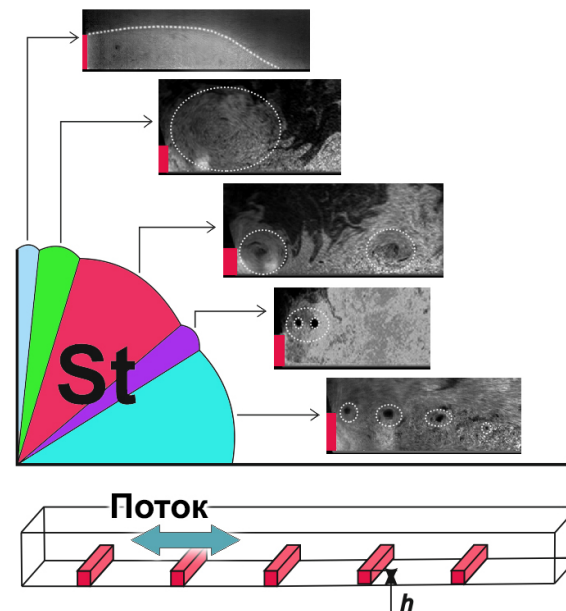


Рис. Эволюция кинематической структуры отрывного течения при изменении частоты наложенных продольных пульсаций скорости.

1. Душин Н.С., Михеев Н.И., Душина О.А., Давлетшин И.А. Прогнозирование режимов вихреобразования за препятствием в канале при гармоническом изменении расхода газа // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2025. №1. С. 52–59.

2. Душин Н.С. Структура и энергетические характеристики отрывного течения в канале с низкими поперечными выступами // Теплофизика и аэромеханика. 2025. Т. 26. № 4. С. 549–560.

ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ТЕЧЕНИЯ В УЗЛАХ УЧЕТА РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА

Душин Н.С., Никифоров И.В.

Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр РАН, Казань
e-mail: ndushin@bk.ru

Неотъемлемой частью процесса транспортировки природного газа является измерение расхода, значение которого используется для расчетов между поставщиком и потребителем газа, управления технологическими процессами, поиска и локализации утечек газа в трубопроводах. Самые точные современные расходомеры работают на ультразвуковом принципе. Однако, для обеспечения высокой точности измерения расхода необходимо не только выполнить калибровку расходомера на эталонном стенде, но и обеспечить подобие гидродинамической структуры течения в трубопроводе структуре потока в измерительной линии испытательного стенда. Работа технологического оборудования и обтекание местных сопротивлений может приводить к вибрациям трубопроводов и генерации акустических колебаний (шума). Изгибы трубопровода искажают профили скорости течения газа делая их асимметричными и в некоторых случаях закрученными. Перечисленные эффекты негативно отражаются на точности измерения расхода газа и по некоторым данным могут приводить к неопределенности измерений до 20 %.

Обзор нормативной документации и применяемых серийных решений для нивелирования искажений потока показал высокую актуальность разработки универсального устройства подготовки потока. Такое устройство было предложено в [1]. Результаты первых испытаний показали перспективность предложенной конструкции устройства, а также возможность расширения его функционала и эксплуатационных характеристик. Некоторые результаты таких исследований опубликованы, например, в [2]. Слушатели доклада будут ознакомлены с принципами, положенными в основу разработки. Будут продемонстрированы результаты исследования формы проточной части устройства с точки зрения нивелирования гидродинамических искажений потока для широкой номенклатуры воздействий, показаны достижения в части снижения уровня акустического шума в трубопроводе и повышения отношения сигнал-шум датчиков ультразвукового расходомера, рассказано о доработках проточной части, позволяющих нивелировать дефект профилей скорости потока и улучшить воспроизводимость течения на режиме ламинарно-турбулентного перехода. Последняя задача особенно интересна тем, что открывается возможность расширения динамического диапазона измерений расхода с высокой точностью.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-29-00873, <https://rscf.ru/project/25-29-00873/>.

1. Душин Н.С., Валеев А.А., Колчин С.А., Душина О.А. Разработка устройства подготовки потока для трубопроводов с источниками акустического шума // Теплоэнергетика. 2023, №11, С. 54–65.

2. Dushin N. et al. Enhanced acoustic and hydrodynamic performance of cylindrical flow conditioners using rubber and steel fillers for gas metering // Flow Measurement and Instrumentation. 2025, Vol. 102, P. 102768-1–102768-9.



Рис. Как устроено устройство потока цилиндрического типа и что оно дает.

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ МОДАМ

Елкин В.Ю.

Факультет аэромеханики и летательной техники МФТИ, Жуковский

e-mail: elkin.viu@phystech.edu

Интерес к проблеме ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) обусловлен её важностью как для фундаментальной науки, так и для авиационной индустрии. Исследования ЛТП в сверхзвуковом пограничном слое ведутся особенно интенсивно, поскольку с ним связан резкий рост трения и теплообмена, что существенно сказывается на характеристиках летательного аппарата.

Целостное изучение всех стадий ЛТП возможно с использованием прямого численного моделирования (ПЧМ). Однако возникает проблема анализа получаемых результатов ввиду колоссального объёма данных. Это привело к появлению методов модального анализа, суть которых заключается в разложении сложного течения на более простые структуры. В данной работе к анализу данных ПЧМ применяется один из таких методов – метод разложения по динамическим модам (DMD) [1].

Исследование направлено на изучение развития возмущений в сверхзвуковом пограничном слое на плоской пластине. Возмущения вводятся в пограничный слой генератором массового расхода, расположенным вблизи передней кромки и работающем на фиксированной частоте в течение одного периода, и представляют собой волновой пакет первой моды. Параметры набегающего потока выбраны в соответствии с полётными условиями на высоте 20 км при числе Маха $M = 3$. ПЧМ произведено на основе решения нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа [2]. С использованием DMD выполнен анализ двумерных полей возмущений продольной скорости и давления [3]. На основе извлечённых динамических мод сделан вывод об экспоненциальном росте амплитуды возмущений на линейной стадии. Выявлены продольные структуры, являющиеся признаком начала нелинейной стадии ЛТП. На рисунке представлены поля возмущений и доминантных мод.

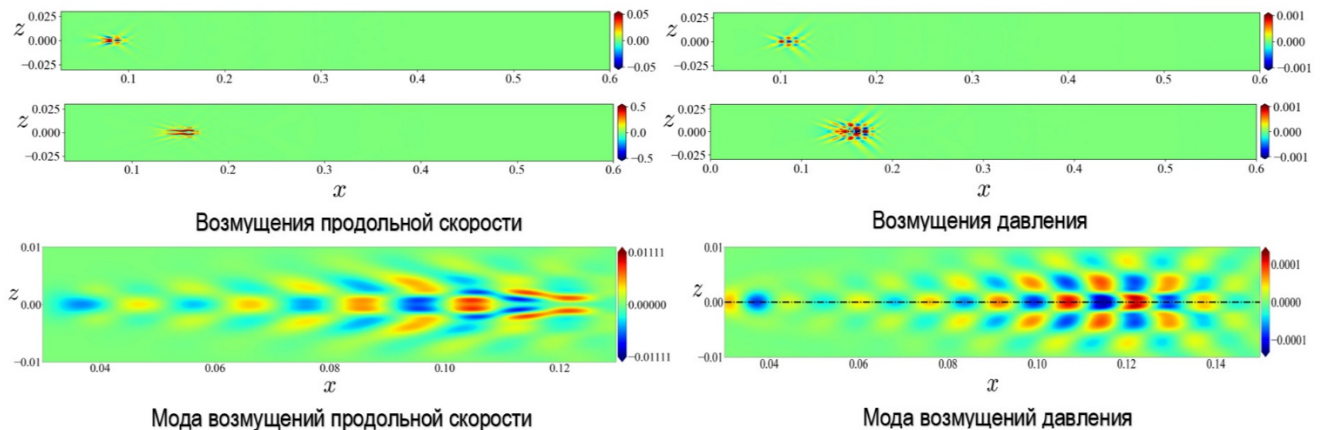


Рис. Поля возмущений и динамические моды, выявляющие продольные структуры и рост амплитуды волнового пакета.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект №23-79-10072).

1. Schmid P. J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data // J. Fluid Mech. 2010. Vol. 656. P. 5–28

2. Новиков А. В. Численное моделирование устойчивости и ламинарно-турбулентного перехода в гиперзвуковом пограничном слое: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.05.02 // Жуковский, 2017. 229 с.

3. И. В. Егоров, В. Ю. Елкин, И. М. Илюхин, С. Т. Калугин, Н. В. Пальчевская, Г. В. Толоко. Применение метода разложения по динамическим модам для численного моделирования ламинарно-турбулентного перехода // Учёные записки ЦАГИ. 2026. Т. LVII. №3. С. 3–11 [Принята к публикации]

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ, СОЗДАННЫХ МИНИСТРУЯМИ В ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ

Иванов О.О., Гареев Л.Р., Трифонов В.В., Веденеев В.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: ivanov@imec.msu.ru

Затопленные струи широко применяются в технике. В большинстве процессов (например, при распыле аэрозолей, горении топлива и т.д.) требуется их интенсивное перемешивание, для чего используют различные способы управления ими, которые могут быть поделены на пассивные, активные и комбинированные методы. К ним относятся, например, акустическое воздействие на струю, использование министруй, профилирование сопла, шевроны и выступы. Особый интерес представляет комбинация способов для достижения синергетических эффектов.

В данной работе изучается влияние министруй на затопленную струю с длинным ламинарным участком [1, 2]. Шесть министруй (Рис.) располагались недалеко от сопла равномерно по окружности, направление их выдува было радиальным. Министруи работали отдельно в режимах «0» или «1» (есть постоянный расход или течения через них нет), а вместе – в разных режимах: стационарный выдув через все шесть министруй (CB6, CB6-D с удвоенным расходом), стоячая волна (SW6-2.5 и SW6-5 с числами Струхала $St = 0.23$ и 0.46 , все министруи работают одновременно или выключены) и бегущая волна (PW6-2.5 и PW6-5, $n = 1$, три соседние министруи работали, а три оставшиеся нет).

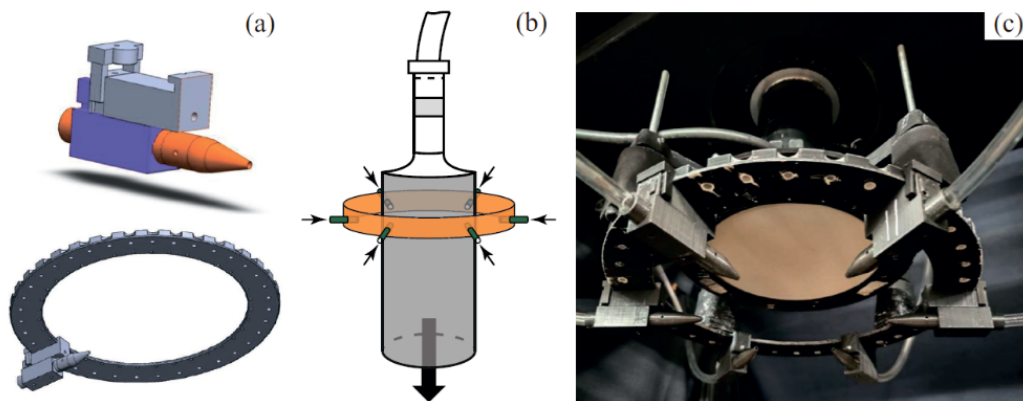


Рис. Сопло министруй с креплением и удерживающим кольцом (а); схема расположения 6 министруй относительно основной струи (b); фотография экспериментальной установки (с).

Все режимы значительно сокращали ламинарный участок. Наиболее быстрый переход к турбулентности дал SW6-5, сочетающий немодальный рост и волну Кельвина–Гельмгольца. При стационарном обдуве CB6 показал наименьший эффект; удвоение расхода (CB6-D) почти не изменило расход основной струи, но повысило турбулентность, хотя аналогичного результата можно достичь при меньшем расходе в нестационарных режимах (например, PW6-5). Наибольшее разрушение струи после перехода обеспечил PW6-2.5: по расходу он близок к SW6-5, но значительно превосходит его по интегральной турбулентности, что, вероятно, связано со спиральным сдвигом, создающим локальный твердотельный сдвиг в каждом сечении. По данным визуализации, ядро струи наиболее размыто именно в режиме PW6-2.5.

Работа выполнена при поддержке гранта 25-19-00278.

1. Zayko J., Teplovodskii S., Chicherina A., Vedeneev V., Reshmin A. Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers. // *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30. №. 4.
2. Ivanov O.O., Ashurov D.A., Gareev L.R., Vedeneev V.V. Non-modal perturbation growth in a laminar jet: an experimental study // *Journal of Fluid Mechanics*. 2023. Vol. 963. Art. 8.

ОПТИМИЗАЦИЯ КИНЕМАТИКИ РЫБОПОДОБНОГО ПЛАВАНИЯ

Исмагилов Д.А., Гумеров Н.Н., Бегерестанова Л.Ж.

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Институт математики и механики имени Н.И. Лобачевского, Казань
e-mail: DaAismagilov@kpfu.ru

Создание эффективных биомиметических движителей для подводных аппаратов требует глубокого понимания того, как кинематические параметры влияют на гидродинамическую эффективность [1]. В данной работе представлено численное исследование и оптимизация закона движения рыбоподобного пловца, совершающего волнообразные колебания. Целевой функцией выступает квазипропульсивная эффективность η_{QR} , вычисляемая как отношение мощности буксирования к мощности, затрачиваемой на движение в крейсерском режиме [2].

Рассматривается пловец с сечением в форме профиля NASA 0012. Кинематика срединной линии задаётся бегущей волной с полиномиальной огибающей амплитуды. За счет выбора коэффициентов c_1 , c_2 , λ можно определять различные режимы плавания. В данной работе будут рассмотрены скомброидный и угревидный режимы. Гидродинамика описывается уравнениями Навье–Стокса. Численное моделирование выполняется в OpenFOAM с использованием метода динамической сетки и алгоритма PIMPLE. Рассматривается движение с крейсерской скоростью, которая соответствует нулевой средней продольной силе.

Установлено, что при стандартных параметрах угревидный стиль обладает более высокой эффективностью, чем скомброидный, причём максимум η_{QR} для угревидного достигается при длине волны $\lambda = 2$, что нехарактерно для природных аналогов. Проведена оптимизация параметров c_1 , c_2 , λ симплекс-методом Нелдера–Мида. Получен новый закон движения, обеспечивающий прирост эффективности более чем на 10% по сравнению с угревидным и почти на 30% по сравнению со скомброидным пловцом, а также существенно более высокую крейсерскую скорость. Трёхмерные расчёты подтвердили устойчивость найденного режима (см. Рис.).

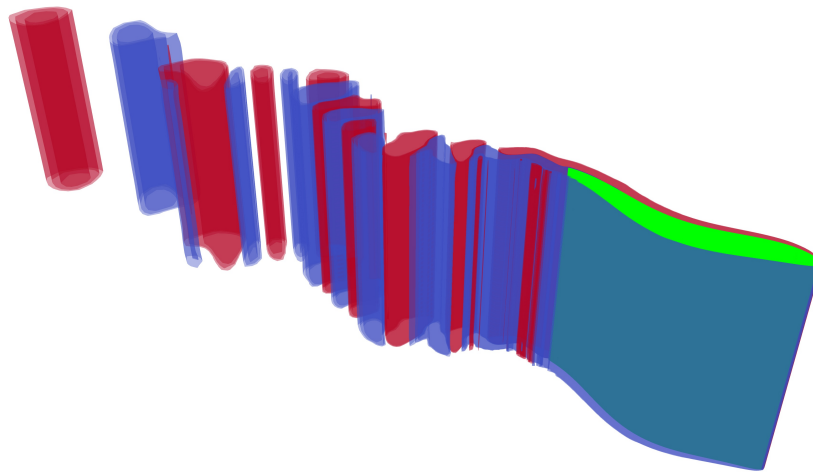


Рис. Визуализация z-компоненты поля завихренности в трехмерных расчетах оптимального пловца при крейсерской скорости.

1. Triantafyllou M.S., Weymouth G.D., Miao J. Biomimetic Survival Hydrodynamics and Flow Sensing // Annu. Rev. Fluid Mech. 2016. Vol. 48. P. 1–24.
2. Maertens A. P., Triantafyllou M. S., Yue D. K. P. Efficiency of fish propulsion // Bioinspiration & biomimetics. 2015. Vol. 10. № 4. Art. 046013.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА И ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Калугин С.Т., Толоко Г.В.

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва
e-mail: kalugin.st@phystech.ru

Проблема ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) занимает важное место в механике жидкости и газа, сохраняя фундаментальную научную значимость и востребованность в аэрокосмической отрасли. Её прикладная важность обусловлена тем, что смена режима течения в пограничном слое вызывает увеличение сопротивления трения, а при сверхзвуковых скоростях — и интенсивный рост тепловых потоков к обтекаемой поверхности. Целью данного исследования является изучение ЛТП и турбулентности, возникающих из-за возмущений в набегающем потоке.

В работе рассматриваются результаты численного моделирования ламинарно-турбулентного перехода и турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое при числе Маха 3, числе Рейнольдса $Re_L = 2.37 \times 10^6$ и температуре набегающего потока $T_\infty = 103.6$ К [1]. ЛТП инициирован акустическими возмущениями в набегающем потоке. Расчет выполнен в рамках полных нестационарных уравнений Навье-Стокса для совершенного газа [2].

В работе изучено развитие возмущений в пограничном слое от линейной стадии до турбулентности. На начальном этапе зафиксировано взаимодействие косых волн первой моды с образованием продольных структур по сценарию косого распада. На сильнонелинейной стадии появляются и усиливаются кратные гармоники, происходит разрушение ламинарного течения и формируется турбулентность (см. Рис.), что подтверждается наличием логарифмического профиля скорости и согласованием коэффициента трения с данными для полностью турбулентного обтекания [1, 3, 4]. С помощью спектрального и корреляционного анализа показана воспроизводимость течения во времени вплоть до области турбулентности.

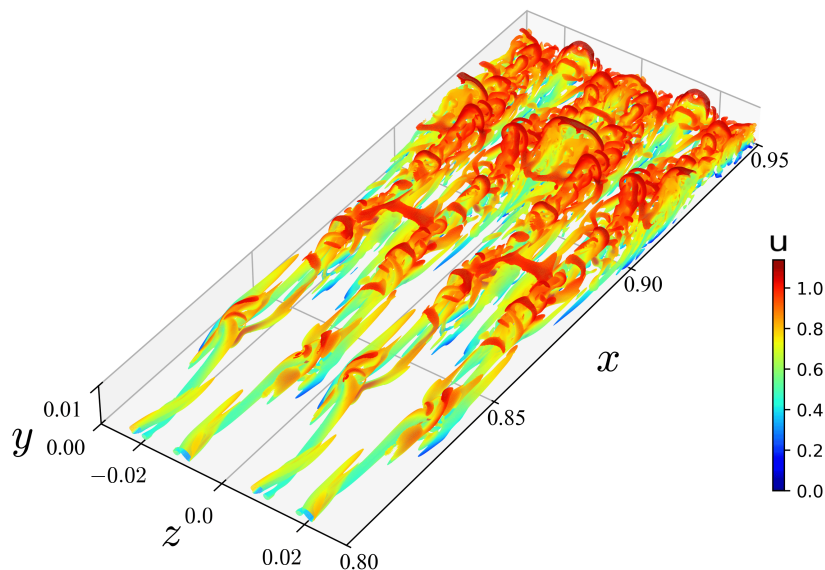


Рис. Q-критерий (изоповерхности $Q=2500$). Цветовая палитра соответствует продольной скорости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №23-79-10072-П.).

1. Mayer C. S. J., Von Terzi D. A., Fasel H. F. Direct numerical simulation of complete transition to turbulence via oblique breakdown at Mach 3 // J. Fluid Mech. 2011. Vol. 674. P. 5–42.
2. Башкин В. А., Егоров И. В. Численное моделирование динамики вязкого совершенного газа // М: ФИЗМАТЛИТ, 2012.
3. White F. M. Viscous Fluid Flow. McGraw-Hill. 1991.
4. Pope S. B. Turbulent flows. // 1. publ., 12. print. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2015. 771 p.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВИБРАЦИЙ ВЕРТОЛЕТА НА БАЗЕ МОДЕЛИ СОВМЕСТНЫХ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАСТЕЙ И ВТУЛКИ НЕСУЩЕГО ВИНТА НА УПРУГОДЕМПФИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ

Каргаев М.В.^{1,2}

¹ АО «НЦВ Миль и Камов», пгт. Томилино

² Московский авиационный институт, Москва

e-mail: kargaev_mv@mail.ru

Конкурентным преимуществом гражданских и транспортных вертолетов является низкий уровень вибраций в кабинах экипажа и пассажиров на всех эксплуатационных режимах. Основными источниками их возникновения являются двигатели, редуктора, несущий и рулевой винты вертолета. Стандартом [1] регламентируются допустимые уровни вибраций, характеризуемые среднеквадратическими значениями амплитуд виброускорений в диапазоне частот 1,4-180 Гц, действующие на пассажиров и членов экипажа вертолета в условиях установившегося горизонтального полета.

Снижение вибраций в контрольных точках вертолета достижимо [2] как за счет изменения параметров основных источников вибраций, в том числе за счет управления ими, так и за счет применения динамических гасителей вибраций и вибропоглощающих материалов. Решение задачи обеспечения приемлемого уровня вибраций в контрольных точках вертолета предпочтительно выполнять на этапе его проектирования. Для этого необходимо иметь соответствующие математические модели и методы расчета вибраций.

В настоящей работе предложен метод расчета вибраций в контрольных точках вертолета, вызванных совместными аэроупругими колебаниями лопастей и втулки несущего винта на упругодемпфирующем основании [3].

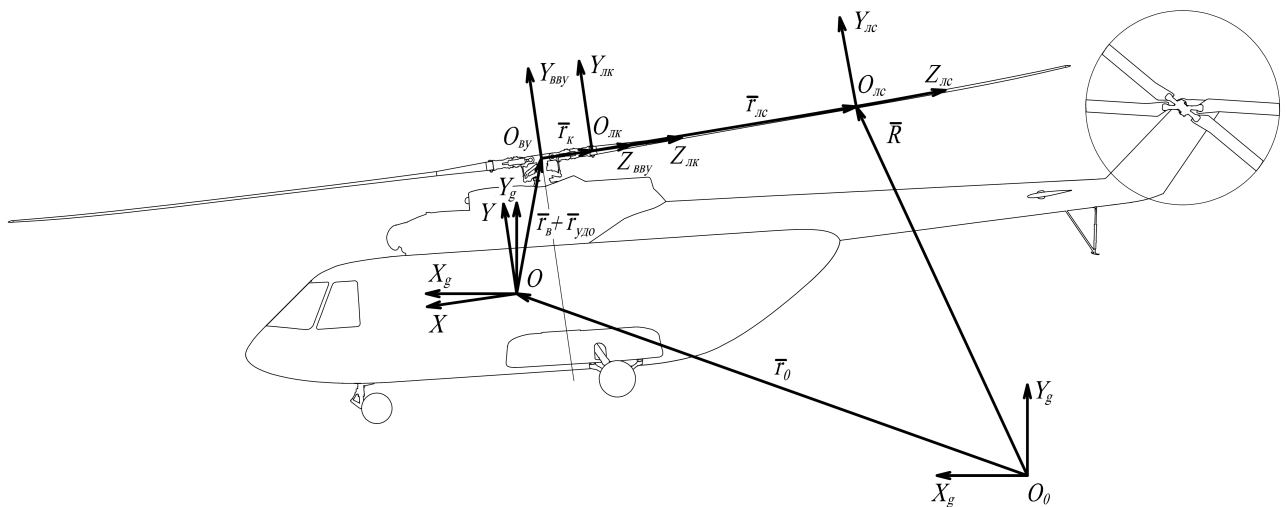


Рис. Векторная сумма, характеризующая движение центра жесткости сечения лопасти несущего винта.

Приведены результаты расчетов вибраций в кабинах экипажа и пассажиров вертолета типа Ми-171А3 на режимах висения и горизонтального полета.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00045, <https://rscf.ru/project/24-79-00045/>.

1. ГОСТ 23718–2014. Самолеты и вертолеты пассажирские и транспортные. Допустимые уровни вибрации в салонах и кабинах экипажа и методы измерения вибраций // М.: Стандартинформ, 2015. 23 с.

2. Вертолеты: Труды ОКБ МВЗ имени М.Л. Миля. Вып. 2 // Под ред. А.Г. Самусенко. М.: Машиностроение-Полет. 2012. 334 с.

3. Каргаев М.В. Математическая модель совместных аэроупругих колебаний лопастей и втулки несущего винта на упругодемпфирующем основании при пространственном движении вертолета// Вестник Московского авиационного института. 2026. Т.33. №2. С. 43–54.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА В ВОЗДУХОЗАБОРНИКЕ СПУТНИКОВ ДЛЯ СВЕРХНИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ

Косьянчук В.В.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: vasiliy_ksnk@mail.ru

Длительные полеты космических аппаратов (КА) на ультранизких околоземных орбитах (УНОО) с высотой 150 – 250 км открывают широкие перспективы для развития телекоммуникаций, транспортных операций, а также широкого круга научных исследований, и потому освоение УНОО является одной из приоритетных задач для ведущих мировых держав

Вместе с тем, основной проблемой полетов на УНОО является аэродинамическое сопротивление остаточной атмосферы, делающее длительное нахождение КА на орбите невозможным без наличия двигателей в составе КА, поддерживающих его движение. Возможным решением, активно рассматривающимся в последние годы по всему миру, являются воздушные электрореактивные двигатели (ВЭРД), использующие в качестве рабочего тела поток набегающих заборных газов [1]. Однако в настоящее время в мире пока отсутствуют действующие модели ВЭРД, из-за необходимости решения целого спектра взаимосвязанных фундаментальных и инженерных задач. Одним из инструментов для решения поставленных задач является численное моделирование процессов, происходящих в ВЭРД [2]. В данной работе представлены некоторые результаты моделирования течения разреженного газа в ВЭРД методом прямого статистического моделирования Монте-Карло (ПСМ) с учетом процессов ионизации и диссоциации.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 26-71-10075).

