

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

НИИ МЕХАНИКИ МГУ



**Тезисы докладов XXIII Международной конференции
«НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ
УСТОЙЧИВОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ»**

**25 февраля – 4 марта 2018 г.
Московская область, г. Звенигород,
пансионат «Звенигородский» РАН**

Издательство Московского университета

2018

УДК 532.516.532.517
ББК 35.114
М 43

Тезисы докладов XXIII международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» 25 февраля – 04 марта 2018 г. М 43 пансионат «Звенигородский» РАН, Моск. область, г. Звенигород / Ответственный редактор – Н.В. Никитин. М.: Издательство Московского университета, 2018. – 127 с.

ISBN 978-5-19-011260-3

В докладах отражено современное состояние теории гидродинамической устойчивости и турбулентности. Представлены экспериментальные и теоретические работы по прямому численному моделированию турбулентности и по переходу к турбулентности. Сборник будет полезен аспирантам, студентам и научным сотрудникам.

УДК 532.516.532.517
ББК 35.114

Тезисы докладов напечатаны с оригиналов, представленных авторами.

ISBN 978-5-19-011260-3

© НИИ механики МГУ
2018

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Авагян С.Г. НЕЛИНЕЙНЫЕ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ПЛАСТИНЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ	9
2.	Агеев А.И., Голубкина И.В., Осипцов А.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ В МИКРОКАНАЛЕ С ПОЛОСЧАТОЙ СУПЕРГИДРОФОБНОЙ СТЕНКОЙ	10
3.	Алексеев А.К., Бондарев А.Е. К ЧИСЛЕННОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПЕРАТОРОВ КУПМАНА И ПЕРРОНА-ФРОБЕНИУСА	11
4.	Амелюшкин И.А., Стасенко А.Л. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЙ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОЙ ЖИДКОСТИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ С ОБТЕКАЕМЫМ ТЕЛОМ	12
5.	Аллилуева А. И., Шафаревич А.И. КОРОТКОВОЛНОВЫЕ РЕШЕНИЯ ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ	13
6.	Андриевский А.А., Желиговский В.А., Чертовских Р.А. ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ВИХРЕВАЯ ДИФФУЗИЯ, ВЫЗВАННАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ АЛЬФА-ЭФФЕКТОМ	13
7.	Аристов В.В., Ровенская О.И. НЕУСТОЙЧИВЫЕ И ТУРБУЛЕНТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ, МОДЕЛИРУЕМЫЕ КИНЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	14
8.	Asmolov E. S., Nizkayaa T. V., Vinogradova O. I. FLOW AND ADVECTIVE SUPERDIFFUSION IN CHANNEL WITH ANISOTROPIC SUPERHYDROPHOBIC WALLS	15
9.	Бабушкин И.А., Глухов А.Ф., Зильберман Е.А., Зюзгин А.В. КОНВЕКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА	16
10.	Баранов В.Б. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ КОМЕТЫ ЧУРЮМОВА-ГЕРАСИМЕНКО ПРИ ПОМОЩИ АППАРАТА ROSETTA	16
11.	Баранов С.А., Моралев И.А., Сбоев Д.С., Толкачев С.Н. УПРАВЛЕНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫМ ПЕРЕХОДОМ В ТРЕХМЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ПОМОЩИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА ПРИ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВНЕШНЕГО ПОТОКА	17
12.	Баранов С.А., Батура Н.И., Гаджимагомедов Г.Г., Сбоев Д.С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ СО СВОБОДНОЙ СТРУЕЙ	18
13.	Бахадиров Г.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВЛАГОНАСЫЩЕННОГО ТЕЛА ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ МЕЖДУ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ВАЛАМИ	19
14.	Бессонов О.А. ПРЕДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ МЕТОДА ЧОХРАЛЬСКОГО ПРИ ВРАЩЕНИИ КРИСТАЛЛА И ТИГЛЯ	20
15.	Боголепов В.В., Нейланд В.Я. СВОБОДНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕГУЩЕГО В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ С ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ	21
16.	Бойко А.В., Демьянко К.В., Нечепуренко Ю.М. ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫХ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЙ	22
17.	Бойко А.В., Довгаль А.В., Нечепуренко Ю.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫХ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЙ	23
18.	Боронин С.А. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЙ МНОГОФАЗНЫХ И ДИСПЕРСНЫХ СРЕД	24
19.	Брацун Д.А., Демин В.А., Мизев А.И., Петухов М.И., Шмыров А.В. ДИНАМИКА ПЛЕНКИ НЕРАСТВОРИМОГО СУРФАКТАНТА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ОБЪЕМНЫМ ТЕЧЕНИЕМ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ – ШОУ	25
20.	Брацун Д.А., Зюзгин А.В., Красняков И.В. АКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОНВЕКТИВНЫМ ТЕЧЕНИЕМ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕ ПОСРЕДСТВОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЕЁ ОРИЕНТАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ	26
21.	Брацун Д.А., Костарев К.Г., Мизев А.И., Мошева Е.А. ХЕМОКОНВЕКЦИЯ В РЕАГИРУЮЩИХ СМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЯХ С КОНЦЕНТРАЦИОННО-ЗАВИСИМОЙ ДИФФУЗИЕЙ: ОТ СТАЦИОНАРНЫХ ЯЧЕЕК ДО ВОЛН ПЛОТНОСТИ УДАРНОГО ТИПА	27

22.	Булатов В.В., Владимиров Ю.В. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ СРЕД	28
23.	Вяткин В.А., Брацун Д.А. О ТОЧНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕШЕНИЯХ ВИБРАЦИОННОЙ ГИДРОМЕХАНИКИ	29
24.	Ганченко Н.Ю., Горбачева Е.В., Ганченко Г.С., Демёхин Е.А. УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА ВОЗЛЕ ИОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНЫ С НЕПОЛНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ	30
25.	Ганченко Н.Ю., Кирий В.А., Демёхин Е.А. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОКОНВЕКЦИИ ОКОЛО БИПОЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕМБРАН	31
26.	Гембаржевский Г.В. МАЛОМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛЕДА ОТ ДВУХ ЦИЛИНДРОВ	32
27.	Гладков С.О. ОБ ОДНОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ	33
28.	Головастов С.В., Бивол Г.Ю. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ФОРМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРИ РАСПАДЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ НАД ПОРИСТЫМ ПОКРЫТИЕМ	34
29.	Гончаров М.М., Кондрашов А.Н., Сбоев И.О. ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ НЕОДНОРОДНО НАГРЕТОГО ЦИЛИНДРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕЛООТДАЧИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ЗАЗОРЕ	35
30.	Григорьев Ю.Н., Ершов И.В. УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО ГАЗА	36
31.	Гувернюк С.В., Дынникова Г.Я., Дынников Я.А., Андронов П.Р. ПОПЕРЕЧНЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ ЦИЛИНДРА, СИЛЬНО ЗАГРОМОЖДАЮЩЕГО ПОТОК ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ	37
32.	Демин В.А., Мизев А.И., Петухов М.И., Углев Н.П. ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МАССОПЕРЕНОСА В БИНАРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВАХ ВБЛИЗИ ПЛОХО СМАЧИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	38
33.	Джалалова М.В. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ КУПОЛА КВАДРАТНОГО ПАРАШЮТА С КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ	39
34.	Дрюма В.С. О РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ ТЕЧЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЛАГРАНЖЕВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ	40
35.	Дударь О.И. МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ТРУБЕ, ОСНОВАННАЯ НА АНАЛИТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НИКУРАДЗЕ	41
36.	Евграфова А.В., Кучинский М.О., Сухановский А. Н. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В КОНВЕКТИВНОМ ТЕЧЕНИИ ОТ НАГРЕТОГО ИСТОЧНИКА	42
37.	Ермаков М.К. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ В ЖИДКОМ МОСТЕ ПРИ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ЧИСЛАХ ПРАНДТЛЯ	43
38.	Evrin C., Isaev A., Kulenovic R., Laurien E. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW PATTERNS IN A VERTICAL T-JUNCTION CONFIGURATION	43
39.	Evstigneev N.M. RESULTS OF NUMERICAL BIFURCATION ANALYSIS IN SOME PROBLEMS OF LAMINAR-TURBULENT TRANSITION	44
40.	Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ УРОВНЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ПОД ВЛИЯНИЕМ МОДУЛЯЦИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ	45
41.	Жуков К.А., Корнев А.А., Попов А.В. УСКОРЕНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ РЕШЕНИЙ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ДИНАМИКУ ВЯЗКОГО ГАЗА	45
42.	Заваркин В.Н., Поткин А.Н., Немтырева И.А. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗНОШАГИЦЫ В СОПЛОВОМ АППАРАТЕ ТУРБИНЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВИБРОНАПРЯЖЕНИЙ В РАБОЧИХ ЛОПАТКАХ	46
43.	Зайко Ю.С., Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Трифонов В.В., Чичерина А.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ	47
44.	Зайцева Д.В., Каллистратова М.А. ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СОДАРОМ И МИКРОБАРОГРАФОМ	48

45.	Заметаев В.Б., Горбушин А.Р. НЕКЛАССИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ВЯЗКИХ ПУЛЬСАЦИЙ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ	49
46.	Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ	50
47.	Ильичев А.Т. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН В УПРУГИХ МЕМБРАННЫХ ТРУБАХ, ЗАПОЛНЕННЫХ ВОДОЙ	51
48.	Исаев С.А., Грицкевич М.С., Гувернюк С.В., Попов И.А., Усачов А.Е. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ SST-МОДЕЛИ 2003 ГОДА С КОРРЕКЦИЕЙ НА КРИВИЗНУ ЛИНИЙ ТОКА ПО РОДИ-ЛЕШЦИНЕРУ-ИСАЕВУ ДЛЯ (U)RANS РАСЧЕТОВ ОТРЫВНЫХ И ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ	52
49.	Карелин А.Н. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ	53
50.	Карпунин И.Э., Козлов Н.В. ОСРЕДНЁННАЯ ДИНАМИКА СВОБОДНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЯДРА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ И ВИБРИРУЮЩЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОЛОСТИ	54
51.	Kasimov A.R. HYDRAULIC JUMP AND ITS INSTABILITIES	55
52.	Киселёв Н.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М., Виноградов Ю.А. ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛАДКОЙ И ВИХРЕОБРАЗУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ В СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ	56
53.	Козлов Н.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСРЕДНЁННОГО ТЕЧЕНИЯ В ОБЪЁМЕ ЖИДКОСТИ С КОЛЕБЛЮЩИМИСЯ ДЕФОРМИРУЕМЫМИ СТЕНКАМИ	57
54.	Колосов Г.Л., Косинов А.Д., Семенов Н.В., Смородский Б.В., Ермолаев Ю.Г., Яцких А.А. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЕЙ ПУЛЬСАЦИЙ В ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ	58
55.	Копьев А.В., Зыбин К.П. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ИЗОТРОПНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ, ОСНОВАННАЯ НА ЛИНЕЙНОМ МЕХАНИЗМЕ	59
56.	Копьев В.Ф. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОАКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ	60
57.	Коротеева Е.Ю., Знаменская И.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ	61
58.	Кошелев К.Б., Стрижак С.В. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЗАПИРАНИЯ ТЕЧЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ	62
59.	Краснопольский Б.И. О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ РАСЧЕТА ПРИ ПРЯМОМ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С УСРЕДНЕНИЕМ ПО НЕСКОЛЬКИМ НЕЗАВИСИМЫМ АНСАМБЛЯМ	63
60.	Кривоносова О.Э., Жиленко Д.Ю. ВЛИЯНИЕ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН, ВЫЗВАННЫХ КОЛЕБАНИЯМИ ОДНОЙ ИЗ ГРАНИЦ СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ	64
61.	Кривоносова О.Э., Жиленко Д.Ю. НОВЫЙ ВИД НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ВРАЩАТЕЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ В ТОНКОМ СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ	64
62.	Куликов Ю.М., Сон Э.Е. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА «КАБАРЕ» НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ТЕЙЛОРА-ГРИНА И НАПОРНОГО ТЕЧЕНИЯ ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	65
63.	Куркина О.Е., Куркин А.А., Кокоулина М.В. ИНДЕНТИФЕКАЦИЯ БАРОКЛИННЫХ МОД В ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ В СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ БАССЕЙНАХ	66
64.	Лихачев А.П., Губанов Е.В., Медин С.А. КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЕ МАГНИТНОЕ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ В ГЕОМАГНИТНОМ ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ: МЕХАНИЗМ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ЭФФЕКТЫ	67
65.	Лыков А.А., Малышев В.А. ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ЭЙЛЕРА ДЛЯ ГАЗА ЧАПЛЫГИНА ИЗ МИКРОДИНАМИКИ	68

66.	Макарова М.С., Лущик В.Г., Решмин А.И. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОМ И КРУГЛОМ КАНАЛАХ С ДИФFUЗОРОМ	69
67.	Маслов С.А., Смирнов В.А., Харчевский А.А. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ГЕНЕРАЦИЮ ЗАВИХРЕННОСТИ ТАЙФУНОВ И ТОРНАДО	70
68.	Матюшин П.В. ГРАВИТАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ, КАК ГЕНЕРАТОР ВНУТРЕННИХ ВОЛН НАД МЕСТОМ СТАРТА ТЕЛА В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	71
69.	Михайлов Е.А., Марчевский И.К. МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ПРОФИЛЯ ВИХРЕВЫМИ МЕТОДАМИ	72
70.	Моденова В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ МАССООБМЕНА	73
71.	Монахов А.А., Попеленская Н.В. КАВИТАЦИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ В РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ОБЛАСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЦИЛИНДРА ВДОЛЬ СТЕНКИ	74
72.	Моршнева И.В. БИФУРКАЦИИ КОРАЗМЕРНОСТИ 2 В ЗАДАЧАХ КОНВЕКЦИИ С КРУГОВОЙ СИММЕТРИЕЙ	75
73.	Никитин Н.В., Пиманов В.О. НОВЫЕ ДАННЫЕ О МЕХАНИЗМЕ ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	76
74.	Образ А.О., Федоров А.В. ГИБРИДНАЯ LST-RANS МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ	77
75.	Осипцов А.Н., Азанов Г.М., Алексюк А.И. О БЕЗМАШИННОМ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА	78
76.	Очеретяный С.А., Козлов И.И., Прокофьев В.В. ВЛИЯНИЕ ПОДВОДЯЩЕГО ТРУБОПРОВОДА НА КАВИТАЦИОННЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ, ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ СТРУЙ	79
77.	Петров А.Г. ИЗБРАННЫЕ ЗАДАЧИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ	80
78.	Петрова Л.И. РАЗВИТИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ. МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗАВИХРЕННОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ	81
79.	Петрова Т.А., Шугаев Ф.В. ЭВОЛЮЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВИХРЯ В ВЯЗКОМ ТЕПЛОПРОВОДНОМ ГАЗЕ	81
80.	Пивоваров Д.Е., Никитин Н.В. О СКОРОСТИ РОСТА ВОЗМУЩЕНИЙ В ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ КУЭТТА	82
81.	Плавник Р.А., Завьялов И.Н., Пляшков Е.В. ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ	83
82.	Попеленская Н.В., Пиманов В.О., Никитин Н.В. О МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ ДВИЖЕНИЙ ПРАНДТЛЯ 2-ГО РОДА	84
83.	Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА В СЛЕДЕ ЗА РЕБРОМ	85
84.	Прокофьев В.В., Филатов Е.В. ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ВОЛНОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ	86
85.	Рязанов Д.А., Сибгатуллин И.Н., Ерманюк Е.В. БИГАРМОНИЧЕСКИЕ АТТРАКТОРЫ ВНУТРЕННИХ ВОЛН	86
86.	Решмин А.И., Чичерина А.Д., Тепловодский С.Х., Трифионов В.В. РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В РАСШИРЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ С МАЛЫМИ УГЛАМИ РАСКРЫТИЯ	87
87.	Сагитов Р.В., Шарифулин А.Н. БИФУРКАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В НАКЛОНЕННОЙ ПОЛОСТИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ	88
88.	Сбоев Д.С., Баранов С.А., Моралев И.А., Толкачев С.Н. ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В ТРЕХМЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВНЕШНЕГО ПОТОКА	89
89.	Сбоев И.О. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ, ВЫЗВАННОГО ДЕЙСТВИЕМ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА	90

90.	Семёнов А.Б., Кураев А.А. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЫХОДА ГИДРОДИОДА НА РАБОЧИЙ РЕЖИМ	91
91.	Симоненко М.М., Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Кузьмин А.Г. ОСОБЕННОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА С КОЛЬЦЕВЫМИ ВЫСТУПАМИ И ВЫЕМКАМИ НА ПОВЕРХНОСТИ	92
92.	Сисоев Г.М., Осипцов А.Н., Коратеев А.А. О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ В ВАКУУМЕ	93
93.	Смирнов Е.М., Панов Д.О., Рис В.В. СОЧЕТАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КАНАЛОВ С РЕЗКИМ ПОВОРОТОМ ПОТОКА	94
94.	Соболева Е.Б. РАЗВИТИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННО - КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ОДНОРОДНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ	95
95.	Солдатов И.Н., Клюева Н.В. ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ СВОЙСТВ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ДИНАМИКУ И УСТОЙЧИВОСТЬ СЛОЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ФЛОТИРУЮЩЕЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	96
96.	Стрижак С.В., Калугин М.Д., Кошелев К.Б., Крючкова А.С. ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВИХРЕВЫХ СЛЕДОВ МОДЕЛЬНЫХ ВЕТРОУСТАНОВОК С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ	97
97.	Субботин С.В., Кропачева А.С., Дьякова В.В. ИНЕРЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И ОСРЕДНЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ	98
98.	Субботин С.В., Козлов В.Г., Сабиров Р.Р. ОСРЕДНЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПОЛОСТИ С ЭЛАСТИЧНОЙ СТЕНКОЙ, ЗАЖАТОЙ МЕЖДУ ДВУМЯ КОЛЕБЛЮЩИМИСЯ ГРАНИЦАМИ	99
99.	Сюй Сюинь, Сибгатуллин И.Н., Ерманюк Е.В., Leo Maas, Thierry Dauxois ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ АТТРАКТОРОВ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ	100
100.	Sukoriansky S. TURBULENCE ANISOTROPIZATION UNDER THE ACTION OF EXTERNAL BODY FORCES	101
101.	Талалушкина Л.В., Лобовиков П.В. УТОЧНЕННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭВОЛЮЦИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НАД НЕРОВНЫМ ДНОМ	102
102.	Тепловодский С.Х., Зайко Ю.С., Решмин А.И., Трифонов В.В., Чичерина А.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АРХИМЕДОВОЙ СИЛЫ	103
103.	Толкачев С.Н., Баранов С.А., Сбоев Д.С., Моралев И.А., Устинов М.В. ПОДАВЛЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ	104
104.	Тугазаков Р.Я., Липатов И.И. НЕЛИНЕЙНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ЛАМИНАРНО - ТУРБУЛЕНТНОМ ПЕРЕХОДЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА	105
105.	Устинов М.В. УПРАВЛЕНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫМ ПЕРЕХОДОМ НА СТРЕЛОВИДНОМ КРЫЛЕ С ПОМОЩЬЮ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ	106
106.	Федюшкин А.И. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВЫХ ЛАМИНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ И НА ЗЕМЛЕ	107
107.	Филимонова А.М., Говорухин В.Н. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВИХРЕВЫХ КОНФИГУРАЦИЙ НА ПЛОСКОСТИ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ	108
108.	Франц Е.А., Ганченко Г.С., Шелистов В.С., Никитин Н.В., Демёхин Е.А. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ДВИЖЕНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ МИКРОЧАСТИЦ	109
109.	Хазов Д.Е. МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ В ПОРИСТОЙ ТРУБКЕ	110

110.	Хатунцева О.Н. АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА, ЗАПИСАННЫХ С УЧЕТОМ ПРОИЗВОДСТВА ЭНТРОПИИ, В ПЛОСКОЙ ЗАДАЧЕ КУЭТТА	111
111.	Цыпкин Г.Г. ВЛИЯНИЕ КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЛЕГКОЙ ЖИДКОСТИ НАД ТЯЖЕЛОЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ	112
112.	Чепрасов С.А. ОСОБЕННОСТИ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ ПРИ БОЛЬШИХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ	113
113.	Черепанов И.Н., Сидоров А.С., Смородин Б.Л. АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЙ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ ПРИ БОКОВОМ ОБОГРЕВЕ	114
114.	Черкасов Д.Ю., Шугаев Ф.В. ЭВОЛЮЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АНСАМБЛЯ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ В ВОЗДУХЕ	115
115.	Чернышенко С.И., Жанг Ч., Бутт Х., Бейт-Сади М. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ВЫСОКИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА ОСНОВЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР И ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	116
116.	Чичерина А.Д., Зайко Ю.С., Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Трифонов В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ПО СОЗДАНИЮ ЛОКАЛЬНОЙ ЧИСТОЙ ЗОНЫ	117
117.	Чувахов П.В., Фёдоров А.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ К ТВЁРДЫМ МИКРОЧАСТИЦАМ	118
118.	Шалаев В.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА СИММЕТРИЧНОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ	119
119.	Шаргатов В.А. ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ ФРОНТА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ ПАР В НЕОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ	120
120.	Шаргатов В.А., Чугайнова А.П. УСТОЙЧИВОСТЬ СТРУКТУРЫ УДАРНЫХ ВОЛН И ЕДИНСТВЕННОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РИМАНА ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ХОПФА	121
121.	Шишаева А.С., Симоненко М.М., Синявин А.А., Аксенов А.А. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ТЕЛА С КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНОЙ	122
122.	Шапакидзе Л.Д. О НЕЛИНЕЙНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ПРОНИЦАЕМЫМИ ЦИЛИНДРАМИ	123
123.	Yakhot A. TURBULENCE IN A LOCALIZED PUFF IN A PIPE	123
124.	Яворский Н.И. БИФУРКАЦИЯ ВРАЩЕНИЯ В ТОЧНОМ РЕШЕНИИ МГД УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ТЕЧЕНИЯ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕПОДВИЖНЫМИ НЕПРОНИЦАЕМЫМИ ДИСКАМИ	124
125.	Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. ЭВОЛЮЦИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В ТРЕХМЕРНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ	125
126.	Яцких А.А., Косинов А.Д., Семенов Н.В., Смородский Б.В., Ермолаев Ю.Г., Колосов Г.Л. ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕГО ТЕРМОАНЕМОМЕТРА ПОСТОЯННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ	126

НЕЛИНЕЙНЫЕ КВАЗИХРОМАТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ПЛАСТИНЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

С.Г. Авагян

Национальный политехнический университет Армении, Гюмрийский филиал

В настоящей работе рассматриваются волны на поверхности жидкости конечной глубины, ограниченной нелинейной упругой пластиной. Для решения задачи применяется вариационный принцип, по которому [1]:

$$\delta \iint_R L dx dt = 0, \text{ где } L = L_{\text{ж}} + L_{\text{п}}, \quad (1)$$

$L_{\text{ж}}$ и $L_{\text{п}}$ – лагранжианы жидкости и пластины соответственно. Для усредненного лагранжиана имеем

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} L d\theta, \quad (2)$$

где $\theta = kx - \omega t$ и называется фазой, k – волновое число, ω – частота. Из (1) и (2) следует

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{ж}} + \mathcal{L}_{\text{п}}. \quad (3)$$

По определению лагранжиана, для пластины

$$L_{\text{п}} = K - \Pi, \quad (4)$$

где K – кинетическая энергия пластины, Π – потенциальная энергия. Кинетическая энергия пластины равна

$$K = \frac{1}{2} \rho \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} v^2 dz, \quad (5)$$

где ρ – плотность пластины, h – толщина, v – скорость частицы. Принято, что плоскость $z = 0$ совпадает со срединной плоскостью пластины в недеформированном состоянии. Как известно [2], потенциальная энергия пластины может быть выражена в виде суммы работы изменения объема и работы изменения формы

$$\Pi = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left(\frac{\vartheta}{2} K_1 \varepsilon_0^2 + 3K_1 \chi_1 \varepsilon_0^2 + \frac{3}{4} G \psi_0^2 + \frac{3}{8} G \gamma_2 \psi_0^4 \right) dz, \quad (6)$$

где K_1 – модуль объемного сжатия, G – модуль сдвига, χ_1 – функция удлинения, γ_2 – функция сдвига, ψ_0 – интенсивность деформации сдвига. Для тонких пластинок $\psi_0^2 = \frac{4}{3} \left(\frac{2}{3} (\varepsilon_x^2 + \varepsilon_z^2 - \varepsilon_x \varepsilon_z) + \frac{1}{2} \psi_{xy}^2 \right)$. Среднее удлинение $\varepsilon_0 = \frac{1}{3} (\varepsilon_x + \varepsilon_z)$. Исходя их соотношений напряжений для $\delta_z = 0$, т.е. $3K_1 \varepsilon_0 (1 + \chi_1 \varepsilon_0 + \chi_1 \varepsilon_0^2) + 2G(1 + \gamma_2 \psi_0^2)(\varepsilon_x - \varepsilon_0) = 0$, а также учитывая, что $\varepsilon_z = -\frac{\vartheta}{1-\vartheta} \varepsilon_x$, $K_1 = \frac{2}{3} \frac{(1+\vartheta)}{(1-2\vartheta)} G$, $\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2}$,

из (6) получим потенциальную энергию. Здесь ϑ – коэффициент Пуассона. Учитывая, что $u_x = 0$, $u_y = 0$, из (5) для кинетической энергии получим $K = \frac{1}{2} \rho h \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} \right)^2$. После соответствующих выкладок из (4) получим лагранжиан пластины. Так как пластина находится на поверхности жидкости, то составляющая вектора деформации u_z будет равна η , где $\eta = N(\theta)$ уравнение поверхности $z = 0$. Периодическая функция $N(\theta)$ представляется в виде рядов Фурье $N(\theta) = b + a_1 \cos \theta + \sum_2^{\infty} a_n \cos n\theta$, где a_1 – амплитудный параметр, а b – средняя высота поверхности воды. Оставляя два члена, будем иметь $u_z = N = b + a_1 \cos \theta + \cos \theta + a_2 \cos 2\theta$. После соответствующих выкладок из (2) получится усредненный лагранжиан пластины. Лагранжиан жидкости вычисляется по формуле [1]

$$L_{\text{ж}} = -\rho_0 \int_{-h_0}^{\eta} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\Delta \varphi)^2 + gz \right), \quad (7)$$

где h_0 – глубина жидкости, ρ_0 – плотность, φ – потенциал скоростей. Для одномерного случая наиболее общая форма периодического волнового пакета такова: $\varphi = \beta x - \gamma t + \Phi(\theta, z)$, где β – средняя горизонтальная скорость $\partial \varphi / \partial x$, а γ связана со средней высотой волн. Периодическая функция $\Phi(\theta, z)$ может быть представлена в виде рядов Фурье $\Phi(\theta, z) = \sum_1^{\infty} \frac{B_n}{n} \text{ch} kn(z + h_0) \sin n\theta$. Оставляя два члена и подставляя φ в (7), получим значение $L_{\text{ж}}$, а затем по (2) – усредненный лагранжиан жидкости. Сравнительный анализ с [4] показывает, что наличие пластины увеличивает поперечную устойчивость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уизем Дж.Б. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977. – 624 с.
2. Каудерер Г. Нелинейная механика. М.: Ил, 1961. – 771 с.
3. Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973. – 175 с.
4. Авагян С.Г. Нелинейные изгибные волны в пластине, находящейся на поверхности жидкости конечной глубины // Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. XXXVIII, №6, 1985. – С. 51-61.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ В МИКРОКАНАЛЕ С ПОЛОСЧАТОЙ СУПЕРГИДРОФОБНОЙ СТЕНКОЙ

Агеев А.И., Голубкина И.В., Осипцов А.Н.
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова

Супергидрофобные поверхности (СГП) – это текстурированные поверхности, образованные микролунками (микрокавернами) либо микровыступами, в которых силой поверхностного натяжения статически удерживаются пузырьки воздуха. Пузырьки воздуха не вытесняются из текстуры СГП при течении вязкой жидкости вдоль такой поверхности. Трение между воздухом и жидкостью практически отсутствует, поэтому в экспериментах наблюдается макроскопическое проскальзывание вязкой жидкости вдоль такой СГП и снижение трения, как при ламинарном, так и при турбулентном режимах течений вдоль СГП [1, 2]. Для количественной оценки снижения трения на СГП используется величина, называемая тензором эффективной длины скольжения [3]. Тензор эффективной длины скольжения входит в эффективное граничное условие проскальзывания типа Навье на СГП, которое связывает касательную скорость и касательное напряжение, вычисленные на обтекаемой поверхности. Значения компонент тензора скольжения определяют из решения задачи о течении вязкой жидкости в окрестности выделенного периода текстуры СГП, содержащего межфазную границу, с заданным на ней условием отсутствия касательных напряжений. При решении такой задачи необходимо учитывать параметры текстуры СГП, которые влияют на величину осредненной длины скольжения и интенсивность снижения трения: долю газового участка, форму межфазной границы и возможное смещение в микрокаверну точек закрепления мениска [2]. В работе [4] предложен численный алгоритм, основанный на использовании метода граничных интегральных уравнений [5] для решения такой задачи, который позволяет достаточно просто учитывать параметры текстуры, влияющие на величину эффективной длины скольжения. Там же показано, что учет смещения мениска в микрокаверну может привести к значительному снижению величины эффективной длины скольжения по сравнению со значением, соответствующим межфазной границе, закрепленной в углах каверны.

В настоящей работе предложена математическая модель для оценки снижения трения (перепада давления) и изменения локальных свойств проскальзывания на СГП при течении вязкой жидкости в микроканале с нижней полосчатой супергидрофобной стенкой. Разработанная модель основана на сращивании решения задачи об осредненном течении вязкой жидкости в микроканале с заданным расходом на масштабе длины микроканала (макромасштаб) с решением задачи об обтекании выделенного периода текстуры СГП, содержащего одиночную микрокаверну, частично заполненную газовым пузырьком (микромасштаб). Модель позволяет учитывать смещение точек закрепления мениска в микрокавернах, обусловленное сжимаемостью газа, удерживаемого текстурой СГП. Положение мениска в микрокаверне вычисляется из условия сохранения массы газового пузыря, удерживаемого в каверне. Так как статическое давление в жидкости изменяется по длине канала, то вследствие сжимаемости газа положение точек закрепления мениска изменяется от каверны к каверне. Поэтому на макромасштабе величина эффективной длины скольжения будет являться не константой, а функцией локального статического давления. При этом максимум эффективной длины скольжения достигается на выходе из микроканала, а минимум – на входе, где локальное давление в жидкости максимальное. Выполнено параметрическое численное исследование снижения трения (перепада давления) в микроканале с использованием разработанной модели. Показано, что наряду с долей газового участка и формой межфазной границы глубина микрокаверн, образующих текстуру СГП, решающим образом влияет на интенсивность снижения перепада давления. Установлено, что максимального снижения перепада давления в микроканале можно добиться на СГП, уменьшая глубину микрокаверн, образующих текстуру СГП. Предложенная в работе математическая модель может быть использована для разработки оптимального дизайна текстурированных поверхностей с целью эффективного снижения трения с использованием СГП.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00057.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Rothstein J.P. Slip on superhydrophobic surfaces // *Annu. Rev. Fluid. Mech.* 2010. **42**. P. 89–109.
2. Lee C., Choi C.-H. and Kim C.-J. Superhydrophobic drag reduction in laminar flows: a critical review // *Experim. In Fluids*. 2016. **57**. P. 176.
3. Bazant M.Z., Vinogradova O.I. Tensorial hydrodynamic slip // *J. Fluid Mech.* 2008. **613**. P. 125–134.
4. Агеев А.И., Осипцов А.Н. Стоксово течение над каверной супергидрофобной поверхности, содержащей пузырек газа // *Изв. РАН. МЖГ*. 2015. N 6. С. 35–49.
5. Pozrikidis C. *Boundary and singularity methods for linearized viscous flows*. New York: Cambridge University press, 1992. 272 p.

К ЧИСЛЕННОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПЕРАТОРОВ КУПМАНА И ПЕРРОНА-ФРОБЕНИУСА

А.К. Алексеев¹, А.Е.Бондарев²

¹МФТИ, Москва, Россия

²ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

Достаточно давно [1] существует представление о том, что конечномерная *нелинейная* динамическая система эквивалентна некоторой бесконечно-мерной *линейной* системе. Это дает надежду на глобальную линеаризацию нелинейных решений. Однако до недавних пор эта надежда обесценивалась отсутствием эффективных численных методов построения такой “выпрямляющей” системы.

Прогресс в этом направлении наметился после разработки метода разложения по динамическим модам (Dynamic Mode Decomposition (DMD)) [2].

В работе [3] построение DMD связано с операторами Купмана и Перрона- Фробениуса. Оператор Купмана описывает линейную эволюцию системы в бесконечном наборе наблюдаемых, оператор Перрона-Фробениуса описывает эволюцию плотности вероятности (пропагатор обобщенного уравнения Лиувилля).

DMD обеспечивает построение оператора Купмана в линейном конечном словаре по некоторому последовательному набору срезов (состояний системы в последовательные моменты времени).

В качестве попытки расширения DMD на нелинейные задачи разработан метод EDMD [4], обеспечивающий построение оператора Купмана в нелинейном (возможно, бесконечном) словаре. Ключевым элементом для численной реализации EDMD является использование функции ядра (kernel trick).

Построение оператора Купмана подразумевает и построение оператора Перрона- Фробениуса, так как они являются сопряженными относительно некоторого скалярного умножения. Соответствующие алгоритмы представлены в [5].

Этот подход интересен с точки зрения численного расчета мерозначных решений уравнений газодинамики, перспективных с точки зрения моделирования турбулентности [6]. В отличие от [6], EDMD позволяет отказаться от использования метода Монте-Карло, что создает надежду на создание вычислительно эффективного алгоритма.

В данной работе представлены результаты анализа автоколебательных режимов течения, возникающих при воздействии недорасширенной сверхзвуковой струи на плоскую поверхность. Используются результаты численного моделирования воздействия струи с помощью нестационарных уравнений (2D+1) Эйлера. Конечномерная аппроксимация уравнений Эйлера рассматривается как конечномерная нелинейная динамическая система.

В работе [7] для анализа этой системы использовано DMD, здесь представлены результаты, полученные с помощью EDMD для полиномиального ядра (порядок полиномов варьировался от 1 до 50). Оценен истинный порядок нелинейности задачи.

С помощью EDMD рассмотрено построение соответствующего оператора Перрона- Фробениуса, возможности применения функции ядра и ограниченных словарей для его компактной записи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-01-00553А и 17-01-444А).

ЛИТЕРАТУРА.

1. T. Carleman, Application De La Théorie Des Équations Intégrales Linéaires Aux Systemes D'Equations Differentielles NonLinaires, Acta Math., 1932, Vol. 59, pp. 63-87
2. P. J. Schmid, Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data, J. Fluid Mech., 2010, v. 656 p. 5-28.
3. C. W Rowley., I. Mezic I., S. Bagheri , P. Schlatter, and D.S. Henningson, Spectral analysis of nonlinear flows. J. Fluid Mech., 2009, 641:115-127
4. M. O. Williams, I. G. Kevrekidis and C. W. Rowley, A data-driven approximation of the Koopman operator: Extending dynamic mode decomposition, J. Nonlinear Sci., 2015. Vol. 25, Issue 6, pp 1307–1346
5. S. Klus, P. Koltai, and Ch. Schutte, On the numerical approximation of the Perron-Frobenius and Koopman operator, arXiv:1512.05997v3 2016
6. U. S. Fjordholm, S. Mishra, E. Tadmor, On the computation of measure-valued solutions, Acta Numerica, 2016, pp. 567–679.
7. A.K. Alekseev, D.A. Bistran, A.E. Bondarev, I.M. Navon, On Linear and Nonlinear Aspects of Dynamic Mode Decomposition, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 2016, V. 82, Issue 6, p. 348–371

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЙ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОЙ ЖИДКОСТИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ С ОБТЕКАЕМЫМ ТЕЛОМ

И.А. Амелюшкин, А.Л. Стасенко

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский,
Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Моделирование граничных условий, и управление обтеканием представляет большой научный и практический интерес: снижение сопротивления, борьба с обледенением, перемешивание в микроканалах, нанесение покрытий и др. Классическая теория турбулентности неоднократно напоминает, что она должна в первую очередь отражать тот факт, что для рассматриваемого явления характерны нелинейность и сильное влияние краевых эффектов [1]. В частности, континуальное описание зарождения турбулентности на микрошероховатостях поверхности должно быть пересмотрено на основе метода молекулярной динамики, позволяющего учесть влияние числа Кнудсена. В работе [2] обнаружен реверс ламинарно-турбулентного перехода при охлаждении поверхности обтекаемого тела: эффект вызван формирующимися в следствии образования инея микро- и нано- неровностей на обтекаемом теле. В [3] представлены результаты молекулярно-динамического моделирования пограничного слоя однокомпонентной жидкости у волнистой поверхности с использованием термостата Ланжевена и искусственного коэффициента трения.

Целью настоящей работы является создание комплекса программ, задачи которого предсказание и оптимизация взаимодействия потока с обтекаемым телом, расчет режимов столкновений частиц и капель с твердым телом, расчет характеристик обтекания тел потоком жидкости, газа и плазмы, моделирование граничных условий на рельефной поверхности, исследование управления трением потока, моделирование смачивания и движения капель по поверхности. В докладе представлены результаты расчета (рис. 1) характеристик трехмерного нестационарного пограничного слоя многокомпонентного реального газа вблизи обтекаемого тела из различных материалов при различной шероховатости: показаны условия скольжения, образования инея и прилипания частиц в сдвиговом потоке к обтекаемому телу. В качестве основных управляющих параметров выбраны характерные высота h и длина λ периодической шероховатости, а также параметр $AK = \varepsilon_{w-m}/\varepsilon_{m-m} \approx 0.5(1+\cos\theta)$, который можно трактовать как отношение энергий ε_{w-m} взаимодействия между молекулой потока и атомом поверхности к характерной энергии ε_{m-m} взаимодействия молекул потока между собой, θ – угол смачивания.

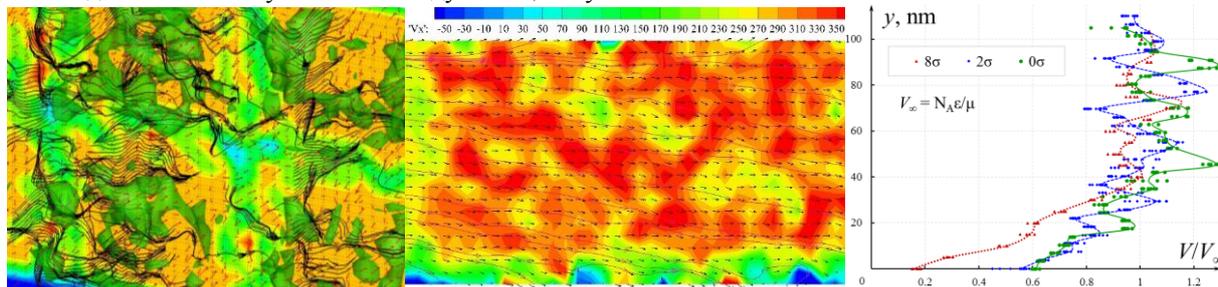


Рис. 1: Расчет пограничного слоя методом молекулярной динамики. Слева: поверхности равных значений скорости потока, трехмерное векторное поле скорости, линии тока; в центре: поле скорости в продольном сечении расчетной области, справа: влияние рельефа поверхности на профиль скорости потока, кривые соответствуют различным h ; σ – характерная длина межмолекулярного взаимодействия.

Представлены результаты моделирования методом молекулярной динамики взаимодействия переохлажденных нанокapель воды с рельефным твердым телом в пограничном слое воздуха. Приведены расчеты ударов кубических и гексагональных нанокристаллов льда о поверхность твердого тела, обладающую различной степенью гидрофобности. Экспериментально подтвержден обнаруженный ранее [4] эффект накопления необходимой для кристаллизации кинетической энергии удара переохлажденной жидкости о твердую поверхность в виде трехмерной статистической диаграммы.

Работа выполнена за счет гранта РНФ, проект № 16–19–10472.

ЛИТЕРАТУРА.

1. В.В. Новожилов. Установившееся турбулентные течения в свете обобщенной теории Кармана. ПММ. 1983, 47(4), 694–700.
2. М.А. Алексеев, В.А. Кузьминский, Н.Ф. Рагулин, Ю.Г. Швалев. Охлаждение поверхности и переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный при сверхзвуковых скоростях потока // Аэромеханика. сборник статей посвященный 60-ю В.В. Струминского. М.: Наука, 1976.
3. N.V. Priezjev, S.M. Troian. Influence of periodic wall roughness on the slip behaviour at liquid/solid interfaces: molecular-scale simulations versus continuum predictions // J. Fluid Mech. Cambridge University Press, Printed in the United Kingdom, 2006, 554. 25–46.
4. I.A. Amelyushkin Visualization and simulation of physical phenomena in aircraft icing process. International Conference “10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing”, Naples, Italy, 2015, Multiphase Flows/Droplets. – Paper ID-187.