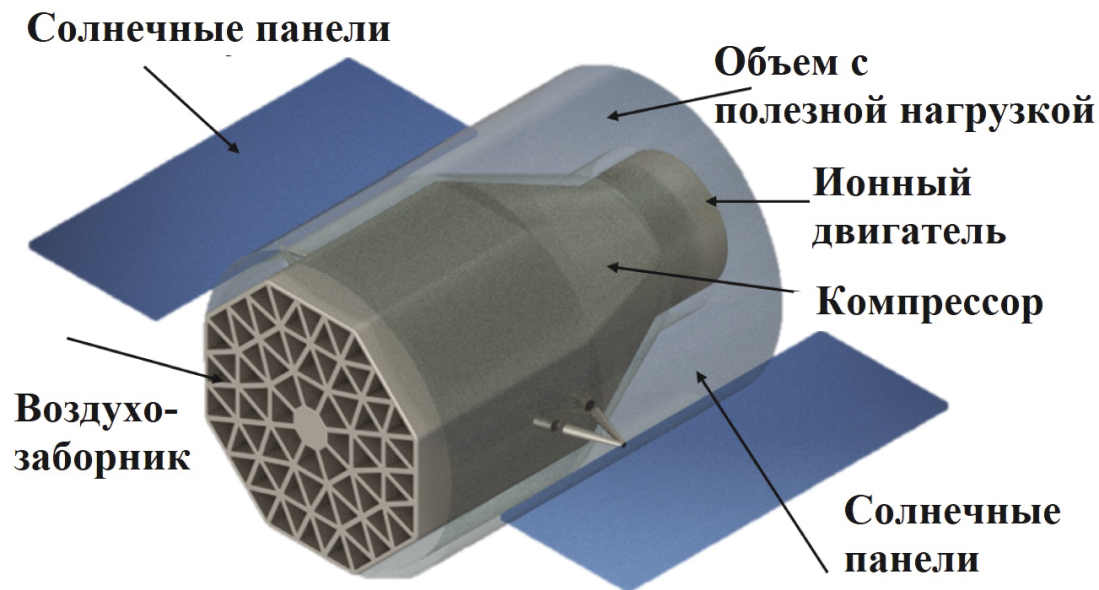


Рис. 1. Модель спутника с ВЭРД.

1. Filatyev A. S. et al. Research and development of aerospace vehicles with air breathing electric propulsion: Yesterday, today, and tomorrow // Progress in Aerospace Sciences. 2023. T. 136. C. 100877.

2. Yakunchikov A., Kosyanchuk V., Filatyev A., & Golikov A. Simulation of rarefied gas flow inside the satellite air intake in ultra-low Earth orbit // Acta Astronautica. 2025. T. 226. C. 102–112.

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ХИМИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Кравченко Д.С., Кустова Е.В.

Математико-механический факультет СПбГУ, Санкт-Петербург

e-mail: kravchenk06.denis@gmail.com

Моделирование сильнонеравновесных течений смесей с содержанием углекислого газа востребовано при описании входа аппаратов в атмосферы Марса и Венеры и в низкотемпературных течениях (сопла, газодинамические лазеры). Основная трудность – корректный учёт колебательного возбуждения CO_2 и учёт связи колебательного возбуждения с химическими реакциями. В работе развит гибридный многотемпературный (ГМТ) подход [1, 2], сочетающий поуровневое и многотемпературное описания за счёт осреднения поуровневых коэффициентов скорости. Колебательная кинетика CO_2 описывается тремя независимыми колебательными температурами; уравнения формулируются относительно средних чисел колебательных квантов, что допускает использование различных квазистационарных распределений.

Поуровневые коэффициенты скорости колебательных энергообменов вычисляются по модели нагруженного гармонического осциллятора (ФНО) [3], обобщённой на многоатомные газы. Оптимальные параметры для исследуемых процессов определены с помощью машинного обучения в диапазоне от 300 до 5000 К. Модель валидирована по экспериментальным временам релаксации в чистом CO_2 и смеси CO_2/Ar , а также на основе сравнения с экспериментами в ударных трубах [4].

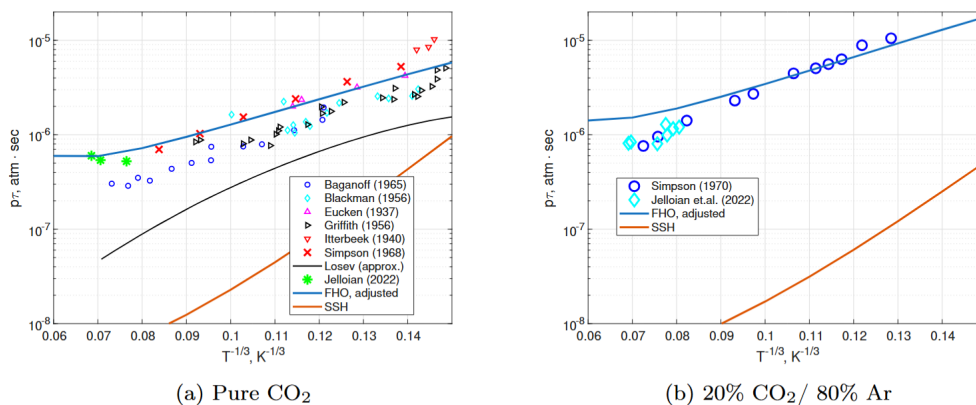


Рис. Время колебательной релаксации в чистом CO_2 и смеси CO_2/Ar , сравнение с экспериментальными данными.

По результатам моделирования удалось продемонстрировать, что ГМТ модель хорошо описывает межмодовую неравновесность, которую нельзя описать с использованием распространенной в CFD двухтемпературной модели. Анализ адиабатической релаксации выявил немонотонное поведение колебательных температур в условиях, характерных для расширения в соплах и плазмы; роль межмолекулярных обменов существенна в смесях с сопоставимыми долями CO_2 , CO и O_2 . Оценено влияние ангармоничности – при сильных отклонениях от равновесия эффекты ангармоничности могут значительно влиять на химические реакции, в то время как для колебательных энергообменов за ударными волнами эффект ангармоничности мал (не превышает 2%).

Работа выполнена при поддержке СПбГУ (грант № 148177671).

1. Kosareva A., Kunova O., Kustova E., Nagnibeda E. Hybrid approach to accurate modeling of coupled vibrational-chemical kinetics in carbon dioxide // *Physics of Fluids*. 2022. Vol. 34. №. 2.
2. Kravchenko D., Kunova O., Kustova E. Non-equilibrium CO_2 kinetics: Assessment of advanced multi-temperature models of vibrational-chemical relaxation // *Physics of Fluids*. 2026. Vol. 38. №. 3.
3. Adamovich I., Macheret S., Rich J., Treanor C. Vibrational energy transfer rates using a forced harmonic oscillator model // *J. Thermophys. Heat Transfer*. 1998. Vol. 12. P. 57–65.
4. Jelloian C. C., Minesi N. Q., Spearrin R. M. High-speed mid-infrared laser absorption spectroscopy of CO_2 for shock-induced thermal non-equilibrium studies of planetary entry: CC Jelloian et al // *Applied Physics B*. 2022. Vol. 128. №. 12. P. 216.

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ СИМУЛЯТОРА МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В СКВАЖИНАХ

Краснопольский Б.И.¹, Карипидис П.А.¹, Быков Д.В.², Арсалан М.³

¹ НИИ механики МГУ, Москва

² ООО «Арамко Инновейшнз», Москва

³ Сауди Арамко, Дахран, Саудовская Аравия

e-mail: krasnopolsky@imec.msu.ru

Проектирование и безопасная эксплуатация скважин требуют проведения всестороннего моделирования возможных режимов ее работы. Применяемое для таких расчетов специализированное программное обеспечение должно сочетать множество факторов, включая необходимую полноту математической модели и экономичные численные методы, обеспечивающие возможность проведения расчетов за удовлетворительное время. В данном докладе будут представлены некоторые результаты разработки такого специализированного программного обеспечения для моделирования течений в скважинах. Будут приведены соответствующие математические модели для описания нестационарных многофазных неизотермических течений, предложенные для этих моделей численные алгоритмы [1, 2], а также ряд примеров расчета типовых задач моделирования течений в скважинах.

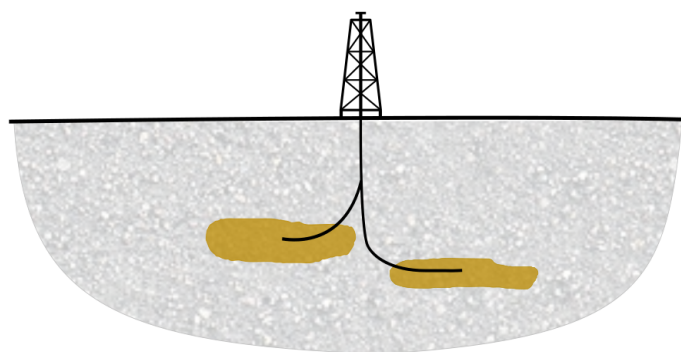


Рис. Многоствольная скважина.

1. Сравнение различных формулировок модели дрейфа при расчёте нестационарных течений в трубах / Б. И. Краснопольский, П. А. Карипидис, Д. В. Быков и др. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2025. Т. 26, № 7. С. 2025–26.

2. Combining machine learning and a multiphase flow model for hybrid virtual flow metering / A. Gryzlov, S. Safonov, B. Krasnopolsky, M. Arsalan // SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2023. SPE: 2023. P. SPE–216672–MS.

ВЫСШИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ МЕТОДА АСИМПТОТИЧЕСКОГО ОСРЕДНЕНИЯ ПЛАСТИН

Кузьмин М.А.^{1,2}

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

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

e-mail: maximim10@mail.ru

В данной работе исследуется применение метода асимптотического осреднения (МАО) к слоистым ортотропным пластинам. Широко известны теории пластин Кирхгофа-Лява и Рейсснера-Миндлина, основанные на сильных кинематических допущениях. Известно, что сильная ортотропия приводит к тем же последствиям, как и увеличение толщины пластины. В связи с этим для пластин, неудовлетворительно описываемых указанными теориями, разработано большое количество теорий 3-го порядка на аналогичной основе. МАО позволяет подойти к построению теории пластин с математической стороны, без введения гипотез.

Классическим подходом в МАО считается разложение искомых полей перемещений и напряжений в ряды по степеням малого параметра (относительная толщина пластины) вплоть до 3-й степени. Ответ о достаточности такого разложения дают впервые полученные 4-е и 5-е приближения МАО в связанной постановке задачи изгиба-растяжения. Проведено сравнение результатов с численными экспериментами по трехмерной конечно-элементной модели в линейной постановке.

На примере поперечного цилиндрического изгиба прямоугольной трехслойной пластины с симметричной укладкой слоев показано, что:

1. В плоскости пластины возникают перемещения в 3-м приближении МАО в случае, если давление действует на лицевую поверхность пластины, чего не наблюдается в классических теориях;
2. Для четвертого приближения и выше состояния изгиба и растяжения в срединной плоскости не разделяются;
3. 4-е приближение МАО вносит качественное уточнение в напряжения межслоевого сдвига (см. Рис.). А именно, распределение касательных напряжений по толщине оказывается несимметричным.

Далее, исследована двухслойная несимметричная укладка слоев пластины, а также 5-е приближение МАО для обоих типов укладок.

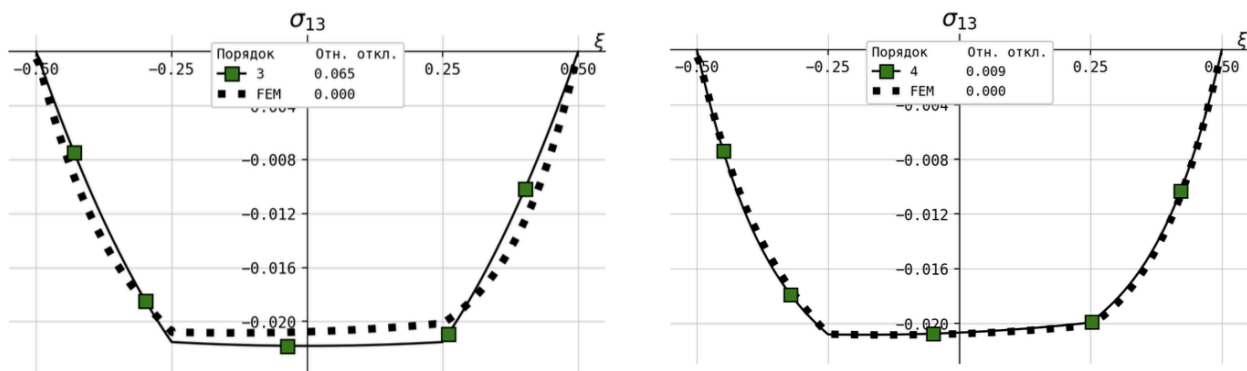


Рис. Распределение напряжений межслоевого сдвига по толщине пластины. Сравнение решения 3-го и 4-го порядков МАО с конечно-элементным расчетом.

1. Шешенин С.В., Кузьмин М.А., Артамонова Н.Б. Высшие асимптотические приближения в задаче о поперечном изгибе пластины // Механика композиционных материалов и конструкций. 2024. Т. 30. № 2. С. 222–236.

2. Sheshenin S. V., Artamonova N. B., Kuz'min M. A. High order asymptotic approximation for transverse plate bending // Mechanics of Composite Materials. 2025. Vol. 61. №. 2. P. 335–350.

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПОЛЁТА В АТМОСФЕРЕ МАРСА

Култашев А.А.¹, Амелюшкин И.А.^{1,2}

¹ Московский авиационный институт, Москва

² Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский

e-mail: Albert.Kultashev@yandex.ru

Марс обладает особыми условиями для обеспечения управляемого полёта в атмосфере для аппаратов самолётного и вертолётного типа. Сочетание низкой плотности атмосферы (в 60 раз меньше земной) большого диапазона температур и низкой гравитации (в 2.6 раз меньше земной) как упрощает, так и усложняет задачу по проектированию летательного аппарата [1]. Записав выражения связи параметров динамики летательного аппарата, пренебрегая сжимаемостью потока при небольших дозвуковых скоростях и предполагая независимость коэффициентов сопротивления от числа Рейнольдса, можно считать $\rho V^2/gL \approx \text{const}$, откуда следует, что для обеспечения той же подъёмной силы, необходимо лететь со скоростью в ~ 7.81 раз больше. В настоящей работе создана модель летательного аппарата с искривленным крылом [2] и своеобразными кольцевыми скользящими шасси, обеспечивающими низкое сопротивление при обтекании, малый вес и возможность движения по неровной поверхности.

Создание БПЛА для Марса обусловлено рядом научных и практических задач, которые невозможно эффективно решить с помощью только наземных роверов или орбитальных аппаратов: проведение исследование труднодоступных районов. Автономный летательный аппарат в атмосфере Марса является удобным инструментом для исследования планеты. Для оптимизации параметров летательного аппарата и выбора режимов полета сформулирована система уравнений нелинейных связей технических параметров летательного аппарата с учетом особенностей атмосферы. Низкое содержание кислорода в атмосфере Марса ($\sim 0.13\%$ по объёму) накладывает ограничения по виду силовых установок доступных к применению, как правило, вынуждает использовать только электродвигатели.

Особую роль играют пылевые бури и сальтация частиц оксида железа, которые могут привести к эрозии обтекаемого тела и привести к значительному возрастанию тепловых потоков в результате аэротермодинамического нагрева и торможения частиц при столкновении. Проведена оценка высоты области повышенной концентрации пыли в пограничном слое у поверхности. Для проведения летных экспериментов в настоящей работе создана модель летательного аппарата рамной схемы (рис. б). Показаны формы, снижающие сопротивление тел в дисперсных средах с учетом свойств материала обтекаемого тела и свойств частиц в атмосфере (рис. в).



Рис. а) - зависимости характерного размера от скорости летательного аппарата для обеспечения горизонтального полёта, для атмосфер Земли и Марса, б) - фотография модели самолета-носителя, предназначенного для запуска сверхзвуковых автономных летательных аппаратов, в) – пример зависимости коэффициента сопротивления степенного тела в двухфазном потоке от показателя степени q и отношения максимальных продольного и поперечного размера.

1. Justh H. L., Suggs R. W. Mars Global Reference Atmospheric Model (Mars-GRAM) User Guide // NASA TM. 2021. 88 p.

2. Амелюшкин И.А., Дружинин О.В. Адаптивное крыло с профилем изменяемой кривизны // Патент на изобретение RU 2777139 C1, 01.08.2022. Заявка № 2021119711 от 06.07.2021.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ТРАКТЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

Ларкин Д., Еремин И.В.

Томский государственный университет, Томск

e-mail: d.m.i.t.r.y.l.a.r.k.i.n@mail.ru

В настоящее время значительная часть исследований двухфазных процессов в энергоустановках ограничена рассмотрением отдельных элементов газодинамического тракта, таких как камеры сгорания или сопловые блоки. Работы, посвященные сквозному моделированию двухфазных течений во всем тракте, остаются немногочисленными. Актуальность разработки методик сквозного расчета обусловлена тем, что при исследовании течений в соплах, входные данные (функция распределения к-фазы, скоростное и температурное отставание и т.д.) существенно зависят от течения в камере сгорания [1].

В настоящей работе разработана квазиодномерная методика моделирования нестационарного течения двухфазной среды. В качестве несущей фазы рассматривается невязкий сжимаемый идеальный газ, а дисперсная фаза представлена сферическими каплями. Взаимодействие между фазами, включающее обмен массой, импульсом и энергией, учитывается через источники членов. Изменение размера капель конденсированной фазы описывается уравнением их горения [2]. При численном интегрировании уравнений газовой фазы используется схема Маккормака второго порядка точности, а для уравнений конденсированной фазы применяется неявная схема.

На основе разработанной методики проведены расчеты нестационарного течения двухфазной среды в газодинамическом тракте модельной энергоустановки. На рисунке (а) представлена зависимость полноты сгорания агломератов алюминия φ от начального диаметра ($d = 50, 100$ и 200 мкм) при вводе в поток в сечении $x/R_{\min} = -20$. Видно, что с увеличением начального диаметра, полнота сгорания существенно снижается. На рисунке (б) показано влияние места ввода капель диаметром 200 мкм на процесс их горения вдоль канала. Отмечается, что полнота сгорания зависит от сечения, через которое агломерат алюминия попадает в поток, что согласуется с теоретическими данными по времени пребывания капель в газодинамическом тракте.

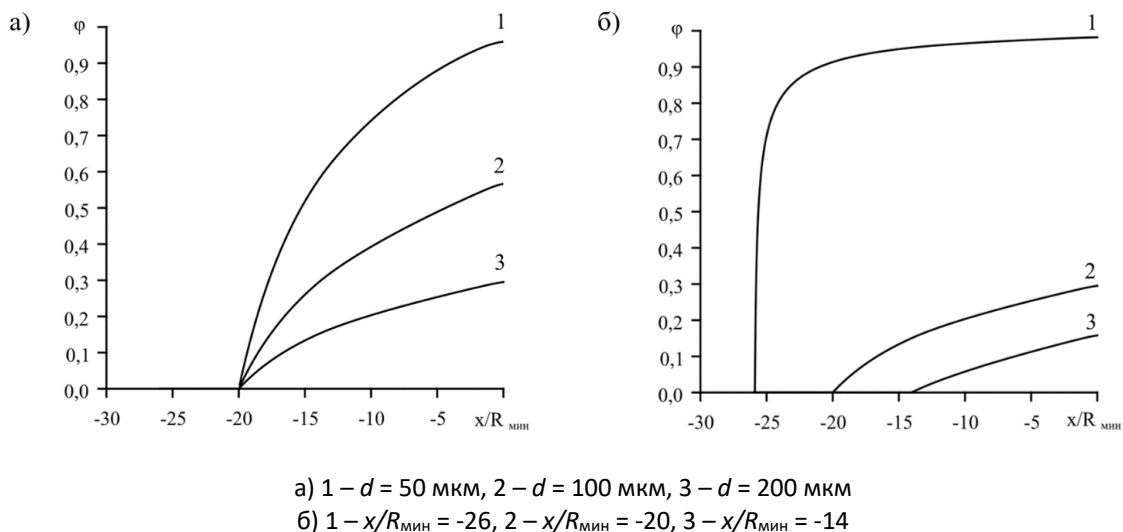


Рис. Зависимость коэффициента полноты сгорания агломератов алюминия при их движении вдоль газодинамического тракта.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0004.

1. Ларкин Д.О., Еремин И.В. Исследование двухфазного течения в соплах РДТТ // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 98. С. 108–119.

2. Вилюнов В.Н., Ворожцов А.Б., Фещенко Ю.В. Моделирование двухфазного течения смеси газа с горящими частицами металла в полузамкнутом канале // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25. № 3. С. 39–43.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Ларкин Д., Костюшин К.В.

Томский государственный университет, Томск

e-mail: d.m.i.t.r.y.l.a.r.k.i.n@mail.ru

Для анализа энерготяговых характеристик ракетных двигателей необходимо учитывать происходящие физико-химические процессы во всем газодинамическом тракте энергоустановки [1]. Многокомпонентность продуктов сгорания, с учетом большого количества индивидуальных веществ существенно усложняет численные расчеты реагирующих течений.

В настоящей работе предлагается подход, основанный на замене прямого термодинамического расчета состава продуктов сгорания моделью машинного обучения. В качестве эталонного решателя используется программа Тетра. Входными параметрами модели служат вектор массовых долей химических элементов (условная формула, нормированная на единицу), а также температура и давление. Выходом являются равновесный состав смеси (массовые доли 2612 индивидуальных веществ) и 25 термодинамических и теплофизических характеристик (теплоемкость, показатель адиабаты, газовая постоянная, скорость звука, вязкость, теплопроводность, число Прандтля и др.).

Обучающая выборка сформирована параметрическим перебором состава смеси, температуры и давления. Состав задается массовыми долями компонентов; для каждого состава равновесные характеристики варьируются в диапазоне 100–5000 К для температуры и 0.1–15 Мпа для давления. Для разнообразия данных используются как составы из всех пар элементов с фиксированными концентрациями, так и случайные смеси из 2–5 веществ, слишком похожие по составу смеси отбраковываются. Суммарно получено 50 млн расчетных точек, охватывающих область составов, представляющих практический интерес. Архитектура модели представляет собой полносвязный кодировщик с остаточными блоками и функцией активации SwiGLU и содержит около 53 млн обучаемых параметров. Для совместного обучения на разнородных целевых величинах используется многозадачная функция потерь с адаптивным взвешиванием на основе обучаемой неопределенности. Повышение устойчивости обучения и качества обобщения достигается за счет применения экспоненциального скользящего усреднения весов (Exponential Moving Average, EMA). Предсказание компонентного состава выполняется в виде распределения вероятностей по словарю веществ с использованием функции Softmax, тогда как скалярные физико-химические свойства прогнозируются в нормированном пространстве признаков с последующим преобразованием результатов в соответствующие физические единицы измерения. Обученная модель экспортирована в формат ONNX и интегрирована в веб-интерфейс для интерактивного расчета (см. Рис.).

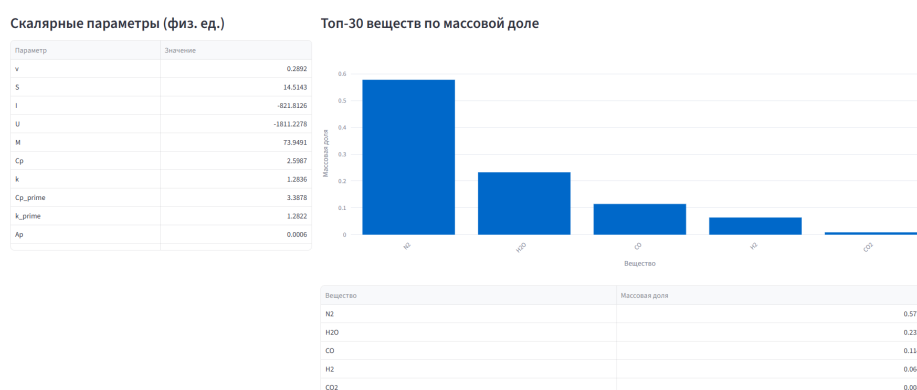


Рис. Веб интерфейс для работы с обученной моделью.

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» № 5.3.1.25 СТП.

1. Червакова А. В., Костюшин К. В. Расчет потерь на химическую неравновесность в соплах ракетных двигателей // XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». 2021. С 91–93.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКОВ В ТВС С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Волков С.М., Евдокименко И.А.,
Светоносов А.И., Чинак А.В.

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
e-mail: lobanov@itp.nsc.ru

В мире активно проводятся расчетно-экспериментальные кампании, направленные на получение данных по локальной гидродинамике и теплообмену для валидации программ для ЭВМ CFD класса, применяемых при теплогидравлическом обосновании активных зон различных реакторных установок. Одними из наиболее перспективных методов проведения экспериментальных исследований являются лазерно-оптические: лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) и цифровая трассерная визуализация (PIV).

Целью данной работы является экспериментальное исследование локальных гидродинамических параметров в вертикальных пучках твэлов с различным типом дистанционирования.

Разработаны, отлажены и использованы для исследования локальной гидродинамики течения модельного теплоносителя лазерно-оптические (ЛДА, PIV) методики измерения скорости течения в межканальных промежутках. На стенде ИТ СО РАН с универсальным рабочим участком, представляющим 7-ми и 37-ми ячейстые фрагменты экспериментальных моделей ТВС, проведено детальное экспериментальное исследование параметров потоков жидкости в сборках стержней с дистанционирующими решетками. Получены данные по влиянию дистанционирующих решеток на вертикальную составляющую скорости течения по высоте ТВС.

Результаты исследований указывают, что при обтекании дистанционирующих решеток потоком теплоносителя наблюдается неравномерное распределение осевой скорости. Зона действия этой неравномерности начинается сразу же за решеткой и распространяется на расстояние протяженностью в несколько гидравлических диаметров вниз по потоку. На расстоянии больше 10 гидравлических диаметров от решетки отклонение максимального и минимального значений скорости жидкости от среднего не превышает 10 %.

Выполнены детальные измерения гидродинамических параметров восходящего течения жидкости в модели с семью самодистанционирующимися имитаторами твэлов. С использованием высокоразрешающих бесконтактных лазерно-оптических методов получены данные о распределениях осредненной и пульсационной скоростей, спектрам пульсаций скорости при различных расходах (числах Рейнольдса) жидкости, имитирующих режимы вынужденной конвекции и естественной циркуляции, которые могут возникать в реакторной установке. Показаны хорошо соотносимые с геометрической формой имитаторов твэлов распределения осевой и горизонтальной компонент скорости теплоносителя и их пульсаций.

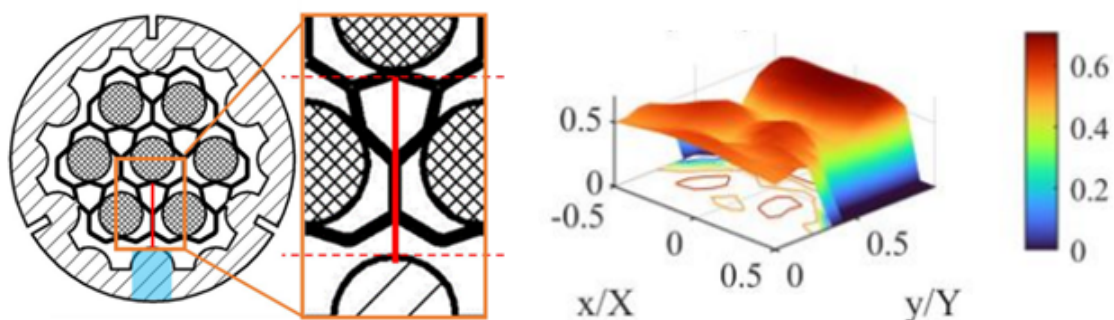


Рис. Распределение локальной скорости жидкости ниже по потоку относительно дистанционирующей решетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2025-572.

1. Кашинский О.Н., Куликов Д.В., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Светоносов А.И. Распределение скорости жидкости в экспериментальной модели тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 2. С. 227–231.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ РУ

Лонин К.А., Ереев М.Н., Козин А.В., Соловьев С.А., Патрушев В.Л.
АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород
e-mail: lonin_ka@okbm.nnov.ru

Оборудование современных реакторных установок (РУ) эксплуатируются в условиях сложного сочетания термомеханических воздействий. Переменные температурные поля, внутреннее давление, вибрации, циклические режимы формируют термомеханическое нагружение, определяющее прочность и ресурс оборудования.

Основными объектами анализа являются корпуса и элементы реакторов, электронасосы, приводы системы управления и защиты и т.д. Наиболее опасными факторами считаются температурные градиенты, вызывающие большие напряжения, а также циклические нагрузки, приводящие к накоплению усталостных повреждений материала.

Системный анализ термомеханического нагружения (рис.) на этапах проектирования включает:

- анализ эксплуатационных и аварийных режимов;
- разработка 2D и 3D цифровых моделей оборудования;
- получение гарантированных физико-механических свойств материалов при рабочих температурах;
- адаптация программного обеспечения;
- расчетное моделирование температурных и напряженно-деформированных состояний;
- разработка технологии численного моделирования;
- анализ прочности и подтверждение ресурсных характеристик;
- анализ нормативной базы.

Использование численного моделирования с использованием результатов экспериментальных работ на отдельном оборудовании позволяет учитывать нагрузки приходящие на оборудование без проведения дорогостоящих натурных испытаний.

Анализ термомеханического нагружения позволяет своевременно выявлять наиболее опасные режимы эксплуатации и тем самым повысить надежность и безопасность оборудования РУ.

Системный подход к анализу прочности конструкций от различных факторов нагружения дает возможность учитывать и прогнозировать изменение технического состояния оборудования в течение всего срока его эксплуатации и подтвердить возможность его продления.

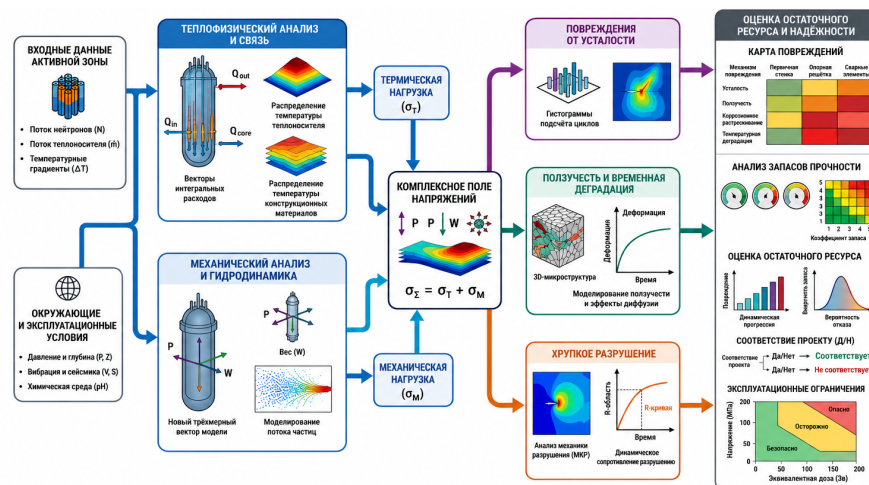


Рис. Этапы системного анализа термомеханического нагружения.

1. Ереев М.Н., Лонин К.А., Потамов Д.О., Патрушев В.Л., Соловьев С.А., Щекин Д.В. Расчетно-экспериментальное обоснование сейсмостойкости оборудования ЯЭУ // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2025. № 5. С. 134–143.

2. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок // М.: «Энергоатомиздат». 1989.

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ НОРМАЛЬНОГО СЖАТИЯ

Глаголев В.В., Лутхов А.И.

Тульский государственный университет, Тула
e-mail: tip460@mail.ru

Анализ критического состояния трещин, возникающих при сжатии в однородных материалах, демонстрирует существенные различия в механизмах их образования по сравнению с трещинами, образующимися при растяжении.

Композиты с адгезионными слоями (АС) демонстрируют значительное превышение критического значения J -интеграла трещиноподобного дефекта при поперечном сдвиге (J_{II}), по сравнению с нормальным растяжением (J_{IC}). Исследование [1] связывает эту особенность с влиянием гидростатического давления, которое оказывает существенное воздействие на АС при нормальном растяжении, в то время как при поперечном сдвиге оно отсутствует. Исходя из установленной зависимости между напряженно-деформированным состоянием вершины трещины, ее относительно малой толщины и величины инвариантного интеграла, как показано в [1], предложен подход декомпозиции инвариантного интеграла на компоненты, каждая из которых отвечает за удельную (к единице поверхности) энергию типа удельной энергии объема и формы. В результате этого подхода был разработан критерий разрушения для материалов, подвергающихся смешанному нагружению I+II. Поскольку гидростатическое сжатие повышает прочность материала, компоненты, отвечающие за удельную энергию типа объема инвариантного интеграла, умножаются на величину сигнатуры гидростатического давления σ . При нагружении нормальным растяжением и поперечным сдвигом, при условии неотрицательного гидростатического давления, достижение инвариантным интегралом предельных величин J_{IC} и J_{II} , необходимых для выполнения критерия, выполняется тождественно. В данной работе проанализирована величина инвариантного интеграла при нормальном сжатии J_{IC}^{compr} , учитывая предельные величины J_{IC} и J_{II} , для трещины, представленной математическим разрезом в адгезионном слое композита, обладающего линейно-упругими свойствами.

Для нахождения параметров «разрыхления» критерия разрушения использовались экспериментальные данные, где критическое состояние смешанной моды нагружения реализовано в рамках SLJ соединения, показанного на Рис.

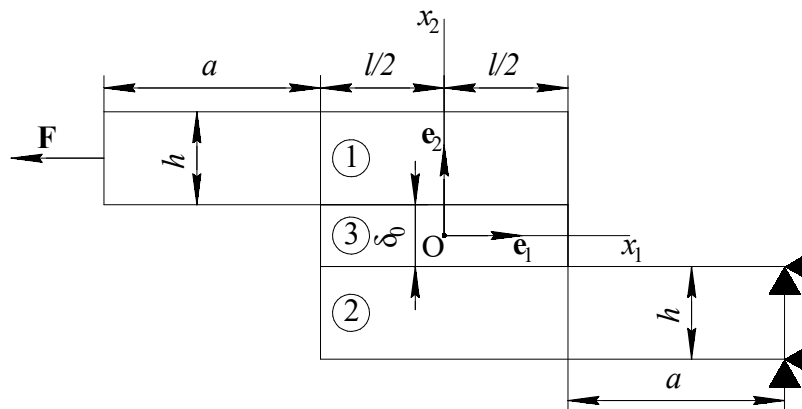


Рис. Схема нагружения SLJ соединения.

Показано, что разница в критических значениях J -интеграла при нормальном разрыве и поперечном сдвиге окрестности трещиноподобного дефекта АС и влияние гидростатического сжатия приводит к существенной разнице между нормальным разрывом и сжатием.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-11-20001, <https://rscf.ru/project/26-11-20001/> и Правительства Тульской области в Тульском государственном университете.

1. Глаголев В.В., Лутхов А.И. О критерии прочности соединения пластин внахлест // Известия РАН. МТТ. 2024. № 3. С. 101–111.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНООСНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ И КРУЧЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЦИКЛА НА ОСТАТОЧНЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Лыкова А.В., Староверов О.А., Сивцева А.В., Ильиных А.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: cem_lykova@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию закономерностей деформирования и разрушения пултрузионного стеклопластика в процессе накопления усталостных повреждений для решения проблемы обеспечения прочности ответственных композитных конструкций, эксплуатируемых в условиях циклических воздействий [1,2].

Исследование выполнено на трубчатых образцах из полимерного пултрузионного композиционного материала, армированного стеклянными волокнами. Проведена отработка методик экспериментального исследования закономерностей механического поведения стеклопластика, подвергнутого предварительным одноосным циклическим и последующим квазистатическим воздействиям. Рассмотрены методические вопросы влияния различных скоростей нагружения и разгрузки на реализуемые жесткостные свойства исследуемого композита при кручении. Показана возможность проведения испытаний на циклическое растяжение и кручение рассматриваемых образцов с определением параметров петель гистерезиса без использования двухосевого датчика деформаций в условиях больших углов закручивания.

По результатам циклических испытаний с различными максимальными значениями напряжений в цикле построены кривые усталости. Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией продемонстрировала высокую описательную способность. Изучено влияние параметров предварительного одноосного циклического воздействия на остаточные прочностные и деформационные характеристики полимерного пултрузионного стеклопластика при одноосном нагружении. Установлено, что все рассмотренные режимы предварительного циклического кручения не оказывают значительного влияния на остаточные пределы прочности при растяжении и кручении, а также на значения модулей Юнга и сдвига. В случае предварительного циклического растяжения, напротив, обнаружено снижение предела прочности при растяжении вплоть до 40–50 % (см. Рис.).

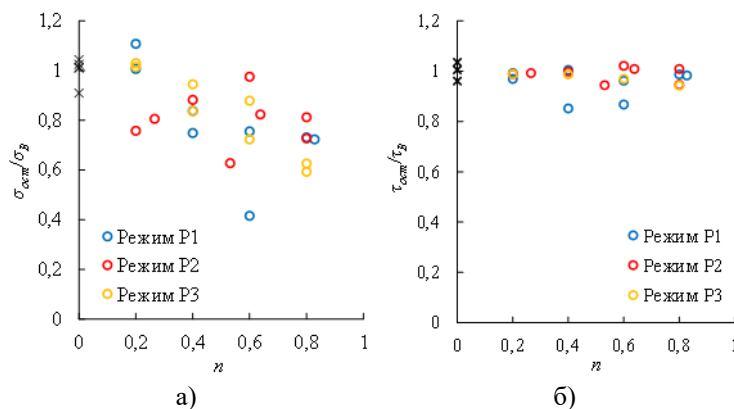


Рис. Зависимости остаточных прочностных характеристик пултрузионного стеклопластика при квазистатическом растяжении (а) и кручении (б) после предварительного циклического растяжения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-10194, <https://rscf.ru/project/25-79-10194/>.

1. Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Мугатаров А.И., Кучуков А.М. Усталостная чувствительность стеклопластиков в условиях пропорционального циклического растяжения с кручением // Вестник ПНИПУ. Механика. 2023. № 6. С. 29–40.

2. Староверов О.А., Кучуков А.М., Мельникова В.А., Елкин С.А., Сергеичев И.В. Статическая прочность пултрузионных стеклопластиков в условиях повышенных и пониженных температур при сложнапряженном состоянии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2025. Т. 91. № 5. С. 45–56.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА

Лыкова А.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: cem_lykova@mail.ru

Температурно-скоростные условия нагружения в значительной степени определяют качество готового изделия. Температура оказывает значительное влияние на микроструктуру, в частности, на интерметаллидные частицы и механические свойства металлов. Увеличение температуры приводит к снижению прочности материала, при этом повышению пластичности и улучшению формовости алюминиевых сплавов [1,2].

Настоящая работа направлена на экспериментальное исследование механического поведения алюминиево-магниевого сплава при повышенной температуре и различных скоростях деформации для установления расширенной картины о закономерностях деформирования сплава 1565ч в различных структурных состояниях и условиях нагружения. Исследуются образцы с исходной крупнозернистой структурой и оценивается возможность реализации больших пластических деформаций и режимов сверхпластичности. Рассмотрены методические вопросы реализации деформирования сплава в условиях повышенных температур, в частности, учет влияния жесткостных характеристик испытательной машины на диаграмму деформирования и тензометрирование в рабочей зоне образца. Установлены закономерности деформирования и разрушения сплава 1565ч с крупнозернистой структурой в условиях одноосного растяжения при различных температурах и скоростях деформации. Отмечено снижение прочностных характеристик сплава, увеличение пластичности, а также формирование выраженной локализации пластических деформаций в виде шейки в рабочей части образцов при повышении температуры. На основе полученных опытных данных сделан вывод о незначительном влиянии направления прокатки на поведение и механические характеристики сплава 1565ч (см. Рис.).

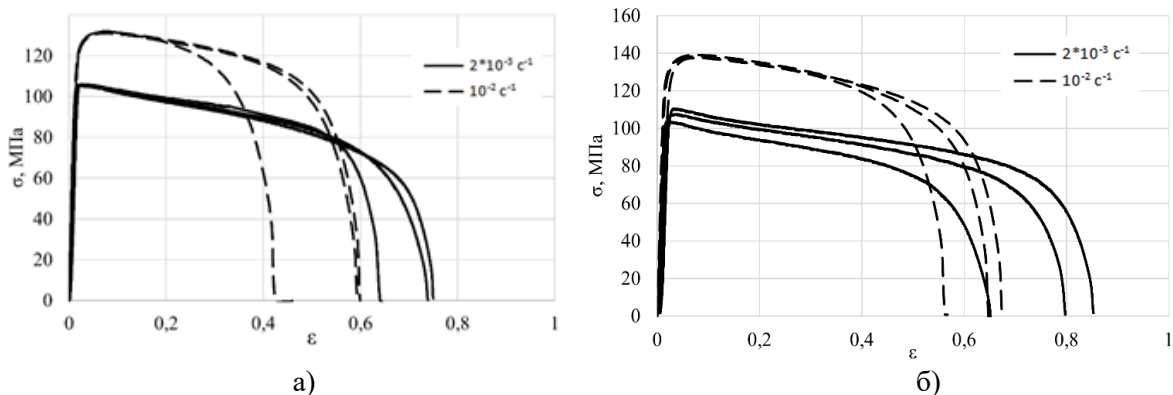


Рис. Диаграммы деформирования сплава 1565ч при температуре 300°C для образцов, вырезанных в продольном (а) и поперечном (б) направлениях, при различных начальных скоростях деформации в координатах «истинное напряжение – истинная деформация»

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00747, <https://rscf.ru/project/25-19-00747/>.

1. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Экспериментальное изучение закритического деформирования и разрушения сталей при высоких температурах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 1. С. 27-37.

2. Summers P.T., Chen Y., Rippe C.M., Allen B., Mouritz A.P., Case S.W., Lattimer B.Y. Overview of aluminum alloy mechanical properties during and after elevated temperature exposure // Fire Technology.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТА НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО НАНОИНДЕНТИРОВАНИЮ

Майский А.В., Корнев Ю.В., Гилязова Р.Ф., Муромцев Д.Н., Карнет Ю.Н.

Институт прикладной механики РАН, Москва

e-mail: andrey.mayskiy@gmail.com, yurikornev@mail.ru

В настоящей работе были исследованы эластомерные композиты, разработанные для применения в составе конструкций гасителей колебаний. Данные композиты были изготовлены на основе СКЭПТ-50 (этилен пропилен диеновый каучук) с добавлением бутил каучука, а также с добавлением микро и субмикрочастиц породы шунгит [1]. Композиты были получены с применением лабораторного смесителя Haake PolyLab Rheomix 3000. Исследования ползучести (Среер эффект) эластомерных композитов проводилось на измерительном комплексе NanoTest 600 с применением сфероконического индентора радиусом 10 мкм. Исследования проводили при различных нагрузках (1,5 и 6 мН). В ходе эксперимента при достижении заданной нагрузки она фиксировалась и происходило измерение изменения глубины индентирования. Таким образом были получены кривые ползучести в экспериментах по наноиндентированию. Проводилась оценка кривых для различных составов эластомерных композитов, а также до и после облучения ультрафиолетом (см. Рис.).

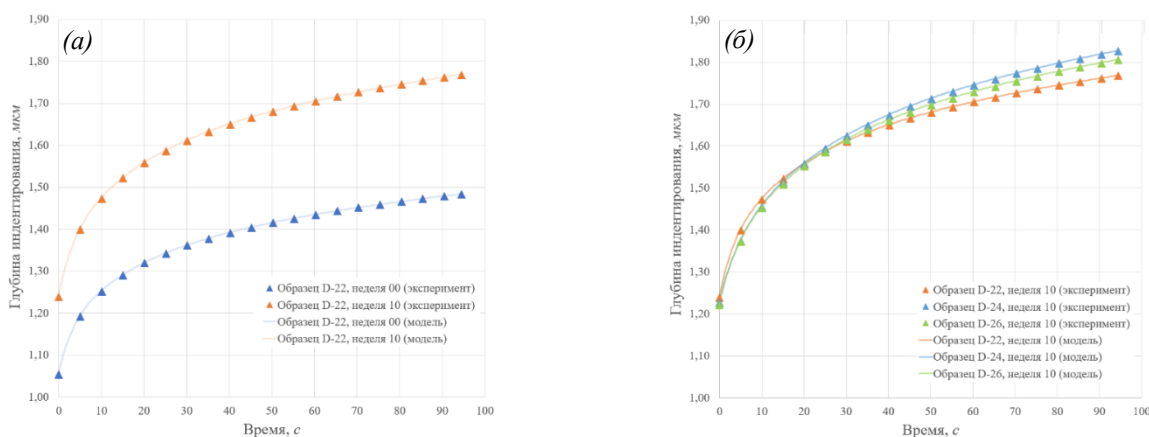


Рис. Кривые ползучести при наноиндентировании для образцов на основе СКЭПТ-50, нагрузка 1,5 мН:
(а) для образца D-22 до и после облучения; (б) для образцов D-22, D-24 и D-26 после облучения.

Для полученных в ходе эксперимента зависимостей глубины индентирования от времени были выбраны такие аппроксимирующие математические функции, параметры которых являются реальными вязкоупругими характеристиками. Данные аппроксимирующие функции соответствуют функциям моделей на основе обобщенной механической модель Кельвина-Фойгта сочетающей упругие и вязкие элементы для описания вязкоупругого поведения полимеров во время индентации [2].

Параметры для аппроксимирующих функций были подобраны с помощью программы на языке программирования Python (библиотеки SciPy, функции *curve_fit*) для поиска оптимальных параметров методом наименьших квадратов. Для исследованных эластомерных композитов были получены следующие характеристики: G_0 - мгновенный модуль сдвига, G_{100} - длительный модуль сдвига (при времени индентирования 100 секунд). Установлено, что после воздействия УФ облучения на композит минимальные изменения как мгновенного, так и длительного модуля были получены для образца с добавкой субмикрочастиц породы шунгит.

1. Корнев Ю.В., Гилязова Р.Ф., Муромцев Д.Н., Майский А.В., Карнет Ю.Н. Исследование механических свойств эластомерных композитов для применения в конструкциях гасителей колебаний. Метод наноиндентирования // Механика композиционных материалов и конструкций. 2025. Т. 31. № 4. С. 589–605.

2. F. Stan, C. Fetecau. Characterization of viscoelastic properties of molybdenum disulphide filled polyamide by indentation // Mech Time-Depend Mater. 17. 2013. P. 205–221.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СРЕД, ОСЛАБЛЕННЫХ СИСТЕМОЙ ЛОМАНЫХ ТРЕЩИН

Морковкина Е.А.

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

e-mail: evgeniia.morkovkina@math.msu.ru

Моделирование температурного поля сред с ослаблениями имеет широкое практическое применение в различных областях техники и промышленности. Внешнее тепловое воздействие на объект может выступать как необходимое условие для проведения технологических процессов, так и служить деструктивным фактором, способным инициировать процессы разрушения конструктивных элементов. Например, в авиакосмических технологиях при неравномерном нагреве обшивки двигателей из-за колебаний температурных нагрузок возникают температурные напряжения, которые усиливаются у ослаблений. Подобная концентрация может инициировать рост дефектов и, в конечном счёте, разрушение конструкции. Прогнозирование поведения такой системы реализуется с помощью исследования распределения температур.

Точные решения подобных задач получены лишь для простейших случаев, а для более сложной геометрии реальных объектов аналитические методы часто становятся труднореализуемыми. В случае же использовании численных методов необходимо обеспечить достаточную мощность компьютера для большого количества вычислений. Обе проблемы решаются применением численного метода граничных элементов, который позволяет моделировать температурное поле сред произвольной геометрии за сравнительно небольшое время работы [1]. В нем граница, рассматриваемой области, разбивается на отрезки, на каждом из которых берутся аналитические решения элементарных задач теории теплопроводности. Верификация с известными аналитическими решениями показала достаточную для практических применений точность. В связи с этим метод можно использовать в инженерных расчетах. Одной из таких задач является нахождение эффективного коэффициента теплопроводности сред.

Для каждого материала известно значение коэффициента теплопроводности, который находится в идеальных условиях. Но при наличии в среде ослаблений распределение температурного поля меняется и, соответственно, реальное значение не будет совпадать с табличным. Такое скорректированное с учетом дефектов значение принято называть эффективным коэффициентом теплопроводности. Этот важный в инженерных расчетах макропараметр удалось получить при помощи предложенной в этой работе методики.

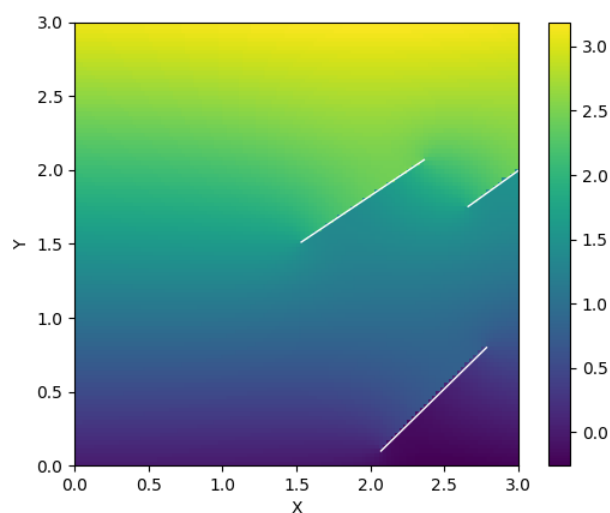


Рис. Пример распределения температурного поля в среде, ослабленной системой трещин.

1. Zvyagin A.V., Udalov A.S., Shamina A.A. Numerical modeling of heat conduction in bodies with cracks //Acta Astronautica. 2023. Vol. 214. P. 196–201.

СОВМЕСТНЫЙ КОЛЛАПС ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЛИНЕЙНОЙ, ПЛОСКОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИЯХ

Мустафин И.Н., Аганин А.А.

Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань

e-mail: mustafin@imm.knc.ru

Изучение совместного коллапса парогазовых пузырьков имеет большое научное и прикладное значение, что обусловлено многочисленными негативными последствиями и позитивными применениями кавитации. В этих последствиях и применениях кавитации важную роль играет совместный коллапс парогазовых пузырьков, поскольку при совместном коллапсе степени сжатия пузырьков могут быть более высокими.

В настоящей работе рассматривается совместный коллапс парогазовых пузырьков в наиболее простых конфигурациях: в линейной, состоящей из двух пузырьков, плоской, с равномерным распределением N пузырьков на окружности, и пространственной, с четырьмя пузырьками в вершинах правильных многоугольников (см. Рис.). Изучается влияние числа пузырьков в конфигурации, а также расстояния между пузырьками.

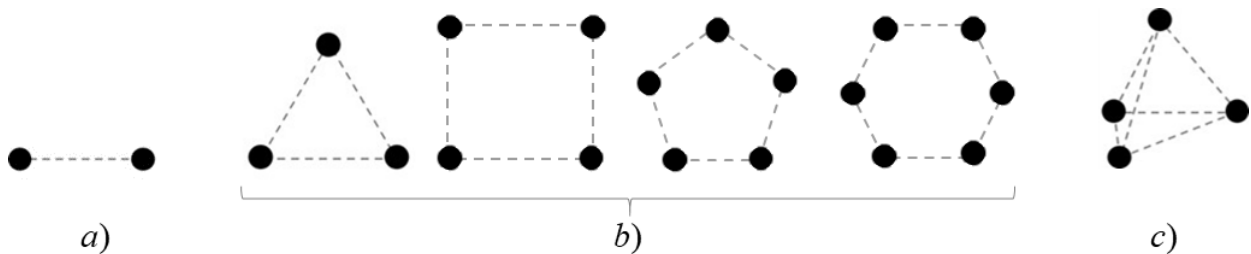


Рис. Исследуемые линейная (a), плоская (b) и пространственная (из N пузырьков) (c) конфигурации парогазовых пузырьков с одинаковым расстоянием между центрами ближайших пузырьков.

Первоначально пузырьки одинаковы по размеру, заполнены насыщенным водяным паром и некоторым количеством неконденсируемого газа (воздуха), скорость жидкости и парогазовой смеси в пузырьках равна нулю. Начальное давление парогазовой смеси в пузырьках намного меньше давления окружающей жидкости, в результате чего пузырьки совместно коллапсируют. Отметим, что физически подобные начальные условия соответствуют моменту перехода от расширения к сжатию пузырьков, созданных в стационарной жидкости лазерным или искровым пробоем.

Исследования проводятся с помощью математической модели совместного коллапса парогазовых пузырьков работ [1, 2]. Данная модель включает в себя обыкновенные дифференциальные уравнения относительно радиуса пузырьков, радиальной скорости жидкости на поверхности пузырьков, давления в пузырьках, а также уравнения в частных производных относительно температуры и массовой концентрации газа в пузырьках и жидкости, замыкаемых соответствующими кинематическими, динамическими, тепловыми и диффузионными граничными условиями. Диффузия газа из пузырьков в жидкость и обратно описывается законом Генри, испарение/конденсация на поверхности пузырьков – формулами Герца-Кнудсена-Ленгмюра.

Установлено, что первоначально преимущественно паровые пузырьки со временем превращаются в преимущественно газовые. По мере увеличения начальной массовой доли газа этот переход становится всё более продолжительным, амплитуда расширений и сжатий пузырьков возрастает, а их частота уменьшается. Показано влияние временной задержки в распространении акустических взаимодействиях пузырьков. В частности, наиболее осязаемое влияние временной задержки в случаях двух, трех и четырех (в пространственной конфигурации) пузырьков наблюдается при меньших расстояниях между пузырьками.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 25-71-00088, <https://rscf.ru/project/25-71-00088/>.

1. Aganin A.A., Khalitova T.F. Collapse of equal symmetrically located spherical cavitation bubbles // Lobachevskii J. Math. 2024. V. 45. No. 5. P. 1875–1885.

2. Aganin A.A., Mustafin I.N. Collapse of symmetrically located vapor-gas bubbles // Lobachevskii J. Math. 2026. V.47. No.6 (in press).

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА СФЕРИЧЕСКИЕ ОПОРНЫЕ ЧАСТИ МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ

Мухаметшин А.Р.¹, Каменских А.А.^{1,2}, Носов Ю.О.^{1,2}

¹ Лаборатория цифрового инжиниринга машиностроительных процессов и производств, ПИШ ВШАД, ПНИПУ, Пермь

² Кафедра вычислительной математики, механики и биомеханики, ПНИПУ, Пермь

e-mail: muhametshin_science@mail.ru

В сейсмически активных регионах надежность мостовых сооружений в значительной степени определяется работоспособностью опорных частей, воспринимающих эксплуатационные и динамические нагрузки. Подобные объекты охватывают многие критически важные сферы: газотурбинной установки, мосты, и гидроэлектростанции [1,2]. В конструкции мостовых сооружений ключевым элементом, обеспечивающим передачу усилий и перемещений от пролетного строения на нижележащие опоры, являются опорные части. Данные узлы мостового сооружения подвержены множественным факторам взаимодействия, таким как климатические воздействия, сейсмические нагрузки, процессы старения и деградации материалов [3]. Такие эффекты негативно влияют на срок службы и их важно учитывать в конструкции мостовых опор, так как к ним предъявлены строгие стандарты по времени безаварийной работы. Численное моделирование выполнено методом конечных элементов с учетом контактного взаимодействия элементов опорной части. Расчеты проводились в нелинейной постановке с учетом трения в контактной паре сферических поверхностей.

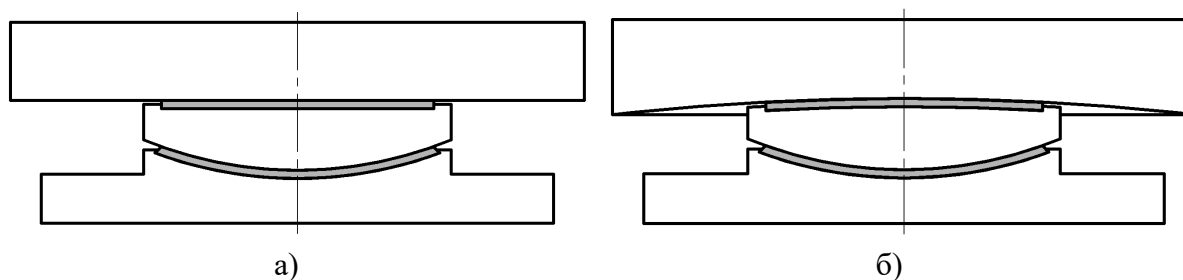


Рис. Опорная часть моста с применением балансира
а) плоская поверхность, б) радиальная поверхность.

В работе выполнено конечно-элементное моделирование двух конструктивных вариантов сферических опорных частей балансирующего типа при совместном действии вертикальной и горизонтальных компонент сейсмического воздействия. Исследовано влияние фазовых соотношений между компонентами нагрузки и неравномерной осадки опоры на напряженно-деформированное состояние конструкции. Установлено, что модификация геометрии верхней плиты оказывает существенное влияние на распределение контактных напряжений и величину перемещений элементов опорной части.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00470, <https://rscf.ru/project/25-29-00470/>.

1. Chen S., Zhou Y., Xie K., Zhang P., Li C. Dynamic Adaptability of Spherical Bearings in Small-Span Bridges for Heavy-Haul Railways // Buildings. 2025. Vol. 15. Art. 619.

2. Ni Y., Chen L., Sun Z. Applicability of Combined Seismic Isolation Device in Seismic Design of Railway Simply Supported Beam Bridge // Appl. Sci. 2025. Vol. 15. Art. 12557.

3. Адамов А.А., Каменских А.А., Носов Ю.О. Математическое моделирование поведения современных антифрикционных полимеров // Прикладная математика и вопросы управления. 2019. № 4. С. 43–56.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТИФРИКЦИОННОЙ ПРОСЛОЙКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСЧЕТНОГО ОБЪЕМА

Мухаметшин А.Р.¹, Каменских А.А.^{1,2}, Носов Ю.О.^{1,2}

¹ Лаборатория цифрового инжиниринга машиностроительных процессов и производств, ПИШ ВШАД, ПНИПУ, Пермь

² Кафедра вычислительной математики, механики и биомеханики, ПНИПУ, Пермь
e-mail: muhametshin_science@mail.ru

Сферические опорные части мостовых сооружений относятся к классу конструкций, работоспособность которых в значительной степени определяется напряженно-деформированным состоянием антифрикционной прослойки слоя скольжения [1-2]. Данная прослойка представляет собой композицию сверхвысокомолекулярного полиэтилена и консистентного смазочного материала, размещенного в системе технологических углублений [3]. При построении численных моделей конструкции явное описание геометрии углублений, межфазных границ и контактного взаимодействия компонентов приводит к существенному увеличению числа степеней свободы и вычислительных затрат, особенно при решении задач многоциклового термосилового нагружения. В связи с этим актуальной является разработка подходов, основанных на замене неоднородной структуры антифрикционной прослойки эквивалентной однородной средой с эффективными упруговязкопластическими характеристиками.

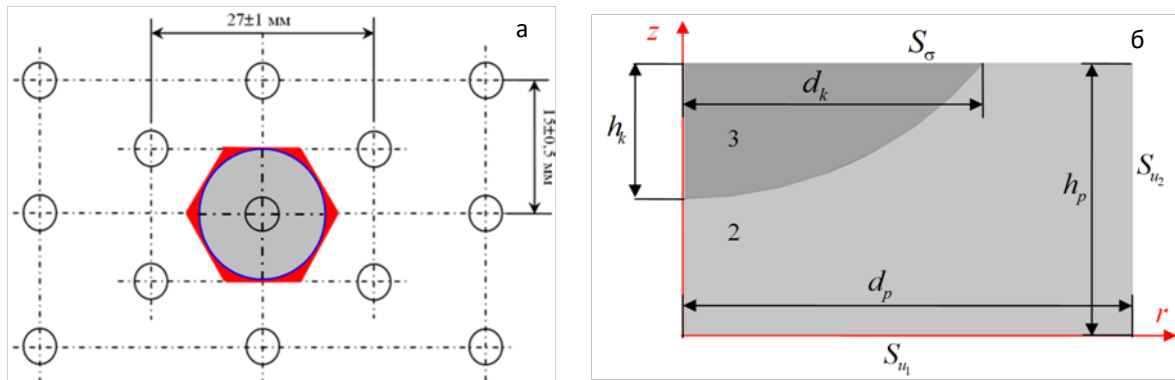


Рис. Геометрическая конфигурация углублений под смазочный материал:
а) схема заполнения; б) расчетный объем: 2 – полимер; 3 – смазка

На основе серии численных экспериментов выполнено определение эффективных упругих и упруговязкопластических характеристик представительного объема антифрикционной прослойки, содержащего полимерный материал и локальную область, заполненную смазкой. Получены функциональные зависимости параметров эквивалентной среды от температуры и геометрических характеристик расчетного объема. Установлены закономерности изменения эффективных характеристик при варьировании размера представительного объема и условий термосилового воздействия. Показано, что предложенный подход позволяет реализовать многоуровневую схему моделирования сферической опорной части, в которой неоднородная структура слоя скольжения заменяется эквивалентной однородной средой с эффективными определяющими соотношениями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00470, <https://rscf.ru/project/25-29-00470/>

1. Адамов А.А., Каменских А.А., Носов Ю.О. О влиянии геометрии и конфигурации сферического слоя скольжения опорной части мостового сооружения на параметры контактного взаимодействия ее элементов // Computational Continuum Mechanics. 2021. Т. 14. № 3. С. 398–411.

2. Meghashree M., Urs N., Amith B.N. et al. Elastomeric bearing performance prediction and damage effect evaluation using machine learning // Multiscale and Multidiscip. Model. Exp. and Des. 2025. Vol. 8, Art. 243.

3. Nosov Y.O., Kamenskikh A.A. Influence Analysis of Lubricant Recesses on the Working Capacity of the Bridge Span Spherical Bearing // Lubricants. 2022. Vol. 10. Art. 283.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНОГО ВИНТА С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ ЕГО ЛОПАСТЕЙ В РАМКАХ ВИХРЕВОЙ ТЕОРИИ И БАЛОЧНОЙ АНАЛОГИИ

Некипелов В.С.^{1,2}

¹ Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, Жуковский

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва

e-mail: nekipelov.vs@phystech.edu

При расчете аэродинамических характеристик воздушного винта обычно принимается, что лопасти являются абсолютно жесткими, и моделирование проводится без учета изменения их формы. В то же время влияние деформаций может оказаться существенным: расхождение в получаемых величинах тяги и мощности винта может составлять свыше 10% в широком диапазоне режимов работы винта. Более того, учет этого эффекта может приводить к изменению характеристик как в большую [1], так и в меньшую [2] сторону по сравнению со случаем абсолютно жестких лопастей. С другой стороны, трудоемкость сопряженных расчетов существенно выше аналогичных «однодисциплинарных» задач, что ограничивает применение сеточных методов при параметрических исследованиях. Вследствие этого первоначальный анализ требуется проводить с использованием методов, обладающих низкими вычислительными затратами и удовлетворительной точностью.

В данной работе аэродинамические силы моделировались по вихревой теории воздушного винта, упругие деформации рассчитывались по балочной теории с учетом центробежных сил [3]. Стационарный сопряженный расчет проводился методом последовательных нагружений.

По описанной методике был проведен расчет модели тематического 6-лопастного воздушного винта, имеющей однородные полнотелые лопасти с прямой осью жесткости. Проведено сравнение результатов расчетов в случае упругих и абсолютно жестких лопастей с данными испытаний в аэродинамической трубе (см. Рис.). Показано, что учет деформаций лопастей позволил повысить точность прогнозирования тяги и мощности.

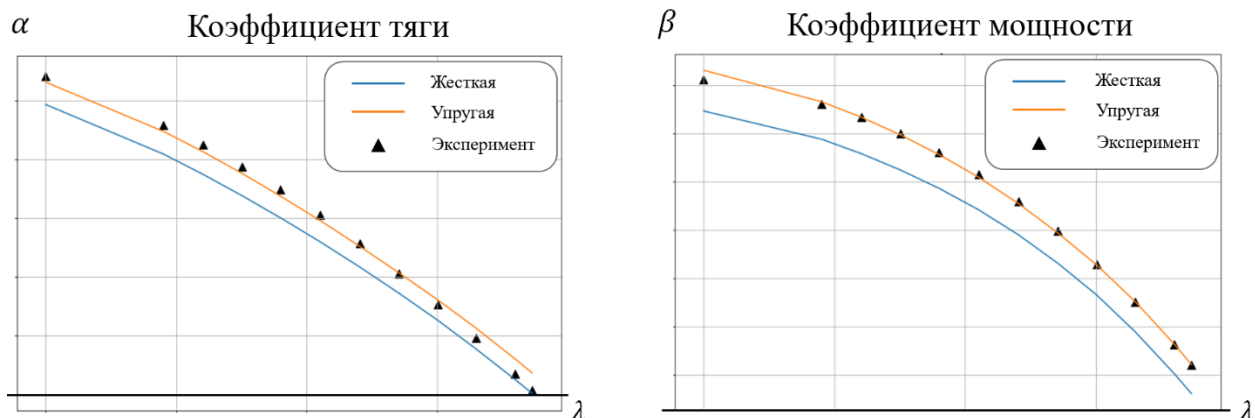


Рис. Влияние деформаций на величины коэффициентов тяги и мощности на различных режимах работы воздушного винта.

1. Moehren F., Bergmann O., Janser F., Braun C. On the influence of elasticity on propeller performance: a parametric study // CEAS Aeronautical Journal. 2023. Vol. 14. № 2. P. 311–323.

2. Rotundo C. D., Sinnige T., Sodja J. Aeroelastic Model for Design of Composite Propellers // AIAA SciTech 2024 Forum. 2024. DOI: 10.2514/6.2024-2677.

3. Некипелов В.С. Об учете влияния упругих деформаций на аэродинамические характеристики воздушного винта с прямыми однородными лопастями // Ученые записки ЦАГИ. 2025. Т. 56. № 3. С. 51–63.

ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКАЯ КОНВЕКЦИЯ СЛАБОПРОВОДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КОНДЕНСАТОРЕ

Некрасов О.О., Смородин Б.Л.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: dakeln2@gmail.com

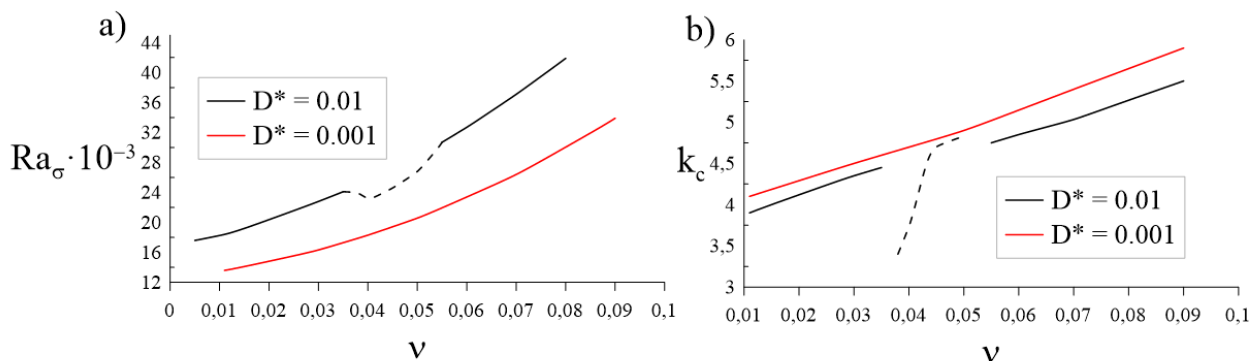
Электрогидродинамика описывает жидкости, содержащие малое количество заряженной примеси. Малая проводимость ограничивает возникновение заметных токов, но позволяет управлять движением жидкости при помощи внешнего электрического поля. Это может быть использовано для контроля тепло- и массопереноса, а также для создания датчиков и немеханических переключателей.

Рассматривается плоский горизонтальный слой слабопроводящей жидкости, помещенный между обкладками конденсатора. В отличие от предыдущих работ, изучается случай твердых горизонтальных границ, а также рассматривается диффузия заряда. Жидкость нагревается на верхней обкладке, электрическое поле, создаваемое конденсатором, модулировано во времени.

Ввиду наличия как гравитационного, так и электрического полей присутствует одновременное действие двух механизмов возбуждения конвекции: термогравитационного и электрокондуктивного [1]. Действие обоих механизмов приводит к мягкому возбуждению движения и появлению волновых режимов движения жидкости. Переменное поле позволяет влиять на порог конвективной неустойчивости и частоту колебаний конвективных структур.

Задача решается численно при помощи метода Галеркина, при этом для удовлетворения граничных условий для функции тока в качестве базисных используются функции Петрова [2]. Изучена зависимость порогов возникновения конвекции от частоты внешнего поля в линейном приближении, а также особенности нелинейного движения среды около порога.

Обнаружено явление параметрического резонанса (см. Рис.), наблюдающегося вблизи собственной частоты колебаний системы, при этом резонанс возникает для конечных значений коэффициента диффузии. В области параметрического резонанса для надкритических значений управляющего параметра обнаружен режим стоячих волн, совершающих колебания с удвоенной частотой внешнего поля. Проведено сравнение случая свободных и твердых горизонтальных границ.



1.

Рис. Зависимости критического электрического числа Рэлея (а) и критического волнового числа (б) от частоты внешнего поля для различных значений безразмерного коэффициента диффузии, сплошные линии соответствуют квазипериодическим колебаниям, штриховые – синхронным.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20108, <https://rscf.ru/project/25-21-20108/> при финансовой поддержке Пермского края.

1. Gross, M. J., Porter, J. E. Electrically induced convection in dielectric liquids // Nature. 1966. Vol. 211, no. 5068. P. 1343–1345.

2. Петров Г. И. Применение метода Галеркина к задаче об устойчивости течения вязкой жидкости // Прикладная математика и механика. 1940. Т. 4, № 3. С. 3–12.

МЕТОД РАЗРЫВНЫХ СМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ТРЕЩИН

Новов Д.Д.

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

e-mail: novovden@yandex.ru

Задачи, связанные с трещинами, представляют особый интерес и находят практическое применение при строительстве зданий и сооружений, в геомеханике горных пластов, при поиске и разработке месторождений полезных ископаемых, оценке последствий горных ударов и землетрясений. В пространственных задачах трещина в общем случае моделируется поверхностью, на которой вектор перемещения имеет разные значения при подходе к ней по нормали с разных сторон (два берега трещины). Задачам с трещинами присуща чрезвычайная нерегулярность границ областей, отвечающих изучаемым объектам, так что при их количественном исследовании трудно рассчитывать на получение аналитических результатов и решения чаще всего приходится так или иначе искать численно.

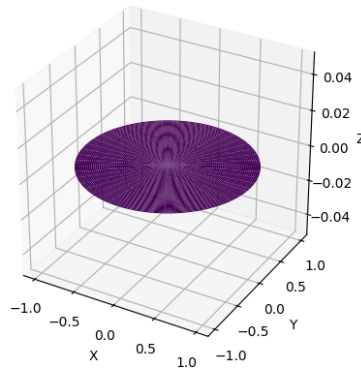


Рис. Дiskoобразная трещина.

В работе рассматривается задача о растяжении упругого пространства, ослабленного дискообразной трещиной (см. Рис.). Предложен осесимметричный метод разрывных смещений, учитывающий наличие кривизны границы. Этот метод основан на представлении решения в виде ряда по аналитическим решениям базовых задач. Ранее метод разрывных смещений, учитывающий наличие кривизны границы применялся только для плоских задач с криволинейными трещинами [1]. Метод дает возможность определить поля перемещений и напряжений, а также коэффициенты интенсивности напряжений для осесимметричных задач механики разрушения. Вычисление коэффициентов интенсивности напряжений является основной задачей линейной механики трещин. Их значение позволяет определить, будет ли расти трещина при заданной нагрузке.

Верификация с известным аналитическим решением показала хорошее качественное и количественное совпадение расчётов.

Работа выполнена при поддержке гос. задания номер ЦИТИС: 121061000022-3.

1. Звягин А.В., Новов Д.Д. Метод разрывных смещений, учитывающий наличие кривизны трещины // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 1, Математика. Механика. 2023. № 3. С. 67–71.

ПЕРЕХОД МЕЖДУ ДИССИПАТИВНЫМ И ВЯЗКИМ ИНТЕРВАЛАМИ ПРИ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Огинов А.А.^{1,2}, Копьев А.В.¹, Зыбин К.П.^{1,3}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

³ «Высшая школа экономики» (национальный исследовательский университет), Москва

e-mail: oginov.aa@phystech.edu

Работа посвящена диффузии температуры (пассивного скаляра) в изотропном турбулентном потоке на малых масштабах: наименьшем диссипативном (диффузии) и гидродинамическом вязком (колмогоровском). Поле скоростей аппроксимируется моделью Казанцева-Крайчнана, то есть предполагается несжимаемым, изотропным, стационарным, гауссовым и дельта-коррелированным по времени [1, 2]. Для анализа эволюции поля температуры используется уравнения транспорта скаляра и формула Фурутцу-Новикова [6], позволяющая получить уравнения динамики автокорреляционной функции скаляра из статистики поля скоростей [5, 7]. После преобразований это уравнение сводится к задаче Штурма-Лиувилля на полуоси с положительным потенциалом (см. Рис. 1). В такой постановке экспоненциально затухающие временные решения [4, 8] соответствуют отрицательным собственным значениям оператора Штурма-Лиувилля или положительным энергиям виртуальных состояний в шредингеровской интерпретации (аналогично задаче с поведением пассивного вектора [3]).

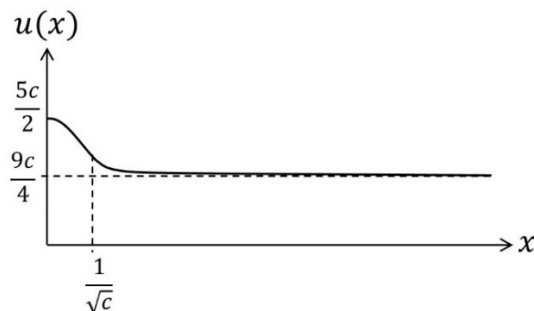


Рис. 1. Вид потенциала в задаче Штурма-Лиувилля (c – характерная частота обращения колмогоровского вихря, x – пространственная координата, нормированная на коэффициент температуропроводности).

Для детального рассмотрения эволюции скаляра в полученном уравнении осуществляется переход в Фурье-пространство и преобразование к задаче с потенциалом в нем. Сравнение результатов, полученных двумя представленными методами, позволяет подробно изучить поведение при выходе возмущения с диссипативного на вязкий масштаб.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 26-72-10146).

1. Казанцев А. П. Об усилении магнитного поля проводящей жидкостью // ЖЭТФ. 1967. Т. 53. № 5 (11). С. 1806.
2. Kraichnan R. H. Small-scale structure of a scalar field convected by turbulence // Phys. Fluids. 1968. V. 11. № 5. P. 945–953.
3. Kopyev A. V. [et al.]. Virtual states and exponential decay in small-scale dynamo // Phys. Rev. E 113, 035101, 2026
4. Balkovsky E., Fouxon A. Universal long-time properties of Lagrangian statistics in the Batchelor regime and their application to the passive scalar problem // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. № 4. P. 4164–4174.
5. Batchelor G. K. Small-scale variation of convected quantities like temperature in turbulent fluid. Part 1. General discussion and the case of small conductivity // J. Fluid Mech. 1959. V. 5. P. 113–133.
6. Il'yn A. S. Selected Topics in Stochastics. Lecture notes in Russian. 2023. С. 61–63. DOI: 10.13140/RG.2.2.31174.86088.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Корреляционные функции скоростей // Теоретическая физика: В 10 т. Т. VI: Гидродинамика. 5-е изд. — М.: Физматлит, 2006. С. 193–197.

ГИБРИДНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ OPENFOAM: ВНЕДРЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ БИБЛИОТЕК ДЛЯ ПЕРЕНОСА РАСЧЕТОВ НА GPU

Павлов Е.П.^{1,2}, Исмагилов Д.А.^{1,3}

¹ Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

² Московский физико-технический институт, Москва

³ Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

е-mail: pavlovep@ispras.ru

OpenFOAM — популярный open-source фреймворк, но его архитектура 1990-х годов ориентирована на CPU и неэффективно использует современные гибридные суперкомпьютеры с GPU. Активно развиваются проекты по переносу вычислений OpenFOAM на GPU. Поскольку основное время занимает решение систем линейных уравнений, большинство работ фокусируются на ускорении именно этих операций (например, AmgX4Foam, petsc4foam [1]). Преимущество подхода — отсутствие изменений в исходном коде. Однако, как отмечено в [2], доля решения линейных уравнений лишь незначительно превышает время на другие процессы (например, сборку матриц), что ограничивает ускорение согласно закону Амдала. Решение — замена всех явных циклов на GPU-вычисления [2], но это требует переписывания кода и ведёт к отставанию от актуальных версий OpenFOAM.

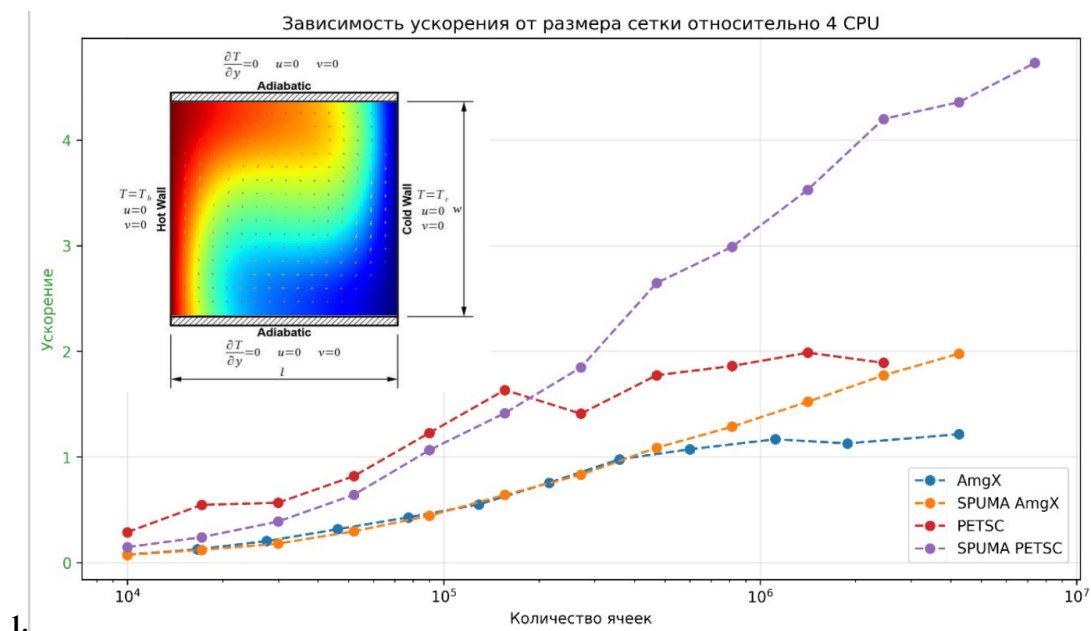


Рис 1. Отношение времени работы на одну итерацию для GPU конфигурации к такому же показателю в случае использования 4 ядер CPU

В данной работе сравнивается скорость вычислений для стандартных CFD-задач. Базовый подход — OpenFOAM-v2412 с декомпозицией на CPU. Сравнение проводится с библиотеками AmgX и PETSc для GPU, а также с SPUMA (переписанной библиотекой на основе OpenFOAM-v2412). Вычисления выполнены на относительно устаревшем оборудовании: NVIDIA Tesla T4 и Intel i7-9700. Результаты для задачи о естественной конвекции [3] (см. Рис. 1) показывают, что ускорение монотонно растёт с размером задачи. Подходы без SPUMA демонстрируют ограничения по ускорению.

1. Bna S., Spisso I., Olesen M., Rossi G. PETSc4FOAM: a library to plug-in PETSc into the OpenFOAM framework // PRACE. 2020.
2. Bna S., Giaquinto G., Fadiga E., Zanelli T. SPUMA: a minimally invasive approach to the GPU porting of OPENFOAM // arXiv:2512.22215v1 . 2025
3. Davis G., Jones I. P. Natural convection in a square cavity: A comparison exercise // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 1983. Vol. 3. № 3. P. 227–248.

УПРУГИЕ ПОЛЯ И ЭНЕРГИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ДИСЛОКАЦИИ В ШАРЕ

Петров Д.А.¹, Красницкий С.А.², Гуткин М.Ю.^{1,3}, Колесникова А.Л.^{1,2}, Романов А.Е.²

¹ Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

e-mail: petrov_d_a@ipme.ru

Упругие поля дислокаций (и других дефектов кристаллической решетки) существенно влияют на свойства наногетеросистем. Поэтому эффективными инструментами исследования различных процессов в наносистемах стали механика сплошной среды и теория дефектов [1]. В этом подходе ключевую роль играют аналитические решения краевых задач теории упругости с дефектами (и в частности, с дислокациями).

В настоящем докладе представлено найденное впервые решение краевой задачи о прямолинейной дислокации, произвольно пересекающей линейно-упруго-изотропный шар. Это решение обобщает полученные ранее результаты для частных случаев, где дислокации пересекали центр шара [2,3]. Как и в [2,3], решение дано в виде суммы решения для прямолинейной дислокации в бесконечной среде и дополнительного поля, для нахождения которого используется метод Лурье [4].

Полученное решение позволяет провести количественный анализ полей напряжений в разных сечениях шара (см. Рис. слева) и упругой энергии дислокации в шаре. Оно также имеет большую практическую ценность, связанную не только с конкретными моделями дефектных наночастиц, но и с проверкой различных приближенных методов, необходимых при рассмотрении более сложных систем и/или дефектных конфигураций (см. Рис. справа).

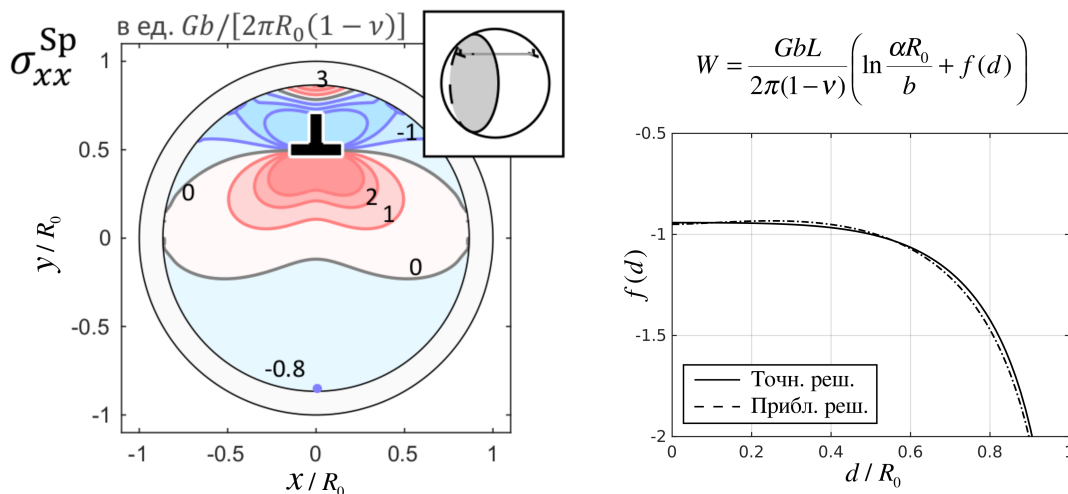


Рис. слева – пример карты напряжений для смещенной краевой дислокации; справа – энергия W краевой дислокации, вертикально смещенной от центра шара на расстояние d . Здесь G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, b – величина вектора Бюргерса дислокации, R_0 – радиус шара, α – параметр энергии ядра дислокации, L – длина линии дислокации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания для ИПМаш РАН (НИР № 124041100008-5).

1. Gutkin M.Yu, Kolesnikova A.L., Krasnitskii S.A., et al. Micromechanics of misfit stress relaxation in heterogeneous crystalline nanostructures: a review // Materials Physics and Mechanics. 2025. Vol. 53. № 5. P. 1-34

2. Petrov D.A., Gutkin M.Yu., Kolesnikova A.L., Romanov A.E. Edge dislocation in an elastic sphere // International Journal of Engineering Science. 2025. Vol. 210. Art. 104226.

3. Polonsky I.A., Romanov A.E., Gryaznov V.G., Kaprelov A.M. Screw dislocation in spherical particle // Czechoslovak Journal of Physics. 1991. Vol. 41. № 12. P. 1249-1255.

4. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука. 1970. 940 с.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ПРЕДНАПРЯЖЁННОЙ ОРТОТРОПНОЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ БАЛКИ ЧОУ

Петров Г.С.^{1,3}, Сердюк Д.О.^{1,2,3}

¹ ФГАОУ ВО Московский авиационный институт, Москва

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

³ АО «НПО «Базальт», Москва

e-mail: georgy.ptvr.engr@gmail.com

Объектами исследования являются неограниченная и свободно опёртая балки в акустической среде (см. Рис. 1.). В начальный момент времени балки находятся в невозмущённом состоянии, затем на них действует нестационарная погонная нагрузка.

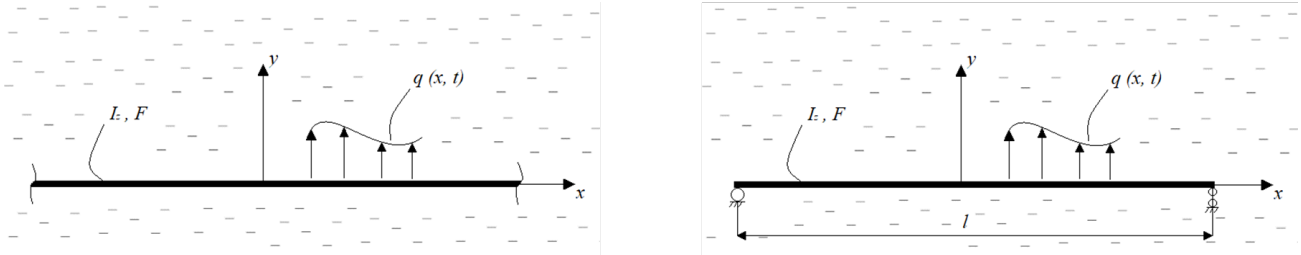


Рис. 1. Неограниченная и свободно опёртая балки.

Математическая модель построена на основе гипотез Чоу [1], [2]. Материал балок ортотропный, вязкоупругий, вязкость описана моделью Кельвина-Фойхта. Акустическая среда учитывается через погонную присоединённую массу и коэффициент демпфирования. Предварительное напряжение задаётся растягивающей продольной силой.

Постановка задачи включает уравнения движения в перемещениях, нулевые начальные условия, условие ограниченности решения на бесконечности для неограниченной балки и граничные условия для свободно опёртой балки.

Целью работы является определение нормальных перемещений неограниченной и свободно опёртой балок при действии нестационарной погонной нагрузки с использованием функций Грина.

Функции Грина для неограниченной балки построены с применением интегральных преобразований Лапласа по времени и Фурье по координате. Обратное преобразование Лапласа выполнялось аналитически при помощи теоремы о вычетах. Обратное преобразование Фурье реализовывалось численно с использованием интеграла обращения и метода быстро осциллирующих функций.

Для свободно опёртой балки функции Грина строились с применением преобразования Лапласа по времени и разложения в тригонометрические ряды Фурье по координате. Обратное преобразование Лапласа также выполнялось методом вычетов, а для численного решения бесконечные ряды Фурье заменялись конечными суммами. Число членов рядов подбиралось по относительной погрешности с заданной точностью.

Связь между искомыми нормальными перемещениями и действующей динамической нагрузкой задаётся интегральным оператором типа свёртки по координате и времени. Ядром данного интегрального оператора являются найденные функции Грина.

Полученное интегральное представление позволяет определять нормальные перемещения неограниченной и свободно опёртой балок при произвольном нестационарном нагружении.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-29-01297, <https://rscf.ru/project/25-29-01297>.

1. Chow T.S. On the Propagation of Flexural Waves in an Orthotropic Laminated Plate and Its Response to an Impulsive Load. Journal of Composite Materials. 1971 Vol. 5. P. 306-319. DOI: 10.1177/002199837100500302.

2. Сердюк Д.О., Земсков А.В., Ершова А.Ю. Нестационарная динамика анизотропной пластины Чоу, связанной с упруго-нестационарным основанием // Научно-технические ведомости СПбГУ. Физико-математические науки. – 2025 – Т. 18 (1), - с 149-162. DOI: 10.18721/JPM.18113.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ НАГРЕВ В ОБЛАСТИ ОТРЫВА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ПОТОКЕ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

Попович С.С.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: pss@imec.msu.ru

В области сверхзвуковых внутренних течений в каналах актуальным представляется учёт при определении теплового потока и коэффициента теплоотдачи локальных изменений определяющей температуры – адиабатной температуры стенки. Как показано в ряде работ, погрешность в определении коэффициента теплоотдачи, рассчитанного без учета локальных изменений равновесной температуры стенки, может составлять до 50% [1-3]. При исследовании высокоскоростного аэродинамического нагрева дальнейшее повышение точности определения закономерностей теплоотдачи при обтекании сверхзвуковым потоком поверхностей сложной формы требует тщательного исследования локальных значений адиабатной температуры стенки.

Доклад посвящен исследованию динамических (распределение статического давления на стенке, поле скорости) и тепловых (адиабатная температура стенки, коэффициенты восстановления температуры и теплоотдачи) параметров в потоке сжимаемого газа при обтекании плоской стенки и в области отрыва пограничного слоя на поверхности. Исследования проводились на аэродинамической установке АР-2 периодического действия. Тепловой поток в стенку определялся аналитическим методом: решением обратной задачи теплопроводности по измеренному темпу охлаждения стенки и теплофизическим свойствам материала модели. Для определения локальной скорости течения потока использовался PIV-метод.

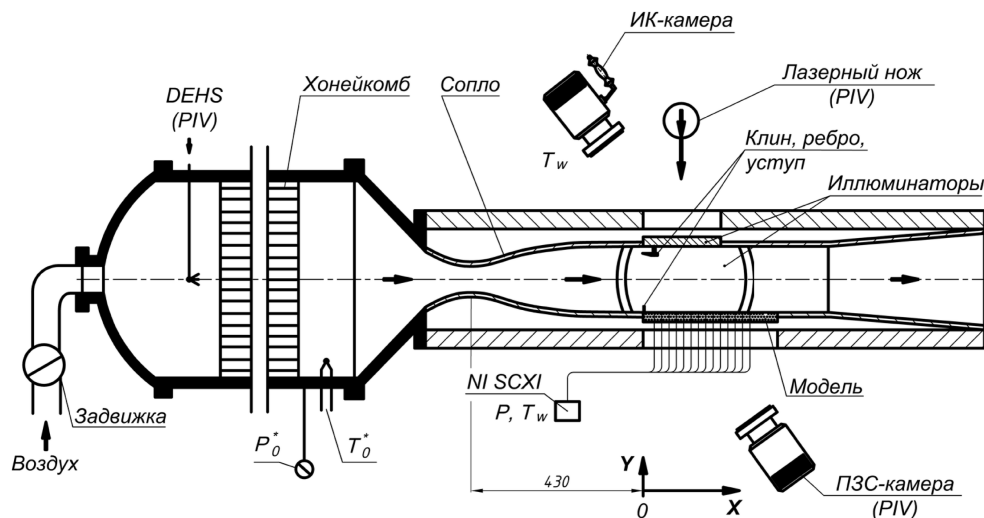


Рис.1. Аэродинамическая установка регулируемая АР-2.

Исследование выполняется в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (AAAA-A19-119012990115-5).

1. Леонтьев А.И., Попович С.С., Лущик В.Г., Макарова М.С. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое // ТВТ. 2022. Т. 60, №3. С. 455–480.
2. Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov U.A. Experimental study of aerodynamic heating in the region of an incident shock wave boundary layer interaction // Acta Astronautica. 2025. V. 229. P. 804–813.
3. Popovich S.S. Aerodynamic cooling of the wall in the trace of a supersonic flow behind a backward-facing ledge // Fluid Dynamics. 2022. V. 57. N. 1. P. 57–64.

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА МАХА НА КОЭФФИЦИЕНТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Попович С.С., Лущик В.Г.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: pss@imec.msu.ru

В инженерных методиках расчета теплообмена для определения теплового потока в стенку при высоких скоростях течения газа используется коэффициент восстановления температуры $r = (T_{aw}^* - T_0) / (T_0^* - T_0)$, где: T_{aw}^* – адиабатная температура стенки, T_0 – статическая температура и T_0^* – температура торможения потока.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью учета изменений коэффициента восстановления температуры при расчете теплообмена в каналах энергоустановок, двигателей, теплообменных аппаратов и устройств безмашинного энергоразделения потоков. Результаты экспериментальных, аналитических и численных исследований коэффициента восстановления температуры частично отражены в обзоре [1].

Численное исследование зависимости коэффициента восстановления температуры от числа Маха проведено с использованием трехпараметрической RANS-модели турбулентности [2], дополненной уравнением переноса для турбулентного потока тепла.

Расчеты проводились в следующей постановке. Пластина обтекалась потоком воздуха с постоянной сверхзвуковой скоростью u_1 , соответствующей заданному числу Маха при статической температуре $T_0=200$ К и давлении торможения $p^*=0.5$ МПа. Интенсивность турбулентности набегающего потока составляла менее 1%. Параметрами задачи являются число Маха M и число Рейнольдса по длине $Re_x = \rho_1 u_1 x / \eta_1$ при значениях теплофизических свойств, определенных по температуре и давлению в набегающем потоке.

На рис. 1 представлены результаты расчета зависимости $r(M)$ при числе Рейнольдса $Re_x=10^8$ и экспериментальные данные, приведенные в [1].

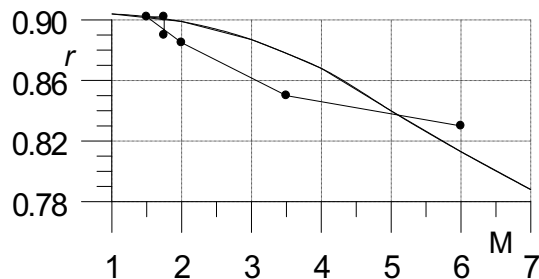


Рис.1. Зависимость коэффициента восстановления температуры от числа Маха набегающего потока: линия – расчет, точки – экспериментальные данные, приведенные в [1].

Как видно из рис. 1, при значениях числа Маха $M>4$ коэффициент восстановления температуры существенно уменьшается с ростом числа Маха, в то время как по результатам многочисленных экспериментальных исследований в широком диапазоне чисел Маха при обтекании пластины, конуса, конуса-цилиндра, приведенным в [1], не выявлено существенного влияния числа Маха на коэффициент восстановления температуры, хотя в ряде работ с увеличением числа Маха (вплоть до $M=6$) наблюдалось некоторое его уменьшение.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (AAAA-A19-119012990115-5).

1. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С., Попович С.С. Коэффициент восстановления температуры в сжимаемом турбулентном пограничном слое (обзор) // ТВТ. 2022. Т.60. № 3. С. 455–480.

2. Лущик В.Г., Попович С.С., Чайка А.М. Применение трехпараметрической дифференциальной RANS-модели турбулентности для решения задач энергоразделения газового потока // Программная инженерия. 2025. Т. 16, № 3. С. 143–155.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА ДОЗВУКОВЫМ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Попович С.С.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: pss@imec.msu.ru

В литературе 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). За цилиндром (или, например, за выходной кромкой турбинной лопатки) образуется вихревой след с температурной стратификацией по сечению вихря: в центре вихря полная температура ниже начальной, а на периферии – выше. Для сверхзвуковых потоков снижение адиабатной температуры стенки (эффект аэродинамического охлаждения) фиксируется в следе за обтекаемым препятствием в виде клина, ребра или ступеньки.

По-видимому, впервые эффект охлаждения цилиндра был опубликован в работе Хилтона. Отмечалось, что температура задней стенки цилиндрического зонда практически равняется статической температуре набегающего потока. В то же время в передней части цилиндра температура была близка к температуре торможения. Данный эффект был подтвержден в ряде последующих работ, а также интенсифицирован за счет взаимного влияния пары круговых цилиндров [1]. На основе эффекта Эккерта-Вайзе предложен метод энергоразделения газового потока [2].

В данной работе представлены результаты исследования методом ИК-термографии поперечного обтекания цилиндра дозвуковым потоком воздуха. Экспериментальное исследование проводилось на базе аэродинамической установки АР-2 на стационарном режиме при числах Маха набегающего потока от 0.4 до 0.6, давлении торможения до 150 кПа, температуре торможения до 23°C. С помощью ИК-камеры зафиксирован эффект охлаждения задней поверхности цилиндра, причем эффект возрастает с увеличением скорости набегающего потока. Охлаждение поверхности цилиндра составило от 4 ± 0.6 К при числе Маха 0.4 до более 20 ± 0.6 К при числе Маха 0.6.

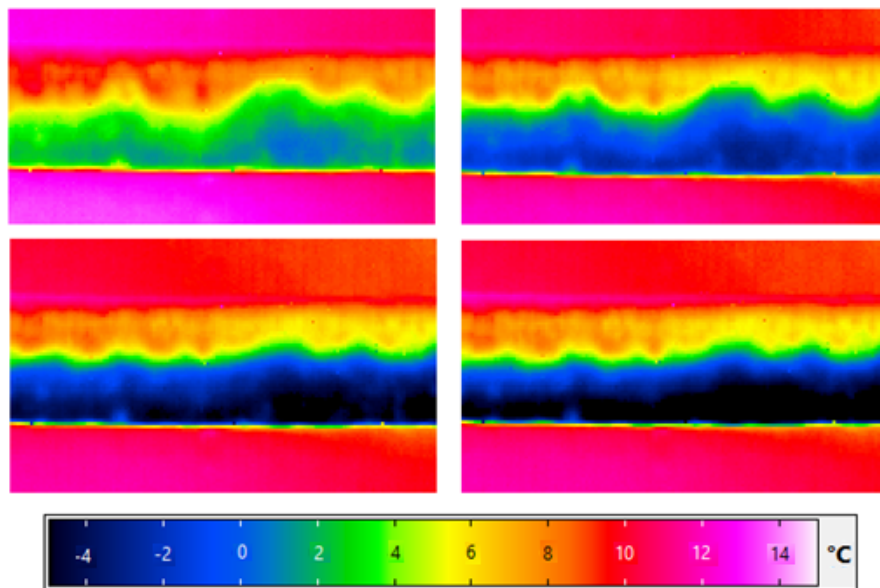


Рис.1. Инфракрасная визуализация обтекания цилиндра при изменении числа Маха от 0.4 до 0.6.

Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ №24-79-10035.

1. Zditovets A.G., Kiselev N.A., Popovich S.S., Vinogradov Y.A. Experimental investigation of the Eckert-Weise effect (aerodynamic cooling) of pair side-by-side circular cylinders in a compressible cross-flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. V. 233.

2. Здитовец А.Г., Попович С.С., Киселев Н.А., Виноградов Ю.А. Устройство и способ безмашинного энергоразделения газа // Патент на изобретение №2853045. Опубл.: 12.12.2025.

ОБОБЩЕНИЕ SOE-ПОДХОДА НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПЕРАТОРЫ ВЯЗКОУПРУГОСТИ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

Приказчиков Д.А.

Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный

e-mail: prikazchikov.da@mipt.ru

Моделирование вязкоупругих материалов с долгой памятью (бетон, полимеры, композиты) требует вычисления интегральных функционалов свёртки. Классический SOE-подход (Sum-Of-Exponentials) сводит линейный оператор памяти к рекуррентным переменным, снижая сложность с $O(T^2)$ до $O(T \cdot N)$. Однако в нелинейных задачах с накоплением повреждения ядро памяти зависит от текущих напряжений $\sigma(t)$ и повреждённости $p(t)$, что делает стандартный SOE-метод неприменимым.

В работе предложено обобщение SOE-подхода на нелинейные операторы вида

$$F(t) = \int_0^t A(t - \tau, \sigma(\tau), p(\tau)) \varepsilon(\tau) d\tau$$

Доказана теорема об аппроксимации ядра суммой экспонент с коэффициентами-функциями:

$$A(s, \sigma, p) \approx \sum_{i=1}^N a_i(\sigma, p) e^{-\frac{s}{\tau_i}}$$

Введены рекуррентные переменные $h_i(t)$, удовлетворяющие ODE $\dot{h}_i = -h_i/\tau_i + a_i(\sigma, p)\dot{\varepsilon}$, что позволяет вычислять свёртку без хранения истории. Разработаны автоматический выбор числа экспонент N и постоянных времени τ_i на основе SVD-разложения матрицы Ганкеля, а также устойчивая полуявная схема интегрирования.