КОРОТКОВОЛНОВЫЕ РЕШЕНИЯ ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

А. И. Аллилуева, А.И. Шафаревич.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва.

В докладе обсуждаются коротковолновые решения уравнений газовой динамики, линеаризованных на гладком фоне. Такие решения соответствуют наличию характеристик различной кратности (двукратных для гидродинамической моды и простых для акустических). Обсуждаются эффекты фокусировки акустических мод, а также устойчивость и неустойчивость гидродинамических.

ЛИТЕРАТУРА.

1. A.I. Allilueva, A.I. Shafarevich. "Evolution of Lagrangian Manifolds and Asymptotic Solutions for Equations of Gas Dynamics". To appear in "Regular and Chaotic Dynamics", 2018.

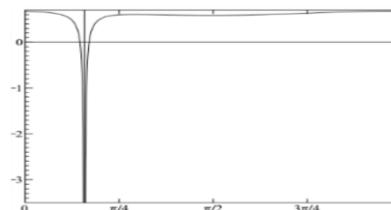
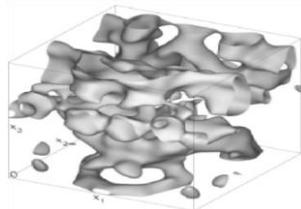
ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ВИХРЕВАЯ ДИФФУЗИЯ, ВЫЗВАННАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ АЛЬФА-ЭФФЕКТОМ

А.А. Андриевский*, В.А. Желиговский**, Р.А. Чертовских***

* ООО ЦПР РТСофт, Москва

** Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва** Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

Данная работа [1] посвящена аналитическому и численному исследованию механизма генерации крупномасштабного магнитного поля мелкомасштабными течениями в пределе малого отношения пространственных масштабов методами асимптотической теории многомасштабной магнитогидродинамической устойчивости [2,3]. Решается задача кинематического динамо для стационарного пространственно-периодического поля скорости, антисимметричного по некоторой координатной оси. Показано, что в главном порядке магнитный α -эффект вызывает гармонические колебания среднего магнитного поля во времени. Рассмотрена возникающая на фоне этого α -эффекта магнитная вихревая (турбулентная) диффузия. Показано, что как функция направления φ волнового вектора возбуждаемой магнитной моды в проекции на плоскость, перпендикулярную оси антисимметрии потока, она сингулярна (в отличие от случая, когда из-за центральной симметрии потока α -эффект отсутствует). Поэтому вихревая диффузия может принимать сколь угодно большую по модулю отрицательную величину и, следовательно, генерировать крупномасштабное (среднее) магнитное поле при любой молекулярной магнитной диффузии η .



На левом рисунке представлены изоповерхности кинетической энергии поля скорости несжимаемой жидкости, использованного в расчётах, синтезированного как сумма гармоник Фурье со случайными коэффициентами, на уровне 0.2 от максимальной плотности кинетической энергии. На правом – зависимость максимального инкремента роста крупномасштабного магнитного поля от азимутального направления φ при разных коэффициентах молекулярной диффузии η .

ЛИТЕРАТУРА.

1. Andrievsky A., Chertovskih R., Zheligovsky V. Negative magnetic eddy diffusivity due to oscillatory α -effect. Physica D, submitted (2017).
2. Andrievsky A., Brandenburg A., Noullez A., Zheligovsky V. Negative magnetic eddy diffusivities from test-field method and multiscale stability theory. Astrophysical J. 811, 135 (2015)
3. Zheligovsky V.A. Large-scale perturbations of magnetohydrodynamic regimes: linear and weakly nonlinear stability theory. Lecture Notes in Physics, vol. 829, Springer-Verlag, Heidelberg, 2011.

НЕУСТОЙЧИВЫЕ И ТУРБУЛЕНТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ, МОДЕЛИРУЕМЫЕ КИНЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В.В. Аристов, О.И. Ровенская

Вычислительный центр им. А.А Дородницына РАН Федеральный исследовательский центр информатики и управления РАН

Развивается подход моделирования течений с проявлением неустойчивости и турбулентности на основе уравнений физической кинетики. Идеи применения в той или иной форме кинетических подходов к описанию турбулентности высказывались Жигулевым, Коганом, Цуге (Zuge), Климонтовичем, Сакураи (Sakurai) и др. В [1] рассмотрены предпосылки и получены первые результаты изучения неустойчивых и турбулентных течений с помощью уравнения Больцмана. Решения с помощью уравнения Больцмана и модельных уравнений свидетельствуют о принципиальной пригодности кинетического моделирования для описания неустойчивых и турбулентных явлений. В [2] с помощью прямого метода решения уравнения Больцмана получен колмогоровский энергетический спектр в задаче об изотропной турбулентности, сходные результаты описаны в [3], где применялся метод прямого статистического моделирования DSMC. В [4] для изучения структуры турбулентного течения также используется уравнение Больцмана. С помощью дискретных кинетических моделей найдены турбулентные решения [5] для модели Карлемана, где впервые исследована краевая неустойчивая задача (в [6] также изучаются вопросы хаотизации решения в задаче для модели Карлемана, являющейся прообразом более сложных дискретных кинетических уравнений).

В настоящей работе приводятся решения сложных двумерных и трехмерных задач на основе прямых методов решения уравнения Больцмана и кинетических модельных уравнений. Для сверхзвуковых течений газа моделируется и исследуется структура неустойчивых вихрей типа Тейлора-Гёртлера. Особый практический интерес может представлять выявленное влияние на характер неустойчивости шероховатости сопла. В задачах обтекания тел различной формы наблюдались неустойчивые явления. Для обратного уступа сопоставлением с экспериментом получено первое подтверждение возможности более точного описания турбулентного теплопереноса при использовании кинетических уравнений по сравнению со сплошнородным описанием типа RAND. Свойства устойчивости различных течений изучаются и с помощью кинетических дискретных моделей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 18-01-00899.

ЛИТЕРАТУРА.

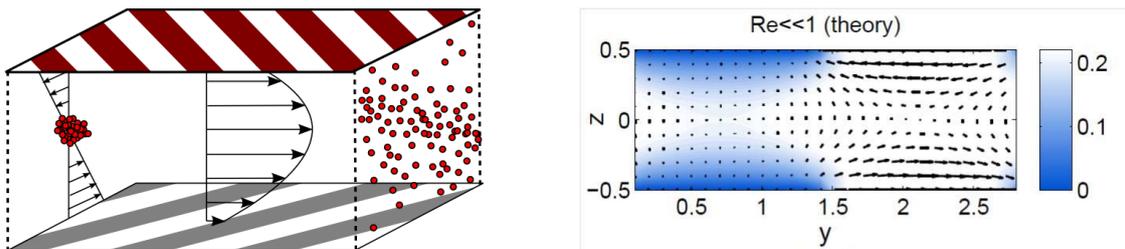
1. V.V. Aristov. Direct methods for solving the Boltzmann equation and study of nonequilibrium flows. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001.
2. V.V. Aristov, O.I. Rovenskaya. Application of the Boltzmann kinetic equation to the eddy problem. *Computers and Fluids*, 2011, 50, 189-198.
3. M.A. Gallis, N.P. Bitter, T.P. Koehler, J.R. Torczynski, S.J. Plimpton, G. Papadakis. Molecular-level simulations of turbulence and its decay. *Physical Review Letters*, 2017, 118, 064501.
4. С.А. Попов. О внутренней структуре турбулентности. Доклады Академии наук. 2016, т. 469, №6, с. 686-690.
5. V.V. Aristov, O.V. Ilyin. Kinetic model of the spatio-temporal turbulence. *Physics Letters A*, 2010, 374, 4381-4384.
6. E.V. Radkevich, O.A. Vasil'eva. Generation of chaotic dynamics and local equilibrium for the Carleman equation. *Journal of Mathematical Sciences*. 2017, 224, 763-795.

FLOW AND ADVECTIVE SUPERDIFFUSION IN CHANNEL WITH ANISOTROPIC SUPERHYDROPHOBIC WALLS

E. S. Asmolov^{a,b}, T. V. Nizkaya^a, O. I. Vinogradova^{a,b}
^a Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow
^b Moscow State University

Superhydrophobic (SH) textures in the Cassie state, where the texture is filled with gas, have motivated numerous studies during the past decade. The use of highly anisotropic SH textures provides additional possibilities for flow manipulation due to secondary flows transverse to the direction of the applied pressure gradient. This can be used to separate non-Brownian microparticles [1] and enhance mixing rate [2] in microfluidic devices. Most of the prior work has focused on calculations of the eigenvalues of the effective slip-length tensor for a single SH interface.

In the present work, we show that a misalignment of textured and anisotropic walls leads to a generation of shear flow in the transverse direction. The transverse shear generates complex flow structures at the scale of the texture period [3]. We consider the pressure-driven flow between two parallel stationary SH walls decorated with two identical misaligned superhydrophobic walls with no-slip (white) and partial-slip (colored) stripes (see Fig.). The flow is periodic in a rectangular unit cell. We assume the gas interface to be flat with no meniscus curvature. The 3D flow is found using the theoretical solution of Stokes equations based on Fourier series and Dissipative Particle Dynamics simulations. The effective properties of the channel are characterized by the flow and shear rates averaged over the cell volume. The results evaluated within the two approaches compare very well at low Reynolds number. The flow in the transverse direction at $x=0$ is shown in Fig. and represents a transverse shear superimposed with two co-rotating vortices. For larger Reynolds number these vortices become isolated, by suppressing fluid transport in the transverse direction.



Dispersion of Brownian particles is relevant to many applications. It is difficult in wide microchannels with smooth walls since the diffusion is slow at low Re and large Pe . SH surfaces with anisotropic patterns can enhance mixing in channels and both transverse shear and vertical components of the velocity contribute to this process. We study dispersion of additives in the transverse direction due to a combined effect of convection and Brownian diffusion and look for an optimal regime [4]. The scalings for two limiting regimes of superdiffusive dispersion are found. The maximal spreading can be attained at the intermediate case when $Pe \sim L/H \gg 1$, where L and H are the channel length and width. This regime corresponds to the case when the time scales for particles to migrate through the channel length and to diffuse to channel walls are comparable. This conclusion is validated by simulations of particle assembly.

BIBLIOGRAPHY

1. D. Pimponi, M. Chinappi et al. Mobility tensor of a sphere moving on a superhydrophobic wall: application to particle separation. *Microuidics Nanouidics*. 2014. Vol. 16. P. 571–585.
2. J. Ou, G. R. Moss, J. P. Rothstein. Enhanced mixing in laminar flows using ultrahydrophobic surfaces. *Phys. Rev. E*. 2007. Vol. 76. P. 016304.
3. T. V. Nizkaya, E. S. Asmolov et al. Flows and mixing in channels with misaligned superhydrophobic walls. *Phys. Rev. E*. 2015. Vol. 91, P. 033020.
4. T. V. Nizkaya, E. S. Asmolov, O.I. Vinogradova. Advective superdiffusion in superhydrophobic microchannels. *Phys. Rev. E*. 2017. Vol. 96, P. 033109.

КОНВЕКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

Бабушкин И.А., Глухов А.Ф., Зильберман Е.А., Зюзгин А.В.
Пермский национальный исследовательский университет, Пермь
Емельянов В.М.
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
Иванов А.И.
Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королев
Максимова М.М.
Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва, Королев
Сазонов В.В.
Институт Прикладной Математики им. Келдыша РАН, Москва

Рассматриваются результаты конвективных экспериментов в условиях реальной невесомости и динамического воздействия на гравитационно-чувствительные системы. Эксперименты с оборудованием Alice-1 (1995), Дакон (1998), Алис-2-Вибро (1999), Алис-2-Вибро-2000 (2000), Дакон-М (2008) показали, что микрогравитационная обстановка при орбитальном полете крупного комплекса может вызывать конвективные потоки в стратифицированных средах, а дополнительные динамические воздействия (нештатная работа вентилятора, стыковка с космическим аппаратом, или действия членов экипажа) также вызывают термоконвективные или термовибрационно-конвективные эффекты. В результате анализа телеметрической информации о полете орбитальной станции восстановлена квазистатическая компонента микроускорений и показано ее ориентирующее влияние на виброконвективные потоки. Обнаружены и описаны конвективные процессы при вращательном движении космического аппарата.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ КОМЕТЫ ЧУРЮМОВА-ГЕРАСИМЕНКО ПРИ ПОМОЩИ АППАРАТА ROSETTA

Баранов В.Б.
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова)

В 2004 году Европейским космическим агенством (ESA) по сложной траектории был запущен аппарат Rosetta для исследования кометы Чурюмова-Герасименко. В сентябре 2014 года, незадолго до прохода кометой перигелия, аппарат встретился с кометой и, маневрируя вокруг нее, в течение двух лет проводил исследования параметров истекающего из кометы газа. При этом большое внимание уделялось взаимодействию кометного газа (газа комы кометы) с солнечным ветром.

Границу раздела плазмы солнечного ветра и заряженной компоненты кометного газа (плазмы), которая является тангенциальным разрывом, обычно называют в литературе «ионопаузой». Поскольку кометы не имеют собственного магнитного поля, то эта граница разделяет межпланетное магнитное поле и область кометной комы, в которой магнитное поле отсутствует (magnetic cavity). Впервые эта область была открыта при исследовании кометы Галлея в марте 1986 года при помощи аппарата Giotto. Было, в частности, показано, что ионопауза имеет определенную структуру, т.е. оказалось, что магнитное поле в солнечном ветре проникает на некоторое расстояние в кому кометы. В работе [1] было показано, что это проникновение может быть объяснено отсутствием «вмороженности» магнитного поля в плазму вследствие эффекта Холла. Аппарат Rosetta при маневрировании вокруг кометы Чурюмова-Герасименко много раз пересекал такую границу, что интерпретировалось как неустойчивость ее ионопаузы.

Проблеме интерпретации некоторых результатов измерений плазменных параметров вблизи кометы Чурюмова-Герасименко при помощи аппарата Rosetta и посвящен настоящий доклад.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов В.Б. О влиянии токов Холла на проникновение магнитного поля через тангенциальные разрывы в немагнитную плазму в физических условиях космического пространства // Письма в АЖ. Т. 39, № 11, 2013.

УПРАВЛЕНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫМ ПЕРЕХОДОМ В ТРЕХМЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ПОМОЩИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА ПРИ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВНЕШНЕГО ПОТОКА

С.А. Баранов¹, И.А. Моралев², Д.С. Сбоев¹, С.Н. Толкачев¹

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

В работе представлены результаты экспериментального исследования по управлению ламинарно-турбулентным переходом в трехмерном пограничном слое при помощи диэлектрического барьерного разряда (ДБР). Эксперименты проведены в аэродинамической трубе (АДТ) ЦАГИ Т-124 на модели стреловидной плоской пластины с наведенным отрицательным градиентом давления при скорости потока 12-24 м/с. Угол стреловидности пластины 35°. Потенциальное течение во внешнем потоке моделировалось при помощи искривленных фальшстенок в рабочей части. Измерения проведены однониточным датчиком термоанемометра. Положение перехода определялось по распределениям перемежаемости вблизи стенки. ДБР-актуатор общей длиной 390 мм размещался параллельно передней кромке в 110 мм от неё и предназначался для зажигания микрозарядов с шагом 5 мм в положении $X = 125$ мм. Положение актуатора выбиралось из соображений возбуждения субкритических стационарных возмущений поперечного течения в малотурбулентном режиме работы АДТ. Напряжение на актуаторе могло регулироваться.

Наши предыдущие измерения показали, что данный актуатор помимо предусматривавшейся стационарной моды генерирует в пограничном слое бегущие колебания неустойчивости поперечного течения, приводившие к раннему переходу. Поэтому в данной работе была предпринята попытка замаскировать эти вносимые актуатором нежелательные возмущения естественными, повысив для этого турбулентный фон внешнего потока. Повышенная степень турбулентности около 0.9% создавалась с помощью сетки, установленной на срезе сопла АДТ.

Результаты экспериментов показали, что при включенном актуаторе в пограничном слое возникает модуляция полей средней скорости и ее среднеквадратичных пульсаций по трансверсальной координате. Такая модуляция отсутствует при выключенном актуаторе. Темп нарастания вниз по потоку интегральных по спектру пульсаций при работе актуатора практически не изменялся. Однако существенно изменялись частотные спектры возмущений. В них оказывались подавленными высокочастотные компоненты, а низкочастотные слабее затухали к внешней границе пограничного слоя. Этот эффект проявлялся по всей ширине зоны измерений и не зависел от положения по трансверсальной координате.

Работа актуатора слабо повлияла на положение начала ламинарно-турбулентного перехода, определявшееся как начало отклонения распределений перемежаемости по продольной координате от нуля. Однако положение конца перехода при работающем актуаторе сдвигалось вниз по потоку на 50-100 мм. При возрастании скорости потока и неизменном положении датчика выигрыш в скорости наступления развитого турбулентного режима течения составлял около 1 м/с. Темп производства турбулентных пятен при включении актуатора существенно снижался, что было заметно и визуально при проведении опытов. Кроме того, было установлено, что для актуатора данной конструкции имеется некоторая оптимальная величина напряжения на электродах, дающая наибольшее снижение производства турбулентных пятен.

Как известно, в трехмерных пограничных слоях при повышенной внешней турбулентности протяженность зоны разрушения ламинарного режима может быть достаточно большой, до 30-40% хорды крыла [1, 2]. Полученные результаты показывают, что, во-первых, ДБР-актуаторы могут иметь некоторые перспективы в управлении ламинарно-турбулентным переходом в таких условиях. Во-вторых, для успешного применения этого метода управления в малотурбулентных течениях необходимо существенно снизить генерацию актуатором бегущих мод.

ЛИТЕРАТУРА.

1. А.Ф. Киселев, Д.С. Сбоев, С.Л. Чернышев Особенности ламинарно-турбулентного перехода в трехмерном пограничном слое при повышенной внешней турбулентности. ДАН, 2014, 454(6), 665-668.
2. A.Ph. Kiselev, V.A. Kuzminsky, D.S. Sboev The laminar-turbulent transition zone in 2D and 3D boundary layers with emphasis on effect of free stream turbulence. 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2014), 2014, St. Petersburg, Russia.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ СО СВОБОДНОЙ СТРУЕЙ

С.А. Баранов, Н.И. Батура, Г.Г. Гаджимагомедов, Д.С. Сбоев
Центральный Аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

Аэродинамические трубы со свободной струей имеют широкое применение в практике аэродинамического эксперимента. Важной особенностью этих установок является возникновение пульсаций скорости в рабочей части (РЧ), вызванных генерацией вихрей в слоях смешения. Кроме того, взаимодействие слоя смешения струи и диффузора приводит к возникновению вибраций установки и самого здания, в котором она смонтирована. По этой причине весьма актуальной задачей для существующих и перспективных труб является управление возмущениями в слое смешения. Литература по этой проблеме весьма обширна, однако физические механизмы возбуждения колебаний понята недостаточно.

Предлагаемое сообщение посвящено описанию экспериментов по исследованию характеристик пульсаций в аэродинамической трубе со свободной струей Т-03 ЦАГИ. Максимальная скорость этой модельной установки - 45 м/с, размеры среза прямоугольного сопла - 570x370 мм, длина открытой рабочей части до диффузора - 1300 мм. Эксперименты проводились как на установке в ее исходном виде, так и при монтаже на срезе сопла треугольных вихрегенераторов различной высоты.

Методом PIV были исследованы средние характеристики полей скорости в районе слоя смешения струи. На всех исследуемых режимах при скоростях до $U_0 = 40$ м/с положение внешней и внутренней границы, а также границы первоначального расхода рабочей струи мало зависит от глубины установки в поток вихрегенераторов и скорости потока. Дымовая визуализация показала присутствие квазиупорядоченных вихрей в слое смешения на некоторых режимах. Пульсации в струе исследовались с помощью двух термоанемометров, которые устанавливались на разных расстояниях от среза сопла. Полученные осциллограммы также выявили квазипериодические пульсации, которым на спектре соответствуют дискретные гармоники. Помимо дискретных гармоник на всех скоростях наблюдаются нарастающие вниз по потоку пульсации в широкой полосе частот (15-300 Гц), центрированные около числа Струхала $Sh=0,48$. Анализ спектров турбулентности показал, что источником этих возмущений служит завихренность в турбулентном слое смешения, окружающем струю. По сигналам с двух датчиков были рассчитаны кроспспектры и скорость распространения возмущений, которая оказалась равной примерно $0,66U$ для наиболее интенсивных колебаний. Характерная длина волны возмущений растет вниз по потоку.

Рассмотрено несколько аэроакустических механизмов, которые могут вызывать возникновение интенсивных квазипериодических колебаний с дискретными гармониками в спектре. В пионерской работе [1] предложена модель возбуждения таких колебаний, основанная на взаимодействии квазипериодических возмущений в свободной струе и собственных колебаний (стоячих акустических волн) закрытой части АДТ. Механизм, лежащий в основе модели [1], состоит в том, что квазипериодические вихри возбуждают в закрытой части АДТ стоячие волны большой амплитуды, которые, в свою очередь, на срезе сопла интенсифицируют порождение квазипериодических вихрей. При этом возникает обратная связь, придающая процессу автоколебательный характер. Анализ полученных в настоящем эксперименте данных показал, что в возбуждении колебаний большой амплитуды на дискретных частотах могут участвовать и акустические моды собственных колебаний других компонентов установки, в частности, камеры Эйфеля.

В представленных экспериментах при помощи термоанемометра изучалось влияние на колебания скорости в рабочей части АДТ Т-03 вихрегенераторов, выполненных в виде треугольных пластинок, выступающих в поток перпендикулярно стенкам сопла и устанавливаемых на его срезе сопла. Механизм влияния таких вихрегенераторов на колебания в слое смешения состоит в том, что они способствуют перераспределению энергии квазиупорядоченного колебательного движения от поперечной завихренности к продольной, тем самым снижая интенсивность колебаний в ядре потока. В сечении $x = 445$ мм в АДТ с вихрегенераторами пульсации, по сравнению с исходной конфигурацией, снижаются примерно на 0,1 %, в среднем с 0,7 до 0,6 %. Ниже по потоку влияние вихрегенераторов более существенное. Пульсации падают примерно на 30 %, с 2 до 1,4 %. Таким образом, исследованные вихрегенераторы благоприятно сказываются на колебаниях потока в АДТ.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Стрелков С.П., Бендриков Г.А., Смирнов Н.А. Пульсации в аэродинамических трубах и способы демпфирования их // Труды ЦАГИ. – 1946. – № 593.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВЛАГОНАСЫЩЕННОГО ТЕЛА ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ МЕЖДУ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ВАЛАМИ

Г.А. Бахадиров

Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз, г. Ташкент

Вопросу движения влагонасыщенного тела переменной массы между вращающимися валами исследователи подходят по разному.

А.Ниссэна [1], зону контакта вращающихся валов, делит на две части: входную и выходную, считает, что влага из материала удаляется в выходную часть. Это объясняется тем, что удаление влаги из материала происходит под действием капиллярных сил в выходной части зоны контакта, где упругие покрытия валков при расширении впитывают влагу.

Другие исследователей [2-3], показывают обратную картину: влага удаляется из входной части зоны контакта и в выходной части имеет место впитывание влаги материалом из покрытий валов. Следует иметь в виду, что характер удаления влаги из материалов и впитывание влаги материалом покрытий валов зависит от свойств материалов и механических параметров отжимных устройств.

Непосредственное использование этих теорий при изучении процесса отжима влагонасыщенного материала (например, кожевенного полуфабриката) валковой парой дает значительную погрешность.

При отжиме влагонасыщенного материала валковой парой целесообразно использовать общий закон динамики для тел переменной массы (уравнение Мещерского) [4]. В этом случае количество влаги, содержащейся в влагонасыщенном материале с течением времени изменяется непрерывно.

В работе рассматривается процесс отжима жидкости из влагонасыщенного листового материала валковой парой с одинаковыми радиусами. Ось абсцисс Ox направим перпендикулярно линии, соединяющих центры валков и проходящей через ее середину. Длина $l = CC_1$ геометрического очага деформации в проекции на ось Ox определяется из треугольника O_1CC_1 и равна $l = R \sin \alpha$ (α - угол захвата) (рис.). Если в очаге деформации на момент времени t выделить элемент массой M , то его движение

можно описать уравнением

$$\frac{dM}{dt} \vec{V}_c + M \vec{W}_c = \vec{F}^{(e)}, \quad (1)$$

где \vec{V}_c , \vec{W}_c – соответственно вектора скорости и ускорения центра масс выделенного элемента; $\vec{F}^{(e)}$ - главный вектор внешних сил, действующих на этот элемент.

Время прохождения материала очаг деформации составит $t = \alpha/\omega$ (ω - угловая скорость вращения валков). В произвольный момент времени $t \in [0, \alpha/\omega]$ положение точки B элемента, лежащей на линии дуги AC деформации валка характеризуется углом $\varphi = \alpha - \omega t$. В случае, когда линия деформации

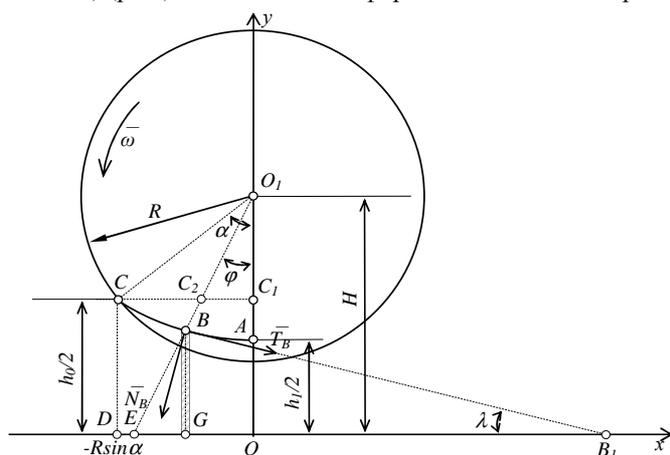


Рис. К определению параметров валковой пары

представляет параболу, используя координаты точек A и C , найдем ее уравнение [5]:

$$y = \frac{h_0 - h_1}{2R^2 \sin^2 \alpha} x^2 + \frac{h_1}{2}, \quad (2)$$

где h_0, h_1 – толщины материала соответственно до начала захвата и при выходе ее из очага деформации.

Считая, что сила трения и реакция связи будут менять свое положение как в пространстве, так и во времени определяется объем жидкости вытекший из материала на произвольный момент времени.

Выведена зависимость нормальной реакции для выделенного элемента с переменной массой с учетом кинематических и геометрических параметров зоны контакта валковой пары.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Nissan A. Functions of the felts in water removal on the papermaking machine –Tappi, 1954, 37, n 12, p 597-606.
2. Кузнецов Г.К. Динамика текстильных машин: Учебн. пособие. – Кострома.: КТИ, 1992. – 110 с.
3. Новиков Н.Е. Прессование бумажного полотна. – М.: Легкая промышленность, 1972. – 248 с.
4. Фомин Ю.Г. Разработка теоретических основ и средств повышения эффективности обработки тканей валковыми модулями отделочных машин: Ар. дисс. ... докт. техн. наук. - Иваново: Ив. гос. текстильная академия. 2001. – 41 с.
5. Ризаев А.А., Бахадиров Г.А., Баклушин М.Б. Определение центра масс элемента кожполуфабриката между двумя валами. Узбекский журнал. Проблемы механики, №3, 2002 г. стр.32-36.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ МЕТОДА ЧОХРАЛЬСКОГО ПРИ ВРАЩЕНИИ КРИСТАЛЛА И ТИГЛЯ

О.А. Бессонов

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

В работе представлены результаты расчетов и анализ влияния раздельного и совместного вращений кристалла и тигля на устойчивость течений в широком диапазоне чисел Прандтля (от 0.01 до 10).

Для исследования конвективных взаимодействий широкое применение нашла гидродинамическая модель метода Чохральского (рис. 1, слева). Взаимодействие механизмов тепловой гравитационной и вынужденной конвекций в модели метода Чохральского изучалось на протяжении длительного времени [1, 2], однако, как правило, рассматривались частные случаи конвективных течений жидкости малой интенсивности, а расчеты проводились на грубых сетках, либо для осесимметричной модели [3].

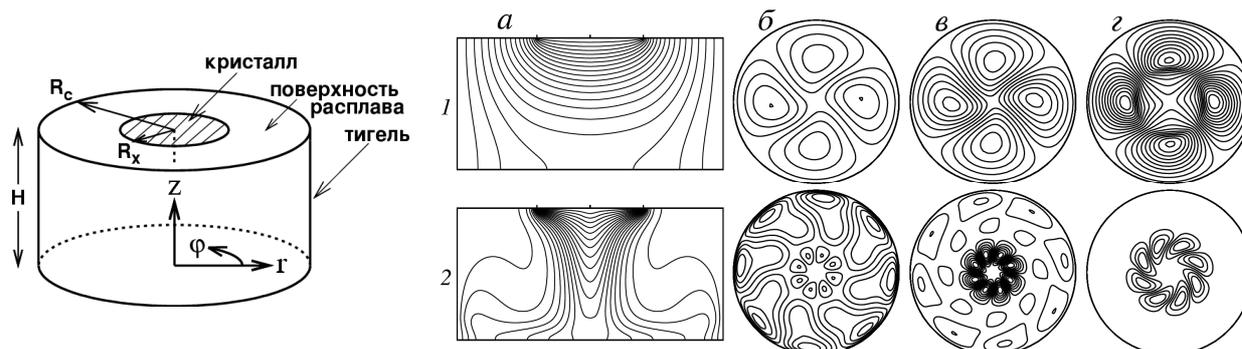


Рис. 1. Слева – иллюстрация метода Чохральского. Справа – примеры неосесимметричных течений при слабой надкритичности: изотермы θ в вертикальном сечении (а) и изолинии отклонения температуры $\delta\theta$ в горизонтальных сечениях $z = 0.2, 0.5, 0.95$ (б–г) при $(Pr, Gr, Re_x, Re_c) = (0.03, 2.75 \cdot 10^6, -100, 2000)$ (1) и $(0.07, 3.3 \cdot 10^6, 1900, -50)$ (2)

Настоящая работа завершает цикл параметрических исследований тепловой гравитационной и смешанной конвекций [2, 4]. Исследованы течения с различными сочетаниями скоростей вращения кристалла и тигля, проведен численный анализ двумерной и пространственной мод неустойчивости, рассмотрены механизмы потери осевой симметрии течения (рис. 1, справа).

Определены режимы с повышенным порогом устойчивости для различных сочетаний скоростей вращения. Продемонстрировано, что для высоких чисел Прандтля совместное вращение кристалла и тигля позволяет повысить значение критического числа Грасгофа в 9-12 раз. Построена сводная диаграмма (карта) предельных режимов естественной и смешанной конвекций для чисел Прандтля от 0.01 до 10 (рис. 2). Представленные результаты позволят продвинуться в понимании практических вопросов повышения устойчивости течения и устранения колебаний расплава при выращивании кристаллов.

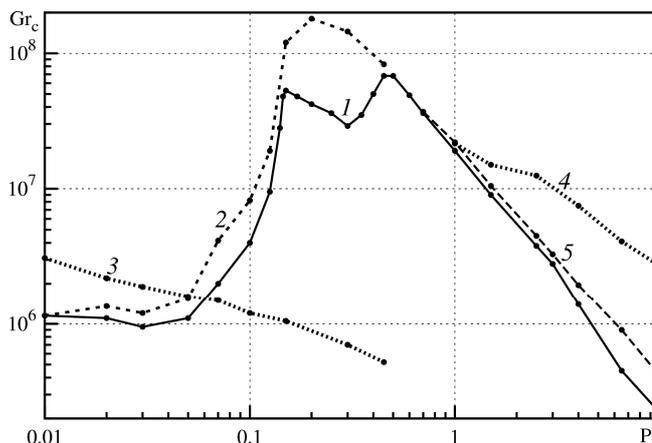


Рис. 2. Предельные режимы устойчивого пространственного течения; зависимость критических чисел Gr_c от Pr : 1 – без вращений кристалла и тигля, 2 – с вращением кристалла, 3 – с вращением тигля, 4 – с совместным вращением кристалла и тигля, 5 – потеря осевой симметрии колебательного течения при высоких Pr (без вращений)

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (15-01-06363 и 15-01-02012). Расчеты выполнялись на компьютерах вычислительного центра “Mésocentre”, Университет Экс-Марсель, Франция.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Н.В. Никитин, С.А. Никитин, В.И. Полежаев. Конвективные неустойчивости в гидродинамической модели роста кристаллов методом Чохральского. Успехи механики, 2003, т.2, №4, с.63-105.
2. О.А. Бессонов, В.И. Полежаев. Неустойчивости тепловой гравитационной конвекции и теплообмен в модели метода Чохральского при различных числах Прандтля. Изв. РАН. МЖГ, 2013, №1, с.27-40.
3. В.С. Бердников, В.А. Гапонов. Смешанная конвекция в режимах дифференциального вращения кристалла и тигля в методе Чохральского // Тр. 4-й Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд. МЭИ, 2006, Т.3, с.71-75.
4. О.А. Бессонов, В.И. Полежаев. Анализ смешанной конвекции в модели метода Чохральского в широком диапазоне чисел Прандтля. Изв. РАН, МЖГ, №3, 2017, с.44-56.

СВОБОДНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕГУЩЕГО В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ С ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ

В.В. Боголепов, В.Я. Нейланд

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского,
г. Жуковский, Московская область

Несомненным достижением механики жидкости и газа прошлого века, по утверждению Д. Лайтхилла [1], является асимптотическая теория свободного взаимодействия сверхзвукового потока с пограничным слоем [2,3], которая возникла при исследовании стационарной задачи об отрыве пограничного слоя. Эта теория вобрала в себя достижения и опыт многочисленных предыдущих исследований, дала объяснение механизму развития отрывного течения, позволила определить все характеристики этого сложного явления, которое занимало умы величайших механиков 20-го века.

Нестационарная форма теории свободного взаимодействия оказалась эффективной при исследовании различных видов возмущений пограничного слоя, его устойчивости (см., например, [4]).

Эта теория инициировала широкий круг исследований, позволила решить многие задачи, которые не поддаются изучению в рамках классической теории пограничного слоя при сверх- и гиперзвуковых скоростях набегающего потока [5].

В работе сформулирована краевая задача нестационарной асимптотической теории взаимодействия бегущего в сверхзвуковом потоке внешнего возмущения давления с пограничным слоем. В невязком стационарном приближении получены аналитические и численные решения с учетом механизма самоиндукции, когда изменение толщины пограничного слоя индуцирует дополнительное возмущение давления. Показано, что учет самоиндукции значительно ослабляет воздействие на поток внешних возмущений и способствует смещению окрестности взаимодействия в направлении движения внешнего возмущения.

Получено решение для зарождения схода вихревой пелены с поверхности тела в случае движения возмущения давления вниз по потоку при учете самоиндукции.

Представленные модельные решения являются хорошей основой для дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lighthill M.J. Fluid Mechanics. Twentieth Century Physics. Edited by L.M. Brown, A. Pais, B. Pippard. Institute of Physics and American Institute of Physics. 1905. Vol. II. Chap. 10. P. 795-912.
2. Нейланд В.Я. Сверхзвуковое течение вязкого газа вблизи точки отрыва / III Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике 25.01.1968-01.02.1968 // Сборник аннотаций докладов съезда. М.: Наука, 1968. С. 224.
3. Stewartson K., Williams P.G. Self-induced separation / Proc. Roy. Soc, A, 1969. – Vol. 312. № 1509. – P. 181-296.
4. Жук В.И. Волны Толлмина-Шлихтинга и солитоны / М.: Наука. – 2001. – 167 с.
5. Нейланд В.Я., Боголепов В.В., Дудин Г.Н., Липатов И.И. Асимптотическая теория сверхзвуковых течений вязкого газа / М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2003. – 456 с.

ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫХ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЙ

А.В. Бойко¹, К.В. Демьянко^{1,2,3}, Ю.М. Нечепуренко^{1,2,3}

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

²Институт вычислительной математики РАН, Москва

³Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

Первая часть доклада посвящена обзору технологии численного анализа пространственно неоднородных сдвиговых течений, разработанной авторами на основе оригинальных специализированных матричных методов, предложенных и обоснованных в работах [1-7]. Технология включает новые, не имеющие аналогов экономичные высокоточные матричные алгоритмы вычисления линейного и энергетического критических чисел Рейнольдса и максимальной амплификации плотности кинетической энергии возмущений и оптимальных возмущений с гарантированной точностью. Для дополнительного ускорения вычислений и повышения точности расчетов используется алгебраическая редукция. Особое место в технологии занимают методы ньютоновского типа, предназначенные для решения частных линейных и нелинейных проблем собственных значений с большими разреженными матрицами [8-11]. Использованию этой технологии и обсуждению полученных результатов для различных фундаментальных задач устойчивости будет посвящен на этой конференции отдельный доклад.

Вторая часть доклада посвящена инженерному приложению разработанной технологии – блоку ламинарно-турбулентного перехода LOTRAN, который авторы разрабатывают и используют в промышленных проектах в течение нескольких последних лет [12-14]. Этот блок представляет собой оригинальную реализацию e^N -метода.

Разработка численных алгоритмов выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-31-60092), реализация и обоснование - при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-71-20149), численные эксперименты выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-08-00354).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко А.В., Нечепуренко Ю.М. Численный спектральный анализ временной устойчивости ламинарных течений в каналах постоянного сечения. ЖВМ и МФ, 2008, 48(10), 1731-1747.
2. А.В. Бойко, Ю.М. Нечепуренко. Технология численного анализа влияния оребрения на временную устойчивость плоских течений. ЖВМ и МФ, 2010, 50(6), 1109-1125.
3. A.V. Boiko, Yu.M. Nechipurenko, M. Sadkane. Fast computation of optimal disturbances with a given accuracy for duct flows. *Comput. Math. Phys.*, 2010, 50(11), 1914-1924.
4. Yu.M. Nechipurenko, M. Sadkane. A low-rank approximation for computing the matrix exponential norm. *SIAM J. Matr. Anal. Appl.*, 2011, 32(2), 349-363.
5. A.V. Boiko, Yu.M. Nechipurenko, M. Sadkane. Computing the maximum amplification of the solution norm of differential-algebraic systems. *Comput. Math. Modeling*, 2012, 23(2), 216-227.
6. Нечепуренко Ю.М. О редукции линейных дифференциально-алгебраических систем управления. Доклады АН. 2012, 445(1), 17-19.
7. Бойко А.В., Демьянко К.В., Нечепуренко Ю.М. Численный анализ пространственной гидродинамической устойчивости сдвиговых течений в каналах постоянного сечения. ЖВМ и МФ, 2018, 58(5).
8. G. El Khoury, Yu. M. Nechipurenko, M. Sadkane. Acceleration of inverse subspace iteration with Newton's method. *J. Comput. Appl. Math.* 2014, 259, 205-215.
9. K.V. Demyanko, Yu. M. Nechipurenko, M. Sadkane. A Newton-like method for computing deflating subspaces. *J. Numer. Math.*, 2015, 23(4), 289-300.
10. K.V. Demyanko, Yu.M. Nechipurenko, M.Sadkane. A Newton-type method for non-linear eigenproblems. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 2017, 32(4), 237-244.
11. K.V. Demyanko, Yu.M. Nechipurenko. A block Newton's method for computing invariant pairs of non-linear matrix pencils. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 2018, 33(1).
12. Бойко А.В., Нечепуренко Ю.М., Жучков Р.Н., Козелков А.С. Блок расчёта положения ламинарно-турбулентного перехода для пакета ЛЮГОС. Теплофизика и аэромеханика, 2014, 21(2), 201-220.
13. A.V. Boiko, Yu.M. Nechipurenko, I.V. Abalakin, V.G. Bobkov. Numerical prediction of laminar-turbulent transition on an airfoil. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 2014, 29(4), 205-218.
14. A.V. Boiko, K.V. Demyanko, Yu.M. Nechipurenko. On computing the location of laminar-turbulent transition in compressible boundary layers. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 2017, 32(1), 1-12.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫХ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЙ

А.В. Бойко¹, А.В. Довгаль¹, Ю.М. Нечепуренко^{1,2,3}

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

²Институт вычислительной математики РАН, Москва

³Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

На примере ряда задач рассмотрены особенности гидродинамической устойчивости течений, существенно зависящих от нескольких пространственных переменных и формирующихся при наличии сложной геометрии обтекаемой поверхности. Такие поверхности, усложненные, например, оребрением, продольной кривизной, тепловыми пятнами, локальными выступающими технологическими элементами, угловыми конфигурациями широко применяются на практике, что делает рассматриваемые задачи чрезвычайно актуальными.