Численные эксперименты проведены для трёх моделей повреждения: Качанова–Работнова, Lemaître и Chaboche. Ускорение рекурсивного метода относительно прямого интегрирования (эталон $O(T^2)$) представлено на (см. Рис.). Для модели Качанова–Работнова при числе шагов $N_t = 12801$ достигнуто ускорение $1898 \times$ при максимальной относительной ошибке 0,76%. Модели Lemaître и Chaboche дали ускорение $1437 \times$ и $1332 \times$ соответственно. Ошибка остаётся ограниченной во времени и не накапливается.

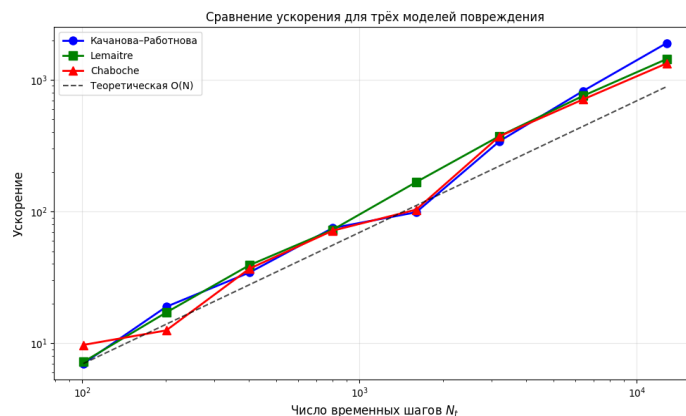


Рис. Сравнение ускорения для трёх моделей повреждения. Пунктир – теоретический предел $O(N)$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00035-П.

1. Петров И.Б., Приказчиков Д.А., Хохлов Н.И. Численное решение интегродифференциальных уравнений теории вязкоупругости с ядрами экспоненциального и работновского типов // Доклады Российской Академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2024. Т. 505. С. 46–49.

СТРУКТУРА КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ С ЭФФЕКТОМ СОРЕ В ПЛОСКИХ СЛОЯХ С ГРАНИЦАМИ МАЛОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Прокопьев С.А., Любимова Т.П.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: prokopev.s@icmm.ru

В работе исследуется термодиффузионная конвекция бинарной жидкой смеси в горизонтальном слое с твердыми непроницаемыми границами при заданном вертикальном тепловом потоке. Такая постановка соответствует случаю низкой теплопроводности ограничивающих стенок и существенно отличается от классической задачи с фиксированной температурой на границах. Рассматриваются смеси с отрицательным коэффициентом разделения, для которых развитие конвекции возможно как при нагреве снизу, так и при нагреве сверху. Работа посвящена численному исследованию структуры течения и характерных пространственных масштабов конвекции в нелинейной постановке. В линейной теории для рассматриваемого диапазона параметров потеря устойчивости равновесного состояния происходит по длинноволновому механизму. Однако результаты прямого численного моделирования показывают, что длинноволновой режим реализуется только в непосредственной окрестности порога устойчивости. При увеличении числа Рэлея происходит переход к течениям с конечным волновым числом и формированием квадратных ячеек.

При нагреве сверху переход к коротковолновым режимам выражен наиболее отчетливо: по мере удаления от порога устойчивости формируется устойчивая ячеистая структура с характерным конечным размером ячеек. При нагреве снизу линейный анализ предсказывает возможность колебательной неустойчивости. Нелинейные расчеты подтверждают существование колебательных режимов вблизи порога конвекции; при дальнейшем увеличении надкритичности течение переходит в стационарное пространственно неоднородное состояние.

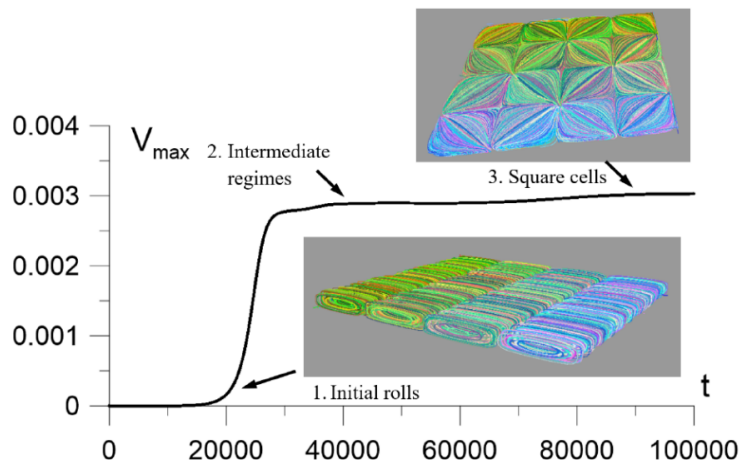


Рис. Зависимость максимальной скорости течения от времени при подогреве сверху, $Ra = -50$.

Показано, что на начальной стадии развития конвекции реализуются конвективные валы (см. Рис.), но основными режимами являются квадратные и прямоугольные конвективные ячейки. Полученные результаты подтверждают выводы линейной теории вблизи порога возникновения конвекции [1] и уточняют закономерности формирования трехмерных структур в бинарных смесях при наличии эффекта Соре и конечной теплопроводности границ. Подробно с результатами исследования можно познакомиться в статье [2].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 25-71-00038).

1. Lyubimova T. P., Sadilov E. S., Prokopev S. A. Onset of Soret-induced convection in a horizontal layer of ternary fluid with fixed vertical heat flux at the boundaries // The European Physical Journal E. 2017. Vol. 40. P. 15.

2. Prokopev S.A., Lyubimova T.P. Soret-induced convection of a binary mixture with a negative separation ratio in a layer with nearly insulating boundaries // Physics of Fluids. 2026. Vol. 38. №. 6.

ДЕСТРУКЦИЯ ОТВЕРЖДЕННЫХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ

Ран М.А., Струкова В.И., Каменских А.А., Пустовалов Д.О.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
e-mail: ranmasha06@yandex.ru

Температурная деструкция позволяет оценить деградацию материалов при температурном воздействии [1]. Зависимости изменения массы материала (DT, %) от температуры позволяет понять фазы структурных переходов. Определить переходную точку, при которой происходит выжигание всей органики, позволяет определить скорость изменения массы (DTG, % °C⁻¹) [2]. Термогравиметрический анализ позволяет получить зависимости остаточной массы материала от температуры, скорость изменения массы материала можно получить, определив производную от DT.

В текущем исследовании сформирована выборка из российских и зарубежных выжигаемых фотополимерных материалов, применяемых в литье. А также стандартных фотополимерных материалов для формирования твердотельных структур, которые при достаточно эффективной деструкции могут быть использованы в технологии литья по выжигаемым моделям. Для исследования были выбраны 13 фотополимерных смол. При дальнейшем исследовании 1 фотополимер HARZ Labs J-cast был исключен из выборки из-за большого процента брака, паразитной засветки, усадки и полимеризация на открытом воздухе даже в темноте. На настоящий момент материал снят с производства ООО «HARZ Labs» (Россия, Москва).

На рис. в качестве примера показана температурная деструкция двух фотополимеров: выжигаемый – HARZ Labs Dental Cast Cherry; стандартный – JAMG HE ChiTu Systems Conjure Grey.

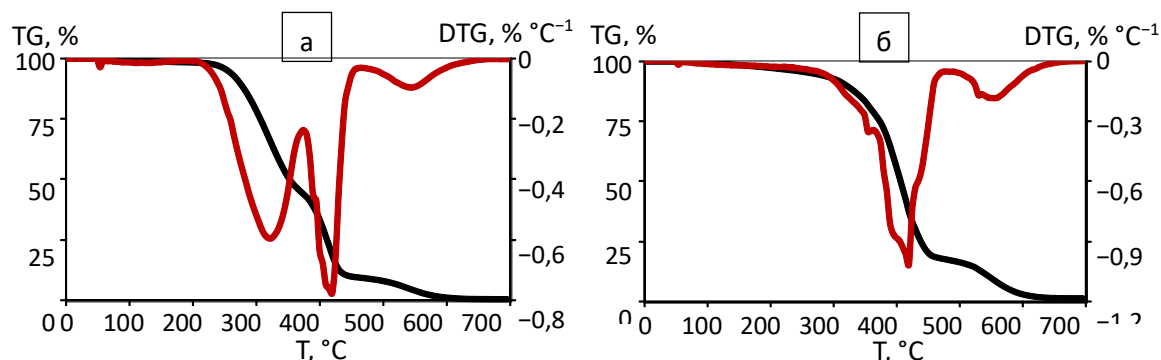


Рис. Деструкция отвержденных фотополимерных смол: а) выжигаемый; б) стандартный.

Оба полимера начинают термическое разложение с температуры 50 °C. Но отличаются температурой начала быстрой деструкции: выжигаемый – 260 °C, стандартный – 335 °C. Выжигаемый фотополимер HARZ Labs Dental Cast Cherry обладает двумя пиками скорости изменения массы при температурном разложении, связанными со структурными изменениями. Остаточная масса при температуре 695 °C составляет 0,278 %. Стандартный фотополимер JAMG HE ChiTu Systems Conjure Grey показал термическое разложение удовлетворительное для использования в технологии литья по выжигаемым моделям с одним пиком изменения скорости разложения. Остаточная масса материала при температуре 695 °C составляет 1,26 %. Схожие картины деструкции и их количественных характеристики были определены для всей выборки материалов.

Результаты термогравиметрического анализа стали основой для экспериментов, направленных на определение температурных зависимостей коэффициента температурного расширения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края, соглашение от 26.02.2025 г. № С-26/940.1.

1. Kamenskikh A.A., Pustovalov D.O., Strukova V.I. Thermal Degradation and Thermomechanics of Castable Photopolymer Resins After Curing // Technologies. 2026. Vol. 14. Art. 484.

2. Eken S., Kavun Y., Çelikçi N., Kerli S. Production of bio-based Photopolymer–Colemanite resin composites using 3D DLP printing for advanced radiation protection // Applied Radiation and Isotopes. 2026. Vol. 229. Art. 112380.

ТЕРМОВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ ПОСЛЕ АДДИТИВНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ С РАЗНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ПЕЧАТИ

Ран М.А., Струкова В.И., Каменских А.А., Пустовалов Д.О.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: ranmasha06@yandex.ru

Динамический механический анализ (ДМА) позволяет получить температурные зависимости модуля потерь, модуля накопления и тангенса угла механических потерь, которые являются основой для формирования термовязкоупругой модели поведения материалов [1]. Модель Максвелла с разложением ядра релаксации рядами Prony применяется для описания термомеханики фотополимерных материалов [2]. В рамках текущего исследования выполнено аддитивное формирование структур материалов на основе фотополимерных смол для набора современных выжигаемых и стандартных фотополимеров. Рассматриваются материалы российского и зарубежного производства из разного сегмента рынка, стоимость литра которых варьируется от 2 до 30 тыс. руб. Материалы рассматриваются как перспективные для формирования выжигаемых фотополимерных моделей для получения сложнопрофильных геометрий литейных форм.

Динамический механический анализ материалов выполнен при температурах до 225 °С, что соответствует диапазону температур до начала стадии быстрой деструкции материалов. В рамках экспериментов определены условия выхода из зоны линейной вязкоупругости. Исследования выполнены на базе лаборатории пластмасс ПНИПУ с использованием DMA Q800 (TA Instruments г. Нью-Касл, США). Термомеханика фотополимерных материалов на примере температурных зависимостей модуля накопления и модуля потерь показана на рисунке.

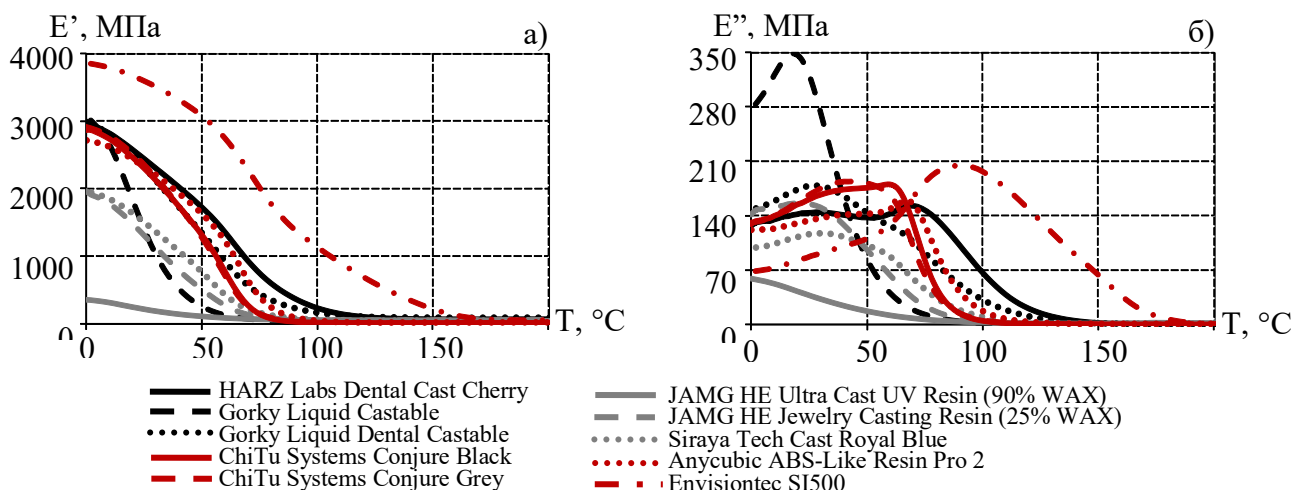


Рис. Термомеханика отвержденных фотополимерных смол: а) модуль накопления; б) модуль потерь.

Максимальная температура ДМА для материалов варьировалась от 205 до 225 °С и зависела от поведения материала, а также условиями не выхода из зоны линейной вязкоупругости. Сравнительный анализ экспериментальных данных показан в рамках общего для всей выборки диапазона температур от 0 до 200 °С для одного из направлений печати образцов, по координате x . При увеличении температуры модуль накопления снижается, что соответствует стеклянному переходу и структурной α -релаксации. Снижение жесткости материалов может быть оценено по сигналу модуля потерь: снижение модуля после пикового значения. При дальнейшем увеличении температуры материалы выходят на вязкое плато.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края, соглашение от 26.02.2025 г. № С-26/940.1.

1. Moharana A.P., Singh S.S., Dixit A.R. Dynamic mechanical and viscoelastic properties of glass fiber reinforced photopolymer composite fabricated using vat-photopolymerization additive technique: Influence of filler volume fraction // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 130. P. 72–86.

2. Струкова В.И., Каменских А.А., Носов Ю.О., Пустовалов Д.О. Термомеханическая модель поведения фотополимерного материала // Вестник Чувашия государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2025. №1(63). С. 65–75.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛАСТИКА ПРИ 3D ПЕЧАТИ В КОСМОСЕ

Саньков М.А., Татусь Н.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва

e-mail: sankov.michail@gmail.com

В условиях микрогравитации отсутствует естественная конвекция и теплопроводность, и раскалённый экструдированный пластик остывает исключительно за счёт излучения. Это резко замедляет достижение порога затвердевания. Если следующий слой наносится на материал, не успевший остыть ниже температуры стеклования, деталь теряет геометрию: под влиянием нового слоя полужидкая основа деформируется, что ведёт к «расползанию» стенок и нарушению точности печати.

Без научных данных о реальной скорости охлаждения в вакууме невозможно рассчитать оптимальную паузу между слоями. Исследование необходимо, чтобы гарантировать послойную стабильность и создать надёжную технологию орбитального производства взамен доставки грузов с Земли [1].



Рис. Коллектив научной организации.

В работе рассмотрен одномерный стержень постоянной и переменной длины. Определена его скорость охлаждения в вакууме на основе закона Фурье и закона Стефана-Больцмана [2]. Краевая задача, полученная в результате анализа законов и физической постановки задачи, решена методом конечных разностей. Также произведено решение методом конечных элементов. Проведено сравнение с известной скоростью охлаждения пластика в земных условиях. Как результат, определена допустимая скорость печати пластиком *ABS* в космосе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России Соглашение № 075-15-2025-646 от 20.08.2025 г.

1. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Тянь Шиаюн. Анализ эффективности композитных структур для космических конструкций, способных запасать упругую энергию // Труды МАИ. 2025. № 4.

2. Авдеевский В.С., Галицкий Б.М. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике // М., «Машиностроение», 1975. С. 624.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ПУЗЫРЬКА В ЛИНЕЙНО-ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Седова А.К.

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

e-mail: anastasiia.sedova@math.msu.ru

Моделирование резкого сжатия (схлопывания) газовых пузырьков в жидкости — актуальная задача благодаря широкому кругу приложений в науке и технике. Указанные процессы могут приносить как пользу, так и вред. К числу положительных примеров относится применение кавитации в медицине: например, для разрушения жировых отложений или дробления почечных камней. Отрицательное действие проявляется в эрозии деталей гидродинамических установок — винтов, лопастей насосов и турбин, где ударные волны постепенно повреждают металлическую поверхность. Более того, в особых условиях подобные явления способны даже инициировать термоядерные реакции.

Для некоторых более простых постановок задачи о сжатии пузырька существуют аналитические решения. Классический пример — решение, описывающее схлопывание сферической полости внутри идеальной несжимаемой жидкости (см. Рис.). Однако в источнике [1] обосновывается физическая некорректность такой модели: при её использовании скорость границы раздела сред в момент схлопывания становится бесконечной, а в жидкости около пузырька возникает резкий скачок давления, не позволяющий пренебречь сжимаемостью среды.

Из-за отсутствия точных аналитических решений для различных вариаций данной задачи, возникает необходимость применения численных методов. В настоящей работе процессы моделируются конечно-разностными численными схемами, что даёт возможность достаточно точно определить скорость сжатия пузырька и распределение давления в окружающей жидкости.

Во всех рассматриваемых случаях пузырёк считается сферически симметричным. Для ситуации схлопывания пустой полости в идеальной несжимаемой жидкости удалось установить, что численное решение хорошо совпадает с аналитическим. В более сложной постановке (для которой аналитического решения нет) газ полагается идеальным и совершенным, а жидкость — несжимаемой линейно-вязкой. Процесс изучается в предположении гомобаричности: давление внутри пузырька считается одинаковым во всём объёме. Все пространство делится на две области: газ и окружающая жидкость. Известно начальное распределение следующих величин: давления, плотности, скорости и температуры. Таким образом, имеем начально-краевую задачу с подвижной границей. В работе представлено приближённое решение данной задачи и проведён анализ распределения давления в жидкости.

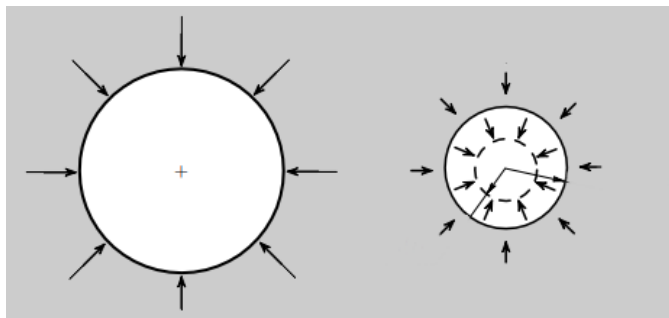


Рис. Схлопывание газового пузырька.

1. Нигматулин Р. И. Механика сплошной среды. Кинематика. Динамика. Термодинамика. Статистическая динамика. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2014.

АНАЛИЗ ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ РАСПЛАВЛЕННОГО ПАРАФИНА

Сиваков Н.С., Усанов В.А., Логинов А.А

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

e-mail: sivakov@ipmnet.ru

Высокий интерес к исследованиям легкоплавких твердых топлив на основе парафина в промышленности и аэрокосмической отрасли обусловлен простотой в применении и безопасностью хранения. Под воздействием высокотемпературных потоков газа скорость регрессии легкоплавких твердых топлив заметно выше, чем у газифицирующихся твердых топлив. Развитие неустойчивости поверхности расплава приводит к уносу капель топлива и интенсивному смешению с окислителем, что в результате дает большую скорость регрессии и увеличению полноты сгорания топлива [1].

Понимание механизмов развития неустойчивости поверхности расплава позволяет контролировать динамику массопереноса и интенсивность теплообмена и достигается за счет сочетания экспериментальных и вычислительных методов исследования. При помощи алгоритмов компьютерного зрения была достигнута автоматизация выделения и анализа волновых структур, которая позволила перейти от качественного наблюдения к количественным оценкам динамики процесса [2].

Параметры численного расчета соответствовали одному из экспериментальных пусков, проводимых на исследовательской установке лаборатории термогазодинамики и горения ИПМех РАН. Численное трехфазное моделирование проводилось в программном пакете *OpenFoam* в двумерной постановке при помощи расчетного модуля с возможностью отслеживания межфазных границ методом VOF. Для возможности анализа мелкомасштабных явлений на поверхности образца используется расчетная сетка с пятью уровнями измельчения.

Полученные при обработке видеок кадров эксперимента и расчетных полей при помощи методов компьютерного зрения гистограммы представлены на Рис. Установлено, что в интервале длин волн от 0.6 мм до 3 мм лежит 90% всех регистрируемых волн с видео эксперимента и 88 % волн, наблюдаемых в расчете. Амплитуда волн в диапазоне от 0.05 мм до 0.5 мм регистрируется для 88 % волн в эксперименте и 85 % волн, полученных численно. Результаты хорошо аппроксимируются при помощи функции логарифмически нормального распределения, кривые которого наложены на гистограммы. Выявлена доминирующая частота колебаний – около 120 Гц. Достигнут высокий уровень соответствия результатов эксперимента и численного расчета.

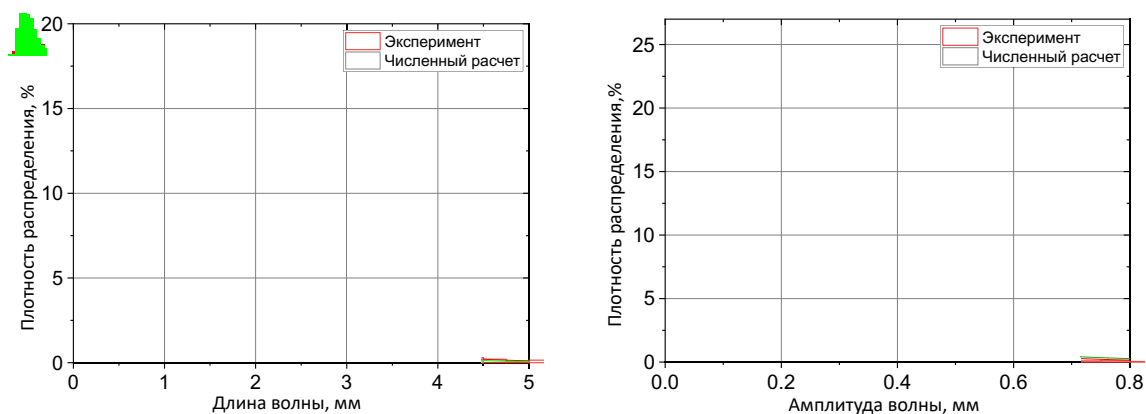


Рис. Сравнение плотностей распределения величин при эксперименте и численном расчете. Длина волны (слева), амплитуда (справа).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-19-00703).

1. Mazzetti A., Merotto L., Pinarello G. Paraffin-based hybrid rocket engines applications: A review and a market perspective // *Acta Astronautica*, 2016, V. 126, P. 286–297.

2. Усанов В.А., Логинов А.А., Сиваков Н. С. Применение алгоритмов компьютерного зрения для анализа волн на поверхности расплава парафина // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2025. Т. 26, № 8.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ПЕРИОДИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Сорока М.З., Касимов А.Р.

Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва

e-mail: maryush.soroka@skoltech.ru

Рассматривается проблема распространения одномерной волны горения в периодически неоднородной среде. Проблема мотивирована явлением регуляризации колебаний скорости детонационной волны, обнаруженным в недавних исследованиях детонации в неоднородных смесях [1]. Известно, что как детонационные волны [1], так и медленные волны горения [2], распространяющиеся в однородных средах, обладают сложной нелинейной динамикой. В этом случае скорость волны может колебаться регулярно или хаотически в зависимости от параметров смеси (например, энергии активации). Вопрос о влиянии периодических внешних условий на такие колебания представляет научный и практический интерес.

В данной работе исследуется явление регуляризации динамики волны горения при ее распространении в периодически неоднородной среде. Изучается модельная система уравнений реакции-диффузии для безразмерной температуры T и концентрации топлива C с Аррениусовской кинетикой выделения энергии.

Мы исследуем, как пространственная неоднородность начальной концентрации топлива, C , а также коэффициента тепловых потерь, q , влияет на динамику волн. В частности, мы рассматриваем случаи, когда начальная концентрация следует профилю $C=C_0+A\sin(kx)$, где A и k представляют собой амплитуду и волновое число возмущений соответственно. Влияние этих параметров на динамику волн горения анализируется путем численного решения системы уравнений, представленной выше, для различных значений волнового числа и амплитуды неоднородности и определения соответствующей скорости волны для каждого случая.