Исследования имели комплексный характер и включали в себя разработку новых методов адекватного лабораторного и численного моделирования таких течений и распространения возмущений в них, экспериментальное и численное исследование устойчивости различных конкретных пространственно неоднородных сдвиговых течений, представляющих значительный фундаментально-научный и практический интерес, сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов [1-6].

Установлена возможность немодового нарастания стационарных возмущений в областях отрыва ламинарного пограничного слоя, модулированных элементами неровности обтекаемой поверхности, периодически размещенными в трансверсальном потоке направлении. Определены закономерности перехода от затухания стационарных возмущений к их усилению в зависимости от пространственной конфигурации системы элементов и объяснен парадокс наблюдаемого экспериментально реверса дефекта скорости; изучена устойчивость такого пространственно периодического течения. Изучена реакция областей отрыва ламинарного пограничного слоя на температурные возмущения, образованные пространственно периодическим нагреванием/охлаждением обтекаемой потоком поверхности.

Исследовано влияние продольного оребрения обтекаемой поверхности на устойчивость плоских течений. Впервые подтвержден численно известный экспериментальный парадокс, состоящий в том, что оребрение может увеличивать критическое энергетическое число Рейнольдса и уменьшать при этом линейное. Кроме того, впервые установлено, что при определенных периодах оребрения увеличиваются либо уменьшаются одновременно оба критических числа Рейнольдса. Дано строгое теоретическое объяснение обнаруженного эффекта.

На основе сравнения расчетных и доступных экспериментальных данных обоснован принципиально новый подход к задачам восприимчивости сдвиговых течений к внешним возмущениям, основанный на анализе оптимальных возмущений, и позволивший впервые получить коэффициенты восприимчивости вихрей Гёртлера с хорошей точностью совпадающие с экспериментальными.

Физические и численные эксперименты выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-08-00354), разработка и реализация численных алгоритмов выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-71-20149).

ЛИТЕРАТУРА.

1. A.V. Boiko, A.V. Dovgal, S. Hein. Control of a laminar separating boundary layer by induced stationary perturbations. *Eur. J. Mech. B/Fluids*, 2008, 27(4), 466–476.
2. A. Boiko, A. Dovgal, S. Hein, A. Henning. Particle image velocimetry of a low-Reynolds-number separation bubble. *Exp. Fluids*, 2011, 50, 13-21.
3. A.V. Boiko, A.V. Dovgal, A.M. Sorokin. Instability of a backward-facing step flow modified by stationary streaky structures. *Phys. Fluids*, 2012, 24, 104104.1-104104.11.
4. A.V. Boiko, A.V. Dovgal, A.M. Sorokin. Modification of flow perturbations in a laminar separation bubble by heat transfer. *Phys. Fluids*, 2017, 29, 024103.1-024103.8.
5. А.В. Бойко, Н.В. Ключнев, Ю.М. Нечепуренко. Устойчивость течения жидкости над оребренной поверхностью. Москва: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2016.
6. A.V. Boiko, A.V. Ivanov, Y.S. Kachanov, D.A. Mischenko, Yu.M. Nечepurenko. Excitation of unsteady Görtler vortices by localized surface nonuniformities. *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 2017, 31, 67–88.

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЙ МНОГОФАЗНЫХ И ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

С.А. Боронин

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Сколковский институт науки и технологий (Сколтех).

Течения дисперсных сред широко распространены в различных технологических процессах, требующих эффективного контроля их режима (барботажные и очистные установки, гидро- и пневмотранспорт в трубопроводах, аэрокосмические и нефтесервисные технологии). Мотивацией теоретических исследований устойчивости потоков с включениями является также практически полное отсутствие экспериментальных данных о влиянии дисперсной примеси на ламинарно-турбулентный переход потоков сплошных сред.

Основой для развития теории гидродинамической устойчивости течений дисперсных сред послужила пионерская работа Ф.Г. Сэфмана 1962г [1], в которой в рамках модели взаимопроникающих континуумов была сформулирована задача линейной устойчивости плоскопараллельного потока запыленного газа. Был сделан ряд упрощающих предположений о модели дисперсной среды и конфигурации потока: межфазное взаимодействие определяется силой Стокса, в основном течении рассогласование скоростей фаз отсутствует и концентрация частиц распределена однородно по потоку, объемная доля дисперсной фазы пренебрежимо мала. В реальных дисперсных потоках указанные предположения, как правило, не выполняются ввиду конечности объема дисперсной фазы (например, при исследовании течений суспензий, где отношение плотностей материалов фаз изменяется в широком диапазоне); высоких градиентов скорости на масштабе частицы (при течении дисперсной среды в пограничном слое, где для корректного описания межфазного взаимодействия помимо силы Стокса необходимо учитывать подъемную силу); неоднородности концентрации частиц ввиду их инерционной или сдвиговой миграции; рассогласования скоростей фаз в основном течении, вызванного, например, гравитационным осаждением частиц.

На примере ряда плоскопараллельных течений дисперсных сред рассмотрено влияние указанных новых факторов на модальную и немодальную устойчивость потоков с включениями: стратифицированное течение запыленного газа в пограничном слое [2, 3], стратифицированные течения Пуазейля и Куэтта суспензии в плоском канале [4-7], стратифицированное течение запыленного газа в вертикальном канале, и цилиндрическая свободная и затопленная двухфазная струя [9]. Получено, что рассмотренные новые факторы оказывают существенное влияние на модальную устойчивость дисперсных потоков, и их необходимо учитывать при анализе ламинарно-турбулентного перехода реальных течений сплошных сред с включениями. В частности, получен новый механизм неустойчивости стратифицированных течений суспензии и течения запыленного газа в вертикальном канале с осаждающимися частицами при малых числах Рейнольдса (обобщение неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и длинноволновая гравитационная неустойчивость). Изучена также немодальная устойчивость дисперсных и многофазных потоков, позволяющая предсказать потерю устойчивости плоскопараллельных потоков в докритической области определяющих параметров и получить форму трехмерных структур, предшествующих возникновению турбулентности (оптимальные возмущения). Получено, что в широком диапазоне определяющих параметров дисперсная примесь существенно усиливает алгебраический (немодальный) механизм нарастания возмущений. Для струйного двухфазного течения получено, что алгебраический механизм пространственного нарастания возмущений существенен для стационарных возмущений (стоячих волн) с малыми азимутальными числами (от 1 до 4).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-01-00057), автор выражает благодарность руководству Сколтеха за финансовую поддержку в рамках стартап проекта.

ЛИТЕРАТУРА.

1. P.G. Saffman, "On the stability of laminar flow of a dusty gas," J. Fluid Mech. 13(1), 120–128 (1962).
2. Боронин С.А., Осипцов А. Н. Устойчивость течения дисперсной смеси в пограничном слое // Изв. РАН. МЖГ. 2008. № 1. С. 76–87
3. Боронин С.А., Осипцов А.Н. Модальная и немодальная устойчивость течения запыленного газа в пограничном слое // Изв. РАН. МЖГ. 2014 N. 6. С. 80-93.
4. Боронин С.А. Исследование устойчивости течения суспензии в плоском канале с учетом конечной объемной доли частиц // Изв. РАН. МЖГ. 2008. № 6. С. 40–53
5. Боронин С.А. Гидродинамическая устойчивость стратифицированного течения суспензии в плоском канале // Доклады РАН. 2009. Т. 429. № 4. С. 477-480
6. Боронин С.А. Устойчивость плоского течения Куэтта дисперсной среды с конечной объемной долей частиц // Изв. РАН. МЖГ. 2011. N 1. С. 85-94
7. Боронин С.А. Оптимальные возмущения течения запыленного газа в плоском канале с неоднородным распределением частиц // Изв. РАН. МЖГ. 2012 N 3. С. 74-88
8. Boronin S.A., Healey J.J., Sazhin S.S. Nonmodal stability of round viscous jets // J. Fluid Mech. 2013. V. 716, P. 96-119
9. Boronin, S.A., Osipov, A.N., Nonmodal instability of a stratified plane-channel suspension flow with fine particles. Phys. Rev. E. 2016. V. 93, Iss. 3, 033107.

ДИНАМИКА ПЛЕНКИ НЕРАСТВОРИМОГО СУРФАКТАНТА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ОБЪЕМНЫМ ТЕЧЕНИЕМ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ – ШОУ

Д.А. Брацун¹, В.А. Демин², А.И. Мизев³, М.И. Петухов¹, А.В. Шмыров³

1 – Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

2 – Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

3 – Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Образование квазитвердой пленки на свободной поверхности в замкнутой полости изучалось теоретически в работах [1,2]. Чтобы получить аналитическое решение задачи, в них делалось множество упрощений. В частности, рассматривалась полость с нагревом со стороны одной из вертикальных граней, но при этом распределение температуры вдоль всей полости считалось линейным. В работе [3] данная задача была исследована экспериментально с целью подтверждения теоретических выводов работы [1]. Как выяснилось, получить навязываемое в теории распределение температуры достаточно сложно, поэтому в опытах был использован неоднородный нагрев сверху так, чтобы создать распределение на свободной поверхности, максимально приближенное к линейному. Данное изменение привело к существенным отличиям в результатах, в частности, положение точки застоя в зависимости от параметра эластичности не совпало с теоретическими предсказаниями. В нашей работе проводится прямое численное моделирование поведения нерастворимого сурфактанта на свободной поверхности жидкости в ячейке Хеле – Шоу при наличии неоднородного нагрева сверху с целью согласовать теорию и эксперимент.

Численное моделирование основывалось на классических уравнениях межфазной гидродинамики. Рабочая жидкость находилась в ячейке Хеле – Шоу со свободной горизонтальной поверхностью, на которой присутствовал нерастворимый сурфактант. В отсутствие градиента температуры на всей свободной поверхности образуется мономолекулярная пленка. По мере увеличения разности температур пленка смещается, создавая участок со свободной поверхностью. Одним из ключевых параметров, характеризующих положение точки, разделяющей свободную поверхность и пленку, является так называемый параметр эластичности, который по существу равен отношению концентрационного числа Марангони к тепловому. Задача решалась численно методом конечных разностей с помощью двухполюсного метода посредством программы, написанной на языке программирования Fortran-90. По результатам численного моделирования было установлено, что изменение температурных граничных условий действительно сильно сказывается на положении точки застоя. Результирующая кривая, определяющая положение точки застоя в зависимости от параметра эластичности E теперь хорошо повторяет экспериментальные данные. В области $0 < E < 1$ на поверхности образуются две области: свободный участок и пространство, закрытое пленкой. Уменьшение параметра эластичности усиливает термокапиллярный эффект и генерирует течение с большей интенсивностью, что, в свою очередь, сильнее сдвигает пленку в противоположный конец полости. В ходе расчетов было учтено изменение состояния сурфактанта (газовое и жидкорасширенное). Характерное отклонение от линейной зависимости при больших E вызвано переходом сурфактанта в жидкорасширенное состояние. Полученные в результате расчетов поля функции тока и температуры количественно хорошо согласуются с экспериментом [3].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-01-00662 а).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Homsy G.M., Meiburg E.* The effect of surface contamination on thermocapillary flow in a two-dimensional slot // *J. Fluid Mech.* 1984. Vol. 139. P. 443–459.
2. *Carpenter Bradley, Homsy G.M.* The effect of surface contamination on thermocapillary flow in a two-dimensional slot. Part 2. Partially contaminated interfaces // *J. Fluid Mech.* 1986. Vol. 155. P. 429–439.
3. *Мизев А.И., Шмыров А.В.* Взаимодействие термокапиллярного течения с поверхностной фазой в ячейке Хеле – Шоу // Сб. науч. трудов «Конвективные течения», Вып. 7. Пермь: ПГГПУ, 2015. С. 37–60.

АКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОНВЕКТИВНЫМ ТЕЧЕНИЕМ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕ ПОСРЕДСТВОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЕЁ ОРИЕНТАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ

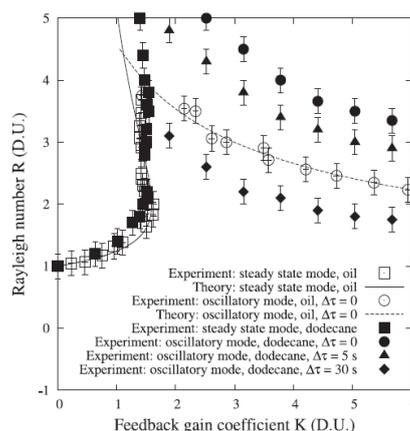
Д.А. Брацун¹, А.В. Зюзгин², И.В. Красняков¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

² Пермский государственный научно-исследовательский университет, Пермь

Вопросы управления процессами тепломассопереноса вызывают значительный интерес, как с фундаментальной точки зрения, так и в связи с многочисленными технологическими приложениями. Особенно актуальна задача об активном управлении с обратной связью, когда управление осуществляется в автоматическом режиме. Задача об автоматическом поддержании механического квазиравновесия неоднородно нагретой жидкости в конвективной петле с запаздыванием была рассмотрена в [1]. В отличие от множества работ зарубежных и российских авторов была рассмотрена прямоугольная петля, а управление осуществлялось путем наклона системы в поле тяжести. Было показано, что в этом случае можно добиться уверенной стабилизации механического равновесия жидкости в широком диапазоне управляющих параметров даже для линейного закона управления. Было обнаружено также, что чрезмерное усиление обратной связи возбуждает в системе колебания, которые вызываются запаздыванием контроллера вовремя вносить коррекцию в состояние управляемой системы [1]. Влияние шума на управление было изучено в [2].

Данная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию влияния запаздывания на эффективность управления [3]. Для этого в ходе экспериментов к естественному значению запаздывания искусственно производилась добавка, при изменении которой было возможно изучать устойчивость системы в широком диапазоне значений запаздывания. На фотографии слева представлена сама конвективная петля в определенной фазе движения под углом к полю тяжести, а также контроллер, состоящий из компьютера, соединенного в термосифонном через вольтметр и термопару, и шаговый двигатель, осуществляющий поворот петли. Карта устойчивости для различных режимов конвекции, полученная для трансформаторного масла и додекана представлена на рисунке справа.



В настоящей работе построена маломодовая динамическая модель явления и рассмотрены динамические свойства модели далеко от точки первой бифуркации. Изучение её свойств показало, что из-за запаздывания контроллер вступает в сложное нелинейное взаимодействие с управляемой конвективной системой. Это взаимодействие в зависимости от значений управляющих параметров (числа Рейля и коэффициента управления) может привести к стационарному, периодическому или даже хаотическому поведению. Построены фазовые портреты, выявлены основные бифуркации в системе. Поставлен вопрос об организации интеллектуального управления, которое бы выполняло функции предиктора, снижало величину запаздывания и повышало бы качество управления. Проводится сравнение с данными эксперимента. Сплошная и пунктирная линии на рисунке справа обозначают монотонную и колебательную моду соответственно, вычисленные для масла. Величина $\Delta\tau$ определяет искусственную добавку к запаздыванию контроллера. Обнаружено хорошее согласие с экспериментальными данными.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ (№ 3.6990.2017/8.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. D.A. Bratsun, A.V. Zyuzgin, K.G. Polovinkin, G.F. Putin. Active control of fluid equilibrium in a thermosyphon. *Techn. Phys. Let.*, 2008, 34(8), 650-652.
2. D. Bratsun, I. Krasnyakov, A. Zyuzgin A. Delay-induced oscillations in a thermal convection loop under negative feedback control with noise. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2017, 47, 109-126.
3. D. Bratsun, I. Krasnyakov, A. Zyuzgin Active Control of Thermal Convection in a Rectangular Loop by Changing its Spatial Orientation. *Microgravity Sci. Technol.*, 2017, 1-10.

ХЕМОКОНВЕКЦИЯ В РЕАГИРУЮЩИХ СМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЯХ С КОНЦЕНТРАЦИОННО-ЗАВИСИМОЙ ДИФФУЗИЕЙ: ОТ СТАЦИОНАРНЫХ ЯЧЕЕК ДО ВОЛН ПЛОТНОСТИ УДАРНОГО ТИПА

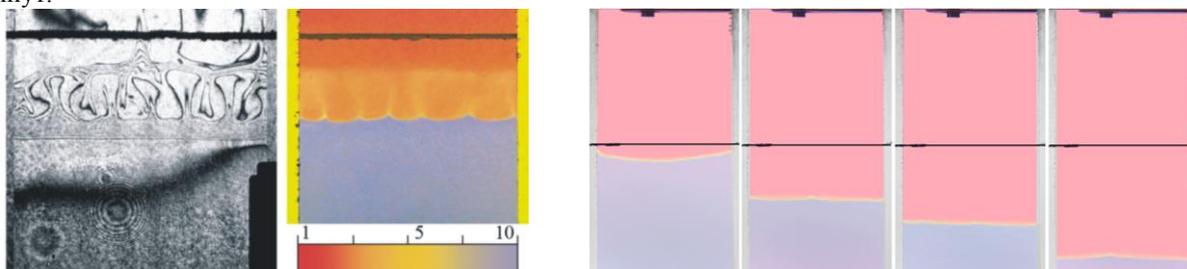
Д.А. Брацун¹, К.Г. Костарев², А.И. Мизев², Е.А. Мошева²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

В работе теоретически и экспериментально изучено развитие конвективной неустойчивости в двухслойной системе смешивающихся жидкостей, помещенных в узкий вертикальный зазор. Верхний и нижний слои образованы, соответственно, водными растворами кислоты и основания. При приведении жидкостей в контакт в системе начинается фронтальная реакция нейтрализации. Визуализация течений и полей концентрации выявила новый тип конвективной неустойчивости, обусловленный сильной зависимостью процессов диффузии реагирующих компонентов и продукта реакции от их концентрации. В зависимости от значения отношения начальных концентраций реагентов наблюдалось несколько характерных типов конвективных структур. При значительном превышении плотности нижнего слоя над верхним зафиксирована слабая традиционная неустойчивость диффузионного слоя (DLC конвекция). При приближении управляющего параметра к линии изопикны наблюдалось спонтанное возникновение регулярной периодической структуры конвективных ячеек, локализованных внутри кармана плотности. Такое структурообразование в системах смешивающихся жидкостей наблюдается впервые и было связано авторами к сильной зависимости коэффициентов диффузии реагентов от их концентрации [1]. Новый тип неустойчивости был назван авторами *конвекцией концентрационно-зависимой диффузии* (CDD конвекция) [1,2]. На рисунке (слева) представлены интерферограмма и pH-поле указанной неустойчивости.

При задании начальных концентраций реагентов еще ближе к изопикне, возникает удивительная структура, которая также ранее не наблюдалась: в системе стремительно развивается волна плотности, профиль которой меняется скачкообразно, а сама она быстро распространяется в направлении силы тяжести [3,4]. Волна возникает в результате схлопывания карманов плотности с CDD конвекцией внутри. Скорость распространения волны составляет примерно 0.06 мм/с, а фронт волны во время движения остается плоским, что резко контрастирует с привычной для хемоконвективных задач фингер-неустойчивостью (см. рисунок справа, на котором приведено несколько кадров эволюции pH-поля). При этом волна демонстрирует мощное перемешивание ингредиентов в своем спутном потоке. Весь процесс прохождения волны по кювете и полная реакция исходных реагентов занимает в эксперименте всего 5-7 минут.



Предложена математическая модель явления, включающая систему уравнений реакции-диффузии-конвекции, записанных в приближении Хеле-Шоу. Законы диффузии реагентов оценены на основании данных, известных в литературе. Представлены результаты численных расчетов основного состояния, нейтральных кривых и нелинейных режимов конвекции. Показано, что в случае использования постоянных значений коэффициентов диффузии эффект в численном эксперименте не воспроизводится. Между экспериментальными данными и результатами численных расчетов в рамках предложенной модели наблюдается хорошее согласие.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ (№ 3.6990.2017/8.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Bratsun, K. Kostarev, A. Mizev, E. Mosheva. Concentration-dependent diffusion instability in reactive miscible fluids. *Phys. Rev. E.*, 2015, 92, 011003.
2. E.V. Aitova, D.A. Bratsun, K.G. Kostarev, A.I. Mizev, E.A. Mosheva. Convective instability in a two-layer system of reacting fluids with concentration-dependent diffusion. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2016, 57(7), 76-88.
3. D. Bratsun, A. Mizev, E. Mosheva, K. Kostarev. Shock-wave-like structures induced by an exothermic neutralization reaction in miscible fluids. *Phys. Rev. E.*, 2017, 96, 053106.
4. D.A. Bratsun. Internal density waves of shock type induced by chemoconvection in miscible reacting liquids. *Tech. Phys. Lett.*, 2017, 43(10), 944-947.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ СРЕД

В.В. Булатов, Ю.В.Владимиров
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Доклад посвящен изложению фундаментальных проблем математического моделирования волновой динамики природных стратифицированных сред (океан, атмосфера). В докладе представлены основные математические модели, описывающие процессы возбуждения и распространения внутренних и поверхностных гравитационных волн в стратифицированных по вертикали, неоднородных по горизонтали и нестационарных средах, изложены асимптотические методы, являющихся обобщением пространственно-временного лучевого метода (метода геометрической оптики, метода ВКБ). Внутренние и поверхностные гравитационные волны изучаются уже достаточно давно, и по данной тематике опубликовано значительное число работ. В настоящее время возникают новые направления в математическом исследовании этих волн. Во-первых, стало понятным, что в поле внутренних и поверхностных волн могут появляться аномально большие короткоживущие волны-убийцы, природа которых напоминает природу волн-убийц на поверхности моря. Во-вторых, сдвиговые течения внутренних волн приводят к большим изгибающим моментам на опоры морских платформ, что уже приводит к деформации подводных технологических конструкций в ряде районов Мирового океана. В стадии разработки находится система мониторинга интенсивных внутренних и поверхностных волн (аналогичная системе мониторинга цунами), которая основана на фундаментальных результатах математического моделирования волновой генерации. В-третьих, внутренние волны способны вызвать транспорт донных наносов в глубоководных районах, где эффект поверхностных волн на дно минимален. Наконец, классические задачи гидродинамики о взаимодействии внутренних и поверхностных гравитационных волн по-прежнему остаются актуальными. На распространение внутренних и поверхностных гравитационных волн существенное влияние оказывают как неоднородность и нестационарность гидрофизических полей, так и изменение рельефа дна. При этом точные аналитические решения основных волновых задач получаются только в случае, если распределение плотности морской воды (рельеф дна) описываются достаточно простыми модельными функциями. Когда характеристики океанической среды (форма профиля дна) произвольны, можно построить только численные решения соответствующих задач. Однако последнее не позволяет качественно анализировать характеристики волновых полей, особенно на больших расстояниях, что необходимо для решения, например, проблемы обнаружения внутренних волн дистанционными методами, в том числе с помощью средств аэрокосмической радиолокации. В этом случае описание и анализ волновой динамики можно осуществить только на основе асимптотических моделей и аналитических методов их решения, изложенных в докладе. Построенные математические модели волновой динамики позволяют описывать поля внутренних и поверхностных волн для реальных гидрофизических параметров сред. Универсальный характер предложенных асимптотических методов моделирования волновой динамики позволяет не только эффективно рассчитывать волновые поля, но и, кроме того, качественно анализировать полученные решения. Тем самым открываются широкие возможности анализа волновых картин в целом, что важно и для правильной постановки математических моделей волновой динамики, и для проведения экспресс-оценок при натурных измерениях волновых полей. Особая роль разработанных асимптотических методов обусловлена тем обстоятельством, что основные параметры природных стратифицированных сред (океан, атмосфера), как правило, известны приближенно, и попытки их точного численного решения по исходным уравнениям гидродинамики с использованием таких параметров могут привести к заметной потере точности получаемых результатов. Помимо фундаментального интереса построенные математические модели представляют значительную ценность для практики, поскольку позволяют решать задачи моделирования волновых гидрофизических полей в широком классе приложений [1-6].

ЛИТЕРАТУРА.

1. В.В.Булатов, Ю.В.Владимиров Динамика негармонических волновых пакетов в стратифицированных средах. М.: Наука, 2010, 470 с..
2. В.В.Булатов, Ю.В.Владимиров Волны в стратифицированных средах. М.: Наука, 2015, 735 с..
3. В.В.Булатов, Ю.В.Владимиров Теория волновых движений неоднородных сред. Киров: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2017, 580 с.
4. В.В.Булатов, Ю.В.Владимиров, И.Ю.Владимиров Дальние поля поверхностных возмущений от пульсирующего источника в жидкости бесконечной глубины. Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2017, №5, с.23-29.
5. В.В.Булатов, Ю.В.Владимиров Внутренние гравитационные волны, возбуждаемые пульсирующим источником возмущений. Прикладная математика и механика, 2017, т.81, № 5, с. 556-564.
6. В.В.Булатов, Ю.В.Владимиров Внутренние гравитационные волны, возбуждаемые движущимся с докритической скоростью источником возмущений. Прикладная механика и техническая физика, 2017, т.58, №6, с.50-57.

О ТОЧНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕШЕНИЯХ ВИБРАЦИОННОЙ ГИДРОМЕХАНИКИ

В.А. Вяткин, Д.А. Брацун

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Точные нестационарные решения уравнений гидромеханики малочисленны, так как получение функциональных зависимостей от двух и более переменных в замкнутой форме является непростой задачей. В 1882 году Громека нашёл точное решение задачи нестационарного изотермического движения вязкой жидкости в бесконечной цилиндрической трубе, к концам которой приложено периодически пульсирующая разность давлений [1]. Было показано, что в этой задаче может быть проведена процедура разделения переменных. Похожим образом было получено точное нестационарное решение неизоэтермической конвективной задачи в работе [2]. В работе одного из авторов [3] показано, что решение может быть обобщено на случай запыленной среды. Было рассмотрено комбинированное течение в плоском слое жидкости, по одной из координат которого действует стационарная сила тяжести, а по другой — осуществляются вибрации с конечной частотой. Оказалось, что такое сложное течение не меняет свой ламинарный характер, что даёт возможность расщепить задачу по пространственным направлениям, найти отдельно аналитические выражения для двух компонент скорости вдоль слоя, рассчитать их эпюры поперек слоя, а затем отдельно решить задачи устойчивости для компонент течений.

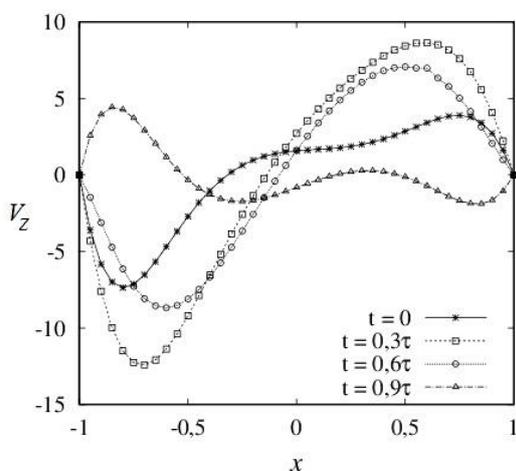


Рис. 1.

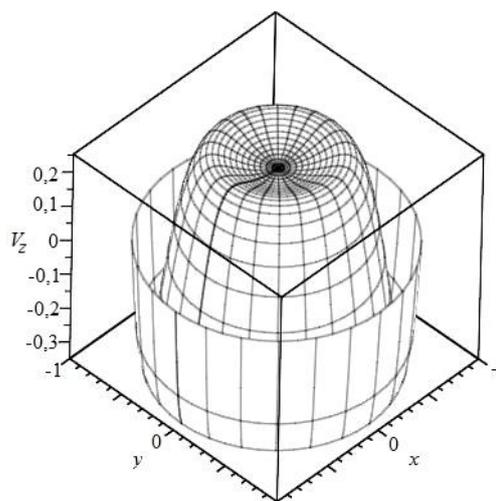


Рис. 2.

Используя описанный выше подход в данной работе были получены точные нестационарные решения для ряда задач вибрационной гидромеханики: течение вязкой жидкости в плоском слое, подогреваемом сбоку и совершающем продольные периодические гармонические вибрации; течение вязкой тепловыделяющей жидкости в плоском слое под действием вибраций, направленных вдоль слоя; течение вязкой жидкости в слое, на границе которого задан постоянный градиент реагирующего вещества и протекает химическая реакция первого порядка, а сам слой периодически колеблется в продольном направлении (эпюры компоненты скорости, направленной вдоль слоя, представлены для разных моментов времени на периоде вибраций на рисунке 1); течение вязкой тепловыделяющей жидкости, заполняющей цилиндрический сосуд, который совершает периодические движения в направлении оси симметрии (профиль компоненты скорости, направленной вдоль оси цилиндра, для одного из моментов времени представлен на рисунке 2). В каждом из перечисленных случаев получены аналитические выражения для скорости жидкости, давления, температуры и концентрации реагента. Обсуждается общая процедура нахождения точных выражений для данного класса решений [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 3.6990.2017/8.9, выполняемый в рамках госзадания).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Громека И.С. К теории движения жидкости в узких цилиндрических трубках. Учен. зап. Казан. ун-та. Отд. физ.-мат. наук, 1882, Кн. I, с. 41-72.
2. Гершуни Г.З., Келлер И.О., Смородин Б.Л. О вибрационно-конвективной неустойчивости в невесомости плоского горизонтального слоя жидкости при конечных частотах вибрации. МЖГ, 1996, № 5, с.44-51.
3. Bratsun D.A., Teplov V.S. On the stability of the pulsed convective flow with small heavy particles. Eur. Phys. J. A., 2000, Vol. 10, P.219-230.
4. Брацун Д.А., Вяткин В.А. Мухаматуллин А.Р. О точных нестационарных решениях уравнений вибрационной конвекции. ВМСС, 2017, Т. 10, № 4, с.433-444.

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА ВОЗЛЕ ИОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНЫ С НЕПОЛНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ

Н.Ю. Ганченко¹, Е.В. Горбачева¹, Г.С. Ганченко², Е.А. Демехин^{2,3}

¹Кубанский государственный университет, Краснодар.

²Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Краснодарский филиал)

³Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова

В данной работе представлены новые механизмы возникновения режимов сверхпределных токов в электролите около неидеальных ионоселективных поверхностей. В качестве таких поверхностей могут выступать ионообменные мембраны, системы наноканалов в заряженном диэлектрике, некоторые электроды. Под действием внешнего электрического тока ионы солей, растворенных в электролите, устремляются к соответствующим электродам и образуется электрический ток. При этом большую часть электрического тока составляет поток ионов, проходящих через ионоселективную поверхность, а ток коионов при этом достаточно мал. Обычно при моделировании подобных процессов рассматривалась модель идеальных ионоселективных поверхностей, в которой предполагалось отсутствие потока коионов через мембраны. На основе этой модели было открыто явление неравновесной электрокинетической неустойчивости [1]: при достаточно большой разности потенциалов около мембраны возникает зона пространственного заряда, где располагается отошедший от мембраны заряд, который может терять устойчивость и приводить к электроконвективному движению. При этом было показано, что для идеальных ионоселективных мембран невозможно возникновение равновесной электрокинетической неустойчивости, предположительно образующейся без формирования зоны пространственного заряда. Однако последние исследования [2, 3] предсказали, что равновесная неустойчивость может возникать около неидеальных ионоселективных мембран.

В нашей работе математическая модель (рис. 1) основана на системе уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса относительно концентраций ионов, электрического потенциала и поля скоростей. Найдено одномерное стационарное решение и исследована его линейная устойчивость, которая дополнена нелинейным анализом, представляющим из себя полное двумерное моделирование нелинейной системы. Расчеты показывают, что, помимо равновесной электроконвекции [2], в системе также присутствует новый тип колебательной неустойчивости [4, 5] с частотой от 50 до 300 Гц, который характерен для мембран слабой селективности или для насыщенных растворов электролитов. Особенность данных типов неустойчивости заключается в том, что они могут вызывать режим сверхпределных токов сразу из омических режимов, минуя режим допределных токов. Такая особенность может быть использована на практике для проектирования микромиксеров без подвижных частей.

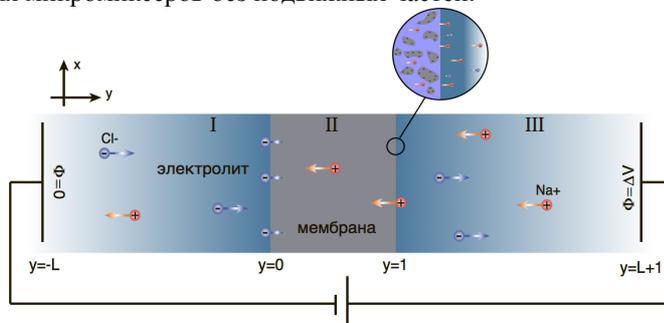


Рис. 1. Схематичная постановка. Области I и III заполнены электролитом, область II – мембрана.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-08-01158-а, и Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант для молодых кандидатов наук МК-5302.2018.1).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] I. Rubinstein, B. Zaltzman, Electro-osmotically induced convection at a permselective membrane // *Phys. Rev. E.*, 2000. Vol. 62, № 2. Pp. 2238–2251.
- [2] I. Rubinstein, B. Zaltzman, Equilibrium Electroconvective Instability // *Physical Review Letters*, 2015. Vol. 114, № 11. Pp. 114502.
- [3] R. abu-Rjal, I. Rubinstein, B. Zaltzman, Driving factors of electro-convective instability in concentration polarization // *Phys. Rev. Fluids.*, 2016. Vol. 1, № 2. Pp. 023601–023617.
- [4] G.S. Ganchenko, E.N. Kalaydin, J. Schiffbauer, E.A. Demekhin, Modes of electrokinetic instability for imperfect electric membranes // *Phys. Rev. E.*, 2016. Vol. 94, № 6. P. 063106.
- [5] Г.С. Ганченко, Е.Н. Калайдин, С. Чакраборти, Е.А. Демехин, Гидродинамическая неустойчивость при омических режимах в несовершенных электрических мембранах // *Докл. РАН.* 2017. Т. 474, № 3. с. 296-300.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОКОНВЕКЦИИ ОКОЛО БИПОЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕМБРАН

Н.Ю. Ганченко¹, В.А. Кирий², Е.А. Демёхин^{2,3}

¹Кубанский государственный университет, Краснодар.

²Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Краснодарский филиал)

³Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Работа посвящена исследованию электрогидродинамических течений электролита около неидеальных биполярных ионоселективных мембран. Биполярная мембрана представляет собой комбинацию катионообменной и анионообменной мембран. Подобная конструкция широко используется на практике для решения проблем водоподготовки, производства кислот, управления кислотностью жидкостей и продуктов питания, а также может быть использована при проектировании микрореакторов по генерации водорода из воды с помощью солнечной энергии в автономных системах [1,2].

Особенность биполярных мембран заключается в образовании области высокой напряженности электрического поля на стыке катионообменной и анионообменной мембран, в котором происходит химическая реакция диссоциации воды. Ранее исследования подобных мембран были основаны по большей части на изучении электростатических явлений [3,4,5]. Гидродинамика рассматривалась только в проточных системах, где электроосмотические эффекты играли второстепенную роль. Это связано с тем, что в непроточных системах в стационарном случае плоской геометрии движение электролита отсутствует, и возникнуть оно может только вследствие потери устойчивости одномерным решением и образования электроконвективных течений. Подобные течения, вызванные электрокинетической неустойчивостью, были открыты в начале XXI века [6] для идеальных монополярных мембран. Неустойчивость в этом случае порождается зоной пространственного заряда, образующейся около мембраны, на границе которой возникает электроосмотическое скольжение со скоростью, достаточной для запуска электроконвекции. В случае биполярных мембран подобная зона образуется только на стыке двух мембран, где из-за пористости мембран движение электролита существенно ограничено, а на внешних (со стороны электролита) границах мембраны образуются только двойные электрические слои, заряд в которых существенно меньше. По этой причине до недавнего времени считалось, что около биполярных мембран не возникает электрокинетической неустойчивости, наподобие той, которая наблюдается около монополярных мембран. Однако работы последних нескольких лет [7,8] показали, что в случае неидеальных ионоселективных мембран в электролите может возникать равновесная электрокинетическая неустойчивость, для развития которой достаточно двойных электрических слоев и потока ионов через мембрану. В нашем исследовании обнаружено, что подобная неустойчивость возникает и около биполярных мембран, особенно в том случае, когда разность потенциалов, приложенная к системе, достаточно велика, а электрическая мембрана обладает слабой селективностью. Отсутствие экспериментальных наблюдений данного феномена, скорее всего, можно объяснить тем фактом, что практически все промышленные мембраны обладают очень высокой селективностью – более 95% – и близки к идеальным.

С математической точки зрения, рассмотрена трехслойная система электролит – биполярная мембрана – электролит, на которую подается разность потенциалов так, чтобы напряженность электрического поля была направлена по нормали к мембране. Электролит предполагается ионным раствором, а транспорт ионов, распределение электрического поля и поле скоростей описываются системой нелинейных уравнений Нернста-Планка-Пуассона-Стокса. Внутри мембраны предполагается наличие объемного заряда, равного заряду мембраны, а движение электролита отсутствует. В модель также включены уравнения транспорта катионов водорода и анионов гидроксидов с источниками/погложателями, отражающими химические реакции диссоциации и рекомбинации воды. Исследование модели проведено численно в одномерной и двумерной постановках. Обнаружен новый тип равновесной электрокинетической неустойчивости, получены качественные характеристики, оценены критические значения параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края, проект 16-48-230107-п_а.

ЛИТЕРАТУРА

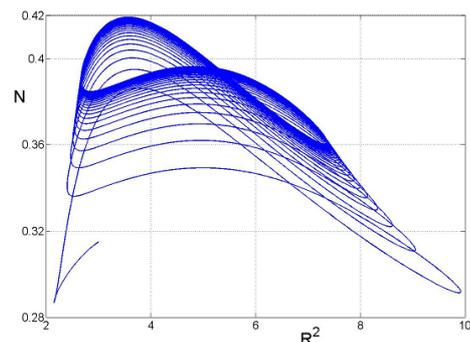
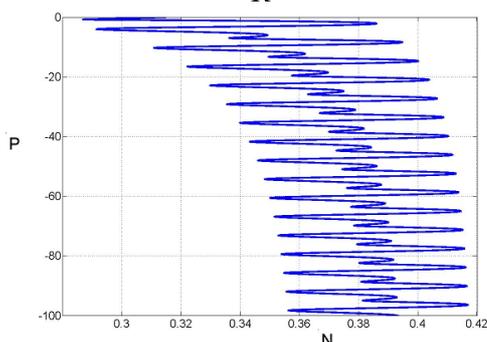
- [1] В.И. Заболоцкий, В.В. Никоненко, Перенос ионов в мембранах. - М.: Наука, 1996. - 392 с.
- [2] Grabowski A., Zhang G., Strathmann H., Eigenberger G. Production of High-Purity Water by Continuous Electrodeionization with Bipolar Membranes: Influence of Concentrate and Protection Compartment // *Separ. and Purif. Technol.* 2008. V. 60. P. 86–95.
- [3] Гребень В.П., Пивоваров Н.Я., Коварский Н.Я., Нефедова Г.З. Влияние природы ионита на физико-химические свойства биполярных ионообменных мембран // *ЖФХ.* 1978. Т. 52. № 10. С. 2641.
- [4] Заболоцкий В.И., Гнусин Н.П., Шельдешов Н.В. Вольтамперные характеристики переходной области биполярной мембраны МБ-1 // *Электрохимия.* 1984. Т. 20. № 10. С. 1340–1345.
- [5] Mafe S., Ramirez P., Alcaraz A. Electric Field-Assisted Proton Transfer and Water Dissociation at the Junction of a Fixed-Charge Bipolar Membrane // *Chem. Phys. Lett.* 1998. V. 294. No 4–5. P. 406–412.
- [6] Rubinstein I., Zaltzman B., Electro-osmotically induced convection at a permselective membrane // *Phys. Rev. E.*, 2000. Vol. 62, № 2. Pp. 2238–2251.
- [7] Rubinstein I., Zaltzman B., Equilibrium Electroconvective Instability // *Physical Review Letters*, 2015. V. 114(11). Pp. 114502.
- [8] G.S. Ganchenko, E.N. Kalaydin, J. Schiffbauer, E.A. Demekhin, Modes of electrokinetic instability for imperfect electric membranes // *Phys. Rev. E.*, 2016. V. 94(6). P. 063106.

МАЛОМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛЕДА ОТ ДВУХ ЦИЛИНДРОВ

Г.В. Гембаржевский
ИПМех РАН, Москва

Турбулентные течения, характеризуемые высокими скоростями процессов переноса, представляют интерес, как для фундаментальной науки, так и для различных технических приложений. Подобные течения могут быть реализованы в форме ближнего следа за плохообтекаемым телом или группой тел. При исследовании и оптимизации подобного течения требуется та или иная его эволюционная модель. Нас, прежде всего, интересует комплексный объект - плазменный след в условиях тлеющего разряда, для которого было обнаружено влияние мощности разряда на конфигурацию следа [1]. Этот объект характеризуется обширным набором параметров, соответственно, желательно иметь по возможности простую его модель. Уже при изучении нейтральных следов принято проводить моделирование не только в рамках уравнений Навье-Стокса или их обобщений, но и строить упрощенные маломерные модели. Для следа уединенного цилиндра это может быть модель двумерного течения в форме дорожки Кармана, одномерная модель осциллятора Ван дер Поля [2] или модель Ландау-Стюарта (эквивалентная укороченным уравнениям типа Ван дер Поля). Последняя модель (Л-С) развития и насыщения неустойчивости обоснована на «физическом» уровне строгости [3]. Следующим шагом является обобщение модели на учет взаимодействия близкорасположенных дорожек Кармана от соседних цилиндров в группе.

Наша модель гидродинамики следа пары цилиндров [4, 5] также основывается на уравнениях осциллятора Ван дер Поля; ее отличительные особенности следующие. Первое – для общности рассмотрения взаимодействие дорожек учтено с помощью нелинейного члена уравнений (тогда как принято использовать для этого линейный член). Вторая особенность – непосредственный учет в уравнениях зависимости частоты осцилляций в дорожках Кармана от амплитуды осцилляций (принято не учитывать). Как показал анализ [4, 5], в рамках модели реализуются пять глобальных квазиламинарных одночастотных мод следа, соответственно, в турбулентном течении в соответствующих областях параметров возможны различные режимы перемежающегося следа. При этом, согласно литературным данным [6], след близкорасположенных цилиндров $1,5 < L/D < 2$, как правило, асимметричен (то есть интенсивность дорожек Кармана различна), причем частота осцилляций в двух дорожках различная. Как показано ниже, наша модель следа содержит такую асимметричную двухчастотную моду течения (для соответствующей области параметров модели), реализующуюся в режиме перемежаемости с симметричной модой следа. Настоящее сообщение посвящено в основном анализу свойств этой двухчастотной моды следа в рамках модели. Затрагиваются такие ее свойства как конфигурация, «фазовый портрет», область существования. Ниже проиллюстрирована релаксация следа в состояние асимметричной моды для некоторого набора параметров модели. Для этого рассматривается взаимозависимость разности фаз осцилляций в двух дорожках Кармана $-P$, величины асимметрии интенсивности осцилляций в дорожках $-N$ и суммарной интенсивности колебаний $-R^2$.



На основе полученных результатов обсуждается возможный подход к экспериментальной оценке свободных параметров модели.

Исследование продолжает работы в рамках гранта РФФИ 13-01-00742 и может служить обоснованием для заявки 18-01-00769.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гембаржевский Г.В. Электроразрядный эффект в плазменном течении следа: перераспределение энергии пульсаций в область низких частот. Письма в ЖТФ, 2009, **35** (5), 95.
2. П.С. Ланда. Нелинейные колебания и волны. М.: Наука, ФМЛ, 1997.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Гидродинамика, Глава 3. .
4. Г.В. Гембаржевский, А.К. Леднев, К.Ю. Осипенко. Моделирование эволюции плазменного следа пары цилиндров под действием электрического разряда. Письма в ЖТФ, 2015, **41** (23), 40.
5. Gembarzhvskii G V, Lednev A K, Osipenko K Yu Mode intermittence in a wake from two cylinders Journal of Physics: Conf Series, 2017, **825**, 012020.
6. Alam Md. M., Zhou Y., Wang X. W. The wake of two side-by-side square cylinders. J Fl Mech, 2011, **669**, 432.

ОБ ОДНОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

С. О. Гладков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ)

Экспериментально было показано [1,2], что зависимость вязкости расплава в области предкристалличности носит экспоненциальный характер и имеет вид $\eta = \eta_0 e^{\frac{\Delta}{T-T_{cr}}}$, где η_0 – вязкость жидкого расплава при $T \rightarrow \infty$, а параметр Δ представляет собой некоторый энергетический потенциал, который можно трактовать, как энергетический барьер, связанный с эффектом туннелирования из расплава в твердую фазу и обратно. Температура T (по определению авторов [1, 2]) играет роль параметра. Этот эмпирический закон был теоретически объяснен в работах [3, 4]. При исследовании любых неравновесных явлений важную роль играет такое понятие, как степень удаленности рассматриваемой релаксирующей системы от положения равновесия. При малых отклонениях от равновесного состояния, как правило, оказывается достаточным найти решения линеаризованных уравнений эволюции (будь то кинетическое уравнение, описывающее динамику функции распределения, для оценки изменения которой в этом случае хватает так называемого «тау – приближения», или, скажем, концентрация индивидов в биологических системах, для которых можно также найти линеаризованные уравнения "движения"). В нашем случае для получения системы динамических уравнений, описывающих эволюцию роста кристалла и его форму, в качестве функционала была выбрана диссипативная функция \dot{Q} [5]. В условиях векторного характера "налипания" каждый гипотетический элементарный кристаллик характеризуется скоростью $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$, меняющуюся на расстояниях, больших или порядка его условного линейного размера b . Отождествим это движение с моментом импульса $\mathbf{L}(\mathbf{x}, t)$. Учет параметров \mathbf{u} , \mathbf{L} и $\nabla\eta$ в диссипативной функции, составленной по типу ее инвариантности по отношению к операции изменения знака времени, позволяет записать следующий функционал

$$\dot{Q}\{\mathbf{L}\} = \frac{1}{2\tau\eta_0} \int_V B_{iknm}^* L_i L_k u_n \nabla_m \eta dV + \dots \quad (1)$$

где τ – некоторая постоянная, имеющая размерность времени, а B_{iknm}^* – феноменологический тензор четвертого ранга, определяющийся чисто симметричными соображениями. Для получения уравнения «движения» вектора \mathbf{L} , воспользуемся феноменологическим уравнением в виде $\dot{\mathbf{L}} = -\gamma \frac{\delta \dot{Q}}{\delta \mathbf{L}}$, где γ – некоторая константа, обеспечивающая правильную размерность, а символ $\frac{\delta}{\delta}$ означает вариационную производную. В результате простого варьирования функционала (1), находим искомое уравнение

$$\dot{L}_i = \eta_0^{-1} B_{iknm} L_k u_n \nabla_m \eta \quad (2)$$

где введенный безразмерный тензор четвертого ранга $B_{iknm} = \gamma \tau^{-1} B_{iknm}^*$. Его анализ позволяет описывать различные формы кристаллов и динамику их роста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Vogel. Experimental observation of crystallization process. Phys. Ztschr. 1921, Bd. 22, pp. 645 - 646.
2. G. S. Fulcher. Viscosity of the melts at crystallization temperature. J. Amer. Ceram. Soc. 1925, v. 8, pp. 339 - 341.
3. S. O. Gladkov. Calculation of viscosity coefficient in high non equilibrium liquid systems. Phys. Lett. A 1990, v. 149, N5, pp. 275 - 278.
4. S. O. Gladkov. To the theory of dissipative phenomenon in viscous liquids. Physica B 1990, v. 167, pp. 145 - 158.
5. С.О. Гладков. Расплавы. О динамике роста кристаллов в локально неоднородном и неравновесном расплаве. 2016. Т. 30. В. 5. СС. 434 – 440.

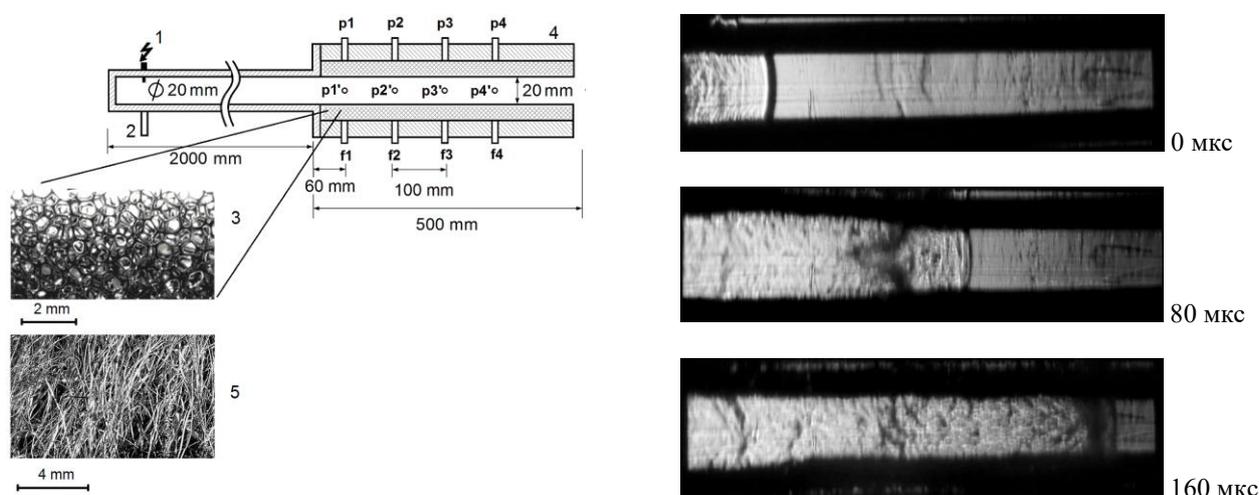
НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ФОРМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРИ РАСПАДЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ НАД ПОРИСТЫМ ПОКРЫТИЕМ

С.В. Головастов, Г.Ю. Бивол
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Одним из способов подавления детонационного распространения горения в газах является использование пористого покрытия на внутренней поверхности детонационной трубки [1]. Так как фронт детонационной волны представляет собой ячеистую структуру, состоящую из поперечных волн сжатия, имеющих поперечную составляющую скорости распространения, то расположение пористого покрытия на боковой стенке канала приведет к поперечному смещению массы ударно нагретого газа за фронтом волны и к снижению интенсивности поперечных возмущений. Механизм воздействия пористого покрытия на распространение фронта пламени представляет собой комбинированный эффект теплопереноса, массопереноса и газодинамического ослабления. Распространение быстрого горения в пористых средах изучалось в [2,3]. Состав горючей смеси и толщина пористого материала также могут значительно изменять параметры распространения пламени [4].

Целью настоящей работы было изучение динамики фронта пламени водородно-воздушной смеси и давления на ударной волне в канале с пористыми стенками, изучение распространения пламени в пористом материале и сравнение параметров детонации в каналах с твердыми стенками и двумя типами пористых материалов: пенополиуретан и стальная шерсть.

На рисунке приведена схема экспериментальной установки, представляющей собой детонационную трубку круглого сечения (длина 2000 мм, внутренний диаметр 20 мм), соединенную с измерительной секцией 4 прямоугольного сечения (длина 500 мм, внутреннее сечение 40x20 мм). Верхняя и нижняя поверхности секции покрывались пористым материалом 3,4 толщиной 10 мм каждая. Фотодиоды и пьезоэлектрические датчики давления использовались для регистрации ударной волны и фронта пламени. Детонационная волна формировалась перед измерительной секцией. Теневой прибор ИАБ-451 совместно с высокоскоростной камерой Videosprint использовался для регистрации фронта пламени и ударных волн. На рисунке также представлены фотографии распространения фронта пламени и ударной волны при расположении пенополиуретана пористостью 95%.



В результате выполнения цикла работ проведены оценки влияния пористости покрытия, толщины покрытия и материала на динамику фронта пламени и ударных волн. А также на возможность повторного реиницирования детонации.

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

ЛИТЕРАТУРА.

1. Teodorczyk A., Lee J. H. S. Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls. *Shock Waves*, 1995, 4 (4), 225-236.
2. Babkin V., Korzhavin A., Bunev V. Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media. *Combustion and Flame*, 1991, 87, 182-190.
3. Yan X., Yu J. Effect of aluminum silicate wool on the flame speed and explosion overpressure in a pipeline. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2013, 49, 153-158.
4. Vasil'ev A. Near-limiting detonation in channels with porous walls. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1994, 30, 101-106.

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ НЕОДНОРОДНО НАГРЕТОГО ЦИЛИНДРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕЛООТДАЧИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ЗАЗОРЕ

М.М. Гончаров, А.Н. Кондрашов, И.О. Сбоев

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Изучен процесс тепломассопереноса в системе коаксиальных цилиндров [1], [2] с неравномерным подогревом. Рассматривается влияние интенсивности нагрева и ориентации системы [3] относительно направления вектора ускорения свободного падения g на структуру течения, распределение температуры в слое жидкости и интенсивность теплоотдачи. Задача решается в двумерной постановке. Внешний цилиндр находится при температуре T_0 и играет роль холодильника. Внутренний цилиндр разделён на две области в вертикальном направлении: одна половина теплоизолирована, другая поддерживается при постоянной температуре $T_i > T_0$. Система находится в поле силы тяжести, причём вектор ускорения свободного падения g ортогонален оси цилиндров. Для имитации поворота внутреннего цилиндра, вектор g задаётся под некоторым углом α к вертикальной оси y . Размер зазора между цилиндрами, заполненного исследуемой жидкостью, определяется аспектным соотношением $A = R_o/R_i$.

Численное решение системы уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска выполняется при следующих значениях параметров: числе Рейля $Ra \in [1 \cdot 10^2, 2 \cdot 10^6]$, числе Прандтля $\sigma = 7$ и углах $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$.

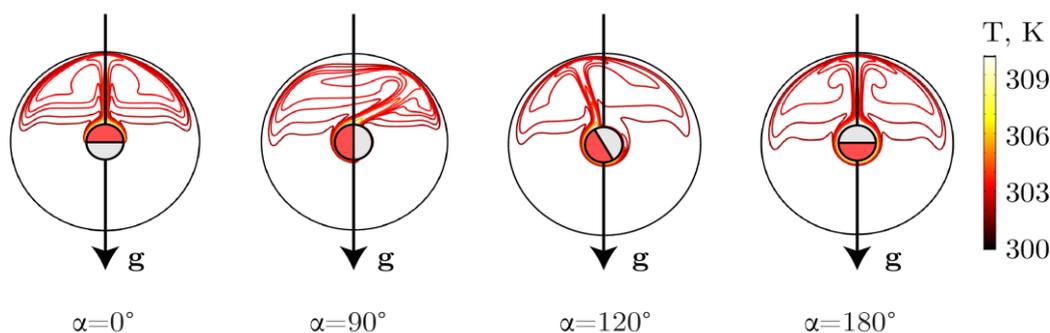


Рис.1: Изотермы, соответствующие термогравитационной конвекции при различных направлениях гравитационного поля $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$, при $Ra = 10^6$

В ходе проведения численного эксперимента наблюдалось запаздывание оси теплового факела относительно направления вектора g . Получены зависимости локальных и глобальных значений числа Нуссельта от параметра Рейля для различных положений источника тепла на поверхности внутреннего цилиндра. Показано, что изменение угла α от 0° до 90° влечёт уменьшение интенсивности теплоотдачи. Дальнейшее увеличение угла вплоть до $\alpha = 180^\circ$ приводит к монотонному росту числа Нуссельта. Полученные результаты аппроксимированы степенным законом, связывающим эффективность теплоотдачи с интенсивностью нагрева и поворотом источника тепла относительно вектора ускорения свободного падения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Teertstra P, Yovanovich M.M.* Comprehensive review of natural convection in horizontal circular annuli // ASME-PUBLICATIONSHTD. — 1998. — Vol. 357. — P. 141–152.
2. *Шеремет М.А.* Нестационарная сопряженная задача термогравитационной конвекции в горизонтальном цилиндре // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2010. — no. 2.
3. *Shareef A. J., Abed W. M., Najeib A. A.* Natural convection heat transfer in horizontal concentric annulus between outer cylinder and inner flat tube // AJES. — 2010. — Vol. 3, no. 2. — P. 31.

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ КУЭТТА КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО ГАЗА

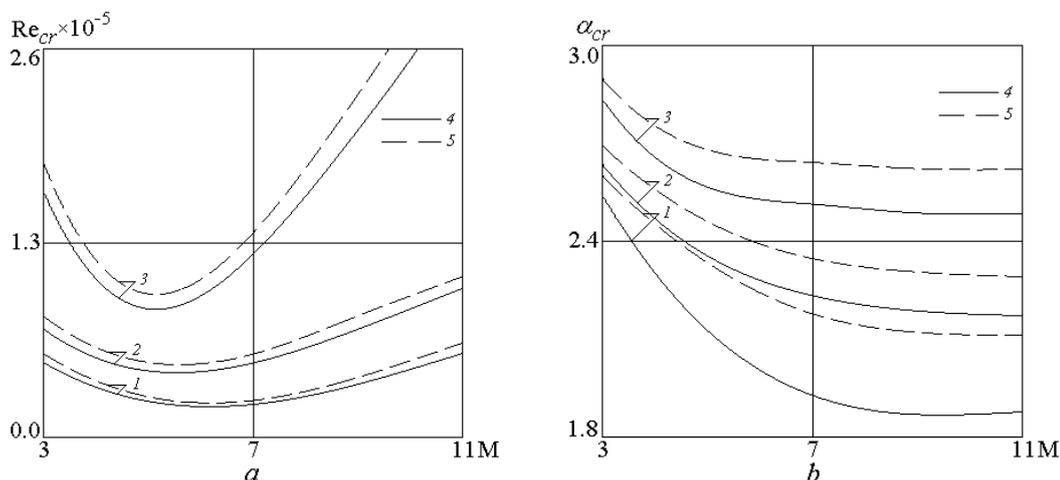
Ю.Н. Григорьев¹, И.В. Ершов^{1,2}

¹Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Новосибирск

Исследована линейная устойчивость вязких двумерных возмущений в сверхзвуковом плоском течении Куэтта совершенного и колебательно-возбужденного газов. В обоих случаях рассматривалась альтернатива, когда коэффициенты переноса либо принимались постоянными, либо зависящими от статической температуры потока. Для учета температурной зависимости сдвиговой вязкости использовалась модель Сазерленда [1–3].

Показано, что “вязкая” стратификация совершенного газа в модели Сазерленда как при учете температурного градиента вязкости ($\eta_T \neq 0$) в уравнениях спектральной задачи, так и без его учета ($\eta_T = 0$) существенно усиливает стабилизацию течения. В частности, в диапазоне чисел Маха $3 \leq M \leq 5$ критическое число Рейнольдса моды II, остающейся наиболее неустойчивой при всех числах Маха $M \geq 3$, возрастает примерно в 3 – 6 раз для $\eta_T \neq 0$ и в 1.5 – 2 раз для $\eta_T = 0$ по сравнению с моделью постоянной вязкости, хотя соответствующие волновые числа α увеличиваются в пределах 20% для $\eta_T = 0$ и 38% для $\eta_T \neq 0$ (см. рис.). При этом относительное уменьшение инкрементов нарастания вязких возмущений мод I и II при колебательном возбуждении практически одинаково для обеих моделей вязкости и условий $\eta_T \neq 0$ и $\eta_T = 0$, при этом увеличение критического числа Рейнольдса во всех рассматриваемых случаях лежит в пределах 12%.



Зависимости $Re_{cr}(M)$ (а) и $\alpha_{cr}(M)$ (б). Модель постоянной вязкости (1), Сазерленда и $\eta_T = 0$ (2), $\eta_T \neq 0$ (3).
4 – совершенный газ и 5 – колебательно-возбужденный газ.

Вместе с тем более простая модель постоянной вязкости на качественном уровне полностью воспроизводит все характерные особенности развития вязких возмущений акустических мод I и II в совершенном газе [1–3]: дестабилизацию устойчивой в невязком пределе моды I в узком диапазоне волновых чисел α в окрестности $M \approx 3$; существенное увеличение инкремента нарастания моды II по сравнению с невязким пределом при $\alpha \approx 1.5$ для сверхзвукового диапазона $5 \leq M \leq 15$; характерное поведение кривых нейтральной устойчивости в координатах (α, Re) при $5 \leq M \leq 15$, в частности, расширение области неустойчивости с ростом Re и наличие двух минимумов на верхней ветви; немонотонную зависимость критического числа Рейнольдса Re_{cr} от числа Маха с незначительным сдвигом минимума в точку $M \approx 6$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекта 17-01-00209).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Yu.N. Grigoryev, I.V. Ershov. Stability and Suppression of Turbulence in Relaxing Molecular Gas Flows. Cham: Springer International Publishing, 2017. 233 p.
2. Yu.N. Grigor'ev, I.V. Ershov. Stability investigations of relaxing molecular gas flows. Results and perspectives. AIP Conference Proceedings, 2017, Vol. 1893, p. 020013(1)-020013(31).
3. Ю.Н. Григорьев, И.В. Ершов. Линейная устойчивость сверхзвукового течения Куэтта молекулярного газа в условиях вязкой стратификации и возбуждения колебательной моды. Известия РАН, Механика жидкости и газа, 2017, № 1, с. 11-27.

ПОПЕРЕЧНЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ ЦИЛИНДРА, СИЛЬНО ЗАГРОМОЖДАЮЩЕГО ПОТОК ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

С.В. Гувернюк, Г.Я. Дынникова, Я.А. Дынников, П.Р. Андронов
Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В начале 2000-х годов в НИИ механики МГУ под руководством проф. В.П. Карликова был проведен цикл систематических экспериментальных исследований обтекания в каналах тел, существенно загромождающих поток жидкости и обладающих свободой перемещения поперек канала [1]. В частности, были исследованы общие закономерности интенсивных поперечных автоколебаний цилиндров, сопровождающиеся их ударным взаимодействием со стенками плоского канала, получены обобщающие эмпирические зависимости безразмерной частоты автоколебаний (числа Струхалея $Sh=f*D/V$) от степени загромождения канала D/H и относительной плотности цилиндра $\rho_{ц}/\rho_{ж}$, рис.1. При этом отмечалось, что данных опыта не было заметного влияния числа Рейнольдса $Re=VD/\nu$ и параметров E_i , характеризующих упругие свойства материалов соударяющихся цилиндра и стенок канала, на величину безразмерной частоты Sh , [2-3]. Однако последний вывод был основан на косвенных единичных данных, а непосредственных измерений коэффициентов отскока соударяющихся тел не проводилось.

Известные попытки математического моделирования автоколебаний рассматриваемого типа не выходили за рамки приближенных квазистатических моделей. Так в работе [4] предложена модель, основанная на стационарных схемах обтекания цилиндра идеальной несжимаемой жидкостью с априорно задаваемыми точками отрыва и в предположении о неупругом характере соударений. Удачных попыток постановки вычислительного эксперимента для данной задачи до настоящего времени также известно не было (основные трудности связаны с тем, что геометрия области течения изменяется во времени, причем в момент соударения изменяется связность этой области; требуется строить решение с согласованием граничных условий для жидкости на поверхности тела с его неизвестной скоростью в каждый момент времени; процесс соударения твердых тел в жидкости представляет собой отдельную малоизученную проблему моделирования).

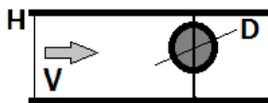


рис. 1

В данной работе математическая задача о поперечных автоколебаниях цилиндра в потоке вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале решена в полной сопряженной постановке, при которой сплошная среда и подвижное твердое тело описываются как единая динамическая система без расщепления на динамическую и гидродинамическую составляющие. Расчеты выполнены с помощью авторского программного кода, основанного на бессеточном численном методе вязких вихревых доменов (ВВД) решения двумерных уравнений Навье-Стокса [5], что позволило преодолеть все вышеперечисленные трудности моделирования в данной задаче. На каждом шаге по времени решается система линейных уравнений, выражающая условие непротекания на твердых стенках и закон сохранения импульса системы жидкость–тело. Незвестными величинами в этой системе являются циркуляции генерируемых на твердых границах дискретных вихревых частиц и мгновенная скорость тела. Предполагается, что взаимодействие со стенкой происходит мгновенно, при этом цилиндр получает от стенки импульс $P=P_1+P_2$, равный сумме импульса P_1 , необходимого для его остановки при выполнении условия непротекания в момент остановки, и импульса $P_2=k P_1$, где k – физический коэффициент восстановления скорости цилиндра при соударении тех же тел в вакууме. При этом суммарный импульс, полученный телом, автоматически перераспределяется между телом и жидкостью в результате решения вышеупомянутой системы уравнений. Данная модель соударений тел в жидкости была предложена и получила экспериментальное подтверждение в работе [6]. Выявлена существенная зависимость частоты автоколебаний цилиндра в канале от параметра k .

ЛИТЕРАТУРА

1. Карликов В. П., Резниченко Н. Т., Шоломович Г. И. О динамических эффектах обтекания в трубах колеблющихся тел, сильно загромождающих поток // *МЖГ*. — 2001. — № 4. — С. 122–122.
2. Карликов В. П., М. В. Лукашевич, Резниченко Н. Т. и др. Об автоколебаниях свободных цилиндров, сильно загромождающих поток в плоском канале // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1: Мат.. Мех.* — 2004. — № 3. — С. 35–40.
3. Карликов В.П., Хомяков А.Н., Шоломович Г.И. Экспериментальное исследование поперечных автоколебаний круговых цилиндров, сильно загромождающих поток в плоском канале // *МЖГ*. — 2005. — № 5. — С. 133–138.
4. Молодых О.В., Степанов Г.Ю. Расчет поперечных квазистационарных автоколебаний кругового цилиндра при отрывном обтекании несжимаемой жидкостью в плоском канале // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1: Мат.. Мех.* — 2004. — № 3. — С. 41–44.
5. Андронов П. Р., Гувернюк С. В., Дынникова Г. Я. Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок. — М.: изд-во Моск. ун-та. — 2006. — 184 с.
6. П. Р. Андронов, С. В. Гувернюк, Я. А. Дынников и др. Теоретическое и экспериментальное исследование соударений шара с неподвижной стенкой в вязкой жидкости / В сб.: "Материалы XXVIII научно-технической конференции по аэродинамике". — Жуковский, ЦАГИ — 2017. — С. 39–40.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МАССОПЕРЕНОСА В БИНАРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВАХ ВБЛИЗИ ПЛОХО СМАЧИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.А. Демин¹, А.И. Мизев², М.И. Петухов¹, Н.П. Углев³

1 – Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

2 – Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

3 – Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Явление продольного разделения компонентов металлических расплавов в тонких капиллярах впервые наблюдалось в работе [1]. Алюндовый или стеклянный капилляр диаметром от 0.8 до 1.2 мм и высотой от 40 до 220 мм, заполненный однородной двухкомпонентной смесью жидких металлов (Sn-Pb, Cd-Bi или Al-Si), в вертикальном положении помещался в печь так, чтобы оба компонента поддерживались в расплавленном состоянии. Спустя время порядка 1 ч его вынимали и немедленно остужали, после чего изучалось продольное распределение компонентов расплава. В опытах фиксировалось распределение, приближенное к экспоненциальному, и достаточно большой перепад концентрации $\sim 5 - 20\%$ на торцах капилляра. По результатам многочисленных экспериментов было выявлено несколько особенностей явления разделения: 1) устремление перепада концентрации к некоторому пределу при увеличении продолжительности эксперимента, 2) разделение происходило только в случае вертикальной ориентации капилляра, 3) при увеличении температуры выдержки в печи наблюдалось уменьшение перепада концентрации.

Для объяснения эффекта разделения смеси жидких металлов на компоненты было сделано предположение о наличии в капилляре диффузионно-концентрационного и конвективного механизмов переноса. На вертикальных стенках рассматриваемого капилляра, вследствие особенности процессов теплообмена в печи, устанавливается градиент температуры, направленный вверх. В силу специфики используемого в экспериментах материала капилляра, на вертикальных гранях имеет место условие полного несмачивания. На образованной таким образом вертикальной свободной поверхности возникает температурная неоднородность поверхностной энергии, которая приводит к термокапиллярному эффекту. Также в модели были учтены эффекты адсорбции-десорбции. Задача в плоской, максимально упрощенной постановке была решена в [2], где было показано, что наличие указанных механизмов приводит к небольшому (1 – 5 %) перепаду концентрации. В рамках совершенствования модели можно учесть концентрационно-капиллярный механизм [3] и цилиндрическую форму полости, что не было сделано ранее. Задача о разделении смеси в цилиндрическом капилляре решалась нами методом конечных разностей с помощью двухполюсного метода посредством программы, написанной на языке Fortran-90.

Результаты численного моделирования показали, что в процессе разделения смеси на компоненты за время порядка одного часа устанавливается достаточно сильный перепад концентрации ($\sim 20\%$), что достаточно близко к результатам экспериментов [1]. Численное решение уравнений концентрационной конвекции приводило к появлению опускного течения на поверхности. Примесь, скапливаемая в нижней части капилляра, из-за эффекта десорбции проникает в объем, и за счет подъемного течения в центре капилляра незначительно переносится в его верхнюю часть. Затем, за счет адсорбции, в области с низкой концентрацией она возвращалась на поверхность. Отдельно была изучена роль термо- и концентрационно-капиллярного механизмов в формировании профилей поверхностной и объемной концентрации.

Рост теплового числа Марангони, что соответствует усилению термокапиллярного механизма, приводит к увеличению перепада концентрации. В то же время рост концентрационного числа Марангони (усиление концентрационно-капиллярного механизма) дает обратный результат. Аналогичное поведение проявляется и на профилях скорости. Исходя из представленных результатов, можно утверждать, что предложенная модель позволяет качественно описать разделение бинарных металлических расплавов, находящихся в условиях, близких к экспериментам.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-01-00662 а).

ЛИТЕРАТУРА

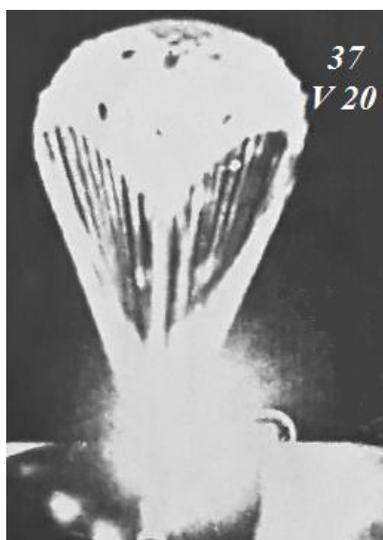
1. Гаврилин И.В., Фролова Т.Б., Захаров В.П. О ликвации в жидких эвтектических расплавах // Известия АН СССР. Металлы, 1984. № 3. С. 191–193.
2. Демин В.А., Петухов М.И. К вопросу о механизме крупномасштабного переноса компонентов металлических расплавов в неоднородно нагретых тонких капиллярах // Вестник Пермского университета. Сер. Физика. Вып. 3 (34). 2016. С. 65–71.
3. Демин В.А., Петухов М.И. Крупномасштабный перенос компонентов металлических расплавов в тонких капиллярах // Вестник Томского университета. Сер. Математика и Механика. Томск: Изд-во Томск. ун-та, № 48, 2017. С. 57–69.

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ КУПОЛА КВАДРАТНОГО ПАРАШЮТА С КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

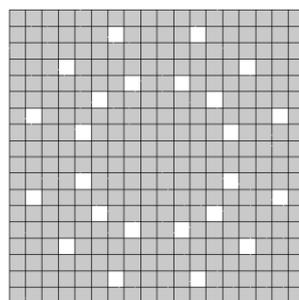
М.В. Джалалова

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

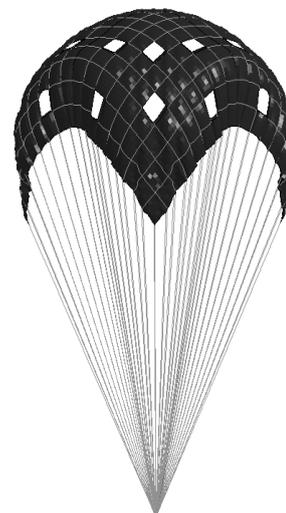
Экспериментально исследовались нестационарные аэродинамические характеристики моделей квадратных парашютов размером $0,81\text{ м}^2$ в аэродинамической трубе А-6 Института механики МГУ при дозвуковых скоростях набегающего потока $V = 20, 30, 40$ м/с. Рассматривались различные схемы конструктивной проницаемости, в процессе исследования была выбрана наиболее перспективная схема, обеспечивающая достаточно высокий коэффициент сопротивления и хорошую устойчивость модели в потоке (рисунок (б)): количество строп – 76, лент каркаса – 38, отверстия заключены в кольцо с радиусами 0,47 и 0,95 от стороны квадрата). Стропы парашюта выбирались из условия равенства расстояния от полюса купола до коуша строп, т.е. разной длины. На рисунке (а) – снимок модели в трубе, сделанный кинокамерой с частотой 48 к/с (из-за вспышки света не четко виден коуш). При других схемах проницаемости модели совершали поперечные колебания с большой амплитудой, поэтому для численного расчета формы квадратного купола была взята наилучшая схема проницаемости и точно такая же модель парашюта, как в экспериментах, из воздухо непроницаемой ткани. Верификация численной процедуры проводилась по результатам данных экспериментальных исследований в аэродинамической трубе А-6.



а



б
схема конструктивной
проницаемости



в

Для раскрытия купола парашюта в потоке газа в настоящее время в основном используется *FSI* подход (Fluid Structure Interaction), основанный на совмещенном лагранжево-эйлеровом описании движения [1], требующий значительных временных и вычислительных ресурсов. В работе [2] численно получена форма купола квадратного парашюта без конструктивной проницаемости и с другим набором длин строп, в которой предложен модифицированный лагранжевый подход, основанный на пошаговой процедуре.

В данной работе в отличие от работы [2] использовался более эффективный по времени расчета метод, основанный на применении явной схемы интегрирования по времени с дополнительным демпфированием и с предписанным перепадом давления по куполу, взятым из работы [3]. Характерная форма раскрытой модели квадратного парашюта, полученная в численном расчете, представлена на рисунке (в). Расхождение между численными и экспериментальными данными составляет не более 3%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kenji Takizawa, Samuel Wright, Creighton Moorman and Tayfun E. Tezduyar. Fluid–structure interaction modeling of parachute clusters. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*. 2011; 65: 286–307.
2. Джалалова М.В. Компьютерное моделирование процесса формообразования купола квадратного парашюта. Материалы XXII Международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» 14 – 21 февраля 2016 г. Московская область, г. Звенигород, пансионат «Звенигородский» РАН / Ответственный редактор – Н.В. Никитин. Изд-во Моск. ун-та. Москва, тезисы, с. 57-62.
3. Рахматулин Х.А., Джалалова М.В. Исследование параметров формы и напряженного состояния купола квадратного парашюта численным методом. *Парашюты и проницаемые тела*. Издательство МГУ. Москва. 1987. с. 63-79.

О РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ ТЕЧЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЛАГРАНЖЕВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

В.С. Дрюма

Институт математики и информатики АН РМ, Кишинев

Уравнения трехмерных течений несжимаемой жидкости в лагранжевых переменных имеют вид

$$\frac{d^2 X^i}{dt^2} = -[X^j, X^k, P] + \mu \left[X^2, X^3, \left[X^2, X^3, \frac{dX^i}{dt} \right] \right] + \mu \left[X^3, X^1, \left[X^3, X^1, \frac{dX^i}{dt} \right] \right] + \mu \left[X^1, X^2, \left[X^1, X^2, \frac{dX^i}{dt} \right] \right], \quad (1)$$

$$[X^1, X^2, X^3] = \frac{dX^1 dY^2 dZ^3}{dx^1 dy^2 dz^3} - \frac{dX^1 dY^2 dZ^3}{dx^1 dz^2 dy^3} - \frac{dX^1 dY^2 dZ^3}{dy^1 dx^2 dz^3} + \frac{dX^1 dY^2 dZ^3}{dz^1 dx^2 dy^3} + \frac{dX^1 dY^2 dZ^3}{dy^1 dz^2 dx^3} - \frac{dX^1 dY^2 dZ^3}{dz^1 dy^2 dx^3} = 1, \quad (2)$$

Здесь $P=P(x,y,z,t)$ – давление, μ – коэффициент вязкости, $X^i = X^i(x,y,z,t)$ – зависящие от времени координаты частиц жидкости, $i=1,2,3$, идентифицируемых по значениям векторного параметра $\bar{x}=(x,y,z)$.

В докладе будут приведены примеры точных частных решений системы уравнений (1) и (2), в конструкции которых основная роль принадлежит условию несжимаемости жидкости (2). На этом пути появляется возможность привлечения результатов теории полиномиальных систем обыкновенных дифференциальных уравнений $\frac{dx^i}{dt} = \sum a^i_{kj} x^k x^j$ с параметрами a^i_{kj} и обладающих предельными циклами для описания свойств полной системы уравнений (1) и (2).

Теорема 1.

В результате замены переменных вида

$$Y(x,y,z,t) = M\left(\frac{x}{t}, \frac{y}{t}, \frac{z}{t}\right)t, \quad Y(x,y,z,t) = L\left(\frac{x}{t}, \frac{y}{t}, \frac{z}{t}\right)t, \quad Z(x,y,z,t) = N\left(\frac{x}{t}, \frac{y}{t}, \frac{z}{t}\right)t, \quad (3)$$

соотношение (2) принимает вид

$$A(\xi, \eta, \chi) \frac{\partial L}{\partial \xi} + B(\xi, \eta, \chi) \frac{\partial L}{\partial \eta} + C(\xi, \eta, \chi) \frac{\partial L}{\partial \chi} - 1 = 0, \quad (4)$$

где $\xi = \frac{x}{t}$, $\eta = \frac{y}{t}$, $\chi = \frac{z}{t}$, с коэффициентами

$$A(\xi, \eta, \chi) = \frac{\partial N}{\partial \chi} \frac{\partial M}{\partial \eta} - \frac{\partial M}{\partial \chi} \frac{\partial N}{\partial \eta}, \quad B(\xi, \eta, \chi) = -\frac{\partial M}{\partial \xi} \frac{\partial N}{\partial \chi} + \frac{\partial M}{\partial \chi} \frac{\partial N}{\partial \xi}, \quad C(\xi, \eta, \chi) = -\frac{\partial N}{\partial \xi} \frac{\partial M}{\partial \eta} + \frac{\partial M}{\partial \xi} \frac{\partial N}{\partial \eta}, \quad (5)$$

которые можно рассматривать в качестве компонент бездивергентного векторного поля

$$\frac{\partial A(\xi, \eta, \chi)}{\partial \xi} + \frac{\partial B(\xi, \eta, \chi)}{\partial \eta} + \frac{\partial C(\xi, \eta, \chi)}{\partial \chi} = 0. \quad (6)$$

С помощью соотношений (4), (5) и (6) могут быть найдены компоненты скорости течения (3) с достаточно большим функциональным произволом, который используется далее для интегрирования полной системы уравнений (1) с учетом условий ее совместности.

Теорема 2. [4]

Квадратичная система уравнений

$$\frac{dy}{dt} = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_{11} x^2 + b_{12} xy + b_{22} y^2, \quad \frac{dx}{dt} = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_{11} x^2 + a_{12} xy + a_{22} y^2,$$

обладает предельными циклами при специальных значениях параметров b_i, a_i, b_{ij}, a_{ij} . При переходе к проективным координатам $\xi = \frac{x}{t}$, $\eta = \frac{y}{t}$, $\chi = \frac{z}{t}$ ей отвечает векторное поле с условием (6) на компоненты

$$\begin{aligned} A(\xi, \eta, \chi) &= 4a_0 \chi^2 + 4a_2 \eta \chi + (3a_1 - b_2) \xi \chi + 4a_{22} \eta^2 + (3a_{12} - 2b_{22}) \xi \eta + (2a_{11} - b_{12}) \xi^2, \\ B(\xi, \eta, \chi) &= 4b_0 \chi^2 + 4b_1 \xi \chi + (3b_2 - a_1) \eta \chi + 4b_{11} \xi^2 + (3b_{12} - 2a_{11}) \xi \eta + (2b_{22} - a_{12}) \eta^2, \\ C(\xi, \eta, \chi) &= -(b_2 + a_1) \chi^2 - (2b_{22} + a_{12}) \eta \chi - (2a_{11} + b_{12}) \xi \chi. \end{aligned} \quad (7)$$

В докладе будут рассмотрены некоторые примеры решений лагранжевых уравнений течения жидкости, порождаемых бездивергентными векторными полями вида (7).

ЛИТЕРАТУРА.