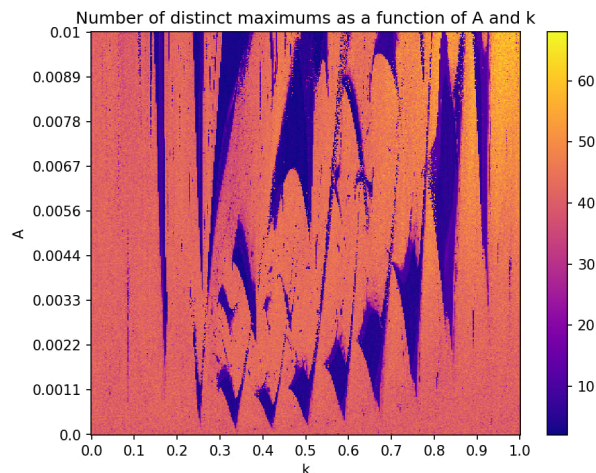


Рис. Языки Арнольда для неоднородной концентрации топлива при разных амплитудах и волновых числах.

Проведенный анализ позволил выявить явления регуляризации и синхронизации колебаний, а также существование областей синхронизации при определенных значениях волнового числа. Установлено, что характер колебаний существенно зависит от k . При приведении двухпараметрического исследования и одновременном изменении волнового числа и амплитуды неоднородности были получены структуры, напоминающие языки Арнольда (см. Рис.). Были проанализированы области внутри и вне языков и описаны различные режимы синхронизации пламени в неоднородной среде.

1. Kasimov A.R., Goldin A.Yu. Resonance and mode locking in gaseous detonation propagation in a periodically nonuniform medium // Shock Waves. 2021. Vol. 31. № 8. P. 841–849.

2. Weber R.O. et al. Combustion Waves for Gases ($Le = 1$) and Solids ($Le \rightarrow \infty$) // Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1997. Vol. 453. P. 1105–1118.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С НАКЛОННЫМ ГАЗОВЫМ КЛИНОМ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

О.Г. Сутырин¹, С.В. Малышев²

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

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

e-mail: sutyurin@imec.msu.ru

На основе уравнений Эйлера численно моделируется автомодельная задача о взаимодействии ударной волны с «газовым клином» – областью газа пониженной плотности, ограниченной двумя лучами. Применяется конечно-объемный метод CWENO 3-го порядка аппроксимации на подробных динамических локально-адаптивных расчетных сетках [1].

На основе серии расчетов для фиксированной интенсивности ударной волны и отношения плотностей газов описана газодинамика течения, включающая косые скачки уплотнения, контактные и тангенциальные разрывы, трехударные конфигурации, высоконапорные струи и слоистые вихри. Основное внимание уделяется конфигурации сопряжения лидирующего скачка, формирующегося в результате взаимодействия исходной волны с передним краем газового клина, с косым скачком, соединяющим лидирующий скачок основной волной. Обнаружен переход от регулярного к маховскому режиму сопряжения лидирующего и косого скачков при увеличении угла наклона верхней грани газового клина.

С помощью численного решения соотношений Ренкина-Гюгонио построены ударные поляры Буземана для потоков газа в системах отсчета, связанных с точкой сопряжения лидирующего и косого скачков, а также с тройной точкой маховской конфигурации. Показано, что переход к маховскому режиму сопряжения скачков связан с изменением необходимого для согласования давлений и направлений потоков угла наклона прилегающего участка лидирующего скачка. Определено критическое значение угла наклона задней границы клина, при котором происходит переход к маховскому сопряжению.

Показано, что конфигурация сопряжения лидирующего и косого скачков геометрически совпадает с аналогичной конфигурацией в известной задаче о взаимодействии ударной волны с наклонной границей раздела газов типа «fast-slow» [2] при условии правильного подбора числа Маха волны и отношения плотностей газов.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (тема АААА-А19-119012990113-1).

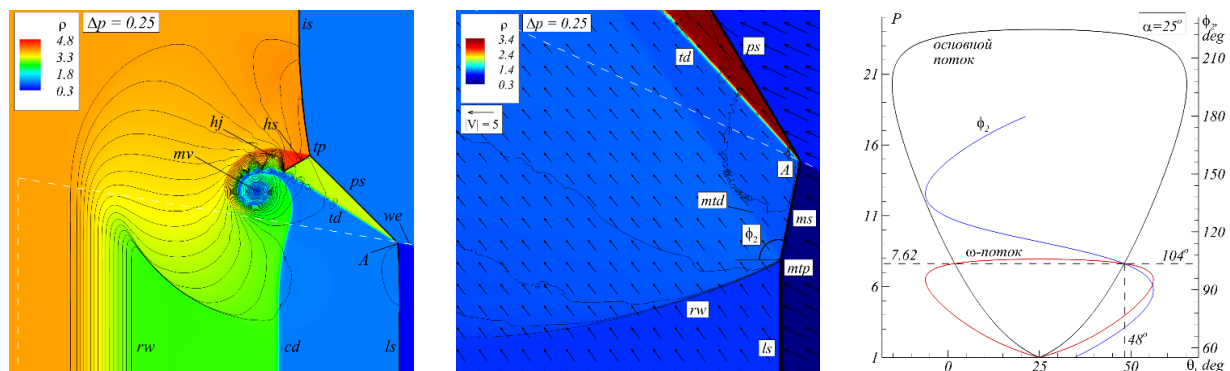


Рис. 1. Слева: общий вид течения для небольшого угла наклона верхней грани газового клина ($\alpha = 10^\circ$), поле плотности, изолинии давления. Посередине: увеличенная область взаимодействия лидирующего ls и косого ps скачков через маховскую ножку ms при $\alpha = 25^\circ$, вектора скорости в системе отсчета, связанной с движущейся точкой A . Справа: ударные поляры Буземана для точки A ; пересечение поляр соответствует давлению и углу разворота потока за косым скачком ps и маховской ножкой ms . Угол наклона скачка $\phi_2 = 104^\circ > 90^\circ$ соответствует маховскому режиму сопряжения скачков.

1. Сутырин О.Г. О моделировании задач газовой динамики с помощью локально адаптируемых сеток на основе дерева квадрантов // Вестн. моск. ун-та. мат. мех. 2026. № 3. С. 71–74.

2. Abd-El-Fattah A.M., Henderson L.F. Shock waves at a fast-slow gas interface // Journal of Fluid Mechanics. 1978. V. 86. №. 1. P. 15–32.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДЗЕМНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ГАЗА В НЕОДНОРОДНЫХ СЛОИСТЫХ ПЛАСТАХ

Сыпченко И.М.^{1,2}

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

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

e-mail: sypchenkoim@imec.msu.ru

Рассматривается осесимметричная задача закачки газа через вертикальную скважину в водонасыщенный пласт, состоящий из чередующихся между собой проницаемых и непроницаемых слоев. Каждый проницаемый слой характеризуется своей пористостью, соответствующей ей проницаемостью и мощностью. Закачка газа сопровождается образованием двухфазной зоны, на которую влияют гравитационные и капиллярные силы, а также параметры пласта. Целью работы является аналитическая оценка эффективности подземного размещения газа в таких пластах на основе ограниченного количества данных: характеристик слоев и темпа закачки.

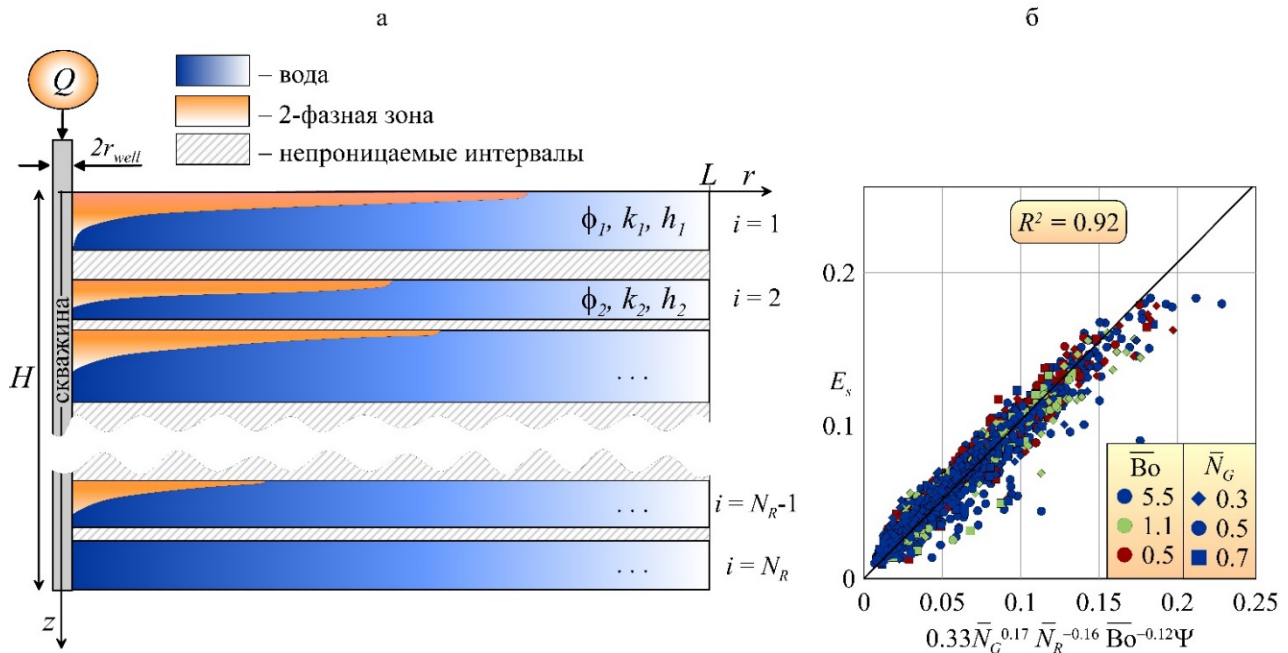


Рис. Схема задачи фильтрации в пласте, имеющем слоистое строение (а). Сравнение рассчитанных значений эффективности закачки с аналитической оценкой (б).

Аналитическая оценка эффективности размещения газа получена в предположении, что эффективность в каждом слое удовлетворяет закону подобия $E_s \sim \sqrt{Gr}$, полученному в статье [1]. Предложен безразмерный параметр Ψ , в котором учитывается неравномерность истечения газа из скважины, а также пористости, проницаемости и мощности каждого слоя. Так, эффективность закачки газа в пласт пропорциональна Ψ : $E_s = a\Psi$, где a - коэффициент. Проведено параметрическое исследование, в котором варьировались значения параметров подобия, отвечающих за капиллярное давление, количество слоев в пласте, отношение вертикальной проницаемости к горизонтальной, а также минимальную и максимальную мощность слоев. Найдена зависимость коэффициента a от перечисленных параметров подобия.

1. Sypchenko I., Afanasyev A. CO₂ storage efficiency in saline aquifers: Insight from the numerical modeling of immiscible displacement. Physics of Fluids. 2024. V. 36. No. 126624.

ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕНИЯ СОЛИ НА ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ПРИ ЗАКАЧКЕ В НЕОДНОРОДНЫЙ СЛОИСТЫЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ

Сыпченко И.М.^{1,2}

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

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

e-mail: sypchenkoim@imec.msu.ru

В рамках осесимметричной задачи закачки газа через вертикальную скважину в пласт, насыщенный соленой водой, исследуется эффект запираания низкопроницаемых слоев вследствие отложения соли. В задаче рассматривается пласт, состоящий из чередующихся проницаемых и непроницаемых слоев. Проницаемость первых задается случайным образом, а вторых равна нулю. Закачка сухого газа с постоянным расходом продолжается до начала истечения газа из рассматриваемой области. В исследовании сравниваются случаи соленой и пресной воды, изначально насыщающей слоистую систему.

Для подтверждения описанного эффекта проведено численное моделирование данной задачи. В расчетах учитывается неравномерное истечение газа из скважины, изменение проницаемости за счет выпадения соли, а также капиллярные силы. На каждый слой приходится по одной ячейке по оси z , то есть влияние гравитационных сил не учтено.

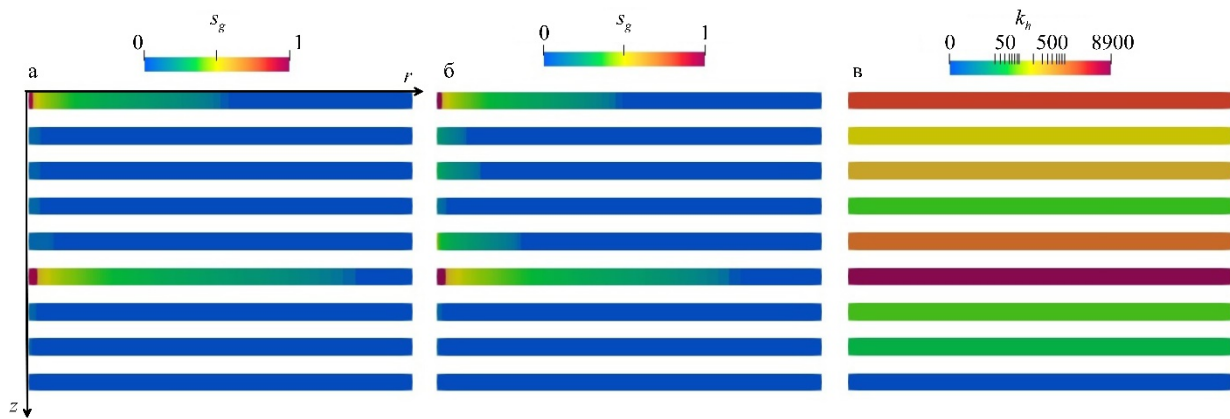


Рис. Рассчитанные распределения насыщенности газа в слоистой системе в случаях с соленой (а) и пресной (б) пластовой водой. Распределение горизонтальной проницаемости в обоих расчетах (в).

В проведенных расчетах наблюдается различие в распределении насыщенности газа в случаях соленой (Рис. а) и пресной (Рис. б) пластовой воды. Начальное распределение горизонтальной проницаемости в этих случаях одинаково (Рис. в). Показано, что газ преимущественно течет в высокопроницаемые пласты в обоих случаях, однако в случае с пресной водой течение газа наблюдается и в слоях с более низкой проницаемостью. В случае, когда соленость пластовой воды ненулевая, в слоях с более низкой проницаемостью происходит запираание потока газа вследствие выпадения соли. Таким образом, проницаемость в этих слоях снижается, а закачиваемый с постоянным расходом газ перераспределяется на высокопроницаемые слои.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ, ОБУСЛОВЛЕННОГО НАЛИЧИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ МАССООБМЕНА

Толоко Г.В., Калугин С.Т.

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва

e-mail: toloko.gv@phystech.edu

В связи с ростом сопротивления трения при турбулизации потока ламинарно-турбулентный переход остается актуальной проблемой для исследований. Одним из методов таких исследований является метод прямого численного моделирования. При этом в расчетах этим методом возникает проблема постановки задачи для возмущений в потоке: разный спектральный состав возмущений может приводить к различным результатам в области ламинарно-турбулентного перехода.

В данной работе проведено численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода и турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое на плоской пластине для двух различных генераторов возмущений – с узким и широким спектрами. Численное решение уравнений получено при помощи пакета программ [1,2]. Параметры набегающего потока взяты такими же, как и в [3]: число Маха $M_\infty = 3$; число Рейнольдса, посчитанное по длине пластины, $Re_L = 2.37 \times 10^6$; температура $T_\infty = 103.6$ К.

На основе анализа полей обнаружено, что, несмотря на отличия в форме возмущений от генераторов, поля давления на стенке в области нелинейного развития возмущений содержат одинаковые структуры (рис.). Обнаружено, что зависимости энергии отдельных компонент спектра возмущений (гармоник) от продольной координаты в двух случаях качественно совпадают. Это говорит об одинаковом сценарии нелинейного взаимодействия – косом распаде [4]. Показано, что зависимости среднего коэффициента трения от продольной координаты в двух случаях выглядят схожим образом и в турбулентной области выходят на уровень экспериментальной корреляции.

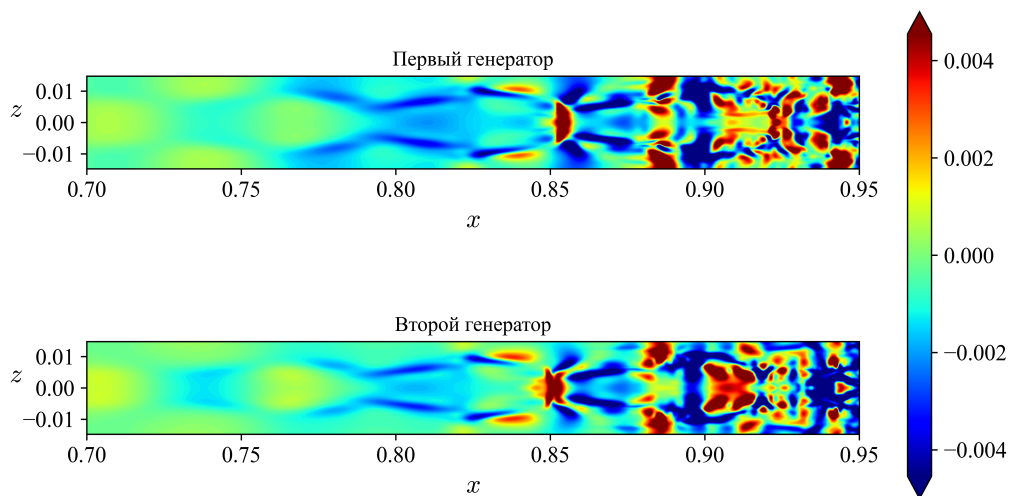


Рис. Возмущения давления на пластине в фиксированный момент времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект №23-79-10072-П.).

1. Башкин В. А., Егоров И. В. Численное моделирование динамики вязкого совершенного газа. ФИЗМАТЛИТ, 2012.

2. Егоров И. В., Новиков А. В. Прямое численное моделирование ламинарно-турбулентного обтекания плоской пластины при гиперзвуковых скоростях потока // Журнал Вычислительной Математики И Математической Физики. 2016. Т. 56, № 6. С. 1064–1081.

3. Mayer C. S. J., Von Terzi D. A., Fasel H. F. Direct numerical simulation of complete transition to turbulence via oblique breakdown at Mach 3 // J. Fluid Mech. 2011. V. 674. P. 5–42.

4. Chang C.-L., Malik M. R. Oblique-mode breakdown and secondary instability in supersonic boundary layers // J. Fluid Mech. 1994. V. 273. P. 323–360.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОНИЦАЕМЫХ ТЕЛ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДАМИ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Удалов А.С.^{1,2}

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

² НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, Москва

e-mail: udalets@inbox.ru

В работе представлены разработанные автором высокопроизводительные численные методы граничных элементов для решения систем эллиптических уравнений, к которым сводится решение прикладных задач обтекания проницаемых тел медленным потоком вязкой жидкости (Рис. 1). Эти методы основываются на полученных точных аналитических решениях уравнений гидродинамики, также называемых гидродинамическими потенциалами, и разложении искомого решения конкретных краевых задач в конечные ряды по этим потенциалам. Для поиска коэффициентов функциональных рядов разложений используется схема коллокаций для граничных условий. Поэтому данный алгоритм принято относить к полуаналитическим. В нем системы дифференциальных уравнений для выбранных моделей сплошной среды выполняются точно, а граничные условия удовлетворяются в некотором дискретном множестве точек границы. Такой подход, во-первых, позволяет производить разбиение на элементы только границы, а не всего пространства (то есть использовать основное преимущество метода граничных элементов), а во-вторых, значительно упрощает анализ получившихся результатов. Это приводит к тому, что при достаточно скромных вычислительных затратах методы демонстрируют хорошую точность полученных результатов. В докладе дополнительно описана верификация разработанных алгоритмов и возможные направления их дальнейшего развития.

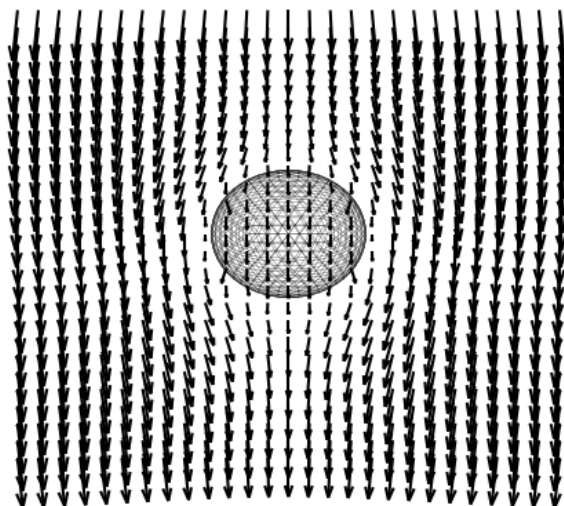


Рис. 1. Обтекание пористого шара потоком жидкости.

Область приложений разрабатываемых алгоритмов достаточно обширна. Например, при закачке в трещину гидроразрыва жидкости с пропантом требуется моделировать сложные масштабные процессы гидродинамики для сред с разными свойствами. Другим примером использования предложенных методов служит взаимодействие пористых катализаторов с жидкими реагентами при моделировании химических реакций. Логiku математически аналогичных разработанных автором методов для задач стационарной теплопроводности гетерогенных трещиноватых сред можно найти в работах [1, 2].

1. Udalov A. S. Numerical modeling of thermal loading of composite aerospace vehicle parts containing cracks // *Acta Astronautica*. 2026. Vol. 240. P. 60–62.

2. Звягин А. В., Удалов А. С. Поиск эффективного коэффициента теплопроводности гетерогенных сред методами граничных элементов // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2026. Т. 66, № 3. С. 421–429.

ПАРАФИН КАК ОСНОВА ЛЕГКОПЛАВКОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ И УНОСА МАССЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Усанов В.А., Гембаржевский Г.В., Сиваков Н.С., Рашковский С.А., Якуш С.Е.

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

e-mail: usanov@ipmnet.ru

При обдуве твердых материалов высокотемпературным газом на поверхности происходят физико-химические превращения, и продукты разложения или испарения могут самовоспламеняться при наличии окислителя и подходящих температурных условиях. Особый интерес вызывают легкоплавкие вещества, например парафин, у которых температура плавления ниже температуры газа. Это значительно увеличивает скорость регрессии топлива, что особенно важно для использования такого топлива в промышленности.

Для решения задачи, были проведены эксперименты (см. рис.) на установке, которая позволяет создавать высокотемпературный поток окислителя. В качестве объекта исследования был выбран парафин марки П-2, из которого были сделаны образцы. Температура воздуха на входе в рабочую камеру варьировалась в диапазоне 600–1000 К, расход воздуха – в пределах 0.05–0.22 кг/с, давление в рабочей камере варьировалось в диапазоне 0.4–2.0 МПа.

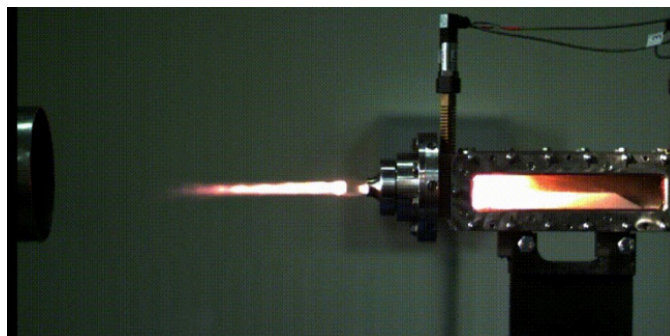


Рис. Работа экспериментальной установки.

В результате установлено, что самовоспламенение образца парафина происходит при определенных значениях параметров T_{in} (температура потока на входе в рабочую камеру) и G_a (массовый расход потока). По результатам экспериментов построена граница области устойчивого самовоспламенения парафина в координатах (G_a, T_{in}) . Также была определена задержка воспламенения. В результате анализа экспериментальных данных и теоретических исследований была предложена модель воспламенения парафина. Проведены исследования влияния геометрических размеров образца, а также наличия искусственных преград на параметры плавления и самовоспламенения образца.

Установлена зависимость скорости регрессии образца от параметров набегающего потока горячего воздуха. С помощью высокоскоростной камеры с объективом высоко увеличения были определены амплитуды и длины этих волн, средние значения которых составляли 0,1–0,3 мм и 0,5–2 мм соответственно. Разработана модель регрессии образца в высокотемпературном потоке воздуха.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00703, <https://rscf.ru/project/24-19-00703/>.

1. С. А. Рашковский, В. А. Усанов, Г. В. Гембаржевский, С. Е. Якуш. Измерение характеристик плавления и горения образца парафина в потоке горячего воздуха // Горение и взрыв. 2026. Т. 19. № 1. С. 123–135.

2. V. A. Usanov, G. V. Gembarzhetskii, S. A. Rashkovskiy, S. E. Yakush. Critical conditions for self-ignition of a paraffin slab in high-temperature air flow // Acta Astronautica. 2026. Vol. 248. P. 1340–1350.

КИНЕТИКА ВЫСВОБОЖДЕНИЯ МОНОМЕРОВ И ОЛИГОМЕРОВ ПРИ БИОДЕГРАДАЦИИ ПОЛИМЕРНОГО СТЕНТА

Хайрулин А.Р.^{1,2}, Кучумов А.Г.^{1,2}

¹ Научно-технологический университет «Сириус», федеральная территория Сириус,

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

e-mail: s.xayrulin@mail.ru

Биоразлагаемые полимерные стенты из PLLA являются перспективной альтернативой металлическим, обеспечивая временную поддержку сосуда [1]. Однако сложность прогнозирования долгосрочного поведения из-за непредсказуемого изменения механических свойств (потеря радиальной жесткости, повышение хрупкости) ограничивает клиническое применение, приводя к рестенозу и тромбозу.