1. А.С.Монин. О Лагранжевых уравнениях гидродинамики несжимаемой жидкости, Прикладная математика и механика. т. XXVI, 1962, с. 320-327.
2. V.S.Dryuma. On equations of incompressible liquids in Lagrangian variables. International Conference Современные проблемы механики сплошной среды, Тезисы докладов, МИАН, Москва, 13-15 ноября, 2017 г., с.14-16.
3. V.S.Dryuma. On Solving of Euler equations of ideal incompressible liquid. International Conference on Mathematical Control theory and Mechanics, Suzdal, July'3-7, Abstracts, 2015, с. 166-168.
4. V.S.Dryuma. Homogeneous extensions of the first order ODE's. International Conference "Algebraic Topology and Abelean functions". Moscow, 18-22 June, Steklov Mathematical Institute of RAS, Abstracts, 2013, с. 78-79.

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ТРУБЕ, ОСНОВАННАЯ НА АНАЛИТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НИКУРАДЗЕ

О.И. Дударь

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

До настоящего времени для анализа влияния шероховатости на турбулентное течение в шероховатых трубах применяются преимущественно феноменологические модели, основанные на физических экспериментах Никурадзе [1], Коулбрука и Уайта [2] и др., которые в последние годы успешно заменяются численными экспериментами (например, [3]). Тем не менее, достаточно универсальные феноменологические модели пока отсутствуют, так как неясно, какие параметры шероховатости нужно выбрать, чтобы модель оказалась применимой для достаточно широкого класса шероховатых поверхностей.

В данной работе предлагается следующая иерархия моделей шероховатой поверхности: с однородной (моноспектральной) шероховатостью, с дискретным спектром шероховатостей, с непрерывным спектром шероховатостей. В экспериментах Никурадзе по турбулентному течению в трубах [1] искусственная песочная шероховатость является однородной, а потому характеризуется только одним, но наиболее существенным параметром шероховатости - относительной высотой элементов шероховатости k/r_p (r_p - радиус трубы). Поэтому экспериментальные данные Никурадзе могут служить базисом в построении моделей шероховатой поверхности.

Прежде всего, необходимо иметь аналитическое описание экспериментов Никурадзе. В феноменологических моделях влияние шероховатости на турбулентность принято учитывать с помощью взаимосвязанных функций $\lambda(Re, k/r_p)$ и $V(r)(Re, k/r_p)$, где λ - коэффициент сопротивления, $V(r)$ - профиль продольной скорости, форма которого задана (например, линейная для ламинарного подслоя и логарифмическая для турбулентного ядра по теории Прандтля). В экспериментах более достоверной является первая функция ввиду интегральности параметра λ , и потому ее считаем основной. В [1] приведены экспериментальные кривые $\lambda(Re)$ для 6 значений k/r , а также полученные на их основе аналитические выражения: $\lambda_s(Re)$ для гидравлически гладкой трубы и $\lambda_\infty(k/r_p)$ - уравнение семейства горизонтальных асимптот полной шероховатости, к которым стремятся кривые $\lambda(Re)$ при $Re \rightarrow \infty$ для фиксированных значений k/r_p . В данной работе на основе анализа данных [1] представлены аналитические выражения кривых, являющихся переходными от гладкостенной кривой $\lambda_s(Re)$ к асимптотам $\lambda_\infty(k/r_p)$. При этом были установлено следующее: 1) переходные кривые удобнее рассматривать в осях «гидравлическая проводимость» $\alpha = \lambda^{-1/2}$ - «перепад безразмерного давления» $\Delta p^* = (16\rho r_p^3)/(\mu^2 l) \Delta p$; 2) у семейства переходных кривых имеется две огибающих: первой огибающей в исходных осях $\alpha - \lg(\Delta p^*)$ является гладкостенная кривая, а второй огибающей в осях $(\alpha - \alpha_\infty) - (\lg(\Delta p^*) - \alpha_\infty)$, приводящих к совмещению асимптот всех переходных кривых, является правая ветвь гауссовой кривой нормального распределения, которая для каждой переходной кривой и стремится к горизонтальной асимптоте $\alpha_\infty(k/r_p)$; 3) по характеру поведения участков переходных кривых, связывающих две огибающие, их можно разделить на: а) монотонно возрастающие кривые малой шероховатости ($k/r < 0,0176$), полностью совпадающие при совмещении асимптот и описываемые параболой с постоянными (не зависящими от шероховатости) коэффициентами; б) монотонно возрастающие кривые средней шероховатости ($0,0176 < k/r < 0,0343$), описываемые параболой с переменными (зависящими от шероховатости) коэффициентами, которая при $k/r = 0,0343$ вырождается в отрезок прямой; в) монотонно убывающие кривые большой шероховатости ($0,0343 < k/r$), которые описываются так называемыми «соприкасающимися полиномами», степень которых возрастает от 0 (при $k/r = 0,0343$) до 12 (при $k/r = 0,219$), причем точки повышения степени полиномов определяются старшими корнями полиномов Эрмита, порождаемых дифференцированием уравнения гауссовой кривой.

Полученные аналитические выражения $\lambda(Re, k/r_p)$ для однородной шероховатости были использованы для моделирования шероховатости со спектром, состоящим из 2 и 3 значений шероховатости. В этом случае важным параметром становится доля площади, занимаемая элементами шероховатости с данным значением k/r_p . Проверка с помощью экспериментов Коулбрука [2] показала хорошее качественное совпадение зависимостей $\lambda(Re)$ и удовлетворительное количественное. Проблемы с количественным совпадением можно объяснить необходимостью более точного учета экранирующего эффекта.

По кривым сопротивления $\lambda(Re, k/r_p)$ были построены профили скорости $V(r)$ ($Re, k/r_p$), которые сравнивались с имеющимися экспериментальными данными Никурадзе. Имело место очень хорошее совпадение. Также было получено уравнение зависимости толщины ламинарного подслоя от Re и k/r_p , которое было использовано для качественного анализа влияния шероховатости на турбулентное течение.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Nikuradse J. Strömungsgesetze in rauhen Röhren. Forschungsheft 361. Beilage zu "Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens", Ausgabe B, Bd. 4, Berlin, 1933, S.1-22.
2. Colebrook C.F., White C.M. Experiments with fluid friction in roughened pipes. Proc. Royal Soc. London, Ser. A., vol.161, 906, 1937, pp 367-381.
3. Chan L. et al. A systematic investigation of roughness height and wavelength in turbulent pipe flow in the transitionally rough regime. J.Fluid Mech., vol.771, 2015, pp 743-777.

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В КОНВЕКТИВНОМ ТЕЧЕНИИ ОТ НАГРЕТОГО ИСТОЧНИКА

А.В. Евграфова, М. О. Кучинский, А. Н. Сухановский

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
Пермский государственный национальный исследовательский университет

В неравномерно нагретой жидкости в поле силы тяжести равновесие, как правило, невозможно. Наличие градиента температуры будет приводить к возникновению конвективных движений, изучению которых посвящен широкий спектр как экспериментальных, так и численных работ.

Изучению конвективных движений возникающих от локализованных источников тепла посвящено множество работ. Это связано с широким распространением подобного рода систем. В [1] предложена математическая модель процессов теплообмена в радиоэлектронной аппаратуре и электронной техники. Модель представляла собой замкнутую прямоугольную полость с локализованным источником тепла В [2] авторы представили результаты по лабораторному моделированию течений вблизи нагретой круглой пластины, расположенной в центре кубической полости (Urban Heat Island Effect). Лабораторный аналог тропического циклона предложен в серии работ Богатырева Г. П. [3] Исследовано возникновение конвективного вихря во вращающемся слое жидкости над нагретым диском. Показано, что возникающее в такой системе вихревое движение схоже по структуре со структурой урагана, а предложенная конфигурация перспективна для изучения природы циклонов. Дальнейшие исследования конвекции в неподвижных и вращающихся цилиндрических слоях жидкости при наличии локализованного нагрева показали существование в зоне нагрева системы вторичных конвективных валов [4, 5], существенное влияние нагрева и скорости вращения на структуру крупномасштабного вихря [6].

В данной работе экспериментально исследованы процессы теплообмена в горизонтальном слое жидкости локально подогреваемом снизу. Постановка задачи максимально приближена к постановке [3, 4, 6]. Экспериментальная модель представляла собой цилиндрический слой жидкости диаметров 300 мм. Нагрев осуществлялся при помощи медного теплообменника диаметром 104 мм, расположенного заподлицо с дном модели. Питание нагревателя происходило через источник переменного тока. Нагрев осуществлялся двумя способами – постоянный поток тепла и постоянная температура нагревателя. Температура нагревателя контролировалась с точностью до 0,5 К через систему Termodat. Высота слоя жидкости составляла 30 мм. В качестве рабочей жидкости использовались силиконовое масло ПМС-5 с кинематической вязкости 5 сСт при 20 °С. Для измерения температуры жидкости была использована линейка медь-константановых термопар – 12 термопар, расположенных на расстоянии 10 мм друг от друга. Линейка размещалась по диаметру нагревателя на разных высотах слоя.

Были получены зависимости безразмерного потока тепла от степени нагрева. Изучено влияние динамики вторичных течений на интенсивность процессов теплообмена.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-31-00150)

ЛИТЕРАТУРА.

1. Шеремет М. А., Мартюшев С. Г. Численный анализ конвективно радиационного теплопереноса в замкнутой воздушной полости с локальным источником энергии // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Vol. 6. P. 383–396.
2. J. Lu, S. Pal Arya, W. H. Snyder, R. E. Lawson, Jr A Laboratory Study of the Urban Heat Island in a Calm and Stably Stratified Environment. Part I: Temperature Field // Journal of Applied Meteorology. 1997. Vol. 36. P. 1377–1391.
3. Bogatyrev, G.P., Excitation of a cyclonic vortex or a laboratory model for a tropical cyclone // Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1990. V. 51. P. 557-559.
4. A. Sukhanovskii, A. Evgrafova, E. Popova Horizontal rolls over localized heat source in a cylindrical layer // Physica D: Nonlinear Phenomena. 2016. Vol. 316. P. 23–33
5. Boubnov B. M., van Heijst G. J. F. Experiments on convection from a horizontal plate with and without background rotation // Experiments in Fluids. 1994. Vol. 16. P. 155–164.
6. A. Sukhanovskii, A. Evgrafova, E. Popova Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2016. Vol. 142. P. 2214-2223

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ В ЖИДКОМ МОСТЕ ПРИ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ЧИСЛАХ ПРАНДТЛЯ

М.К. Ермаков

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

Потеря устойчивости термокапиллярной конвекции в жидком мосте имеет число гидродинамическую природу при низких числах Прандтля и двойную гидротепловую природу при высоких числах Прандтля [1]. Эксперименты при высоких числах Прандтля показывают, что количественное совпадение с анализом линейной устойчивости требует учета теплообмена через свободную поверхность [2].

В данной работе спектр задачи линейной устойчивости [3] с использованием методов обратных итераций и Арнольди. Спектр линейной задачи представляет собой группы ветвей с азимутальными числами от 0 до 10. Получены и анализируются различия спектров линейной задачи для низких и высоких чисел Прандтля и влияния на них теплообмена через свободную поверхность, соответствующего условиям эксперимента MEIS на международной космической станции [2].

ЛИТЕРАТУРА.

1. M. Wanschura, V. M. Shevtsova, H. C. Kuhlmann, H. J. Rath. Convective instability mechanisms in thermocapillary liquid bridges. *Phys. Fluids* 7 (1995) 912-925.
2. K. Nishino, T. Yano, H. Kawamura, S. Matsumoto, I. Ueno, M. K. Ermakov. Instability of thermocapillary convection in long liquid bridges of high Prandtl number fluids in microgravity. *J. Cryst. Growth* 420 (2015).
3. M.K. Ermakova, M.S. Ermakova. Linear-stability analysis of thermocapillary convection in liquid bridges with highly deformed free surface. *J. Cryst. Growth* 266 (2004) 160–166.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW PATTERNS IN A VERTICAL T-JUNCTION CONFIGURATION

C. Evrim, A. Isaev, R. Kulenovic and E. Laurien

Institute of Nuclear Technology and Energy Systems, University of Stuttgart,
Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Germany

Turbulent and stratified mixing flows can cause thermal fatigue in nuclear power plant piping systems. In order to diminish the investigation effort of thermal mixing flow phenomena, a geometrically similar isothermal Mixed Fluid Interaction (MFI) mixing tee using a sodium chloride solution to model the cold heavy branch pipe fluid is built. The purpose of the MFI experiments is to predict the flow phenomena in the vertical thermal mixing Fluid Structure Interaction (FSI) T-junction configuration at the University of Stuttgart. Due to limited optical accessibility of the FSI facility a numerical similarity comparison of the flow phenomena occurring in both experimental setups (MFI/FSI) is essential. Thus, Large Eddy Simulations are carried out which are experimentally validated by applying the Particle Image Velocimetry and Planar Laser Induced Fluorescence measurement techniques and as well as benchmark data. The similarity investigation confirms the usage of three characterizing parameters for the adaption of relevant physical boundary conditions to the FSI setup (branch pipe Reynolds number (Re_b), mixing Richardson number (Ri) and momentum ratio (M_R)). Thereby, the evidenced similarity ensures the utilization of the cold mixing experimental setup for the visual prediction of flow patterns occurring in the hot mixing FSI facility.

Both, the MFI and the Vattenfall simulations show a good agreement with corresponding qualitative and quantitative experimental data. The comparison of the flow patterns shows a good similarity between both experimental setups (MFI/FSI) and confirms the use of the three non-dimensional parameters (Re_b , Ri , M_R) for recalculation of physical boundary conditions between the MFI and FSI setup, which allow to reproduce similar spatial and time dependent flow phenomena in both cases. Therefore, the demonstrated similarity ensure the utilization of the cold mixing experimental setup for the visual prediction of flow patterns occurring in the hot mixing FSI facility.

Keywords: Thermal fatigue, turbulent and stratified flow mixing, flow similarity, T-junction, flow patterns, LES.

RESULTS OF NUMERICAL BIFURCATION ANALYSIS IN SOME PROBLEMS OF LAMINAR–TURBULENT TRANSITION

Evstigneev N.M.

Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

In this paper we present an overview of results for numerical bifurcation analysis for some problems of laminar–turbulent transition. The idea of the analysis is not new and was used by many authors to explain the initial instabilities in the route to chaos - from classics, e.g. [1, 3, 2] to modern, e.g. [4, 5, 6]. Our goal is to trace the initial stage of laminar–turbulent transition in some problems governed by fluid dynamics equations using methods of bifurcation analysis as far (in parameter space) as possible. Problems are selected in such way that the central manifold theorem is applicable. In our research we rely, mostly, on numerical analysis. We apply DNS timesteppers that are used to advance solution in time and parameter space, solve eigenvalue problems and give basis to stabilization methods for stationary (feedback control and Newton's methods) and time periodic and quasi-periodic (Newton's method in Poincaré map) solutions. For each problem we use at least two methods of discretization in timesteppers to perform results validation. All codes are designed to be used on multiple GPGPU architecture clusters.

The **attractor** of the system (governing equations of fluid dynamics) is defined as undecomposable attracting manifold. We define the set of **regular attractors** including fixed points, invariant periodic orbits of various periods and invariant tori of different dimensions (possibly resonant). All other attractors are defined as **singular attractors** including chaotic cycles and tori and intermittency crisis. Our analysis is based on the track of evolution in regular attractors and detection of local (pitchfork, saddle–node, Hopf, transcritical, period–doubling) and global (homoclinic, heteroclinic, infinite–period) bifurcations until all routes lead to Chaos. Here we present the full bifurcation scenarios for the following problems: **Kolmogorov 2D and 3D flow problem** [7, 8], **Rayleigh–Benard convection in rectangular domains** [9], **Backward facing step flow** [10], **Compressible Kelvin Helmholtz and Rayleigh–Taylor instabilities** [11]. After considering these problems we formulate the following Conjecture: *The laminar–turbulent transition is related to the Feigenbaum and Sharkovskiy cascades with terminal formation of fractal attractors (possibly Smale's horseshoe maps) having dimension greater than three (e.g. an m is the torus dimension that is formed as $\{C \otimes \dots \otimes C\}_{m-1} \otimes C_c$ and $m \geq 2$). In this case the phase trajectory generates dense fractal winding that may trigger high dimensional chaos by intermittency crisis, by (possibly high dimensional) Blue Sky catastrophe or by phase locking thus leading to Chaos and, successively, turbulence.* REFERENCES.

- [1] Landau, L. D.: On the problem of turbulence.// Doklady Akademii Nauk SSSR. 44: 339–342, 1944.
- [2] Joseph, D. D.: Stability of Fluid Motions II. – Springer Tracts in Natural Philosophy, Mathematics, 1978.
- [3] Yudovich, V.I.: An example of loss of stability and generation of a secondary flow in a closed vessel. Sbornik Mathematics, 116:4, 519–533, 1967.
- [4] Sanchez, J., Marques, F. and Lopez, J. M.: A continuation and bifurcation technique for Navier-Stokes flows. J. Comput. Phys., 180, 78–98, 2002.
- [5] Yudovich, V.I., Ovchinnikova, S.N.: Resonances in the intersections of bifurcations in the Couette - Taylor problem. Patterns and Waves, Saint-Petersburg, 55–77, 2003.
- [6] Boronska, K. and Tuckerman, L.S.: Extreme multiplicity in cylindrical Rayleigh-Benard convection. I, II. Time dependence and oscillations, Bifurcation diagram and symmetry classification. Physical Review E 81, 036320/1, 2010.
- [7] Evstigneev, N.M., Magnitskii, N.A. and Silaev, D.A.: Qualitative Analysis of Dynamics in Kolmogorov's Problem on a Flow of a Viscous Incompressible Fluid.// Differential Equations, 2015, Vol. 51, No. 10, pp. 1–14., 2015.
- [8] Evstigneev N.M.: Numerical bifurcation analysis in laminar-turbulent transition for 3D Kolmogorov-type flow. //Proc. BIFD-2017, 2017.
- [9] Evstigneev N.M., Magnitskii N.A., Sidorov S.V.: Nonlinear dynamics of laminar-turbulent transition in three dimensional Rayleigh–Benard convection. //Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 15:10, 2851–2859, 2010.
- [10] Evstigneev N.M., Magnitskii N.A., Sidorov S.V.: On The Nature Of Turbulence In A Problem On The Motion Of A Fluid Behind A Ledge. //Differential Equations, 45:1, 68–72, 2009.
- [11] Evstigneev N.M. and Magnitskii N.A.: Numerical Analysis of Laminar–Turbulent Bifurcation Scenarios in Kelvin–Helmholtz and Rayleigh–Taylor Instabilities for Compressible Flow. Chapter 2 in Turbulence Modelling Approaches - Current State, Development Prospects, Applications. INTECH, 2017, pp.29–60.

ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ УРОВНЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ПОД ВЛИЯНИЕМ МОДУЛЯЦИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Д.Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова
Институт механики МГУ, Москва

Экспериментально исследованы изотермические турбулентные течения вязкой несжимаемой жидкости в сферическом слое. Объектом исследования были течения, формирующиеся при противоположном вращении границ слоя, поскольку в этом случае переход к турбулентности происходит при сравнительно небольших числах Рейнольдса [1]. Рассматривалось воздействие модуляции скорости вращения внутренней сферы на свойства турбулентности. В ходе экспериментов проводились измерения пульсаций скорости течения лазерным анемометром. Установлено, что в отсутствие модуляции наклоны спектров скорости близки к величине $-11/5$, что ранее экспериментально наблюдалось только в случае стратифицированных по температуре течений [2]. С увеличением частоты и амплитуды модуляции возможно формирование спектров, характерных для двумерной турбулентности: с наклоном $-5/3$ на низких частотах и наклоном -3 на высоких частотах. Показано, что при небольших амплитудах модуляции скорости вращения наблюдается снижение уровня турбулентных пульсаций скорости, и этот уровень в случае двумерной турбулентности ниже, чем в случае трехмерной [3]. Показано, что переход от трехмерной турбулентности к двумерной под действием модуляции обусловлен высоким уровнем синхронизации между скоростью течения и скоростью вращения сферы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-05-00004 и 18-08-00074).

ЛИТЕРАТУРА.

1. С.Я.Герценштейн, Д.Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова. Ламинарно-турбулентный переход в сферическом течении Куэтта при встречном вращении границ. Изв. РАН. МЖГ. 2001, №2, с. 56-63.
2. X.-D. Shang, K.-Q. Xia. Scaling of the velocity power spectra in turbulent thermal convection. Phys. Rev. E, 2001, 64, 065301.
3. Д.Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова. Изменение свойств турбулентных течений в сферическом слое под действием модуляции скорости вращения. Письма в ЖТФ, 2017, т.43, 10, с. 87-94.

УСКОРЕНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ РЕШЕНИЙ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ДИНАМИКУ ВЯЗКОГО ГАЗА

К.А. Жуков, А.А. Корнев, А.В. Попов
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Рассматривается линеаризованная система дифференциальных уравнений, приближенно описывающая динамику вязкого баротропного газа. В работе получены результаты по ускорению граничной стабилизации, а именно: построено семейство управляющих граничных условий первого рода, обеспечивающих для известных начальных данных ускорение выхода на стационар соответствующего решения. Приводятся необходимые оценки скорости сходимости для нулевых краевых условий. Результаты получены как в случае дифференциальной системы уравнений, так и в случае конечно-разностной аппроксимации. Приводятся результаты численных расчетов стабилизации для начальных условий типа скачок давления и/или скачок плотности. Проведенные численные эксперименты показали эффективность рассмотренного подхода.

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗНОШАГИЦЫ В СОПЛОВИ АППАРАТЕ ТУРБИНЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВИБРОНАПРЯЖЕНИЙ В РАБОЧИХ ЛОПАТКАХ

В.Н. Заваркин, А.Н. Поткин, И.А. Немтырева
ПАО «ОДК-Сатурн», Рыбинск

Доводка изделия является наиболее трудоемким и продолжительным этапом создания газотурбинного двигателя. Часто при эксплуатации обнаруживается, что не обеспечиваются заявленные характеристики двигателя, например, присутствуют повышенные вибрационные напряжения в рабочих лопатках турбины, снижающие надежность работы изделия в течение заданного ресурса.

Для решения технической задачи, направленной на уменьшение вибрационных напряжений на рабочих лопатках первой ступени турбины ГТД-110, возникающих за счет взаимного влияния венцов вверх и вниз по потоку и переменных по времени силовых нагрузок, связанных с недостаточным осевым зазором между венцами турбины, была предложена разношагица [1, 2] в расстановке сопловых лопаток второй ступени при условии минимального изменения существующей конструкции. Исходный вариант конструкции соплового аппарата представляет собой двухлопаточные блоки с постоянным шагом Δ_1 расстановки лопаток числом $z=48$. Для получения разношагицы и снижения риска возникновения возбуждающих колебаний на рабочем колесе первой ступени по 48 гармонике, сопловой аппарат делится на два неравных полукольца 1 и 2 в соответствии с рисунком 1. Причем для возможности создания разношагицы количество лопаток уменьшено на одну за счет того, что от одного двухлопаточного блока отрезается часть с лопаткой. В дальнейшем блоки разделяют на две группы, первую из которых устанавливают в СА без изменений относительно исходной конструкции (полукольцо 1), а во второй группе у блоков при механической обработке удаляют с торцев припуск меньше (полукольцо 2), чем у блоков первой группы. То есть первую группу двухлопаточных блоков устанавливают в окружном направлении как в исходном варианте конструкции с постоянным шагом Δ_1 . Вторую группу двухлопаточных блоков устанавливают в окружном направлении с переменным (чередующимся) шагом Δ_2 между лопатками соседних блоков, при этом между лопатками в блоке шаг остается Δ_1 .

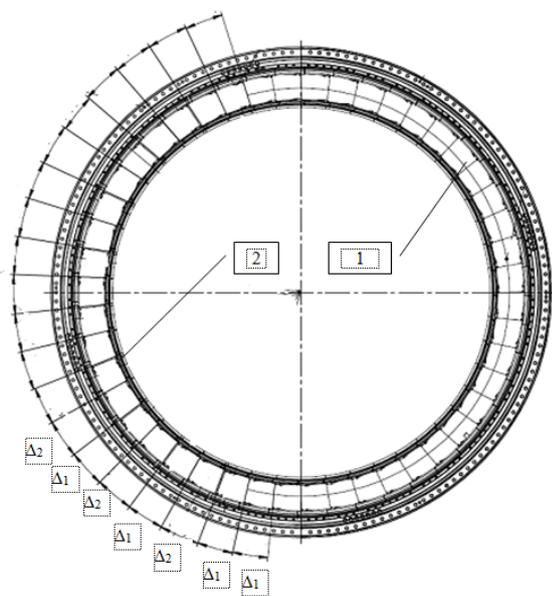


Рисунок 1

Для подтверждения влияния такой схемы на структуру потока было выполнено нестационарное численное моделирование течения газа во второй ступени турбины на номинальном режиме работы двигателя. На гистограмме газовых сил (рис.2), полученной при выходе на установившийся расчетный режим в момент времени, соответствующий полному обороту колеса, четко видна зона прохождения рабочими лопатками области с разношагицей, причем газовые силы, действующие на рабочие лопатки, проходящие через область с разношагицей, превышают газовые силы, действующие на рабочие лопатки, проходящие через область с постоянным шагом, на 6%.

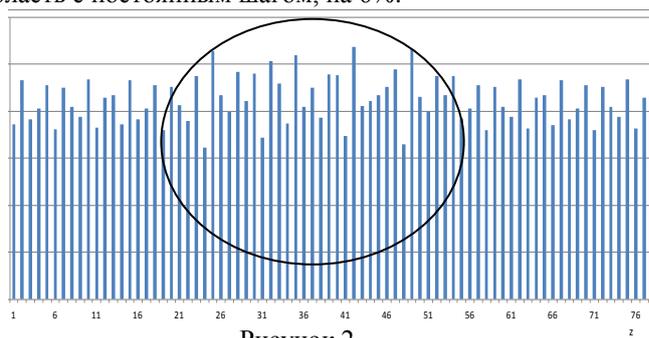


Рисунок 2

Таким образом, по результатам расчета выявлено влияние неравномерной расстановки сопловых лопаток в сопловом аппарате на величину газовых сил, действующих в осевом направлении на последующий венец рабочих лопаток, вследствие чего возникает неравномерность потока, которая должна снижать амплитуду переменных напряжений в рабочих лопатках при их колебаниях по высокочастотным формам вверх и вниз по потоку [1].

На настоящий способ доводки соплового аппарата турбины газотурбинного двигателя получен патент на изобретение.

ЛИТЕРАТУРА.

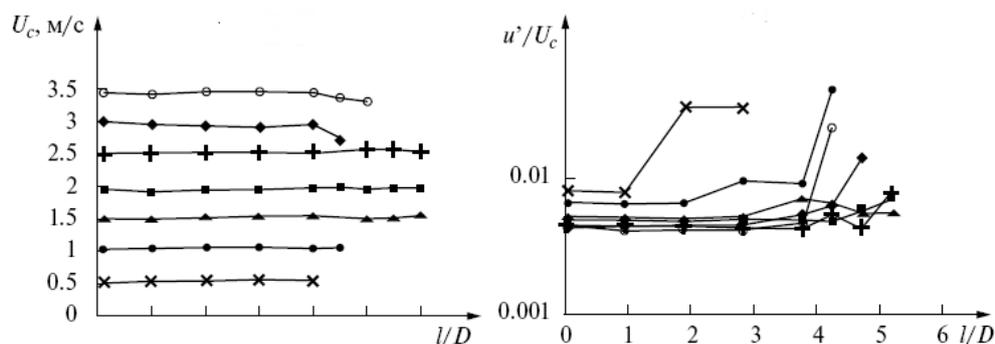
1. И.А. Биргер и др. Расчет на прочность деталей машин. М: Машиностроение, 1993, с.126-127.
2. Описание изобретения к авторскому свидетельству СССР №274956; МПК F01D9/02, F01D5/10; дата подачи заявки 24.02.1969; опубл. 23.02.1986

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ

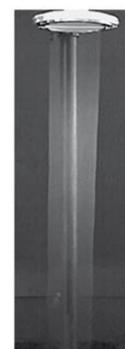
Ю.С. Зайко, А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский, В.В. Трифионов, А.Д. Чичерина
Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Проведены расчетные и экспериментальные исследования формирования и течения ламинарной затопленной струи диаметром 0.12 м при числах Рейнольдса ~ 10000 . Струя сформирована с помощью компактного устройства, основным элементом которого служит сверхкороткий диффузор. Экспериментальные результаты подтверждают ламинарный характер течения на расстоянии 5.5 начальных диаметров струи от формирующего устройства при оптимальных скоростных режимах. Проведены и подтверждены экспериментальными результатами расчеты течения внутри диффузора. Они иллюстрируют влияние геометрии канала диффузора и сопротивления сеток на выходе из него на профиль скорости формируемой струи. Для измерения поля скорости использовался термоанемометр DISA 56C01 СТА, сигнал с него передавался на аналого-цифровой преобразователь и обрабатывался. Скорость и турбулентные пульсации измерялись проволочными датчиками малого размера Dantec Dynamics 55P11, закрепленными на устройстве перемещения. Длина нити датчика составляла 1.25 мм, толщина – 5 мкм. Визуализация струи выполнена с помощью светоотражающих частиц, лазера KLM532 и видеокамеры [1].

Измерения при фиксированном скоростном режиме показали, что скорость и начальная интенсивность турбулентных пульсаций сохраняются на оси струи на расстоянии нескольких диаметров, а на определенном расстоянии, различном для разных скоростных режимов, от выхода из установки начинают изменяться (скорость падает, турбулентные пульсации растут). Результаты измерений профилей скорости и пульсаций на различных расстояниях от выхода из диффузора показали, что струи с самым длинным ламинарным участком реализуются для данного формирующего устройства при скоростях, изменяющихся в диапазоне $U_c = 1.5\text{--}2.5$ м/с.



Скорость U_c и турбулентные пульсации u'/U_c на оси струи на различных расстояниях l от формирующего устройства при интенсивности турбулентности на входе 0.6%.



Ламинарная затопленная струя

Для изучения картины течения внутри диффузора и детального исследования профиля скорости, на выходе из установки, проведен расчет течения за детурбулизующей частью формирующего устройства. Методом контрольных объемов в пакете ANSYS CFX решались уравнения Навье–Стокса и моделировалось ламинарное течение в диффузоре.

Расчеты показали, что при $U_c = 0.5$ м/с касательное напряжение всюду на стенке канала положительно, в то время как при $U_c = 2.5$ и 3.5 м/с на небольшом участке стенки диффузора касательное напряжение отрицательно, что соответствует локальной зоне отрыва. Причиной возникновения локального отрыва при увеличении скорости потока является слишком резкое увеличение диаметра канала диффузора в области перехода от цилиндрической части диффузора к расширению. Сглаживание этой части профиля канала и использование пакета сеток с большим коэффициентом сопротивления устраняют возникновение локального отрыва в исследуемой области параметров течения и увеличивают длину ламинарного участка затопленной струи.

С использованием полученных профилей скорости на выходе из диффузора были проведены численные исследования линейной задачи гидродинамической устойчивости. Они показали, что уменьшение длины ламинарного участка при скоростях, превышающих оптимальную, происходит за счёт увеличения скорости роста возмущений, причем амплитуда наиболее быстро растущих возмущений максимальна в окрестности точки перегиба у внешнего радиуса струи. Режим, соответствующий наибольшей длине ламинарного участка, вырабатывается за счёт оптимального баланса между входным уровнем пульсаций, т.е. начальной амплитудой возмущений, и скоростью их нарастания.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Reshmin A., Sudarikova A., Teplovodskii S., Zayko J. Technology for formation of axisymmetric jet with long laminar region. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 894, 012080.

ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СОДАРОМ И МИКРОБАРОГРАФОМ

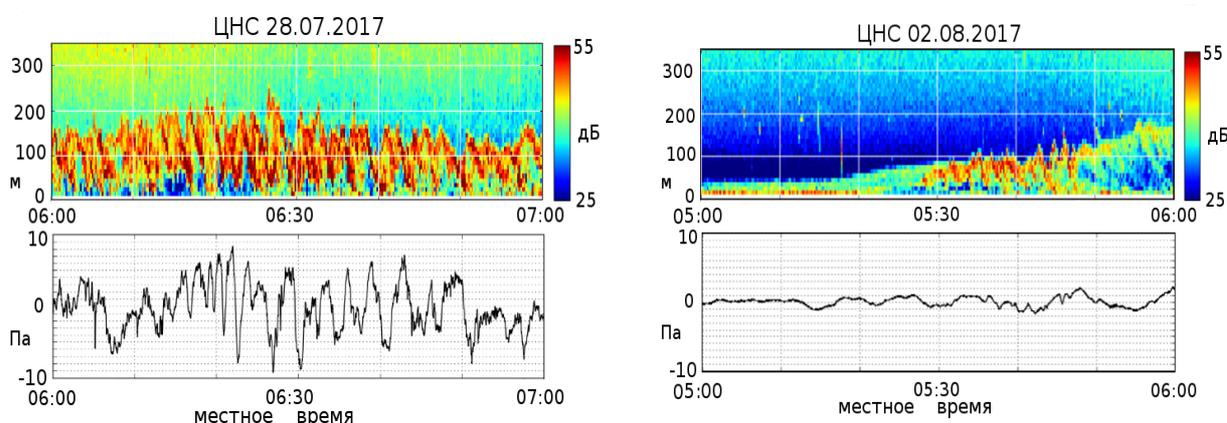
Д. В. Зайцева, М. А. Каллистратова
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) играют важную роль в динамических процессах в термически устойчивом атмосферном пограничном слое (УАПС). По механизму генерации ВГВ разделяют на несколько типов [Sun et al.2015], различно влияющих на метеорологические параметры и интенсивность турбулентности.

Сопоставление одновременных точечных и дистанционных измерений даёт возможность разделять эпизоды волновой активности не только по временным и горизонтальным масштабам, но и по форме, а также вертикальным масштабам [напр. Reddy et al. 1998, Blumen et al. 2001]. Анализ таких совместных измерений открывает возможность для формирования и уточнения критериев разделения волн на типы, применимых для натурных наблюдений.

В работе были использованы данные одновременных измерений доплеровского содара и микробарометра в августе 2017 года над ровной степной поверхностью (Цимлянская научная станция, Ростовская область). По содарным эхограммам были зарегистрированы 11 эпизодов волновой активности в ночное и утреннее время. По вертикальной структуре волновые эпизоды были разделены на два класса: колебания высоты слоя приземной инверсии (или приподнятых слоёв) и периодические структуры, “вкрапленные” в приземный инверсионный слой. Каждый эпизод был разделён на интервалы, внутри которых толщина слоя, охваченного колебаниями менялась менее, чем на 10 метров. Для эпизодов, отнесённых к первому классу, была обнаружена средняя положительная корреляционная связь между значением толщины слоя, охваченного колебаниями и амплитудой колебаний давления. Однако, для некоторых волновых эпизодов этого класса колебания давления с соответствующими периодами не наблюдались. В то же время для второго класса корреляционной связи между указанными величинами не наблюдалось.

На рисунке показаны два примера одновременных содарных эхограмм (верхние панели) и барограмм (нижние панели) для эпизодов с разной толщиной слоя, охваченного колебаниями.



Полученные данные показали, что связь между параметрами волн, измеряемыми содаром и микробарографом, неоднозначна, и требует проверки и уточнения на большем объёме экспериментальных данных.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-05-01072).

ЛИТЕРАТУРА.

1. W. Blumen, R. Banta, S. Burns, et al. Turbulence statistics of a Kelvin-Helmholtz billow event observed in the nighttime boundary layer during the Cooperative Atmospheric-Surface Exchange Study field program. *Dynam. Atmos. Oceans*, 2001, 34, 189–204.
2. K.K. Reddy, T.R.V. Kumar, S.V.B. Rao, et al. Investigation of gravity waves in the atmospheric boundary layer using sodar and microbarograph. *Indian J. of Radio & Space Phys.*, 1998, 27, 247-259.
3. J. Sun, C.J. Nappo, L. Mahrt, et al. Review of wave-turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer. *Rev. Geophys.*, 2015, 53, 956-993.

НЕКЛАССИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ВЯЗКИХ ПУЛЬСАЦИЙ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

В. Б. Заметаев, А. Р. Горбушин

Московский Физико-Технический Институт, г. Жуковский

В работе построена асимптотическая теория двухмерного турбулентного пограничного слоя в рамках трехмерных уравнений Навье-Стокса на плоской пластине при больших числах Рейнольдса для несжимаемой жидкости. Подтверждено, что турбулентный пограничный слой делится на основную невязкую часть, содержащую быстрые пульсации относительно основного (осредненного) профиля продольной скорости и вязкий ламинарный подслой. Однако найдено, что вязкий ламинарный подслой не является традиционным тонким слоем, а состоит из набора малых квадратных (в том смысле, что размеры по направлениям x, y одного порядка величины) подобластей, решение в которых удовлетворяет полным уравнениям Навье-Стокса. Определены асимптотические величины толщины турбулентного пограничного слоя и ламинарного подслоя. Найден механизм взаимодействия основной, пульсационной части турбулентного пограничного слоя и малой вязкой области на обтекаемой поверхности. Это взаимодействие описывается спектром решений уравнения Гамеля с большим значением параметра и означает интенсивный обмен жидкостью между этими областями. Решение оказывается быстро осциллирующей функцией, которая описывает множество тонких струек, как втекающих в вязкую пристенную область, так и вытекающих из нее. Данное решение предлагает механизм генерации мелкомасштабной завихренности (турбулентности) в уравнениях Навье-Стокса.

Для анализа полных нестационарных уравнений Навье-Стокса используется метод многих масштабов при стремлении числа Рейнольдса к бесконечности, а неизвестной заранее толщины пограничного слоя к нулю. Как известно, толщина турбулентного пограничного слоя зависит от предыстории его создания, что доказывает, например, эксперимент Клебанова и Диля [1] по изучению искусственно утолщенных слоев, и поэтому будем полагать толщину некой малой величиной. В качестве основы для рассмотрения используются результаты работы Заметаева и Горбушина [2], посвященной развитию крупномасштабных пульсаций (вихрей) в ламинарных или турбулентных пограничных слоях в рамках невязкой линейной постановки. В силу линейности задачи для первого приближения, в работе рассматривается наиболее простое частное двухмерное решение. В частности используется найденный факт [2], что малые возмущения относительно основного (осредненного) профиля продольной скорости состоят из суммы сносимых (традиционных решений Рэлея) возмущений и так называемого сингулярного возмущения, которое отвечает за взаимодействие вихрей со стенкой. Показано, что найденные сингулярные аналитические пульсации качественно соответствуют поведению пульсаций в турбулентных пограничных слоях, описанных Райхардтом [3], а теоретический коэффициент корреляции пульсаций близок по величине к экспериментальному значению. Вблизи стенки описана вязкая малая ламинарная область, решение в которой удовлетворяет полным уравнениям Навье-Стокса, но эта область не является тонким слоем, а имеет квадратную форму. Таким образом, в каждой точке по медленной переменной вдоль пластины, происходит взаимодействие крупномасштабных пульсаций в пограничном слое со своей малой вязкой ламинарной областью на дне пограничного слоя. То есть быстрое решение имеет сложную форму по времени и пространству, но в результате дает свой вклад в генерацию турбулентности в пограничном слое. Основные результаты данной работы изложены в статье Горбушина и Заметаева [4] в рамках двухмерных уравнений Навье-Стокса, что как выяснилось, является частным решением полной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klebanoff P.S., Diehl Z.W. Some features of artificially thickened fully developed turbulent boundary layers with zero pressure gradient. Rep. NACA 1110, 1952.
2. Zametaev V. B., Gorbushin A. R. Evolution of vortices in 2D boundary layer and in the Couette flow. AIP Conference Proceedings 1770, 030044 (2016) doi: 10.1063/1.4963986.
3. Reichardt H. Messungen turbulenter Schwankungen. Naturwissenschaften 404 (1938).
4. Горбушин А.Р., Заметаев В.Б. Асимптотический анализ вязких пульсаций в турбулентном пограничном слое. Изв. РАН, МЖГ, 2018, №1, с.1-12.

ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ

А.Г. Здитовец, Н.А. Киселёв, Ю.А. Виноградов, М.М. Стронгин
Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Под энергоразделением (температурным разделением) понимается спонтанное возникновение областей в газовом потоке с полной энтальпией (полной температурой в случае совершенного газа) больше и меньше некоей начальной величины. Спонтанного в том смысле, что газовый поток не обменивается энергией с окружающей средой ни в виде теплоты, ни в виде работы. Данное явление лежит в основе устройств для безмашинного энергоразделения (температурного разделения) газового потока. Наиболее известные из них – это вихревые трубы Ранка-Хилша, резонансные трубы Гартмана-Шпренера.

В НИИ механики МГУ на протяжении нескольких лет проводятся исследования метода энергоразделения предложенного в работе [1]. Он основан на эффекте энергоразделения в пограничном слое высокоскоростного газового потока, возникающем при отличии молекулярного критерия Прандтля (Pr) от единицы. При $Pr < 1$ полная температура пристенных газовых слоев меньше начальной, при $Pr = 1$ равна, при $Pr > 1$ больше начальной. В [2] показано, что если дозвуковой и сверхзвуковой поток с одинаковой начальной полной температурой и $Pr \neq 1$ разделены проницаемой перегородкой, то в зависимости от направления перетекания газа среднemasсовая полная температура в пограничном сверхзвукового потока может как уменьшаться, так и возрастать. Практически в то же время было экспериментально зафиксировано [3], что для воздушных потоков с одинаковой начальной температурой самоорганизующийся отсос пристенных слоев из сверхзвукового потока в дозвуковой приводит к росту его среднemasсовой температуры. Более подробно данное явление было исследовано в работе [4]. В [5] численно был рассмотрен способ энергоразделения за счет отсоса пристенных слоев через проницаемую пластину, обтекаемую с одной стороны сверхзвуковым потоком.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования энергоразделения, возникающего при течении воздушного потока с начальной сверхзвуковой скоростью ($M=1.07-1.09$) в трубке с проницаемыми стенками. Схема рабочей части стенда представлена на рис. 1а.

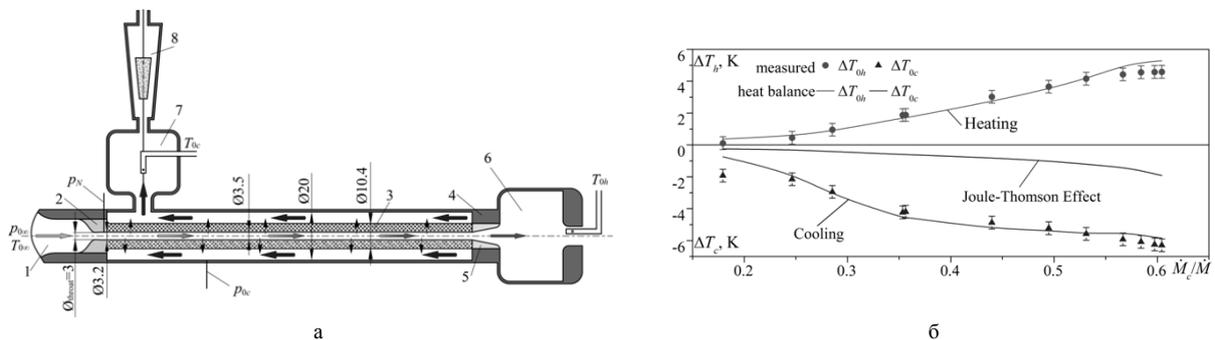


Рис. 1. а - схема экспериментального стенда (1 - форкамере, 2 – сменное сверхзвуковое сопло, 3 – пористая проницаемая трубка, 4 – коллектор отсасываемого воздуха, 5 – диффузор, 6,7 – ресиверы, 8 – ротаметр); б – «нагрев» ΔT_{0h} потока, истекающего из пористой трубки, ΔT_{0c} – охлаждение потока, протекающего сквозь проницаемую стенку в зависимости от массовой доли охлажденного потока

Рабочее тело – сжатый воздух. Исследовалось непосредственно температурное разделение (энергоразделение) воздушного потока в данном устройстве в зависимости от полного давления воздуха (массового расхода через сверхзвуковое сопло) в форкамере. На рис. 1б приведены данные по нагреву и охлаждению потоков, проходящих через данное устройство. Как видно эффект энергоразделения существенно выше, эффект Джоуля-Томсона в данном диапазоне параметров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00699)

ЛИТЕРАТУРА.

1. Леонтьев А.И. Температурная стратификация сверхзвукового газового потока // Доклады Академии наук. 1997. Т. 354, № 4. С. 475–477.
2. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Якубенко А.Е. Влияние вдува отсоса на энергоразделение потоков // Известия РАН Механика жидкости и газа. 2011. № 6. С. 98–105.
3. Здитовец А.Г. Экспериментальное исследование явления температурного разделения воздушного потока, истекающего через сверхзвуковое сопло, с центральным телом в виде пористой проницаемой трубки // Труды конференции-конкурса молодых ученых 13-15 октября 2010 г. 2011. С. 128–136.
4. Vinogradov Y.A., Zditovets A.G., Strongin M.M. Experimental investigation of the temperature stratification of an air flow through a supersonic channel with a central body in the form of a porous permeable tube // Fluid Dyn. 2013. Vol. 48, № 5.
5. Leont'ev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S. Temperature stratification under suction of the boundary layer from a supersonic flow // High Temp. 2012. Vol. 50, № 6. P. 739–743.

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН В УПРУГИХ МЕМБРАННЫХ ТРУБАХ, ЗАПОЛНЕННЫХ ВОДОЙ

А.Т. Ильичев

Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

Рассматриваются свойства устойчивости распространяющихся локализованных волн постоянной формы в податливых мембранных трубах, наполненных идеальной жидкостью. В ряде работ обсуждается возможность моделирование стенок человеческих артерий при помощи упругих мембран (см., например, [1]). Конечно, свободные гибкие трубки, наполненные идеальной жидкостью, не могут служить моделью кровотока в артериях, что связано в первую очередь с двумя обстоятельствами: кровь является не идеальной жидкостью, (а скорее даже неньютоновской), а также сама артерия погружена во внешнюю среду и на границе с внешней средой необходимо ставить адекватные граничные условия. Добавим, что модели кровотока в артериях сейчас активно изучаются физиками в сотрудничестве с медиками и существующие его модели очень сложны (см., например [2]). В работах [3]-[5] на основе мембранного подхода к моделированию стенок артерии делается попытка общего объяснения явления возникновения аневризмы, как явления бифуркации из однородного состояния. Однако стоячая уединенная волна, моделирующая аневризму в рамках данной приближенной модели, оказывается неустойчивой по форме в случае неподвижной на бесконечности жидкости, а при наличии среднего течения – орбитально устойчивой, т. е. приобретающей в результате возмущения скорость и начинающей движение. По-видимому, следует признать, что формирование аневризмы происходит в результате повреждения стенок артерии, что согласуется с результатами работы [6]. Основные уравнения для квазиодномерного движения идеальной жидкости внутри осесимметричной мембранной трубы были получены в работе [7] при помощи прямого вывода. Изучение спектральной устойчивости ветви решений типа неподвижной уединенной волны (так называемой аневризмы) при отсутствии жидкости внутри трубы (случай контролируемого давления) представлен в работе [3]. Параметром бифуркации в этом случае служит давление накачивания. Установлено, что вся ветвь уединенных волн спектрально неустойчива (т. е. возмущение формы волны экспоненциально растет по времени). В работе [4] изучается устойчивость всей ветви решений типа аневризмы, когда жидкость внутри трубы присутствует, но среднее течение (постоянная скорость жидкости на бесконечности) – ноль. Доказано, что аневризма по-прежнему неустойчива, однако присутствие жидкости оказывает сильный стабилизирующий эффект. Авторы статьи [5] предприняли анализ устойчивости решения типа аневризмы в присутствии среднего потока и обнаружили, что если скорость жидкости на бесконечности отделена от нуля, то аневризма спектрально устойчива. Используемая модель является весьма реалистичной для течения воды по шлангам. В настоящем докладе рассматривается вопрос об устойчивости бегущих уединенных волн, возникающих в результате возмущения давления в подобных трубах (в качестве примера таких явлений приведем импульсную подачу воды в ранее используемые пожарные шланги). Параметром бифуркации в этом случае более не является давление накачивания (оно может принимать произвольные значения), но скорость волны.

В докладе обсуждаются также другие свойства устойчивости бегущих и стоячих локализованных волн на стенках упругой мембранной трубы при отсутствии и наличии среднего течения в наполняющей ее жидкости.

ЛИТЕРАТУРА.

1. G.F. Holzapfel, R.W. Ogden. Constitutive modelling of arteries. Proc R Soc A, 2010. 466, 1551-1597.
2. D. Sodhani, S. Reese, R. Moreira, P. Mela, S. Jockenhoovel and S. E. Stapleton. Multi-scale modelling of textile reinforced artificial tubular aortic heart valves. Advances In Biomechanics: From Foundations To Applications. Meccanica; Springer. 2016, 1-17.
3. S.P. Pearse, Y.B. Fu, Characterization and stability of localized bulging/necking in inflated membrane tubes. IMA J. Appl. Math., 2010, 7, 581-602.
4. A. T. Il'ichev, Y.-B. Fu. Stability of aneurysm solutions in a fluid-filled elastic membrane tube. Acta Mechanica Sinica, 2012. 28, 1209–1218.
5. Y. B. Fu, A. T. Il'ichev. Localized standing waves in a hyperelastic membrane tube and their stabilization by a mean flow. Math. Mech. Solids, 2015, 20, 1198-2014.
6. A. T. Il'ichev, Y. B. Fu. Stability of an inflated hyperelastic membrane tube with localized wall thinning. Internat. J. Engrg. Sci., 2014., 80, 53-61.
7. M. Epstein, C. Johnston. On the exact speed and amplitude of solitary waves in fluid-filled elastic tubes. Proc. Roy. Soc. Lond. A, 2001, 457, 1195-1213.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ SST-МОДЕЛИ 2003 ГОДА С КОРРЕКЦИЕЙ НА КРИВИЗНУ ЛИНИЙ ТОКА ПО РОДИ-ЛЕШЦИНЕРУ-ИСАЕВУ ДЛЯ (U)RANS РАСЧЕТОВ ОТРЫВНЫХ И ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ

С.А. Исаев^{1,2}, М.С.Грицкевич², С.В. Гувернюк³, И.А. Попов¹, А.Е. Усачов⁴

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – Казанский авиационный институт, Казань; ²Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург; ³Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва; ⁴Московский комплекс ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Москва

Решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) остается одним из эффективных инструментов численного моделирования турбулентных течений, особенно в области промышленных разработок. Для замыкания уравнений используется иерархия разноразмерных моделей турбулентности, в число употребительных из которых входят двухпараметрические модели переноса сдвиговых напряжений (SST-модели) в версиях 1993 и 2003 года. Десять лет назад для расчета отрывных течений предложена поправка на кривизну линий тока в рамках подхода Роди-Лешцинера-Исаева [1]. В последние годы проводится ее систематическая верификация [2-7] с использованием многоблочных вычислительных технологий (МВТ) в пакете VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D) [5-7]. МВТ базируются на блочных пересекающихся сетках, предназначенных для отображения разномасштабных структурных элементов вихревых течений несжимаемой жидкости и вязкого газа. В качестве тестовых задач рассматриваются стационарные и периодические, двумерные и пространственные, до- и сверхзвуковые течения в задачах внутренней и внешней аэродинамики, а также конвективного теплообмена, имеющие экспериментальные аналоги. Течение в каналах с квадратными и круговыми кавернами, теплообмен в канале со сферической лункой, обтекание пластины со сферической лункой и прямоугольной стойкой, цилиндра с выступающим диском, полукругового профиля, теплообмен при обтекании одиночного цилиндра и пакета цилиндров представляют далеко не полный перечень решенных задач. Численные прогнозы с приемлемой точностью согласуются с экспериментальными данными, полученных в аэродинамических трубах, на аэробаллистической трассе и теплофизических стендах в Институте механики МГУ им.М.В. Ломоносова, ФТИ им.А.Ф.Иоффе, СПбГУ Петра Великого, ИТ им.С.С.Кутателадзе СО РАН, университетов Ростова и Саутгемптона и др. Сопоставительный анализ скорректированной SST-модели с аналогичными модели показал, что применение стандартной SST-модели может приводить к значительной ошибке в оценке интегральных силовых характеристик (до 30% в случае двумерных периодических течений). Предложенная модель с поправкой на кривизну линий тока позволила получить ряд прорывных результатов в области вихревой интенсификации теплообмена овальными траншеями и аэродинамики утолщенных несущих поверхностей с вихревыми ячейками.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проекты 17-08-00148 и 18-58-52005), а также в экспериментальной части при государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый — С. Исаев, КНИТУ-КАИ, г. Казань) по гранту Правительства России № 14.Z50.31.0003.

ЛИТЕРАТУРА.

- 1.Исаев С.А. Верификация модифицированной MSST с учетом влияния кривизны линий тока в рамках подхода Роди-Лешцинера-Исаева при расчете стационарных и периодических течений. Труды XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 2015. С. 1629-1631.
- 2.Исаев С.А., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Коррекция модели переноса сдвиговых напряжений с учетом кривизны линий тока при расчете отрывных течений несжимаемой вязкой жидкости. Инженерно-физический журнал. 2014. Т.87. №4. С.966- 979.
- 3.Исаев С.А., Баранов П. А., Судаков А. Г., Попов И. А. Верификация стандартных и модифицированных с учетом кривизны линий тока MSST и оценка приемлемости комбинированных по Менгеру граничных условий при расчете ультранизкого профильного сопротивления оптимальной компоновки цилиндра с соосным диском. Журнал технической физики. 2016. Т.86. №8. С.32-41.
- 4.Исаев С.А. Верификация модифицированной с учетом влияния кривизны линий тока в рамках подхода Роди-Лешцинера-Исаева модели переноса сдвиговых напряжений на расчетных примерах до- и сверхзвуковых отрывных течений. Сборник докладов IV Минского международного коллоквиума по физике ударных волн, горения и детонации. Минск: ИТМО им.А.В.Лькова, 2015. С.62-69.
5. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 316с.
- 6.Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое моделирование / Под ред. С.А. Исаева. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2016. 215 с.
- 7.Вихревые технологии для энергетики / А.И. Леонтьев, С.В. Алексеенко, Э.П. Волчков и др.; под общей редакцией академика А.И. Леонтьева. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 350с

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ

А.Н.Карелин

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

Для обоснования результатов практических исследований турбулентных потоков, проводимых в СПбГМТУ с 2002 года, и проверки полученных данных с использованием методов теории планирования эксперимента были составлены математические модели [1 – 4].

Регрессионное уравнение математической модели взаимодействия системы струй в начальном моменте в бесконечном пространстве имеет вид:

$$Y = 20,83 - 9,83625X_2 + 13,80125X_3 - 2,605X_1X_2 + 12,156X_2^2,$$

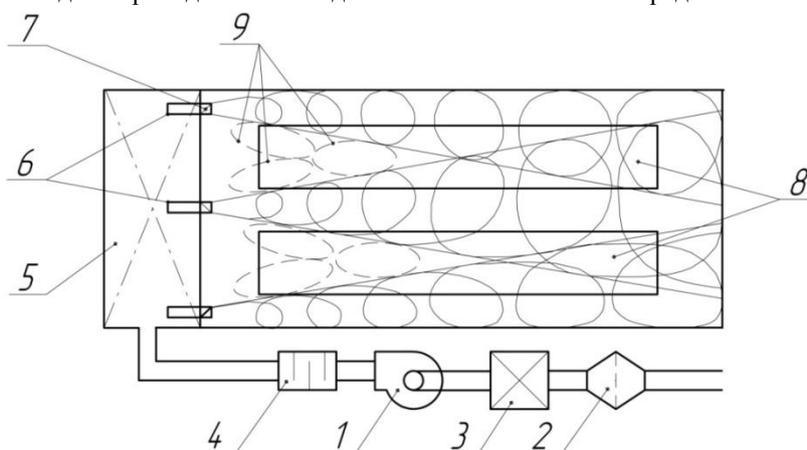
где - $Y = L_{вз}/d_c$ - "долгота вихревой зоны" системы струй, выраженная в виде отношения расстояния от плоскости среза сопел до точки начала взаимодействия соседних струй в потоке $L_{вз}$ к диаметру сопла d_c ;

- $X_1 = Re = (0,93 - 8,37) \cdot 10^4$ - число Рейнольдса;

- $X_2 = C = (1; 2; 3)$ - «сторонность закрутки», т.е. направление вращения турбулентных закрученных струй;

- $X_3 = V_c/d_c = (6,25 - 27,08)$ - отношение поперечного расстояния между соплами V_c к диаметру сопла d_c .

Визуализация модели проводимых исследований системы потоков представлена на рисунке.



На вход подается система взаимодействующих разносторонне закрученных свободных струй. Закрутка – местная.

В состав экспериментальной установки входит центробежный вентилятор (1), механический фильтр (2) и кондиционерный блок (3), находящийся в вентиляционной выгородке, вне помещения. Через глушитель (4), воздух наполняет навесную переборочную напорно-воздушную камеру (5).

Воздухоподающие патрубки (6), длиной $L \approx 10 \cdot d_n$ (d_n – диаметр патрубка), снабжены запатентованными соплами (7), струи подаются в проходы между основным оборудованием (8).

Представляется, что эффект достигается за счет особенностей реализации предложенной основополагающей идеи данного способа и конструкции устройства.

Струи образуют единое аэродинамическое поле. Также в системе формируются вторичные вихри (9).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования/ В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1976.
2. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. - М: Машиностроение; София: Техника, 1980. - 304 с.
3. Карелин А.Н. Гидродинамика и интенсификация теплообмена в сборках ядерных реакторов// Материалы XXI Международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» 25 февраля – 04 марта 2014 г. Московская область, пансионат «Звенигородский» РАН. – М.: Издательство Московского университета, 2014. – 270 с.
4. Карелин А.Н. Натурное моделирование межмашинного руслового канала для проведения исследований аэродинамики турбулентного воздушного потока// Материалы XXII Международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» 14 – 21 февраля 2016 г. Московская область, г. Звенигород, пансионат «Звенигородский» РАН / Ответственный редактор – Н.В. Никитин. - М.: Издательство Московского университета, 2016. – 311 с.

ОСРЕДНЁННАЯ ДИНАМИКА СВОБОДНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЯДРА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ И ВИБРИРУЮЩЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОЛОСТИ

И.Э. Карпунин¹, Н.В. Козлов²

¹ Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, 614990, Пермь, ул. Сибирская, 24
email: vankarpunin@yandex.ru

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ, 614013, Пермь, ул. Академика Королёва, 1
email: kozlov.n@icmm.ru

Вибрации являются эффективным инструментом управления механическими системами [1], благодаря чему делают возможными новые технологические решения. Одним из ярких эффектов, связанных с вибрациями, являются осреднённые течения [2]. Особый интерес представляют вращающиеся двухфазные системы (тела в жидкости, системы несмешивающихся жидкостей разной плотности, частично заполненная жидкостью полость), для которых специфическим является богатый спектр собственных колебаний [3], возбуждаемых переменными силовыми полями. Действие внешней силы на вращающуюся двухфазную систему приводит к возбуждению инерционных колебаний [4, 5, 6]. Резонансное возбуждение колебаний вращающихся гидродинамических систем посредством вибраций может служить эффективным инструментом управления течениями и тепломассопереносом.

В данной работе проводится подробное изучение динамики тела большой относительной длины, рассматривается траектория движения, находятся частоты колебаний. Возмущающее действие на цилиндрическое ядро во вращающейся полости определяется суперпозицией силы тяжести и связанной с вибрациями осциллирующей силы инерции. В результате возбуждаются колебания тела в системе отсчета полости с различными частотами.

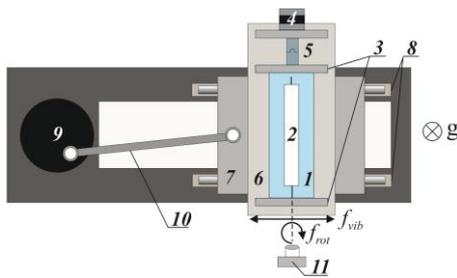


Рис. 1

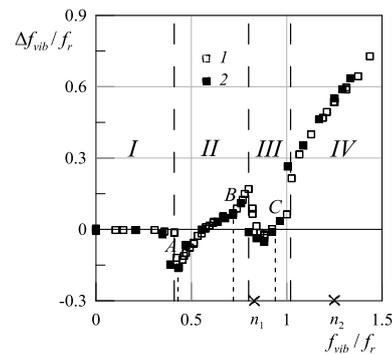


Рис. 2

Экспериментальная модель представляет собой прозрачную цилиндрическую кювету из оргстекла. Внутри полости – рабочая жидкость (вода) и цилиндрическое тело из капрлона. Модель помещается на вибростенд (рис.1), который осуществляет поперечные оси вращения вибрации с заданной частотой: $f_{vib} = 0-7 \text{ Гц}$. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что дифференциальное вращение тела (рис.2) определяется суперпозицией осредненных эффектов, связанных с колебаниями тела с разными частотами. К ним относятся: вызванные силой тяжести (внешним статическим силовым полем) колебания тела относительно вращающейся полости; вынужденные колебания тела с частотой вибраций; собственные колебания тела. Следует отметить важный вклад в дифференциальное вращение тела круговых колебаний с собственными частотами n_1 и n_2 , которые возбуждаются резонансным образом. Обнаружено, что колебания тела могут быть трёхмерными. Это особенно сильно проявляется при относительной частоте вибраций, превышающей единицу, когда круговые трансляционные колебания тела сопровождаются прецессией большой амплитуды.

ЛИТЕРАТУРА.

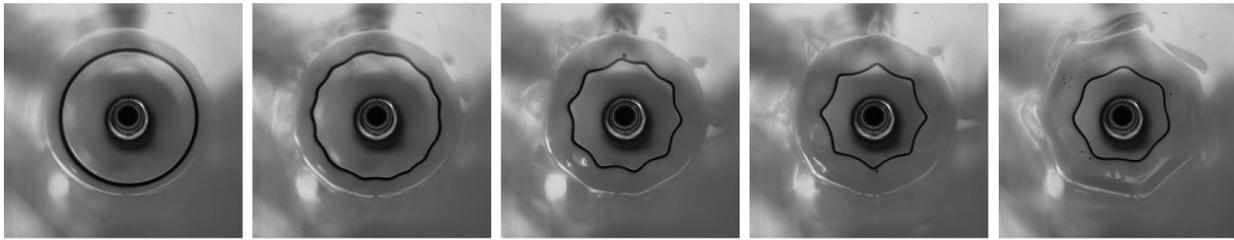
1. I.I. Blekhman. *Vibrational Mechanics (Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications)* // Singapore: World Scientific. 2000. 536 pp.
2. N. Riley. Steady streaming // *Ann. Rev. Fluid Mechanics*. 2001. Vol. 33. P. 43–65.
3. H.P. Greenspan. *The Theory of Rotating Fluids* // Cambridge University Press. 1968. 327 pp.
4. А.А. Иванова, В.Г. Козлов, А.В. Чиграков. Динамика жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре // *Изв. РАН. МЖГ*. 2004. № 4. С. 98–111.
5. А.А. Иванова, В.Г. Козлов, Д.А. Полежаев. Вибрационная динамика центрифугированного слоя жидкости // *Изв. РАН. МЖГ*. 2005. № 2. С. 147–156.
6. В.Г. Козлов, Н.В. Козлов. Вибрационный гидродинамический волчок // *Докл. РАН*. 2007. Т. 415. № 6. С. 759–762.

HYDRAULIC JUMP AND ITS INSTABILITIES

A.R. Kasimov

P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Saudi Arabia

A circular hydraulic jump is a well-recognized phenomenon: when a jet of fluid strikes vertically on a horizontal plate, a typically circular ring forms at some distance from the jet impact point. The ring is a location where the supercritical flow from near the jet transitions rapidly to subcritical flow downstream. Despite the long history of its study, this phenomenon is still attracting the interest of researchers for reasons of many fascinating dynamical and morphological features that are observed. Perhaps the most interesting one is the formation of polygonal patterns of the jump shape [1]. When the fluid is sufficiently viscous and at appropriate conditions for the flow rate, plate size, and jet radius, the circular shape is observed to lose its stability and to transition to various polygonal forms. These forms can be either stationary or spinning [1,2].



Examples are shown in the figures, where one can see snapshots of the hydraulic jump taken from below the horizontal transparent plate [2]. The fluid used was ethylene glycol, the glass plate diameter 32 cm, and the typical radius of the jump was about 2 – 3 cm. The jet impact location is seen as the central dark spot. It was equipped with an outer ring, and controlling the height of the ring, we could control the fluid depth downstream of the hydraulic jump. The figures show the polygon formation when the ring height is increased (from left to right). The jump region is seen to undergo complex structural changes in addition to the formation of polygons of its inner boundary. These experimental patterns will be described and a theoretical model that predicts the patterns will be introduced.

ЛИТЕРАТУРА.

1. C. Ellegaard, A. E. Hansen, A. Haaning, K. Hansen, A. Markussen, T. Bohr, J. L. Hansen, and S. Watanabe. Creating corners in kitchen sinks. *Nature*, 392:767–768, 1998.
2. H. Abderrahmane, A. R. Kasimov, Spinning hydraulic jump, 66-th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Nov. 24-26, 2013, Pittsburgh, PA, USA, <http://meetings.aps.org/link/BAPS.2013.DFD.A28.6>

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛАДКОЙ И ВИХРЕОБРАЗУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ В СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ

Н.А. Киселёв, А.Г. Здитовец, М.М. Стронгин, Ю.А. Виноградов
Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Исследованиям процессов интенсификации теплообмена и увеличения сопротивления посвящены многочисленные работы, в большинстве которых исследуется интенсификация теплообмена на поверхностных интенсификаторах [1]. Среди таких теплообменных поверхностей выделяются облученные поверхности, так как в данном случае возможно нарушение аналогии Рейнольдса в сторону теплообмена.

Однако так же известны работы, посвященные процессам интенсификации теплообмена и увеличения сопротивления, вызванные подавлением естественных соотношений между тепловым и динамическим пограничными слоями [2]. Наиболее часто реализуемым в данном случае методом является создание крупномасштабных вихревых структур: возникая в следе за плохо обтекаемым телом, они приводят к существенному увеличению локальных коэффициентов теплоотдачи, сопровождающемуся снижением коэффициента сопротивления трения. Это приводит к существенному увеличению теплогидравлической эффективности участка поверхности, находящегося в следе. В данной работе проведены исследования коэффициентов теплоотдачи и сопротивления вихреобразующего рельефа, расположенного в следе за поперечно установленным цилиндром. Подобная постановка не встречалась авторам в научной литературе.

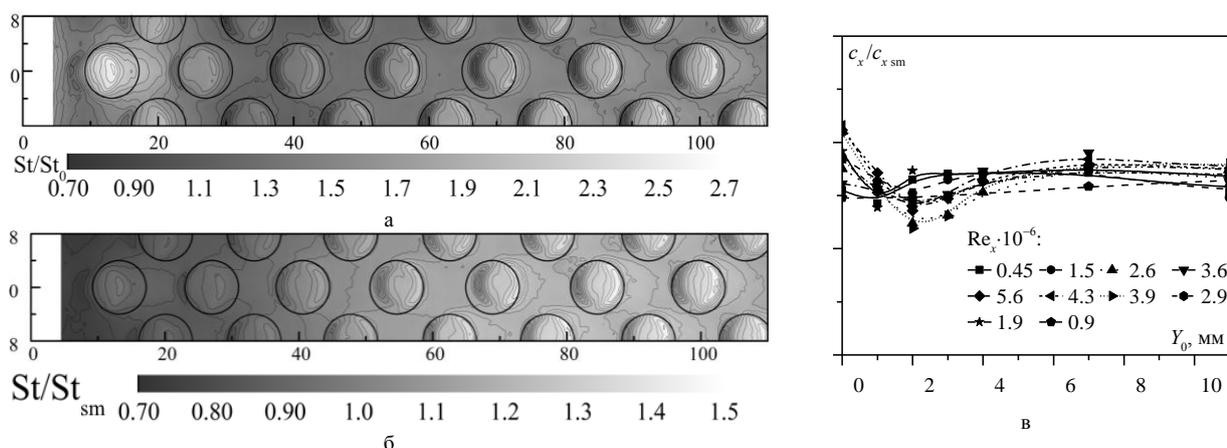


Рис. 1. Коэффициенты теплоотдачи на облученной пластине, отнесенные к гладкой пластине в невозмущенном потоке (а) и к гладкой пластине, стоящей параллельно (б) при $Y_0=4$ мм при $Re_x=3.5 \cdot 10^6$ (размеры в мм, «0» соответствует задней кромке цилиндра); сопротивление облученной пластины, отнесенное к стоящей параллельно гладкой

Расстояние от нижней стенки канала до нижней кромки цилиндра менялось в диапазоне $Y_0=0-11$ мм. Коэффициент сопротивления определялся путем взвешивания исследуемых пластин (гладкая и облученная пластины стояли параллельно на расстоянии 40 мм за задней кромкой цилиндра). Коэффициент теплоотдачи определялся путем регистрации процесса охлаждения поверхности пластин с использованием ИК-Камеры. В экспериментах расстояние от начала канала до исследуемых пластин составляло 0.7 м, число Рейнольдса, определенное по длине пограничного слоя, варьировалось в диапазоне $Re_x=0.5 \cdot 10^6-5.6 \cdot 10^6$.

Значения коэффициентов теплоотдачи, отнесенных к коэффициенту теплоотдачи гладкой пластины в невозмущенном потоке, лежали в диапазоне $St/St_0=1.0-2.8$ и изменялись вдоль направления потока вслед за коэффициентом теплоотдачи на гладкой пластине (рис. 1а). Коэффициенты теплоотдачи, отнесенные к коэффициенту теплоотдачи стоящей параллельно гладкой пластины, имели менее выраженные максимальные и минимальные значения в сравнении с теплообменом в невозмущенном потоке (рис. 1б).

Осредненные по площади плавающего элемента значения увеличения сопротивления, отнесенные к коэффициенту сопротивления гладкой пластины в невозмущенном потоке, для облученной поверхности лежали в диапазоне $c_x/c_{x0}=(-2.6)-(2.9)$. Коэффициенты сопротивления, отнесенные к коэффициенту сопротивления стоящей параллельно гладкой пластины, при этом лежали в диапазоне 1.25-1.55 и практически не зависели от положения цилиндра (рис. 1в). На удалении от цилиндра значения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления стремились к значениям, соответствующим обтеканию облученных поверхностей невозмущенным потоком при всех положениях цилиндра.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 18-08-00413).

ЛИТЕРАТУРА.

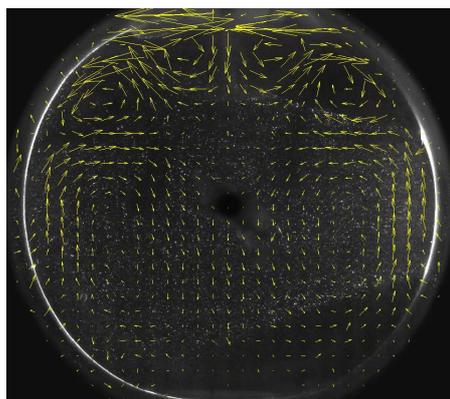
- Bergles A.E. Recent developments in enhanced heat transfer // Heat Mass Transf. 2011. Vol. 47, № 8. P. 1001–1008.
- Suzuki H., Suzuki K., Sato T. Dissimilarity between heat and momentum transfer in a turbulent boundary layer disturbed by a cylinder // Int. J. Heat Mass Transf. 1988. Vol. 31, № 2. P. 259–265.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСРЕДНЁННОГО ТЕЧЕНИЯ В ОБЪЁМЕ ЖИДКОСТИ С КОЛЕБЛЮЩИМИСЯ ДЕФОРМИРУЕМЫМИ СТЕНКАМИ

Н.В. Козлов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ, Пермь

Экспериментально исследуется осреднённая динамика вязкой несжимаемой жидкости в колеблющемся закрытом контейнере. Цилиндрический контейнер радиуса R имеет деформируемые упругие стенки, которым извне сообщаются вибрации с безразмерной частотой $\Omega_{vib} R^2 / \nu$, изменяющейся в широком диапазоне $\sim 10^2 - 10^4$. Жидкость вязкости ν занимает весь объём контейнера. Структура и скорость осреднённого течения изучаются при обработке изображений, снятых через прозрачный торец кюветы. При относительно малых амплитудах вибраций реализуется двумерная структура течения в виде валов, вытянутых вдоль оси контейнера. На рисунке представлено векторное поле скорости, осреднённое по периоду колебаний, при частоте и амплитуде вибраций, соответственно, 20.0 Гц и 0.70 мм в водном растворе глицерина вязкостью 0.25 Ст.



Исследование представляет интерес с точки зрения возможности управления тепло-массопереносом при помощи осреднённых течений. Благодаря аналогии между жидкими и твёрдыми эластичными поверхностями [1, 2], полученные результаты могут быть проанализированы в сравнении с течениями в колеблющихся каплях [3, 4].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 17-71-10189).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Snoeijer J. H. Analogies between elastic and capillary interfaces. *Phys. Rev. Fluids*, 2016, Vol. 1, P. 060506.
2. Sznitman J., Rosgen T. Acoustic streaming flows in a cavity: An illustration of small-scale inviscid flow. *Physica D*, 2008, Vol. 237, P. 2240–2246.
3. Murtsovkin V.A., Muller V.M. Steady-State Flows Induced by Oscillations of a Drop with an Adsorption Layer. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1992, Vol. 151, Issue 1, P. 150–156.
4. Yarin A.L. Stationary d.c. streaming due to shape oscillations of a droplet and its effect on mass transfer in liquid–liquid systems. *J. Fluid Mech*, 2001, Vol. 444, PP. 321–342.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЕЙ ПУЛЬСАЦИЙ В ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ

Колосов Г.Л., Косинов А.Д., Семенов Н.В., Смородский Б.В., Ермолаев Ю.Г., Яцких А.А.
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Изучение закономерностей ламинарно-турбулентного перехода в условиях сверхзвуковых скоростей газовых потоков относится к числу важнейших фундаментальных задач механики жидкости и газа. Положение ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя существенно влияет на аэротермодинамические характеристики и эффективность органов управления сверхзвуковых летательных аппаратов. Экспериментальные и расчетные исследования турбулизации в пристенных сдвиговых течениях продолжают оставаться предметом пристального внимания ученых ведущих научных центров мира. Отсутствие глубоких знаний о закономерностях ламинарно-турбулентного перехода и его чувствительности к изменению различных условий полета затрудняет развитие инженерных методов определения положения ламинарно-турбулентного перехода.

В данной работе приводятся результаты измерений возмущений двумерного и трехмерного сверхзвукового пограничного слоя с помощью сканирующего по перегревам ниточного датчика термоанемометра постоянного сопротивления СТА-2016 v2. Исследования полей пульсаций проведены на следующих моделях: модель плоской пластины с острой передней кромкой; модель скользящего крыла с 3% профилем и углом скольжения 45 градусов; модель скользящего крыла с 3% профилем и углом скольжения 72 градусов. На этих моделях измерены профили среднего и пульсационного течения в пограничном слое при числах Маха $M=2$ и $2,5$ с помощью термоанемометра в режиме автоматического сканирования. На моделях пластины и 45-градусного скользящего крыла изучалось развитие возмущений вниз потоку и зафиксированы положения конца ламинарно-турбулентного перехода. На модели скользящего крыла с углом скольжения 72 градуса измерен рост возмущений в процессе ламинарно-турбулентного перехода при варьировании единичного числа Рейнольдса. Получены диаграммы перехода и величины отношения пульсаций температуры торможения к пульсациям массового расхода в процессе ламинарно-турбулентного перехода.

Для условий выполненных экспериментов на плоской пластине подтверждено, что максимальная величина отношения пульсаций массового расхода и температуры торможения внутри пограничного слоя в процессе перехода практически постоянна (около 0,1). Оценка распределений числа Маха, температуры, скорости и плотности потока поперек пограничного слоя, полученная по результатам термоанемометрических измерений соответствует результатам расчетов в сверхзвуковой части пограничного слоя ($M>1,1$) при числах Маха набегающего потока $M=2$ и $2,5$. Разделение возмущений на пульсации плотности, скорости и температуры осуществлялось с помощью известных газодинамических соотношений и обычных для пограничного слоя допущений [1, 2]. В результате разделения получено, что над пограничным слоем отношение пульсаций скорости к пульсациям плотности удовлетворяет изэнтропическим соотношениям. Вблизи границы пограничного слоя изэнтропичность течения нарушается, а внутри пограничного слоя до числа Маха 1,1-1,2 это отношение монотонно возрастает, но имеет систематически большие значения (не более 15%) в сравнении с изэнтропической оценкой ($1/M^2$). При использовании «сильной рейнольдсовой аналогии» Морковина в сверхзвуковом пограничном слое, относительная величина пульсаций переоценивается более чем в 2 раза. Получены оценки амплитуд пульсаций скорости, плотности и температуры в пограничном слое гладкой плоской пластины при числах Маха 2 и 2,5 в процессе ламинарно-турбулентного перехода (диаграммы перехода). Впервые в трехмерных сверхзвуковых пограничных слоях экспериментально измерено развитие возмущений температуры торможения и массового расхода в процессе ламинарно-турбулентного перехода. Получено, что при ламинарно-турбулентном переходе отношение уровней естественно порожденных пульсаций температуры торможения к пульсациям массового расхода практически постоянно, что аналогично случаю плоской пластины. Максимальное значение отношения возмущений массового расхода и температуры торможения поперек пограничного слоя на моделях скользящих крыльев со сверх- и дозвуковыми передними кромками близки и лежат в диапазоне 0,1-0,15.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 17-19-01289).

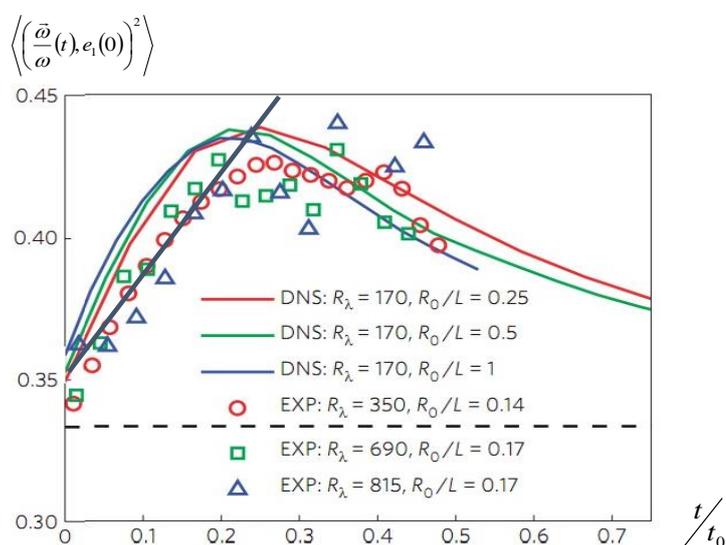
ЛИТЕРАТУРА

1. A.D. Kosinov, Yu.G. Yermolaev, N.V. Semionov, G.L. Kolosov, A.V. Panina. To the analysis of the natural pulsation development during laminar-turbulent transition in supersonic boundary layer. AIP Conference Proceedings, 2017, 1893, 030073
2. Yu.G. Yermolaev, A.D. Kosinov, N.V. Semionov, S.N. Tagaev, A.I. Semisynov. On the pulsation decomposition of supersonic flow for natural and controlled conditions of experiments. Recent Advances in Fluid Mechanics and Aerodynamics, 7th IASME / WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, Moscow, 2009, 89-93.

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

А.В. Копьев, К.П. Зыбин
ФИАН, Москва

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



На рисунке показаны численные (DNS) и экспериментальные (EXP) результаты из [2] с наложенной на них универсальной линейной асимптотикой (полученной в развитой теоретической модели) зависимости от времени усредненного квадрата косинуса угла между текущей крупномасштабной завихренностью и изначальным крупномасштабным вектором доминирующего растяжения. Важность представленных результатов заключается в самом факте применимости линейной стохастической модели в принципиально нелинейном процессе турбулентности. Показано, что линейные эффекты возможно играют главную роль в пируэт-эффекте, который раскрывает механизм образования интенсивных вихревых структур в мелкомасштабной турбулентности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ проект 17-11-01271.

ЛИТЕРАТУРА.

1. В.Р. Кузнецов, В.А. Сабельников. Турбулентность и горение, М: Наука, 1986, 288 с.
2. Н. Ху, А. Pumir, Е. Bodenschatz. The pirouette effect in turbulent flows, Nat. Phys., 2011, 7, 709-712
3. К.П. Зыбин, В.А. Сирота, А.С. Ильин, А.В. Гуревич. Генерация мелкомасштабных структур в развитой турбулентности, ЖЭТФ, 2007, 132, 2 (8), с. 510-523
4. А. Pumir, Е. Bodenschatz, Н. Ху. Tetrahedron deformation and alignment of perceived vorticity and strain in a turbulent flow, Phys. Fluids, 2013, 25, 035101
5. S.B. Pope. PDF methods for turbulent reactive flows, Prog. Energy Combust. Sci., 1985, 11 (2), 119-192

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОАКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

В.Ф. Копьев

Центральный Аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, ЦАГИ, Москва

Исследуются механизмы турбулентности, участвующие в генерации шума турбулентными струями. Рассматриваются три модели генерации шума, связанные с различными представлениями об излучающей турбулентности, – это мелкомасштабная турбулентность, связанная с процессами рождения мелких вихрей, волны неустойчивости, развивающиеся вниз по потоку за счет неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, и крупномасштабные когерентные вихри (вихревые кольца), излучающие за счет собственных колебаний ядра. В разных ситуациях доминировать могут различные механизмы, и наиболее интересными являются случаи, когда механизмы проявляют себя одновременно. Именно такая ситуация имеет место для высокоскоростных струй, когда мелкомасштабной турбулентности, определяющей излучение малоскоростных струй, оказывается недостаточно для объяснения результатов акустических измерений, и требуется рассматривать дополнительно шум, связанный с волнами неустойчивости.