Была использована упрощенная геометрия (куб 0,14×0,14×0,14 мм) – вырезанная часть стента. Анализируются две модели биodeградации PLLA: высвобождение мономеров и олигомеров. Для связи химической деструкции с изменением механического отклика введен параметр «повреждения». Математическая постановка включает: уравнение реакции разрыва эфирных групп, уравнения реакции-диффузии для пространственно-временного распределения продуктов деградации (мономеров и олигомеров) и выражение для их диффузии. Рассмотрены три варианта граничных условий: омывание с трех сторон (ГУ1), частичное погружение в ткань (ГУ2), полное погружение (ГУ3).

На основе моделей повреждений оценено падение модуля Юнга и радиальной жесткости стента. При полном омывании (ГУ1) модель мономеров дает более высокие значения эффективного модуля Юнга по сравнению с моделью олигомеров. При ГУ2 и ГУ3 наблюдается противоположная закономерность: скорость падения модуля у модели олигомеров значительно ниже. Данные различия обусловлены применением модели кристалличности при высвобождении олигомеров.

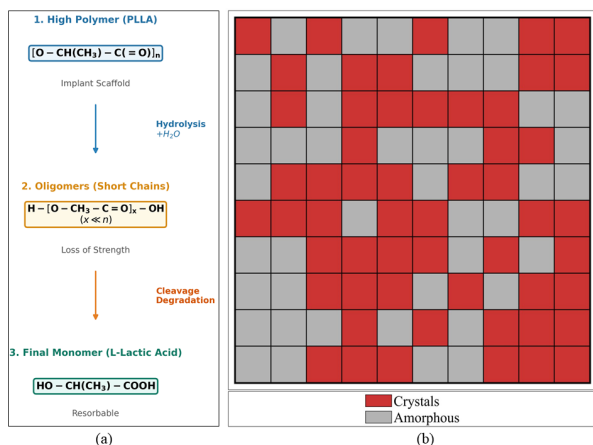


Рис. 1. Схематическое представление цикла биоразложения (a) и фаз полимера (b)

Расчет радиальной жесткости стента показал начальное значение в пределах 30 Н/мм при начальной кристалличности 0,3859, соответствующей стенту, напечатанному на 3D – принтере. Это значение соответствует литературным данным и подтверждает корректность модели и достоверность результатов [2].

Результаты получены при финансовой поддержке проекта «Развитие технологии для проектирования численного моделирования и аддитивного производства сетчатых конструкций для транскатетерной имплантации аортального клапана», реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение № 27-03 от 07 июля 2025 г.).

1. Kuchumov A.G., Khairulin A., Sporysheva D., Drozdov A., Kilina P., Kachenjuk M., Bolshakov P., Akyfiev K., Silberschmidt V.V. Elaboration of PLA and PLLA stents manufacturing regimes and evaluation of their mechanical performance // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025. Vol. 140. P. 5483–5513.

2. He S., Chen Q., Li Z. Influence of Stent Structure on Mechanical and Degradation Properties of Poly (Lactic Acid) Vascular Stent // Journal of Functional Biomaterials. 2025. Vol. 16. № 248.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ БЕГУЩИХ ВОЛН В УПРУГОМ ВОЛНОВОДЕ СИСТЕМОЙ ГИБКИХ ПЬЕЗОАКТУАТОРОВ

Халтурина Д.Д.

Институт математики и информатики КубГУ, Краснодар
e-mail: khalturina@kubsu.ru

Моделирование распространения бегущих волн в упругих материалах необходимо при решении различных задач, таких как мониторинг состояния конструкций (Structural Health Monitoring, SHM), высокоточное позиционирование, активная виброзащита. Идея селективного возбуждения заключается в выборе режима подачи электрического напряжения на систему пьезоактуаторов таким образом, чтобы в волноводе, к которому они прикреплены, возбуждались требуемые бегущие волны и гасились нежелательные моды. Для этого при моделировании необходимо учесть взаимное влияние пьезоактуаторов через волновод, так как простой суперпозиции сигналов от отдельных датчиков недостаточно.

Рассматривается двумерная контактная задача о взаимодействии системы тонких гибких пьезонакладок с упругим волноводом (см. Рис. а). В области контакта выполняется равенство напряжений и смещений, деформация пьезоактуаторов описывается обобщенным законом Гука со связным электрическим полем. Для аналитического преобразования системы к виду, пригодному для решения известными численными методами, используются интегральные и асимптотические представления волновых полей через элементы матрицы Грина слоя и решение отдельных частей задачи в трансформантах Фурье [1-2]. Задача сводится к системе интегро-дифференциальных уравнений, которая дискретизируется по методу Бубнова-Галеркина.

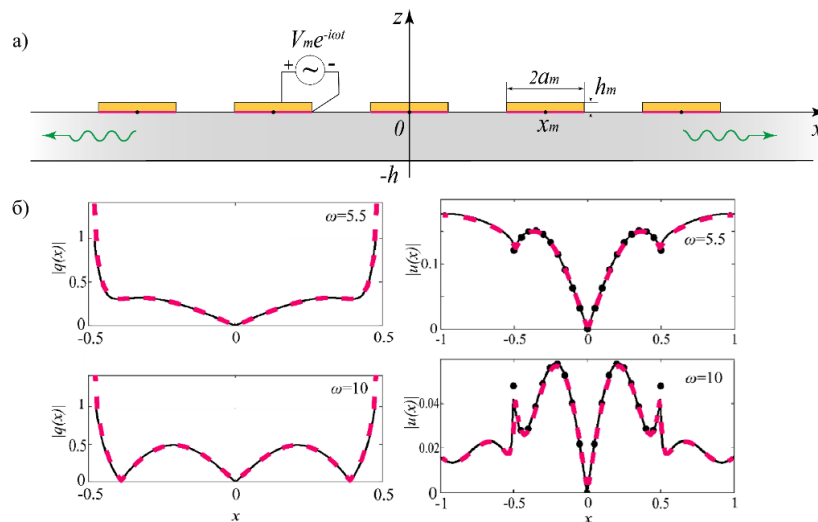


Рис. Схема упругого волновода с прикрепленными к нему пьезоактуаторами (а), тестовое сопоставление полученных контактных напряжений $q(x)$ и продольных смещений $u(x)$ (красным) с результатами [1] (черным) для одной пьезонакладки (б).

Разработан алгоритм расчета волновых полей в рассматриваемой системе при различных режимах подачи электрического напряжения на пьезоактуаторы с учетом их взаимодействия. Алгоритм реализован в виде программного комплекса и верифицирован на известных данных [1] (см. Рис. б). Построена МКЭ-модель задачи, результаты численного решения ей соответствуют.

Работа выполняется под руководством профессоров Е.В. Глушкова и Н.В. Глушковой в рамках проекта РНФ №24-11-00140.

1. Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Зеemann В., Кваша О.В. Возбуждение упругих волн в слое пьезокерамическими накладками // Акустический журнал. 2006. Т. 52, № 4. С. 470-479.

2. Халтурина, Д.Д., Свитин Е.В. Моделирование взаимодействия пьезоэлектрического актуатора с упругим слоем для вычисления электромеханического импеданса // Прикладная математика: современные проблемы математики, информатики и моделирования: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, молодых ученых. 2025. Т. 1, С. 80–84.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ

Ходак А.С.¹, Емельянов И.Г.^{1,2}

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: ashodak@yandex.ru

Металлические оболочки широко применяются как конструктивные элементы в различных отраслях техники. Такие элементы могут эксплуатироваться в контакте с агрессивными водородосодержащими средами. Негативное влияние агрессивной среды на механические свойства металлов – важный фактор, который необходимо учитывать при оценке ресурса. Чтобы определить ресурс металлической оболочечной конструкции, работающей в водородосодержащей среде, необходимо [1, 2]:

- 1) выбрать модель, позволяющую определить нестационарное распределение температуры и распределение концентрации водорода в оболочке;
- 2) выбрать модель, позволяющую определить напряженное состояние оболочки при термомеханическом нагружении;
- 3) определить механические параметры материала оболочки при механическом нагружении в условиях контакта с агрессивной средой;
- 4) выбрать критерий деградации свойств материала и определить ресурс оболочечной конструкции.

В работе используется разработанный математический аппарат на основе вариационной формулировки метода конечных элементов для решения задач теплопроводности. Этот же подход применяется для решения задачи диффузии водорода в металле. Для описания тонкостенной оболочки используется классическая теория, основанная на гипотезах Кирхгофа — Лява. Действующие напряжения определяются путём решения физически нелинейной краевой задачи для оболочки вращения. Используется метод интегрирования уравнений для оболочек с дискретной ортогонализацией С.К. Годунова. В работе учитывается изменение механических свойств металла под действием водорода. Определение ресурса металлической конструкции демонстрируется на примере защитной оболочки колпаковой печи (см. Рис.), предназначенной для высокотемпературного отжига стали.

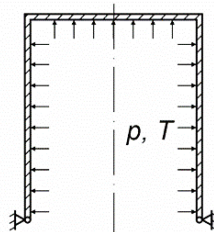


Рис. Расчетная схема защитной оболочки колпаковой печи.

1. Emel'yanov I.G., Polyakov A.A., Hodak A.S. Stressed state of a steel construction working in hydrogen containing environment // Journal of Physics: Conference Series. 8th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Science. 2019. Vol. 1391. P. 012027.

2. Emel'yanov I.G., Hodak A.S. Thin-walled shell service life under variable thermomechanical load // Procedia Structural Integrity. 2023. Vol. 50. P. 50–56.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ОСЕННЕГО ТЕРМОБАРА В ОЗ. ДОЛГОЕ (БЕЛАРУСЬ)

Цыденов Б.О.¹, Деги Д.В.¹, Барт А.А.¹, Трунов Н.С.¹, Суховило Н.Ю.²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

² Белорусский государственный университет, Минск

e-mail: tsydenov@math.tsu.ru

Воспроизведение осенней динамики термобара в оз. Долгое проводилось на основе численной модели [1] в период с 20.11.2025 по 30.11.2025 с использованием метеорологических данных станции п. Шарковщина за ноябрь 2025 г. [2]. Измеренная 20 ноября 2025 г. минерализация в озере и устье протоки из оз. Свядово составила 273.9 и 262.0 мг/л соответственно. В начале расчетов температура воды в озере задана в виде однородного распределения (6 °С). Коэффициенты горизонтальной вязкости и диффузии приняты равными 2.5 м²/с [3].

Результаты моделирования (рис. 1) показали, что 26–27 ноября 2025 г. под действием восточно-северо-восточного ветра фронт термобара сместился в сторону устья протоки, а ранее сформировавшаяся в теплоактивной области прямая температурная стратификация сменилась гомотермией. Однако этот эффект носил краткосрочный характер: после ослабления ветра и смены его направления продолжилось развитие стратификационных процессов и ускорилось распространение фронта термобара в центральную часть озера.

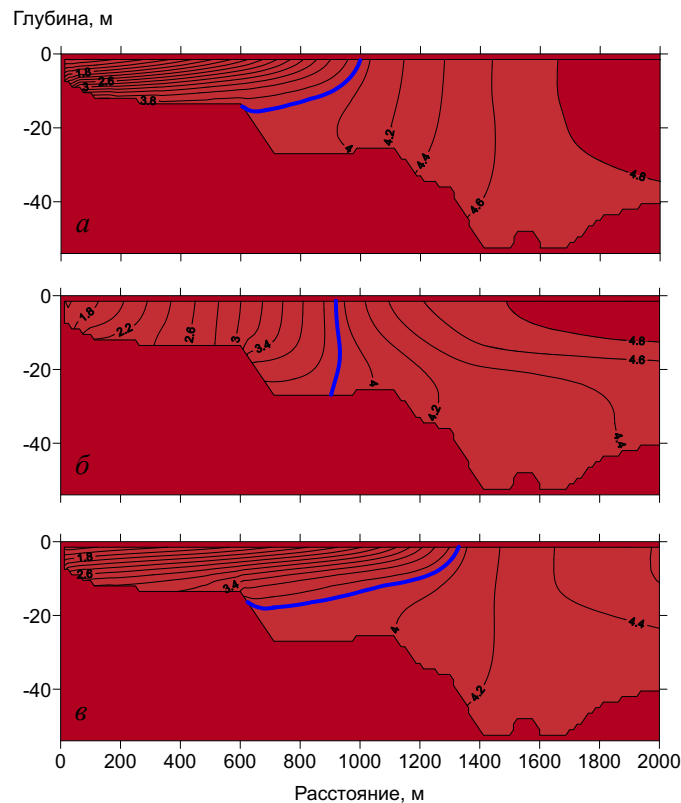


Рис. 1. Распределение температуры (жирной линией показан профиль температуры максимальной плотности) [°С] на 26.11.2025 (а), 27.11.2025 (б) и 28.11.2025 (в).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (№24-47-10001, <https://rscf.ru/project/24-47-10001/>) и БРФФИ (проект №X23РНФМ-001).

1. Tsydenov B.O. Modeling biogeochemical processes in a freshwater lake during the spring thermal bar // Ecological Modelling. 2022. No. 465. Art. 109877.

2. Расписание погоды: [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/>. (Дата обращения: 29.01.2026).

3. Цыденов Б.О., Суховило Н.Ю., Барт А.А., Деги Д.В., Трунов Н.С., Карпаева А.Ю. Математическое моделирование влияния теплового потока на развитие планктона в оз. Долгое (Беларусь) ранней весной // Оптика атмосферы и океана. 2026. Т. 39. № 03. С. 249–258.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЗАКАЧИВАЕМОГО ГАЗА НА ЗАПИРАНИЕ ПОТОКА СОЛЯМИ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ

Чернова А.А.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: a.chernova@imec.msu.ru

Исследуется многофазная фильтрация, сопровождающая закачку газа в пласт, насыщенный соленой водой (Рис.). Оценивается влияние влажности газа на отложение минералов соли в призабойной зоне скважины, приводящее к снижению ее приемистости [1]. Анализ проводится с применением методов численного моделирования фильтрации. Демонстрируется существование критического расхода газа, разделяющего сверхкритический и докритический режим закачки. В сверхкритическом режиме влияние отложений соли на приемистость скважины остается ограниченным. Показано, что в таких случаях закачка более влажного газа является положительным фактором, уменьшающим влияние отложений на снижение приемистости. В докритических режимах поток газа из скважины запирается за конечное время. Показано, что при докритических и околокритических условиях закачка влажного газа является негативным фактором, способствующим более значительному снижению приемистости по сравнению со случаем закачки сухого газа.



Рис. Схема задачи. Области I и II – просушенная прискважинная зона, II – область отложения минералов галита, III – область двухфазной фильтрации воды и газа, а IV – область пласта, которой не достиг газ из скважины.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-19-00380, <https://rscf.ru/project/26-19-00380/>.

1. Чернова А.А., Афанасьев А.А. Запирание газовой скважины отложениями солей при закачке влажного газа // ПММ РАН. 2026. В печати.

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОЙ ДИССИПАЦИИ НА КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ КАНАЛЕ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ СТЕНКИ

Шнейдер А.А., Шеремет М.А.

Механико-математический факультет ТГУ, Томск

e-mail: alinasnejder338@gmail.com

Движение жидкости в горизонтальных каналах имеет большое практическое значение, поскольку оно широко распространено в нефтегазовой, химической и энергетической промышленности. При транспортировке жидкости важно поддерживать температуру выше температуры застывания. Для этого участок стенки может подогреваться. Существует обратная задача, когда труба является теплоотводящим элементом; в этом случае необходимо понимать, насколько эффективно происходит теплообмен. В качестве рабочих сред в таких аппаратах часто используются масла и полимеры. При тепломассопереносе этих сред следует учитывать влияние вязкой диссипации.

В настоящей работе выполнено математическое моделирование вынужденной конвекции несжимаемой жидкости с температурно-зависимыми вязкостью и теплопроводностью с учетом диссипативных слагаемых. Течение считается ламинарным и стационарным. Рассматривается осесимметричный цилиндрический канал с локальным кольцевым нагревом стенки. На нагреваемом участке подвод тепла задается двумя способами: граничным условием первого и второго рода (см. рис. 1). Температурная зависимость динамической вязкости описывается экспоненциальным законом, а теплопроводности – линейным [1]. Определяющие уравнения, полученные из законов сохранения массы, импульса и энергии, приведены к безразмерному виду в переменных «функция тока – завихренность скорости». Система дифференциальных уравнений в частных производных решалась методом конечных разностей второго порядка точности на равномерной сетке [2]. Сходимость по сетке оценивалась на трёх последовательно сгущающихся сетках. Проведена верификация разработанного численного кода.

Было выявлено, что учёт вязкой диссипации позволяет точнее описать процесс теплопереноса, а характер зависимости числа Нуссельта от числа Бринкмана зависит от граничного условия на стенке. Проанализировано влияние вязкой диссипации в осевом направлении.

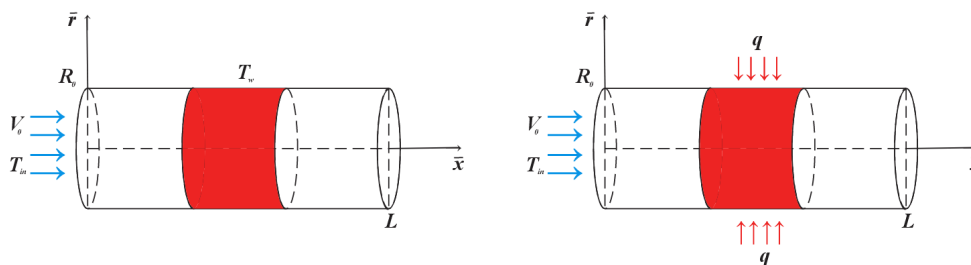


Рис. 1. Постановка задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 25-49-00221).

1. Nonino C. Temperature Dependent Viscosity and Thermal Conductivity Effects on the Laminar Forced Convection in Straight Microchannels // Journal of Heat Transfer. 2013. Vol. 135, № 5. doi:10.1115/1.4024496.

2. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.

ЗАДАЧА О РАЗРУШЕНИИ ПЛОТИНЫ

Шуган И.В.

Институт Океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии Наук, Москва
e-mail: ishugan@rambler.ru

Прорыв плотины представляет собой не только важную практическую проблему в гражданском и гидротехническом строительстве, но и фундаментальную проблему механики жидкости. В связи с материальным ущербом и гибелью множества людей, крайне важно иметь исчерпывающее понимание процессов прорыва плотины и седиментации при оползневых течениях. Главная цель данного исследования — детальный анализ механизмов прорыва плотины с помощью физического и теоретического моделирования. Наша экспериментальная работа была сосредоточена на начальных стадиях прорыва плотины в водном канале, где тонкая пластина, разделяющая воду на разных уровнях, импульсно вытягивается вертикально вверх, в результате чего образуется гидродинамическая бора. Теоретическая модель прорыва плотины основана на уравнениях мелкой воды Бенни. На гидродинамической боре требовались законы сохранения массы, импульса и энергии, в отличие от классических решений Риттера и Стокера, в которых закон сохранения энергии вообще не учитывался. Возникающий поток включает в себя несколько зон: ударную волну и последующий за ней поток сдвиговой вихревой составляющей, контактную поверхность и зону непрерывного истечения. В нашем решении волна движется быстрее, чем классическая волна, которая, в свою очередь, распространяется быстрее, чем контактная поверхность. Разрушающаяся волна характеризуется образованием структуры типа «грибовидной струи», включающей пару вихрей, направленных в противоположные стороны, и предвестник, образованный падающей струей, направленной вперед. Мы обнаружили, что скорость предвестника разрушающейся волны значительно выше скорости самой волны. Эксперименты, проведенные в волновом лотке Тайнаньской гидравлической лаборатории, подтвердили теоретические предсказания предложенной модели разрушающегося потока при различных начальных условиях.

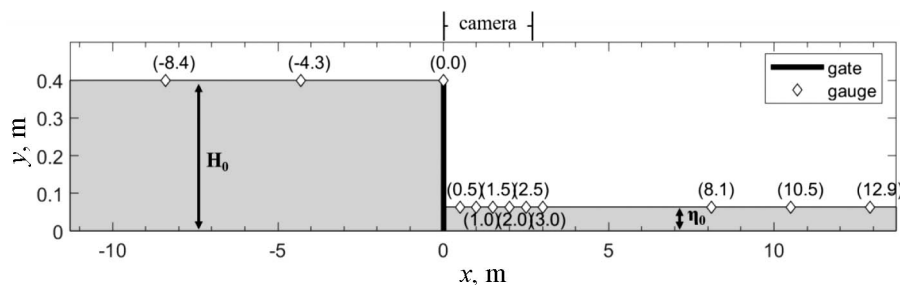


Рис. Схема экспериментальной установки для исследования течения при прорыве плотины.

1. Shugan, I.V., Chen, YY. and Hsu, C.J. Experimental and Theoretical Study on Flood Bore Propagation and Forerunner Generation in Dam-Break Flow // Phys. Wave Phen. 2020. Vol. 28. P. 274–284.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОННОГО РАЗМЫВА В ОКРЕСТНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ПРИЛИВНОЙ ТУРБИНЫ

Ярикова С.П.

Институт системного программирования РАН, Москва

e-mail: yarikova_sp@ispras.ru

Вертикально-осевые приливные турбины рассматриваются как перспективные установки для преобразования энергии морских и речных течений. При размещении таких устройств вблизи донной поверхности существенное значение приобретают процессы локального размыва, способные влиять на условия эксплуатации и устойчивость гидротехнических сооружений.

Численное моделирование донных деформаций в окрестности вращающихся турбин является вычислительно затратной задачей, поскольку требует совместного учета нестационарного течения и изменения формы донной поверхности. В связи с этим представляет интерес применение упрощенных подходов, позволяющих снизить вычислительные затраты при сохранении возможности воспроизведения основных особенностей течения.

В работе выполнено численное исследование локального донного размыва в окрестности вертикально-осевой трехлопастной турбины диаметром 1 м. Для описания воздействия турбины на поток использовался Actuator Line метод, реализованный в открытом программном комплексе OpenFOAM. Расчет донных деформаций выполнялся с использованием решателя scourFoam, учитывающего основные механизмы переноса наносов.

Показано, что размещение турбины вблизи донной поверхности приводит к формированию ускоренного потока в зазоре между турбиной и дном, увеличению придонных касательных напряжений и развитию локальной эрозии. Во всех рассмотренных случаях формируется характерная структура донных деформаций, включающая локальную размывную воронку вблизи турбины и область намыва ниже по потоку (рис. 1а). Полученные профили деформированной поверхности дна показывают, что форма лопастей оказывает заметное влияние на глубину размыва и распределение наносов в продольном и поперечном направлениях (рис. 1б, в).

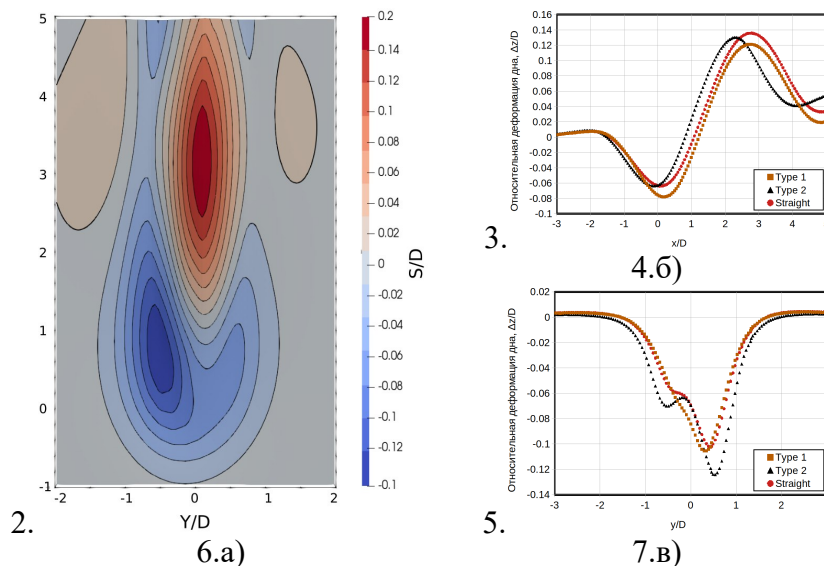


Рис. 1. Донные деформации в окрестности вертикально-осевой турбины: а) карта относительных деформаций донной поверхности; б) продольный профиль деформированного дна; в) поперечный профиль деформированного дна для различных вариантов формы лопастей.

1. Yarikova S., Epikhin A., Valiev A. Numerical Investigation of the Effects of Blade Curvature on the Performance of a Vertical Tidal Turbine // *Advances in Computational Heat and Mass Transfer II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2025. P. 355–364. DOI: 10.1007/978-3-032-16138-3_33.

2. Britov A., Epikhin A., Yarikova S., Elistratov S., Zhang Q. Numerical Simulation of Propeller Hydrodynamics Using the Open Source Software // *Computational Science – ICCS 2023. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 14073. Springer, Cham, 2023. P. 279–291. DOI: 10.1007/978-3-031-36030-5_23.

Научное издание

**ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ-МЕХАНИКОВ
YSM-2026**

(4–14 сентября 2026 г., Сочи, «Буревестник» МГУ)

Тезисы докладов

Ответственные редакторы и составители:

А. А. Афанасьев, А. А. Чернова, О. О. Иванов, Ю. С. Зайко

Художественное оформление *Ю. Н. Симоненко*

Электронное издание сетевого распространения

Тексты публикуются в авторской редакции

Макет утвержден 21.09.2026. № 13578.



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15
Тел.: (495) 939-32-91; e-mail: secretary@msupress.com
<https://msupress.com>. Отдел реализации:
тел.: (495) 939-33-23; e-mail: zakaz@msupress.com