Разработана новая корреляционная модель [1], основанная на моделировании процесса рождения вихрей, как случайного процесса, и детерминированном описании динамики отдельного вихря. Предложенная модель позволяет проанализировать известные корреляционные модели, основанные на эмпирическом моделировании корреляционной функции монопольных, дипольных или квадрупольных источников. Результаты расчета спектральных характеристик, полученные на основе предлагаемой модели с использованием квадрупольных источников, находятся в хорошем соответствии с данными измерений шума круглой струи.

Рассматриваются различные способы влияния на волны неустойчивости с целью управления аэродинамическим шумом. Общая идеология основана на возможности генерации одних и тех же волн неустойчивости при воздействии на струю из различных областей течения. Разработана схема управления искусственно созданной и естественно развивающимися волнами неустойчивости с помощью HF DBD плазменных актуаторов [2]. Предпринята также попытка управления непосредственно вихревыми кольцами в возбужденной струе за счет воздействия на собственные моды вихревого ядра. Показано, что эффект разрушения вихревых колец носит резонансный характер. Эти результаты показывают важность колебательных свойств этих вихрей в динамике всего турбулентного течения.

По результатам экспериментальных, теоретических и численных исследований [3] разработаны методы моделирования и снижения шума взаимодействия струи и крыла самолета, основанные на представлении о волнах неустойчивости и их роли в шуме турбулентной струи. Экспериментально показано, что интенсивность излучаемого шума экспоненциально нарастает при уменьшении расстояния между струей и задней кромкой крыла/закрылка. Данные эффекты корректно описываются созданной теоретической моделью и методами численного моделирования.

На настоящем этапе развития вихреразрешающих методов особую роль играет валидация расчетов. В работе [4] впервые был сформулирован принципиально новый способ валидации расчетов шума струй с помощью измерений, проведенных по методу азимутальной декомпозиции. Будучи валидированными, методы вычислительной аэроакустики позволяют получать различные характеристики турбулентного течения, некоторые из которых невозможно измерить, а значит, открывают новые возможности в познании механизмов шумообразования в турбулентных течениях. Так, подробный анализ течения турбулентной струи, рассчитанного численным методом, позволил идентифицировать пакеты волн неустойчивости, что является одной из необходимых задач при создании демонстратора системы активного управления шумом.

Представленные работы демонстрируют важность понимания структуры излучающей турбулентности в турбулентных струях с точки зрения снижения шума турбулентных потоков, разработки новых методов измерения шума струй и разработки методов управления шумом, а также с точки зрения валидации численных методов, необходимых для решения промышленных задач.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект 17-11-01271.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Копьев В.Ф., Чернышев С.А. “Новая корреляционная модель каскада турбулентных пульсаций как источника шума в струях”, Акустический журнал, 2012, Т.58, №4, с.482-497
2. В.Ф. Копьев, Г.А. Фараносов, С.А. Чернышев, О.П. Бычков, И.В. Беляев, М.Ю. Зайцев, В.А. Копьев, Н.Н. Остриков, «Разработка стратегии активного управления волнами неустойчивости в невозбужденных турбулентных струях», МЖГ, 2018, (принято к печати)
3. Kopiev V.F., Belyaev I.B., Faranosov G.A., Kopiev V.A., Ostrikov N.N., Zaytsev M.Yu., Pararin G.V. Numerical and Experimental Study of JFI Effect on Swept Wing. AIAA Paper 2014-3060, June 2014.
4. Копьев В.Ф., Шур М.Л., Азимутальные компоненты звукового поля турбулентной струи: результаты измерений и их использование для валидации современных методов расчета шума, Уч.Зап. ЦАГИ, 2010, №1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Е.Ю. Коротеева, И.А. Знаменская
МГУ им. Ломоносова, Москва

В настоящей работе проведен количественный анализ пограничного слоя жидкости с использованием новой методики на основе инфракрасной (ИК) термографии. Данная методика применена к исследованию приповерхностного течения воды, формируемого осесимметричной затопленной струей при ее натекании на плоскую ИК-прозрачную стенку. Получены и проанализированы спектры пульсаций температуры при различных режимах течения. Показано, что изменения наклона спектра на разных расстояниях от точки торможения могут быть напрямую связаны с изменением характера турбулентного течения в погранслое.

Импактные струи находят широкое применение в самых разнообразных технологических процессах и устройствах, а в вычислительной гидродинамике используются как тестовый объект для верификации моделей турбулентности. Многочисленные исследования импактных струй сосредоточены, в основном, на изучении процессов тепломассообмена в области взаимодействия струи с преградой [1-3]. При этом основная доля работ приходится на конфигурации с малым относительным расстоянием сопла от преграды, при которых коэффициенты тепло- и массообмена оказываются максимальными [4]. Задачей данной работы было изучение пульсационных характеристик течения вблизи поверхности преграды методом ТВПЖ – термографии высокоскоростных потоков жидкости [5-6].

В экспериментах горячая (35-40 °С) струя воды, погруженная в резервуар с холодной (15-20 °С) водой, натекала на вертикальную стенку резервуара с окном из фторида кальция диаметром 50 мм. Проводилась съемка ИК камерой FLIR SC7000 с рабочим диапазоном длин волн 3.7-4.8 мм. В этом диапазоне более 90% ИК-излучение проходит через окно из фторида кальция, поглощаясь при этом в слое воды порядка 0.1 мм, что позволяет при фокусировке камеры на внутренней стенке окна регистрировать тепловое излучение из тонкого пограничного слоя. Съемка проводилась на частоте от 200 до 400 Гц. Длительность съемки составляла не более 1-2 с, чтобы пренебречь действием теплопроводности и рассматривать температурный контраст ΔT как пассивную примесь.

Обработка тепловизионных измерений в широком диапазоне начальных параметров струи показала, что показатель степени в спектральном законе для тепловых пульсаций является функцией расстояния от точки торможения потока. При этом вид функции определяется параметрами течения – числом Рейнольдса и относительным расстоянием сопла до преграды. Обычно, вблизи точки торможения потока и до 1-2 относительных диаметров вокруг нее спектр мощности пульсаций погранслоя практически не зависит от частоты. Для точек, расположенных на расстоянии порядка 3-6 относительных диаметров от места соударения становится возможным выделить участок с наклоном $-5/3$, соответствующий появлению инерционного интервала. Далее по потоку наклон спектров увеличивается, а показатель степени, в основном, находится в интервале от -1.8 до -3.5. Изменения в показателе степени можно напрямую связать с изменением характера течения в пристеночном слое, что открывает возможности использования предложенной методики для оценки турбулентных характеристик пограничных слоев жидкости.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-38-60186).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М.: Машиностроение, 1977.
2. Волков К.Н. Взаимодействие круглой турбулентной струи с плоской преградой // ПМТФ. 2007. Т. 48, No. 1. С. 55–67.
3. Zuckerman N, Lior N. Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling, Adv. Heat Transfer. 2006, Vol.39, P.565–631.
4. Carlomagno GM, Ianiro A, Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance: a review, Exp. Thermal Fluid Sci. 2014. Vol.58, P.15–35.
5. И. А. Знаменская, Е. Ю. Коротеева, А. М. Новинская, Н. Н. Сысоев. Особенности спектров турбулентных пульсаций струйных затопленных течений воды. Письма в "Журнал технической физики", 2016, Т.13, С. 51–57.
6. М.А. Большухин, И.А. Знаменская, В.И. Фомичев. Метод количественного анализа быстропротекающих тепловых процессов через стенки сосудов при неизотермическом течении жидкости. Доклады Академии наук, 2015, Т. 465(1), С. 38–42.

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЗАПИРАНИЯ ТЕЧЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

К.Б. Кошелев, С.В. Стрижак

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

Течение суспензии с твердыми частицами часто встречается в природе и в промышленных процессах. Движение эритроцитов в артериях человека, перенос речных отложений в реках, движение пшеницы внутри бункера, течение суспензии в проппантной пачке трещины гидроразрыва нефтяного пласта являются хорошим примером течений с переменной плотностью. В подобных механических системах поток частиц обычно связан вместе с жидкостью. Объединенные микроскопические системы (частица-частица и частица-жидкость), взаимодействия между собой, управляют макроскопическим поведением механического процесса. Поэтому понимание явлений микромасштаба может помочь с формулировкой общих методов, выбором масштабных соотношений, с надежным проектированием и контролем различных процессов с участием макрочастицы. Для движения частиц в узких каналах и трещинах характерно явление заклинивания (запирания, блокировки, засорения). Удержание частицы в отсутствии деформирования и смещения постулировалось несколькими исследователями, и демонстрировалось экспериментально. В каналах возможен режим течения когда несколько частиц прибывают в горловину или в область сужения канала одновременно, при этом частицы запирают выход, формируя мост или арку (Рис.1). Объемная доля концентрации твердых частиц может достигать $\phi = 20\%$. При этом важно оценивать при какой объемной доли частиц и отношении диаметра порового канала к диаметру частицы D_0/d_p возникает запирание течения.

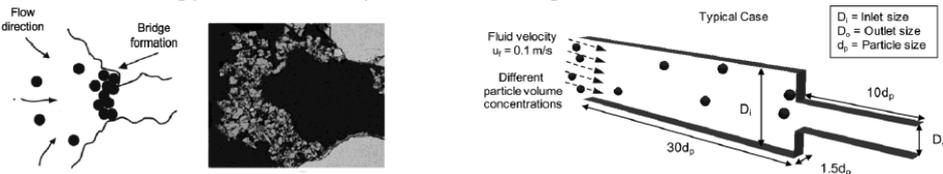


Рисунок 1. Течение в узком канале переменного сечения с твердыми частицами

При моделировании движения вязкой жидкости с частицами твердая фаза может быть смоделирована с помощью Лагранжева подхода. В работе для расчета использовался решатель MPPFoam с Эйлер-Лагранжевым подходом для моделирования нестационарного течения. В данном решателе учитывался объединенный транспорт единственного облака частиц с учетом влияния объемной фракции частиц на непрерывную фазу. Для расчета соударений использовался метод частиц в ячейке и модель мягких сфер. Для расчета скорости движения частиц проводилось интегрирование дифференциальных уравнений движения частиц. Математическая модель для жидкости включала в себя уравнения неразрывности, количества движения для непрерывной фазы. Для дискретизации уравнений использовался метод конечных объемов. Полученные уравнения для связи скорости и давления решались итерационным методом PIMPLE. Рассматривалась модельная задача о течении облака частиц в канале с ужением и в канале с подводом частиц через инжекторы. Размеры расчетной области для случая канала с инжектором выбирались (0.53 0.12 0.01) метра. Расчетная область имела форму плоского канала с двумя разными секциями. Скорость подвода частиц, с диаметром до 1 мм, через два инжектора задавалась равной (18.8 6.8 0) м/с. Распределение количества частиц в инжекторе задавалось 1390885 в секунду. На входе в область для скорости использовалось условие фиксированного значения, на выходе условие продолжения решения, на стенках условия отсутствия проскальзывания, на передней и задней границах условие симметрии. Количество шестигранных ячеек задавалось равным 9776. Течение жидкости полагалось ламинарным. На рисунке 2 показано рассчитанное поле давления и поле концентрации частиц, которые оказывали влияние на течение в момент времени $t=0.05$ секунды. Шаг по времени выбирался равным 0.0001 с. Расчеты проводились на вычислительном кластере web-лаборатории UniCFD ИСП РАН на 12-48 ядрах.



Рисунок 2. Течение в узком канале с подводом частиц через инжекторы

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ РАСЧЕТА ПРИ ПРЯМОМ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С УСРЕДНЕНИЕМ ПО НЕСКОЛЬКИМ НЕЗАВИСИМЫМ АНСАМБЛЯМ

Б.И. Краснопольский
НИИ механики МГУ, Москва

Постоянный рост производительности многопроцессорных вычислительных систем открывает новые возможности для использования вихререзающих методов расчета турбулентных течений. Наиболее распространенные подходы к моделированию статистически стационарных турбулентных течений используют процедуру интегрирования по времени для осреднения характеристик течения и набора статистики. Одним из основных недостатков такого подхода является необходимость проведения длительного интегрирования процесса эволюции течения. В [1-4] авторами предложен подход, предполагающий проведение расчета нескольких реализаций турбулентного течения. Сочетая интегрирование по времени с набором статистики по нескольким ансамблям реализаций, оказывается возможным заменить длительный расчет одного состояния течения на расчет нескольких состояний на более коротком интервале времени. Это позволяет «распараллелить» расчет во времени.

Работы [1-4] рассматривают различные подходы такого распараллеливания. В [1] предлагается проводить независимый расчет состояний течения, используя для каждого из них дополнительный набор вычислительных ресурсов. Хотя этот подход позволяет в ряде случаев многократно сократить время расчета, такое сокращение достигается за счет повышения ресурсоемкости и общих вычислительных затрат. В [2-4] для моделирования несжимаемых течений предлагается другой подход, основанный на одновременном расчете нескольких состояний турбулентного течения. Это позволяет использовать более эффективные реализации методов решения систем линейных алгебраических уравнений для решения систем одновременно с несколькими правыми частями. За счет использования такого подхода оказывается возможным сократить время расчета и снизить общие вычислительные затраты.

Вообще говоря, оба подхода, предложенных в [1-4], являются частными случаями более общей конфигурации, допускающей проведение нескольких независимых расчетов, в каждом из которых моделируется несколько реализаций турбулентного течения. В докладе рассматривается указанная обобщенная схема проведения расчета и приводятся теоретические оценки и критерии, позволяющие определить оптимальную конфигурацию для конкретной вычислительной системы и количества используемых вычислительных устройств. Полученные оценки подтверждаются результатами расчетов для задачи об обтекании турбулентным потоком массива кубов, расположенных на стенке канала. Данные результаты демонстрируют в ряде случаев дополнительное ускорение до 20% по сравнению с предложенными ранее методиками.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 17-01-00140-а. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

ЛИТЕРАТУРА.

1. V. Makarashvili, E. Merzari, A. Obabko, A. Siegel, P. Fischer. A performance analysis of ensemble averaging for high fidelity turbulence simulations at the strong scaling limit // *Computer Physics Communications*, 2017, 219, 236-245.
2. Б.И. Краснопольский. Одновременное моделирование нескольких состояний турбулентного течения // *Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (26-27 сентября 2016 г., г. Москва)*. Изд-во МГУ, 2016, с. 333-342.
3. Б.И. Краснопольский. Оценка эффективности одновременного моделирования нескольких состояний турбулентного течения на примере задачи о прямом расчете турбулентного обтекания массива кубов // *Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (25-26 сентября 2017 г.)*. Изд-во МГУ, 2017, с. 662-670.
4. B. Krasnopolsky. Simultaneous Modelling of Multiple Turbulent Flow States // *arXiv preprint arXiv:1711.10622*, 2017.

ВЛИЯНИЕ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН, ВЫЗВАННЫХ КОЛЕБАНИЯМИ ОДНОЙ ИЗ ГРАНИЦ СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ

О.Э. Кривоносова, Д.Ю. Жиленко,
Институт механики МГУ, Москва

Численно исследованы изотермические течения вязкой несжимаемой жидкости в сферическом слое, вызванные вращательными колебаниями его внутренней границы с двумя частотами относительно состояния покоя. Расчеты проведены в осесимметричной постановке по алгоритму [1]. По рассчитанным полям скорости течения построены волновые поверхности [2], характеризующие направление распространения и вид волн. Показано, что при небольших амплитудах колебаний на каждой из двух частот образуются сферические волны: вблизи внутренней сферы волна определяется колебаниями на большей из частот (f_1), вблизи внешней – на меньшей (f_2). Увеличение амплитуды колебаний границы на частоте f_1 может приводить к существенному усилению низкочастотной моды вблизи внешней границы. При этом изменяется и волновая структура течения: в области, граничащей с внешней сферой направление распространения волн меняется с радиального (сферическая волна) на меридиональное. Следует отметить, что в течениях присутствуют только колебания на исходных частотах f_1 и f_2 , колебания на комбинационных частотах и гармониках отсутствуют. Анализ декрементов затухания показал, что усиление низкочастотной моды происходит благодаря интенсивной меридиональной циркуляции, которая, в свою очередь, возрастает при увеличении амплитуды колебаний границы на частоте f_1 . Отношение амплитуд низкочастотной и высокочастотной мод возрастает с уменьшением низкой частоты и существенно зависит от меридионального угла, увеличиваясь по мере удаления от экватора к полюсу [3].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-05-00004 и 18-08-00074).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Н.В. Никитин. Конечно-разностный метод решения уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в произвольных криволинейных ортогональных координатах. Журнал вычисл. физики. 2006. Т.217. №2. С.759-781.
2. Д.Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова. Определение волновой структуры замкнутых течений с неравномерным вращением границ методом мгновенной разности фаз. ДАН, 2015, т. 464, №4, С. 417-420.
3. Д.Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова. Усиление волн при вращательных колебаниях жидкости. Письма в ЖЭТФ, 2016, т. 104, 8, С. 552-559.

НОВЫЙ ВИД НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ВРАЩАТЕЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ В ТОНКОМ СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ

О.Э. Кривоносова, Д.Ю. Жиленко,
Институт механики МГУ, Москва

Численно исследованы изотермические течения вязкой несжимаемой жидкости в сферическом слое, вызванные одночастотными вращательными колебаниями его внутренней границы относительно состояния покоя. Расчеты проведены в не осесимметричной постановке в соответствии с алгоритмом [1]. Установлено, что при увеличении частоты вращательных колебаний происходит изменение вида неустойчивости с переходом от вторичных течений в виде вихрей Тейлора к ранее не наблюдавшимся тороидальным структурам. Определены границы области существования обнаруженной неустойчивости.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-05-00004 и 18-08-00074).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Н.В. Никитин. Конечно-разностный метод решения уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в произвольных криволинейных ортогональных координатах. Ж. вычисл. физики. 2006. Т.217. №2. С.759-781.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА «КАБАРЕ» НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ТЕЙЛОРА-ГРИНА И НАПОРНОГО ТЕЧЕНИЯ ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Ю.М. Куликов, Э.Е. Сон
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Работа посвящена применению схемы КАБАРЕ, реализованной в приближении слабой сжимаемости, к задачам трехмерных турбулентных течений. В первой части представляются результаты моделирования ламинарного и турбулентного распада вихря Тейлора-Грина, являющегося одной из канонических задач вычислительной гидродинамики. Система уравнений Навье-Стокса решалась на последовательности расчетных сеток с 64^3 , 128^3 , 256^3 ячейками при числах Рейнольдса $Re=100, 280, 1600, 4000$.

Конечно-разностный явный метод КАБАРЕ, имеющий формально второй порядок точности по времени и по пространству, рассматривается в сравнении с другими типами численных методов, – квазигидродинамическим подходом [1], спектральным методом [2] и разрывным методом Галеркина [3]. Схема КАБАРЕ, отличающаяся значительной универсальностью, не уступает другим подходам как в части воспроизводства вихревых структур при ламинарном и турбулентном распаде, так и интегральных параметров. Установлено, что на грубых стеках значения скорости диссипации, полученные из энтропии, существенно ниже результатов непосредственного дифференцирования, а механизм численной диссипации не в полной мере повторяет реальный физический процесс. Таким образом, данный численный метод следует относить к группе LES-методов. Рассматривая процесс распада турбулентности можно выявить влияние искусственных с физической точки зрения периодических граничных условий, определяющих закон убывания турбулентной кинетической энергии на больших временах эволюции. Энергетический спектр течения в момент максимума скорости диссипации приближается к асимптотике «-5/3», вместе с тем, имеет место существенное демпфирование высокочастотного диапазона спектра.

Во второй части представлены результаты моделирования напорного течения слабосжимаемой термовязкой жидкости с использованием квазипериодических граничных условий. В данной постановке можно проследить эволюцию мелкомасштабных хаотических пульсаций, наложенных на стационарный асимметричный профиль скорости, возникающий в неоднородном температурном поле. Характеристики неоднородного турбулентного течения рассматриваются на основе уравнения для турбулентной кинетической энергии, а также свойств турбулентного теплопереноса. Кроме того, показано влияние неидивергентных начальных условий и модельной сжимаемости, интенсивности турбулентных пульсаций и характерного числа Рейнольдса на эволюцию течения слабосжимаемой жидкости. В общем случае наиболее интенсивная генерация турбулентности происходит в окрестности горячей стенки, в результате чего образуется развитый слой смешения. В дальнейшем, в зависимости от числа Рейнольдса и интенсивности пульсаций пристеночный слой может вызвать крупномасштабное перемешивание в центральной части, приводя к турбулизации практически всего канала. Характерный размер перемешивающихся молей жидкости оказывается в несколько раз большим пристеночного масштаба.

На нижеприведенном рисунке представлены изоповерхности положительной и отрицательной завихренности при $Re=4000$ для времени $t=12$ для вихря Тейлора-Грина (слева), а также поле условной температуры в течении термовязкой жидкости при $Re=2100$ для $t=0.11$ (справа), демонстрирующее начало процесса крупномасштабного смешения.



ЛИТЕРАТУРА.

1. Т.Г. Елизарова, И.А. Широков. Ламинарный и турбулентный режимы распада вихря Тейлора-Грина. Препринты ИПИМ им. М. В. Келдыша, 2013, т. 63, 16 с.
2. M.E. Brachet et al. Small-scale structure of the Taylor-Green vortex. JFM. 1983, Vol. 130, 411-452.
3. K. Hillewaert. Direct numerical simulation of the Taylor-Green vortex at $Re = 1600$. 2nd International Workshop on High-Order CFD Methods. Sponsored by DLR, AIAA and AFOSR, 2013, May

ИДЕНТИФИКАЦИЯ БАРОКЛИННЫХ МОД В ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ В СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ БАССЕЙНАХ

Куркина О.Е., Куркин А.А., Кокоулина М.В.
НГТУ им Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород

В данной работе представлен расчет теоретических бароклинных мод, вычисление коэффициентов обобщенного ряда Фурье разложения заданного волнового поля по этим модам [1], расчет эмпирических вертикальных мод по заданному критерию точности для заданного волнового поля [2].

В качестве входных данных были использованы данные за 2010 год район Куршской косы, побережье Балтийского моря, на рисунке точка М - место замеров. Глубина в районе измерений достигает 30 метров.



Разложение на теоретические моды, заключается в решении задачи Штурма-Лиувилля вида:

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} + \frac{N^2}{c^2}\Phi = 0 \quad \Phi(0) = \Phi(H) = 0.$$

Где Φ - мода, N - частота Вайсяля-Брента, c – скорость, z – глубина. Частоту Вайсяля-Брента находим из плотности.

Для разложения волнового поля считаются коэффициенты разложения в обобщенный ряд Фурье

$$u(z, t) = \sum_n A_n(t) \cdot \frac{d\Phi_m}{dz}(z)$$

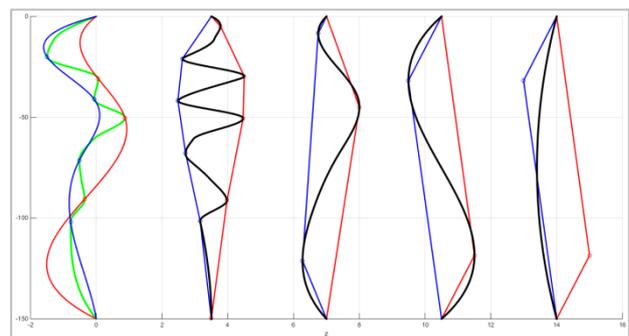
Где коэффициенты A_n были найдены по формуле:

$$A_n(t) = \frac{\int_0^H u(z, t) \cdot \frac{d\Phi_m}{dz}(z) \cdot N^2(z) dz}{\int_0^H \left(\frac{d\Phi_m}{dz}(z) \right)^2 \cdot N^2(z) dz}$$

Вычисление эмпирических мод представляет собой итерационную вычислительную процедуру. Пример разложения на теоретические моды в конкретный момент времени представлен на рисунке.

В заключение дается сравнительный анализ полученных теоретических и эмпирических мод.

По данной работе был создан программный комплекс для идентификации теоретических и эмпирических вертикальных бароклинных мод в волновых полях в стратифицированных бассейнах на языке Matlab script.



ЛИТЕРАТУРА.

1. A. Rybin Spatial structure of velocity field in the layered fluid induced by internal solitary wave/ O.Kurkina, E. Rouvinskaya, A. Kurkin, 2017.
2. В. А. Давыдов, А. В. Давыдов Очистка геофизических данных от шумов с использованием преобразования Гильберта-Хуанга, 2010.

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЕ МАГНИТНОЕ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ В ГЕОМАГНИТНОМ ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ: МЕХАНИЗМ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ЭФФЕКТЫ

А.П. Лихачев¹, Е.В. Губанов¹, С.А. Медин^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская обл.,

В исследованиях динамики магнитосферы важное место занимает проблема пересоединения магнитных силовых линий в геомагнитном хвосте – резкого изменения топологии магнитного поля в относительно тонком слое между областями с противоположно направленным вектором магнитного поля. Интерес к этому явлению обусловлен его определяющей ролью в развитии магнитных бурь и суббурь – основных причин космической «непогоды» на Земле. В ряду физических механизмов, влияющих на процесс пересоединения в магнитосфере, ведущую роль играют резистивные неустойчивости токового слоя, в частности, наиболее важная из них – тиринг-неустойчивость [1], развивающаяся при выполнении условия $Lu > 1$ (число Лундквиста $Lu = \mu \sigma v_a l$, где σ , $v_a = B(\mu\rho)^{-1/2}$, l – проводимость, альфвеновская скорость и характерный размер, соответственно).

В работе рассматривается влияние одного из главных параметров солнечного ветра – проводимости плазмы – на структуру магнитосферы и происходящие в ней процессы. В 2D МГД приближении решается задача об обтекании магнитосферы солнечным ветром в меридиональной плоскости. Полагается, что решение симметрично относительно продольной оси, параметры солнечного ветра с южным направлением межпланетного магнитного поля (ММП) задаются постоянными. Моделирование проводилось для двух значений проводимости плазмы σ_p – 10^{-6} См/м и 10^{-4} См/м. Эти два варианта решения имеют принципиально разный характер: при $\sigma_p = 10^{-6}$ См/м реализуется режим стационарной магнитной конвекции, при $\sigma_p = 10^{-4}$ См/м возникает квазипериодический режим (т.н. пилообразное событие – см., например, [2]). При скорости солнечного ветра 400 км/с и магнитном поле 10^{-9} Т период цикла составляет 4000 с. Именно этому варианту решения в работе уделяется основное внимание.

В результате пересоединения формируется магнитный остров (плазмод), который отрывается от диполя и сносится в ночном направлении. Каждый цикл (период) имеет три четко выраженные фазы: фазу роста, взрывную фазу и фазу восстановления (Рис. 1), которые коррелируют с временными изменениями открытого потока ММП и скорости пересоединения в ночной X-точке (Рис. 2). Начало цикла (и, соответственно, фазы роста) определяется минимумом открытого потока ММП и равенством скоростей пересоединения в дневных и ночной X-точках. Ночная X-точка отделяет дипольное магнитное поле и свободное ММП. В первых двух фазах растет магнитная энергия магнитосферы за счет увеличения открытого ММП. Фаза роста сменяется взрывной фазой в момент пересоединения, когда скорость пересоединения в ночной X-точке становится минимальной. Переход к фазе восстановления начинается в момент достижения максимальных значений скорости пересоединения в ночной X-точке и открытого потока ММП (Рис. 2). В фазе роста и взрывной фазе в ночном секторе диполя возбуждаются пульсации скорости и давления, распространяющиеся вниз по потоку. Газодинамические эффекты анализируются в их взаимосвязи с электродинамическими процессами.

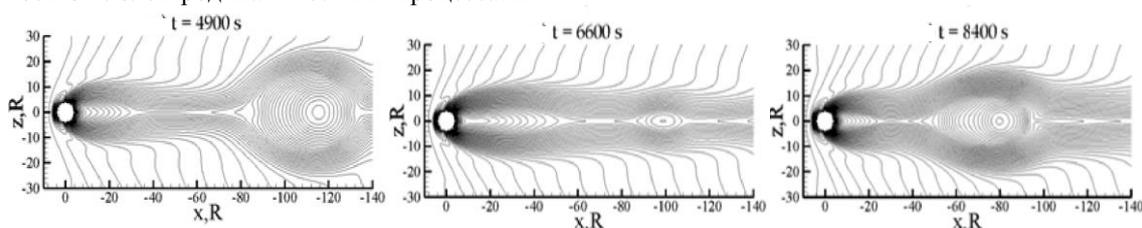


Рисунок 1. Магнитные силовые линии: t=4900с – фаза роста, t=6600с – взрывная фаза, t=8400с – фаза восстановления.

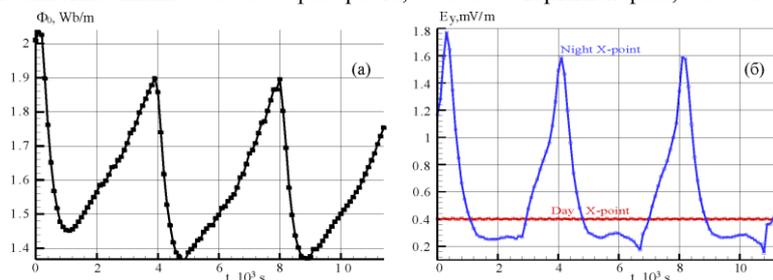


Рисунок 2. Временные профили открытого магнитного потока ММП (а) и скорости пересоединения в дневной и ночной X-точках (б), красная линия – дневная X-точка, синяя кривая – ночная X-точка.

1. Priest, E. R., and T. G. Forbes, Magnetic Reconnection: MHD Theory and Applications, Cambridge Univ. Press, New York, 2000
2. Huang C. S. et al. Periodic magnetospheric substorms: Multiple space based and ground-based instrumental observations // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2003. V. 108. C. 1411.

Вывод уравнения Эйлера для газа Чаплыгина из микродинамики

Лыков А.А., Малышев В.А.

МГУ им. М. В. Ломоносова, механико-математический факультет, Москва

Рассмотрим систему N частиц на прямой с взаимодействием

$$U = \sum_{1 \leq i < j \leq N} V(|x_j - x_i|), \quad (1)$$

где потенциал взаимодействие между частицами имеет вид

$$V(x) = \frac{\omega^2}{2} \begin{cases} \phi(x), & 0 < x \leq a - a_1, \\ (x - a)^2, & a - a_1 < x \leq a + a_1, \\ const, & x > a + a_1, \end{cases}$$

для произвольной гладкой функции $\phi(x)$, и $a = \frac{1}{N} > a_1 = \frac{r}{N} > 0$, $r < 1$ и $\omega = \omega'N > 0$. Начальные условия таковы

$$x_{k+1}(0) - x_k(0) = \frac{1}{N}X\left(\frac{k}{N}\right) > 0, \quad \dot{x}_{k+1}(0) - \dot{x}_k(0) = \frac{1}{N}V\left(\frac{k}{N}\right), \quad x_1(0) = 0, \quad \dot{x}_1(0) = v, \\ x_1(0) = 0, \quad \dot{x}_1(0) = v, \quad X(0) = X(1) = 1, \quad V(0) = V(1) = 0$$

для некоторых $v \in \mathbb{R}$ и $X, V \in C^4([0, 1])$.

Также рассмотрим уравнение Эйлера для газа Чаплыгина:

$$u_t + uu_y = -\frac{1}{\rho}p_y, \quad p = -\frac{1}{\rho}, \quad (2)$$

где $p = p(t, y)$ — давление, $u(t, y)$ — эйлерова скорость газа в точке y в момент t .

В работе [2] доказывается, что при соответствующем скейлинге динамика частиц с потенциалом (1) описывается уравнением Эйлера для газа Чаплыгина (2). Одним из ключевых моментов доказательства выступает понятие регулярности системы частиц. Мы называем систему регулярной, если в ней отсутствуют столкновения, т.е. $x_k(t) \neq x_j(t)$ для всех $t \geq 0$ и всех $k \neq j$. Заметим, что даже для простейшей системы с потенциалом (1) проверка этого свойства является нетривиальной задачей. В частности, мы доказываем следующую теорему:

Теорема. Для всех $t \geq 0, k = 1, \dots, N - 1$ имеет место

$$\frac{1 - \gamma}{N} \leq x_{k+1}(t) - x_k(t) \leq \frac{1 + \gamma}{N}$$

где константа γ зависит только функций X и V , что означает отсутствие столкновений между частицами.

При $N \rightarrow \infty$ мы получаем регулярную континуальную систему частиц [1] с траекториями $y(t, x)$, скоростями $u(t, y)$ и начальными условиями $y(0, x) = x, u(0, y) = v(x)$.

Стоит отметить, что газ Чаплыгина получил большую популярность в связи с исследованиями в космологии, в частности, в проблеме описания тёмной энергии и тёмной материи ([3,4,5,6,7]).

Список литературы

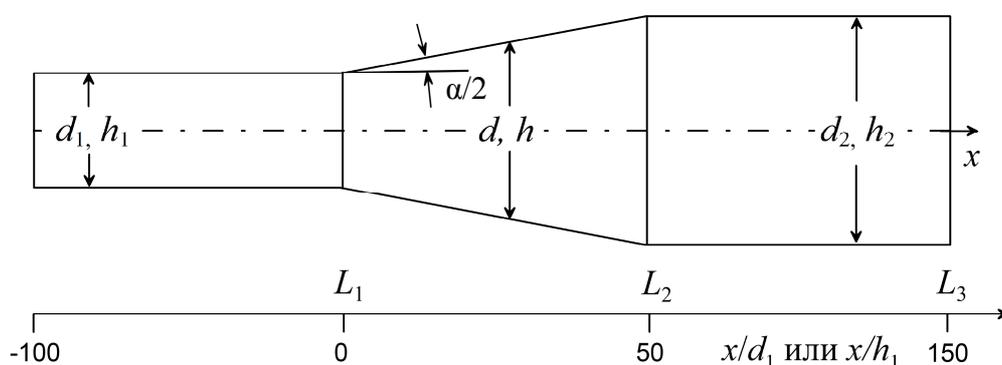
- [1] А. А. Лыков, В. А. Малышев, В. Н. Чубариков. Регулярные континуальные системы точечных частиц, I: Системы без взаимодействия. Чебышевский сборник, 2016, т. 17, № 3, с. 148–165.
- [2] A. A. Lykov, V. A. Malyshev. From the N Body Problem to Euler Equations. Russian Journal of Mathematical Physics, 2017, v. 24, № 1, p. 179-195.
- [3] J. C. Fabris, S. V. B. Goncalves, and P. E. de Souza. Density Perturbations in a Universe Dominated by the Chaplygin Gas. General Relativity and Gravitation, Vol. 34, No. 1, 2002.
- [4] Luis P. Chimento. Extended tachyon field, Chaplygin gas, and solvable k-essence cosmologies. Phys. Rev. D, Vol. 69, Iss. 12 — 15, 2004.
- [5] Ka Luen Cheung. Finite Propagation Speed and Finite Time Blowup of the Euler Equations for Generalized Chaplygin Gas. Advances in Theoretical and Applied Mathematics, v. 12, 1,51-63, 2017.
- [6] M. Salti, H. Yanar, O. Aydogdu. Logarithmic-corrected Ricci and modified Chaplygin gas dark energy models in fractal framework. The European Physical Journal Plus, 132, 5, 2017.
- [7] Subhra Bhattacharyaa, Shibaji Halderb, Subenoy Chakraborty. Evolving cosmic scenario in modified Chaplygin gas with adiabatic matter creation. Annals of Physics, Volume 388, 443–455, 2018.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОМ И КРУГЛОМ КАНАЛАХ С ДИФFUЗОРОМ

М.С. Макарова, В.Г. Лущик, А.И. Решмин
НИИ Механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Продольный градиент давления является параметром, который оказывает существенное влияние на турбулентное течение, приводя в пределе в случае положительного градиента давления при течении в диффузоре к его отрыву. В инженерной практике проточный тракт энергоустановок состоит из участков как постоянного, так и переменного сечения, в частности, и из диффузорных участков. Знание режима течения на этих участках проточного тракта имеет важное значение при определении гидравлических характеристик энергоустановок.

Рассмотрено течение в плоском и круглом каналах, имеющих участок с безотрывным диффузором, которому предшествует и за которым следует канал постоянного сечения. Рассмотрены диффузоры длиной 50 диаметров (высот) входного канала с углами раскрытия $\alpha=1^\circ, 3^\circ$ и 5° . В качестве рабочего тела принят воздух при давлении на входе в канал 0.1 МПа и температуре 300 К. Число Рейнольдса на входе, определенное по гидравлическому диаметру на входе в диффузор и среднерасходной скорости, составляло 20000.



Для решения задачи использовались уравнения неразрывности и движения в приближении узкого канала и трехпараметрическая дифференциальная модель турбулентности [1]. Проведенное в [2] расчетное исследование течения в круглом безотрывном диффузоре с малым углом раскрытия, выполненное с использованием модели турбулентности [1], показало, что расчетные профили скорости и напряжений Рейнольдса хорошо согласуются с измеренными в [2]. Это может служить доказательством правомочности использования модели турбулентности [1] при проведении численного исследования течения в безотрывных диффузорах.

Получены продольные и поперечные распределения интегральных и локальных характеристик течения: градиента давления, коэффициента трения, профили скорости, интенсивности турбулентности и напряжений Рейнольдса. Установлено, что перестройка течения и появляющийся в диффузоре положительный градиент давления приводят к росту турбулизации течения. Подтверждением этого является изменение интенсивности турбулентности и напряжений Рейнольдса, которые существенно возрастают в диффузоре. Показано, что при одинаковом угле раскрытия в круглом диффузоре коэффициент трения и интенсивность турбулентности существенно выше, чем в плоском диффузоре, и это превышение возрастает с увеличением угла раскрытия диффузоров.

Следует отметить, что принципиальное отличие процессов течения в плоском и в круглом диффузоре состоит в том, что в плоском диффузоре число Рейнольдса остается постоянным по всей длине диффузора, а в круглом диффузоре оно уменьшается обратно пропорционально диаметру диффузора по длине. Это сказывается на изменении относительных характеристик течения по длине диффузора, которые зависят от величины числа Рейнольдса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00115).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Лущик В.Г., Павельев А.А., Якубенко А.Е. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1978. № 3. С. 13-25.
2. Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Трифонов В.В. Турбулентное течение в круглом безотрывном диффузоре при числах Рейнольдса, меньших 2000 // Изв. РАН. МЖГ. 2011. № 2. С. 121-130.

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ГЕНЕРАЦИЮ ЗАВИХРЕННОСТИ ТАЙФУНОВ И ТОРНАДО

Маслов С.А.¹, Смирнов В.А.², Харчевский А.А.²

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

²Московский технологический университет (МИРЭА)

Предложен механизм генерации завихренности тайфунов (тропических ураганов) и торнадо (смерчей) за счет турбулентности атмосферы. С использованием вейвлет-анализа реальных атмосферных вихрей показано, что вклад турбулентных пульсаций составляет до 35% от вклада растяжения вихревых линий. Турбулентное движение воздуха в атмосферных вихрях описывается с использованием уравнений неразрывности и Навье – Стокса, причем для характеристик потока справедливо разложение на среднюю и пульсационную составляющие, где осреднение проводится по времени малому по сравнению со временем жизни атмосферного вихря (тайфуна или торнадо) и большому в сравнении с периодом турбулентных пульсаций. Предполагается, что характерный размер пульсаций r' существенно меньше пространственного масштаба R среднего потока [1]. На основе описанных предположений получено уравнение для средней завихренности:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{U} \times \Omega) + \langle \text{rot}(\mathbf{u}' \times \omega') \rangle + \frac{\mu}{\rho} \Delta \Omega, \quad (1)$$

где \mathbf{U} и \mathbf{u}' - средняя и пульсационная скорости, Ω и ω' - средняя и пульсационная завихренности, треугольные скобки обозначают операцию осреднения. Первый член правой части (1) отражает влияние растяжения вихревых линий, второй – воздействие атмосферной турбулентности. Слагаемое $\text{rot}(\mathbf{U} \times \Omega)$ имеет порядок величины $U\Omega/R$, $\langle \text{rot}(\mathbf{u}' \times \omega') \rangle \sim u'\omega'/r'$, $\Omega \sim U/R$, $\omega' \sim u'/r'$. Кроме того, характерную пульсационную завихренность можно оценить как $\omega' \sim 2\pi v'$, где частота флуктуаций v' находится посредством вейвлет-анализа [2] данных натуральных наблюдений. Следовательно, относительный вклад турбулентности в генерацию завихренности тайфунов и торнадо приближенно определяется величиной

$$N \sim \frac{4\pi^2 R^2 v'^2}{U^2}. \quad (2)$$

Для оценки частоты пульсаций проведено сравнение частотно-временной эволюции атмосферного давления на земной поверхности в следующих типичных случаях атмосферных вихрей: торнадо [3] (Пратт, Канзас, США, 07.05.2002), тайфунов Айрин [4] (15 – 29.08.2011, США) и Андреа [5] (06.2013, США). В дальнейшем для обозначения характеристик торнадо используем индекс «1», параметров ураганов Айрин и Андреа – соответственно «2» и «3». Вейвлет-анализ показывает, что характерная частота колебаний давления, а следовательно, и турбулентных пульсаций завихренности, для торнадо в Канзасе имела порядок $v'_1 \sim 1 \cdot 10^{-2}$ Гц (рис. 1), для урагана Айрин $v'_2 \sim 5 \cdot 10^{-5}$ Гц, в тайфуне Андреа $v'_3 \sim 2 \cdot 10^{-5}$ Гц. По оценкам [3 – 5], максимальные азимутальные скорости $U_1=31$ м/с, $U_2=54$ м/с, $U_3=18$ м/с радиус ядра торнадо $R_1 \sim 250$ м, радиусы глаза тайфунов $R_2 \sim 100$ км, $R_3 \sim 50$ км. Из (2) получаем, что для торнадо в Канзасе вклад турбулентности $N_1 \sim 0.25$, для тайфунов соответственно $N_2 \sim 0.34$, $N_3 \sim 0.18$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-31-00456 мол_a)

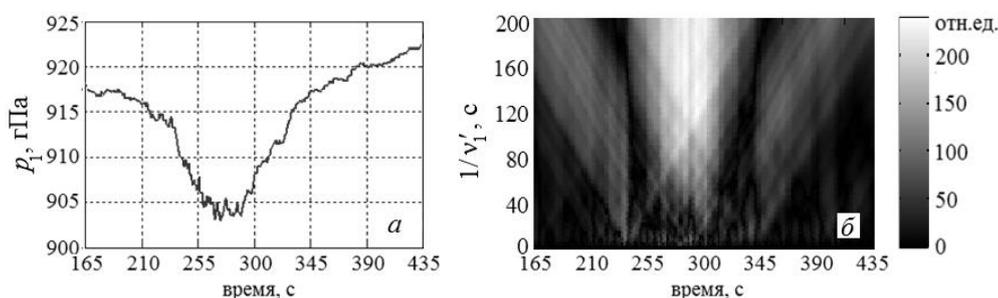


Рис. 1. Эволюция давления в торнадо (Пратт, 07.05.2002) (а) и вейвлет-спектр флуктуаций давления (б).

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсеньев С.А., Бабкин В.А., Губарь А.Ю., Николаевский В.Н. Теория мезомасштабной турбулентности. Вихри атмосферы и океана / Под ред. Г.С. Голицына. М.; Ижевск: РХД, 2010.
2. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: РХД, 2001.
3. Samaras T.M., Lee J.J. Pressure measurements within a large tornado <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/74267.pdf>
4. Hurricane Irene August 26 – 27, 2011. <http://www.weather.gov/mhx/Aug272011EventReview>
5. Tropical Storm Andrea Event Summary. http://www.weather.gov/tae/event-201306_andrea

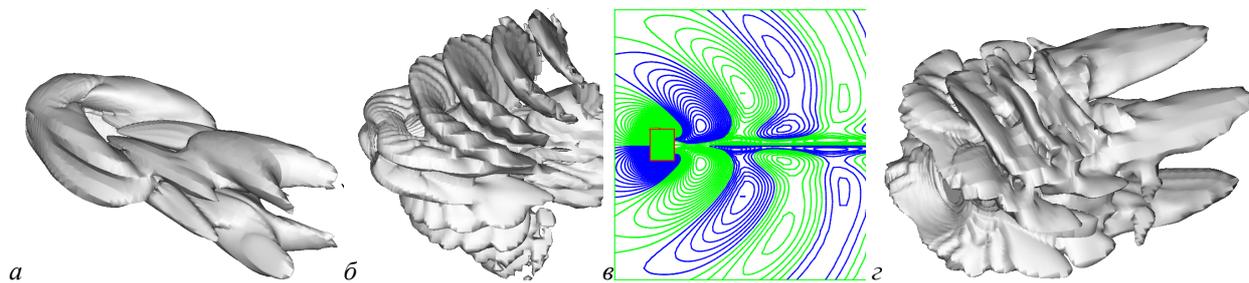
ГРАВИТАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ, КАК ГЕНЕРАТОР ВНУТРЕННИХ ВОЛН НАД МЕСТОМ СТАРТА ТЕЛА В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

П.В. Матюшин

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

В связи с необходимостью детального описания структуры океанических и атмосферных течений, создаваемых движущимися объектами, разработан программный комплекс математического моделирования пространственных отрывных течений линейно стратифицированной по плотности несжимаемой вязкой жидкости около диска с диаметром d , равномернодвигающегося в горизонтальном направлении вдоль своей оси симметрии Z со скоростью U . На вычислительных ресурсах Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН) решалась система уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска при помощи метода МЕРАНЖ с явной гибридной конечно-разностной схемой для аппроксимации конвективных членов уравнений (второй порядок аппроксимации, монотонность) [1].

Поля скоростей всех рассчитанных течений имеют горизонтальную плоскость симметрии $Y-Z$ [2-3]. Поэтому для определенности рассмотрим в дальнейшем только верхнее полупространство над плоскостью $Y-Z$ ($X \geq 0$). В результате проведенных расчетов впервые был исследован нелинейный пространственный универсальный механизм формирования гравитационных внутренних волн над местом M импульсного старта тела в горизонтальном направлении. Через каждый промежуток времени, равный половине периода плавучести жидкости T_b , в силу гравитационной неустойчивости над точкой M формируется небольшое деформированное вихревое кольцо, которое со временем постепенно увеличивается в размерах и сдвигается вниз к точке M [2]. Левые полукольца заполняют верхнее полупространство над следом (рис. б, з), а правые остаются у точки M , утончаясь со временем под давлением новорожденных правых полуколец, давящих на них сверху. Каждая пара левых полуколец образует одну волну (рис. б, в) [2-4]. Этот универсальный механизм работает при любых внутренних числах Фруда $Fr = U \cdot T_b / (2\pi \cdot d)$. Так при $U = 0$ установившимся течением будут две тонкие горизонтальные конвективные ячейки у верхней и нижней точек тела [5]. В силу того, что длина волны λ равна $2\pi \cdot d \cdot Fr$, а внешняя граница расчетной сетки удалена от диска вдоль Z на $25 \cdot d$, то при $Fr > 10$ мы не заметим этих длинных волн ($\lambda > 20\pi \cdot d$) маленькой амплитуды. А при $Fr = 0.5$ $\lambda = \pi \cdot d$ и в расчетной сетке умещается 8 волн, первые две из которых представлены на рис. б-в.



На рис. а, б, и в показаны три пространственные вихревые структуры (изоповерхности $\beta = 0.02, 0.01, 0.02$) течений, возбуждаемых движением диска (толщиной $H = 0.76 \cdot d$) в жидкости в горизонтальном направлении вдоль своей оси симметрии Z при $Fr = 1, 0.5, 0.1$ для числа Рейнольдса $Re = U \cdot d / \nu = 50$, где ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, β – мнимая часть собственных значений тензора градиента скорости [6]. На рис. в показаны изолинии возмущения солёности S с шагом 10^{-5} в вертикальной плоскости $X-Z$ при $Fr = 0.5, Re = 50$. При $X \geq 0$ более темные изолинии соответствуют $S < 0$ (полуволны впадин), а более светлые – $S \geq 0$ (полуволны гребней). Две «клешни» в правом краю рис. а – это первая полуволна гребней у оси Z , которая с уменьшением Fr приближается к диску, срастается с ним при $Fr = 0.45$ и создает у плоскости $Y-Z$ слой течения с нулевой вертикальной компонентой вектора скорости.

ЛИТЕРАТУРА.

1. О.М. Белоцерковский, В.А. Гуцин, В.Н. Коньшин. Метод расщепления для исследования течений стратифицированной жидкости со свободной поверхностью. ЖВМ и МФ, 1987, 27 (4), 594-609.
2. П.В. Матюшин. Эволюция течения стратифицированной вязкой жидкости при начале движения тела. Научный журнал «Процессы в геосредах», 2016, 4 (9), 333-343.
3. П.В. Матюшин. Классификация режимов течений стратифицированной вязкой жидкости около диска. Научный журнал «Процессы в геосредах», 2017, 4 (13), 678-687.
4. В.А. Гуцин, П.В. Матюшин. Моделирование и исследование течений стратифицированной жидкости около тел конечных размеров. Журнал вычислит. математики и математич. физики, 2016, 56 (6), 1049-1063.
5. В.Г. Байдулов, П.В. Матюшин, Ю.Д. Чашечкин. Эволюция течения, индуцированного диффузией на сфере, погруженной в непрерывно стратифицированную жидкость. Известия РАН, МЖГ, 2007, 2, 130-143.
6. M.S. Chong, A.E. Perry, B.J. Cantwell. A general classification of three-dimensional flow field, Phys. Fluids, 1990, A 2, 765-777.

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ПРОФИЛЯ ВИХРЕВЫМИ МЕТОДАМИ

Е.А.Михайлов¹, И.К.Марчевский²

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, факультет
«Фундаментальные науки», Москва

В основе вихревых методов вычислительной гидродинамики, используемых для моделирования обтекания профиля несжимаемым потоком, лежит высказанная еще в начале прошлого века Н.Е. Жуковским мысль о том, что обтекаемый профиль можно заменить вихревым слоем, оказывающим эквивалентное воздействие на поток [1]. Как правило, в вихревых методах задачу поиска неизвестной интенсивности вихревого слоя сводят к решению сингулярного граничного интегрального уравнения типа Фредгольма первого рода, однако в работах [2, 3] развит альтернативный подход, позволяющий сводить задачу к граничному интегральному уравнению второго рода с ограниченным (для случая гладкого профиля) ядром:

$$\frac{1}{2\pi} \int_L K(\vec{x}, \vec{\xi}) \gamma(\vec{\xi}) dl_{\xi} - \frac{1}{2} \gamma(\vec{x}) = f(\vec{x}), \quad \text{где } K(\vec{x}, \vec{\xi}) = \frac{(\vec{x} - \vec{\xi}) \cdot \vec{n}(\vec{x})}{|\vec{x} - \vec{\xi}|^2},$$

$\gamma(\vec{x})$ – искомая интенсивность вихревого слоя; $f(\vec{x})$ – известная функция, зависящая от формы профиля, скорости набегающего потока и распределения завихренности в области течения; $\vec{n}(\vec{x})$ – орт внешней нормали к профилю в соответствующей точке.

В простейшем случае отсутствия вихревого следа правая часть имеет вид

$$f(\vec{x}) = -\vec{V}_{\infty} \cdot \vec{\tau}(\vec{x}),$$

где \vec{V}_{∞} – скорость набегающего потока; $\vec{\tau}(x)$ – орт касательной к профилю.

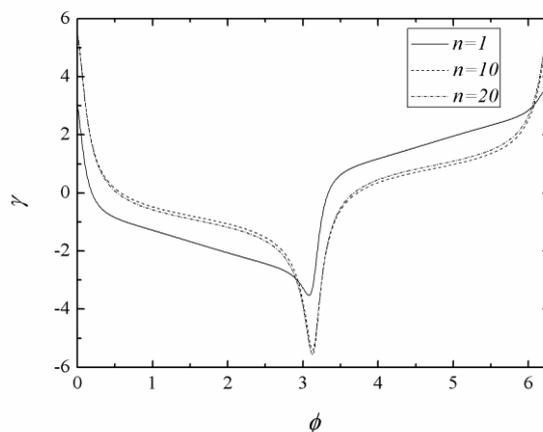


Рис. 1. Зависимость интенсивности вихря от угла обобщенной полярной системы координат для эллипса с соотношением полуосей 1:10.

Решение интегрального уравнения, как правило, сводится к его аппроксимации линейной системой, решаемой, в свою очередь методом Гаусса. В данной работе предлагается использовать для решения данной задачи метод последовательных приближений, известный в теории интегральных уравнений [4]. При этом, предложенный метод, как показывает практика, достаточно быстро сходится к решению, что позволяет значительно сэкономить вычислительные ресурсы.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Жуковский Н.Е. О присоединенных вихрях. // Тр. отделения физических наук Общества любителей естествознания. 1906. Т. 13, № 2. 14 с.
2. Кузьмина К.С., Марчевский И.К., Морева В.С. Определение интенсивности вихревого слоя при моделировании вихревыми методами обтекания профиля потоком несжимаемой среды // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 10. С. 20–34.
3. Кузьмина К.С., Марчевский И.К., Морева В.С., Рятин Е.П. Расчетная схема вихревых методов второго порядка точности для моделирования обтекания профилей несжимаемым потоком // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 73–80.
4. Волков В.Т., Ягола А.Г. Интегральные уравнения. Вариационное исчисление. М.: КДУ, 2008.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ МАССООБМЕНА.

В.В.Моденова

Факультет Вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Работа посвящена разработке математических моделей для решения задач разделения бинарных смесей газов. Экспериментально подтверждена высокая скорость установления адсорбируемого равновесия (при контакте газовой смеси с адсорбентом) поэтому обоснованным является использование приближенных моделей.

Исследовались процессы, протекающие в каскаде аппаратов позволяющих разделять бинарные смеси газов. При переходе от одного полуцикла к следующему в качестве начального распределения рассматривается распределение, установившееся в адсорбере к моменту их переключения. Заметим, что в одном из циклов основным фактором является равновесный фактор, в другом - диффузионный перенос, что позволило при математическом моделировании в аппаратах, работающих в разных режимах (сорбции и адсорбции) учитывать в одном диффузионный поток, и пренебрегать им в другом. Рассматриваемые модели качественно правильно характеризуют рассматриваемый процесс. При решении системы закон Дарси рассматривался как в линейной, так и в обобщенной форме, используя полуэмпирическую формулу Эргана. Особое внимание было уделено постановке начальных и граничных условий при переходе от одного полуцикла к другому. Оригинальный численно-аналитический подход позволил продвинуться в решении задач разделения бинарной смеси газов, приводящей к решению существенно нелинейных систем дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Общая модель решалась разностным методом с использованием итерационного процесса. Идентификация и установление границ применимости каждой из этих моделей – одна из важных задач рассматриваемого исследования. Целью работы являлась идентификация параметров при моделировании этих процессов. Предложен эффективный численно-аналитический алгоритм решения начально-краевой задачи для системы существенно нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

Актуальность рассматриваемой задачи обуславливается целым рядом ее практических применений.

КАВИТАЦИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ В РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ОБЛАСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЦИЛИНДРА ВДОЛЬ СТЕНКИ

А.А. Монахов, Н.В. Попеленская
Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова.

В жидкости практически всегда находится растворенный газ. Его состав и количество определяются свойством жидкости адсорбировать газ из окружающей среды, а также температурой жидкости и внешним давлением. При медленном изменении этих параметров равновесие между растворенным газом и внешней средой происходит за счет диффузии газа в ту или другую сторону. При движении жидкости может возникнуть условие для локального падения давления ниже давления растворенного газа, т.е. для возникновения газовой кавитации. Обычно кавитация наблюдается и исследуется при больших скоростях вращения на лопатках турбин, гребных винтах. Но более полувека назад было показано, что кавитацию можно наблюдать и при малых скоростях движения [1]. При этом числа Рейнольдса могут не превышать 1. Так при движении сферы или цилиндра в жидкости вдоль поверхности с малым зазором, перед линией минимального зазора возникает конфузурная область с поджатием потока, а за ней диффузная область с расширением, где происходит понижение давления. Такие условия часто возникают в различных инженерных приложениях: подшипники, прокатка. Образование двухфазной среды может существенно исказить планируемый технологический процесс. Поэтому знание давления в области возникновения кавитации имеет важное значение.

Экспериментально исследовалось течение между эксцентричными цилиндрами с малым зазором, при вращении внешнего цилиндра. Для измерения давления жидкости на поверхность внутреннего цилиндра в нем по радиусу было сделано небольшое отверстие, соединенное с датчиком давления MPXV7002DP. Внутренний цилиндр мог поворачиваться вокруг своей оси на небольшой угол, и таким образом, измерять давление в конфузурной и диффузорной областях, а также в кавитационном пузырьке. Как показали исследования, при уменьшении зазора между цилиндрами, в конфузурной области происходит понижение давления и падение локального давления. При понижении давления ниже давления растворенных газов, происходит выделение растворенных газов из жидкости. Газ собирается в области пониженного давления вдоль образующей внутреннего цилиндра в виде отдельных газовых пузырьков. Скорость движения и величина зазора взаимосвязаны. С увеличением зазора между цилиндрами, скорость их взаимного перемещения должна возрастать. Однако имеется предельный зазор, при превышении которого кавитация не возникает [2]. Первоначально, кавитация в виде отдельных газовых капель объяснялась модуляцией пониженного давления вдоль образующей. Более внимательное рассмотрение этого явления указало на причастность шероховатости, которая модулирует случайным образом величину зазора между цилиндрами, и, таким образом, изменяет давление в области кавитации. Возникший первоначально кавитационный пузырек имеет на своей поверхности заряд, который препятствует объединению последующих кавитационных пузырьков, с таким же зарядом. Заряд всегда возникает на поверхности раздела газ-жидкость.

Проведенные измерения давления жидкости на внутренний цилиндр показывают, что с уменьшением величины зазора между цилиндрами, возрастает понижение давления до величины давления растворенных газов и далее остается практически постоянной величиной, не зависящей от скорости движения цилиндра вдоль стенки. Это обстоятельство позволяет выработать критерий по измерению давления растворенных газов в жидкости [3]. Уменьшение зазора также приводит к смещению точки минимального давления к линии минимального зазора [4].

Определено влияние отношения диаметров внутреннего и внешнего цилиндров на размер и форму кавитационных пузырьков. Установлено, что увеличение размера внутреннего цилиндра, делает расширяющийся поток более плавным, похожим на течение между концентрическими цилиндрами. Это приводит к увеличению размера кавитационного пузырька в направлении вращения внешнего цилиндра и вдоль образующей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 17-01-00140-а, 16-05-00004-а и 18-08-00074-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Dowson D. Cavitation in lubricating films supporting small loads // Proc. Inst. Mech. Eng. Conf. Lubr. Wear. 1957. P. 93-99.
2. Monakhov A. A., Chernyavski V. M., Shtemler Yu, Bounds of cavitation inception in a creeping flow between eccentric cylinders rotating with a small minimum gap. //Phys. Fluids 25, 093102 (2013).
3. Монахов А. А. Исследование кавитации при движении цилиндрического тела вдоль стенки // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 3. С. 134–139.
4. Монахов А.А., Котелкин В.Д. Гидродинамика течения жидкости в зазоре между цилиндром и движущейся стенкой. //Изв.РАН. МЖГ. 2017. № 3. С. 81–87.

БИФУРКАЦИИ КОРАЗМЕРНОСТИ 2 В ЗАДАЧАХ КОНВЕКЦИИ С КРУГОВОЙ СИММЕТРИЕЙ

И. В. Моршнева

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Рассматриваются пересечения элементарных бифуркаций (бифуркации коразмерности 2) в динамических системах, инвариантных относительно линейного ортогонального действия группы $O(2)$. Примеры задач с такого рода круговой симметрией дают задачи о возникновении конвективных течений вязкой несжимаемой жидкости и жидкости с примесью, расположенной в бесконечном горизонтальном или вертикальном слое. Изучается случай, когда в спектре устойчивости основного течения имеются две пары чисто мнимых собственных значений.

Точке пересечения нейтральных кривых (точке пересечения бифуркаций) в задачах с круговой симметрией отвечает несколько независимых нейтральных мод. Когда параметры системы изменяются в малой окрестности такой точки, становится возможным сильное взаимодействие всех этих (точнее, слегка измененных) мод, которое описывается нелинейной системой амплитудных уравнений на центральном многообразии. Впервые системы амплитудных уравнений для задачи Куэтта-Тейлора с цилиндрической симметрией были построены в работах В. И. Юдовича (1986), G. Iooss, P. Chossat (1987) с помощью осреднения по быстрому времени и метода сведения на центральное многообразие. Вид амплитудных систем зависит от соотношений между волновыми числами, а также между частотами. Если не выполняется ни одно из резонансных соотношений, то система сильно упрощается, в ней остаются только обязательные резонансные слагаемые, которые присутствуют во всех резонансных системах. Впервые все возможные резонансные системы были получены для задач с цилиндрической симметрией В.И. Юдовичем и С.Н. Овчинниковой (2001).

В данной работе построены и изучены на инвариантных подпространствах резонансные амплитудные системы для задач с круговой симметрией. Показано, что в условиях общего положения возможно возникновение периодических решений типа бегущих волн и их нелинейных суперпозиций, а также возникновение квазипериодических решений. Получены явные выражения для асимптотик возникающих решений и для величин, определяющих характер их ветвления и устойчивость. Рассмотрено применение теории к задачам конвекции.

НОВЫЕ ДАННЫЕ О МЕХАНИЗМЕ ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Н.В. Никитин, В.О. Пиманов
Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Движение жидкости и газа в окружающей природе, а также в большом числе технических устройств происходит при больших скоростях, при которых реализуется турбулентный режим течения. Турбулентность характеризуется наличием случайных во времени и в пространстве пульсаций гидродинамических параметров, большим разбросом динамически важных масштабов вовлеченных в движение вихрей. Переход к турбулентности сопровождается, как правило, кардинальным изменением основных характеристик потока. Например, при течении вдоль твердой поверхностью происходит многократное повышение сопротивления трения. Существуют оценки, согласно которым до 20% всей вырабатываемой в мире энергии расходуется в конечном итоге на преодоление турбулентного трения в транспортных системах и в магистральных трубопроводах. Нет сомнений, что появление средств снижения турбулентного трения сулило бы в мировом масштабе невероятную по объему экономию энергии, повышение производительности огромного числа технических устройств, улучшение экологической обстановки. Поиск средств снижения турбулентного трения и, что более обще, поиск методов описания, предсказания и прогнозирования свойств турбулентных потоков активно ведется во многих странах.

Серьезный импульс исследование турбулентности получило с появлением мощных компьютеров и, в частности, многопроцессорных вычислительных систем. Появилась возможность численного моделирования турбулентных течений на основе решения основных уравнений движения вязкой жидкости – уравнений Навье–Стокса. Если в конце 20 века основным в численных расчетах было доказательство пригодности детерминированной системы уравнений Навье–Стокса для описания стохастических турбулентных процессов, то в наши дни прямое численное моделирование заслужило статус равноправного и надежного инструмента исследования турбулентности. Оно все шире применяется для расчета конкретных течений, а главное для изучения фундаментальных свойств турбулентности, недоступных для исследования более традиционными экспериментальными методами.

В докладе будут представлены последние результаты численного исследования механизма самоподдержания турбулентного течения вблизи твердой стенки. Удивительно, что, несмотря на почти полуторавековую историю изучения, явление пристенной турбулентности на сегодняшний день в значительной степени остается непонятым. Мы не можем теоретически обосновать даже простейшие, хорошо известные из экспериментов зависимости, такие, например, как турбулентный закон сопротивления в круглой трубе. Основная проблема состоит в том, что среднее течение в пристенных потоках оказывается устойчивым к малым возмущениям. Таким образом, передача энергии пульсационному движению является нелинейным процессом. Со времен первых экспериментов О.Рейнольдса известно, что турбулентность в трубах на пороге своего возникновения проявляется в виде локализованных в пространстве структур, разделенных участками ламинарного потока. Мы называем такие структуры турбулентными порывами. Турбулентный порыв может рассматриваться как своеобразная единица турбулентности, содержащая внутри себя все необходимые элементы для выживания и самоподдержания. В этом отношении турбулентный порыв является уникальным объектом для исследования. Турбулентный порыв адекватно реализуется в численных расчетах. Однако, несмотря на локализованность в пространстве, он все же остается чрезвычайно сложным для исследования из-за стохастичности происходящих внутри него процессов. Нам удалось численно реализовать решения уравнений Навье–Стокса в некотором смысле аппроксимирующие турбулентный порыв, однако обладающие гораздо более простой пространственно-временной структурой [1]. Благодаря этому мы смогли полностью изучить механизмы их самоподдержания, в частности, выявить способ передачи энергии от среднего течения к пульсационному [2]. Мы надеемся, что найденные нами механизмы ответственны за возникновение и поддержание турбулентности в пристенных течениях.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-01-00140-а).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Никитин Н.В., Пиманов В.О. Численное исследование локализованных турбулентных структур в трубах. Изв. РАН, МЖГ, №5, с.64-75, 2015.
2. Никитин Н.В., Пиманов В.О. О поддержании колебаний в локализованных турбулентных структурах в трубах. Изв. РАН, МЖГ, №1, с.68-76, 2018.

ГИБРИДНАЯ LST-RANS МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ.

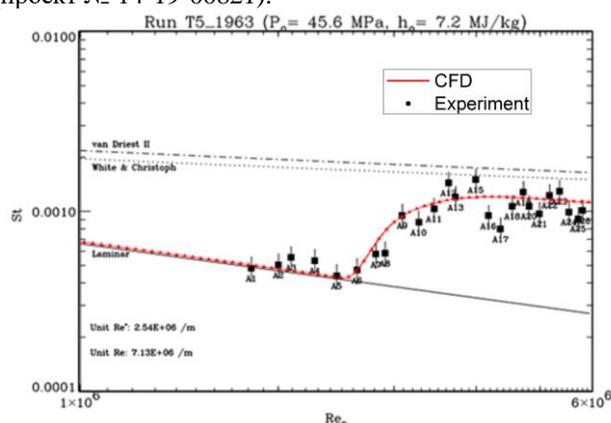
А.О. Образ^{1,2}, А.В. Федоров^{1,2}

¹Московский физико-технический институт

²Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Летные характеристики аэрокосмических систем значительно зависят от состояния пограничного слоя на обтекаемой поверхности. Такие параметры как коэффициенты трения и теплоотдачи существенно различны для ламинарных и турбулентных пограничных слоев. При крейсерском режиме полета на гладких поверхностях обычно реализуется следующая картина течения. Вблизи передней кромки течение ламинарно. В определенном сечении пограничный слой теряет устойчивость и в нем начинают развиваться неустойчивости, которые экспоненциально нарастают вниз по потоку – эта стадия хорошо описывается линейной теорией устойчивости (LST-Linear Stability Theory). Далее вниз по потоку нелинейные процессы приводят к возникновению развитого турбулентного течения. Таким образом, имеется три характерных области течения: ламинарная, переходная и турбулентная. В настоящее время в инженерной практике часто для моделирования таких течений применяются RANS-модели (Reynolds Averaged Navier Stokes). При этом переходная область течения не моделируется или моделируется полуэмпирически на базе корреляций с известными экспериментальными данными. Такой подход не является универсальным и физически обоснованным. В данной работе представлена новая модель расчета перемежаемости переходного пограничного слоя, основанная на линейной теории устойчивости и e-N методе [1]. Для вычисления коэффициента перемежаемости используется функция темпа рождения турбулентных пятен [2]. Данная функция вычисляется на основе характеристик волновых пакетов неустойчивостей, вызывающих ламинарно-турбулентный переход (ЛТП). Эти характеристики наряду с линией начала ЛТП вычисляются на основе линейной теории устойчивости. Полученное распределение коэффициента перемежаемости используется для модификации модели турбулентности Спаларта-Аллмараса (SA-модель) в пакете программ HFlow, разрабатываемого совместно в ЦАГИ и МФТИ. Произведены расчеты ламинарно-турбулентных течений на канонических конфигурациях (плоская пластина и острый круговой конус в потоке под нулевым углом атаки) в широком диапазоне чисел Маха (от 0.04 до 6.93) и температурных факторов модели (отношения температуры стенки к температуре торможения потока в диапазоне от 0.07 до 1). Для всех рассмотренных случаев приводится сравнение расчетов коэффициентов трения и теплоотдачи с имеющимися экспериментальными данными в полетных условиях или малозумных аэродинамических трубах. При этом для большинства рассмотренных случаев ошибка предсказания указанных коэффициентов не превосходит 15%, в то время как для исходной SA-модели величина ошибки может достигать 100%. В качестве примера на рисунке представлено сравнение расчетного числа Стантона на поверхности конуса с экспериментальными данными [3].

Работа выполнена на базе Московского физико-технического института при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00821).



ЛИТЕРАТУРА.

1. W. O. Criminale, T. L. Jackson, and R. D. Joslin, *Theory and Computation of Hydrodynamic Stability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
2. R. Narasimha and S. Dhawan, "Some Properties of Boundary Layer Flow During the Transition from Laminar to Turbulent Motion," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 3, pp. 418–436.
3. A. Rasheed, "Passive Hypervelocity Boundary Layer Control Using an Ultrasonically Absorptive Surface," PhD Thesis, CalTech, 2001

О БЕЗМАШИННОМ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

А. Н. Осипцов¹, Г. М. Азанов², А. И. Алексюк²

¹НИИ механики МГУ, ²Механико-математический факультет МГУ, Москва

Безмашинным энергоделением газового потока называется такой процесс, при котором газовый поток, втекающий в некоторое устройство, преобразуется в два потока с заметно различающимися температурами торможения без совершения работы или подвода тепла из внешних источников. Наиболее известным устройством для газодинамического энергоделения является так называемая вихревая трубка Ранка–Хилша [1]. Такие вихревые трубки могут обеспечить разность температур торможения выходящих потоков в сотни градусов, однако имеют существенный недостаток, связанный с высокими потерями полного давления. Несмотря на большое число приближенных моделей вихревого эффекта Ранка, до сих пор отсутствует полное понимание физических механизмов безмашинного энергоделения газовых потоков, что затрудняет оптимизацию работы существующих энергоделяющих устройств и создание более эффективных устройств, основанных на новых схемах течения. Настоящая работа направлена на исследование нескольких перспективных схем организации течения и общих механизмов газодинамического энергоделения. Для иллюстрации основных механизмов энергоделения запишем уравнение переноса полной энтальпии для вязкого теплопроводного газа:

$$\frac{di_0}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla_j (\tau^{ij} v_i) + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$

Здесь τ_{ij} - тензор вязких напряжений, λ - коэффициент теплопроводности, остальные обозначения общеприняты. Видно, что изменение полной энтальпии (а, следовательно, и температуры торможения T_0) в жидкой частице связано с действием диссипативных механизмов (вязкости и теплопроводности), а также с нестационарностью течения. В стационарном течении невязкого нетеплопроводного газа полная энтальпия $i_0 = c_p T + V^2/2 = c_p T_0$ сохраняется вдоль линии тока (интеграл Бернулли) и энергоделение невозможно. В лекции рассмотрены примеры течений, в которых в процессе энергоделения существенную роль могут играть как эффекты теплопроводности, так и нестационарность потока. В первой части доклада обсуждаются пути повышения эффективности схемы энергоделения стационарного газового потока, предложенной в [2]. В этой схеме часть газа, втекающего в энергоделяющее устройство, проходит через сопло Лавалья и разгоняется до сверхзвуковой скорости. Далее, до- и сверхзвуковой потоки газа, имеющие одинаковые исходные параметры торможения и разделенные тонкой цилиндрической перегородкой, движутся в цилиндрическом канале. Вследствие теплообмена между до- и сверхзвуковыми потоками осредненные температуры торможения на выходе из устройства в этих потоках могут различаться на несколько процентов. Основное преимущество такой схемы - малые потери полного давления. Эффект энергоделения в данном случае обусловлен теплообменом между потоками газа, имеющими существенно различные скорости. В случае теплоизолированной пластины, разделяющей течения в до- и сверхзвуковых пограничных слоях, температура восстановления на различных сторонах пластины может заметно различаться. Соответственно, при замене теплоизолированной пластины теплопроводной перегородкой происходит теплообмен между разделенными течениями, что приводит к появлению разности осредненных температур торможения в газе, прошедшем до- и сверхзвуковые пограничные слои. В докладе представлены результаты параметрических численных расчетов течения в до- и сверхзвуковом ламинарных пограничных слоях, разделенных теплоизолированной, а также теплопроводной плоской стенкой. Показано, что для течений чистого газа эффективность энергоделения может быть существенно повышена (разность средних температур торможения в потоках по обе стороны пластины, отнесенная к исходной температуре торможения может достигать 7%) при использовании смесей газов с малыми числами Прандтля ($Pr \sim 0.2$). Исследована возможность резкого повышения эффективности энергоделения за счет примеси жидких капель в сверхзвуковом пограничном слое. Рассмотрены режимы течения с наличием и отсутствием испарения капель. На основании численных расчетов в рамках модели двухфазного пограничного слоя показано, что для нормальных газов (с числами Прандтля, как у воздуха) присутствие даже очень малых (порядка процентов) массовых концентраций жидкой конденсированной фазы в высокоскоростном пограничном слое может приводить к значительному снижению температуры восстановления на адиабатической стенке и резкой (до 10%) интенсификации процесса энергоделения в случае теплопроводной стенки [3-4]. Во второй части доклада, на примере задачи поперечного обтекания круглого цилиндра сжимаемым вязким газом в режиме периодического схода вихрей в ближний след, исследуется влияние нестационарности

течения на процесс энергоразделения. На основе прямого численного решения двумерных уравнений Навье–Стокса для чисел Маха ≤ 0.6 и чисел Рейнольдса $\leq 10^3$ исследована динамика зон повышенной и пониженной температуры торможения в ближнем следе за цилиндром [5]. Подтвержден и объяснен парадоксальный экспериментальный факт снижения равновесной температуры поверхности адиабатического цилиндра вблизи задней критической точки до температур ниже статической температуры набегающего потока [6]. Проведен детальный анализ роли различных диссипативных механизмов, а также нестационарности течения на распределение осредненной по времени температуры торможения газа в ближнем следе. Сформулированы некоторые идеи о возможности управления процессом энергоразделения в нестационарных газовых потоках. Работа поддержана грантом РФФ № 14-19-00699.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eiasma-ard S., Promvonge P. Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes // Renewable and sustainable energy reviews. 2008. V. 12. N7. P. 1822-1842.
2. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35. №1. С. 157-159.
3. Азанов Г.М., Осипцов А.Н. Влияние мелких испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки в сжимаемом двухфазном пограничном слое // Изв РАН. МЖГ. 2016. №4. С. 67-78.
4. Azanov G.M., Osipsov A.N. The efficiency of one method of machineless gasdynamic energy stratification in a gas flow // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 106. P. 1125-1133.
5. Aleksyuk A.I., Osipsov A.N. Direct numerical simulation of energy separation effect in the near wake behind a circular cylinder // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 119. P. 665-677.
6. Eckert E., Weise W., Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angeströmter unbeheizter Körper // Forschung im Ingenieurwesen. 1942. V 13. N6. P. 246-254.

ВЛИЯНИЕ ПОДВОДЯЩЕГО ТРУБОПРОВОДА НА КАВИТАЦИОННЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ, ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ СТРУЙ

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

Научно исследовательский институт механики МГУ им. Ломоносова, Москва 119192, Россия

Рассматривается задача о возникновении кавитационных автоколебаний при течении жидкости в магистрали с двумя сопротивлениями: первое сопротивление кавитатор, за которым образована искусственная вентилируемая каверна со средним давлением большим атмосферного, через второе сопротивление происходит истечение жидкости и газа в атмосферу. В экспериментах на выходе использовалась либо щель (течение из-под щита), либо сопло Войцеховского. Исследования показали, что возникновение различных мод колебаний связано с взаимодействием двух колебательных систем различной природы – гидродинамической (каверна) и акустической (подводящая труба), частоты автоколебаний в основном определяются свойствами каверны, а также условиями истечения в атмосферу. Оказалось, что скорость распространения волн вдоль каверны близка к скорости на границе каверны невозмущенного стационарного течения. Приводятся экспериментальные данные, в том числе по частотным характеристикам, подтверждающие этот факт. Резонансное взаимодействие колебательных систем различной природы объясняет сильный масштабный эффект, так как гидродинамические колебания зависят от скорости течения, а акустические практически не зависят (скорость распространения акустических волн много больших скорости течения). Более того, эксперименты показывают, что свойства напорного трубопровода влияют на моду кавитационных автоколебаний (при одинаковых условиях наблюдалось до 4-х частотных мод). Кроме того, оказалось, что изменение объема каверны может привести к изменению моды колебаний (ранее было получено, что с ростом объема уменьшается интенсивность автоколебаний).

Были проведены опыты с истечением в атмосферу через экспоненциальное сопло (Войцеховского) с различной шириной выходного сечения. Показано, что при наличии сопла автоколебания не исчезают, а их интенсивность растет с уменьшением выходного сечения (до некоторой величины). Впрочем, подобная закономерность наблюдается и при уменьшении ширины выходной щели. Таким образом, имеется перспектива для использования кавитационных автоколебаний для создания пульсирующих высокоскоростных струй.

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

ИЗБРАННЫЕ ЗАДАЧИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

А.Г. Петров

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

Предлагается единый подход к исследованию задач устойчивости стационарных движений жидкости. Он заключается в выводе динамических уравнений в форме Лагранжа, применение к ним метода игнорирования циклической координаты, определение стационарных течений и построение функции Ляпунова для анализа их устойчивости. В качестве примеров решаются следующие задачи.

1. Определение стационарной формы жидкого цилиндра с поверхностным натяжением в плоскопараллельном потоке жидкости. Исследование ее устойчивости.

2. Определение стационарной формы капиллярных волн и исследование их устойчивости.

3. Определение фигур равновесия вращающейся гравитирующей массы и исследование их устойчивости. Осесимметричные и неосесимметричные формы равновесия и их устойчивость.

4. Определение формы вращающейся жидкой капли и исследование ее устойчивости.

Осесимметричные и неосесимметричные формы равновесия и их устойчивость.

5. Развитие неустойчивости свободных и вынужденных нелинейных колебаний газового пузырька в жидкости при резонансе радиальных и деформационных колебаний. Модель резонансного дробления газовых пузырьков в жидкости при малых энергетических затратах на подачу переменного внешнего поля давления.

6. Решение задачи Капицы об устойчивости цилиндра, вращающегося в ограниченном объеме жидкости.

Решения большинства рассмотренных задач представлены в работах автора.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-01-00901).

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров А.Г. Аналитическая гидродинамика. Часть 1. Идеальная несжимаемая жидкость. ЛЕНАНД, 2016. 362 с.

2. Петров А.Г. Об устойчивости жидкого цилиндра в плоскопараллельном потоке идеальной жидкости // ПММ. Том 80. Вып. 3, 2016. С. 366-374.

3. Петров А.Г. Об устойчивости капиллярных волн конечной амплитуды // ПММ. Том 81. Вып. 1, 2017. С. 42-47.

4. Вановский В.В., Петров А.Г. Пружинная аналогия свободных и вынужденных нелинейных колебаний газового пузырька в жидкости при резонансе // ПММ Том 81. Вып. 4, 2017. С. 462-470.

РАЗВИТИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ. МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗАВИХРЕННОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Л.И. Петрова

МГУ им. М.В. Ломоносова, ф-т Вычислительной математики и кибернетики, Москва

Анализ уравнений законов сохранения энергии, количества движения, момента количества движения и массы, проведенный с помощью кососимметричных дифференциальных форм, показывает, что развитие неустойчивости в материальных системах (сплошных средах) связано с некоммутативностью законов сохранения, которая приводит к появлению внутренних сил и возникновению неравновесности. В данной работе такое исследование проведено для газодинамической системы, описываемой уравнениями Эйлера и Навье-Стокса. Из уравнений законов сохранения, образующих системы уравнений Эйлера и Навье-Стокса, получается эволюционное соотношение, которое описывает процесс развития газодинамической неустойчивости и возникновения волн, вихрей, турбулентных пульсаций и других образований.

В работе показаны особенности численного моделирования неравновесных течений, которые обусловлены скрытыми свойствами уравнениями Эйлера и Навье-Стокса. Из эволюционного соотношения следует, что уравнения Эйлера и Навье-Стокса обладают двойными решениями: на неинтегрируемом, касательном, многообразии и на интегральных структурах. Переход от решений первого типа ко второму описывает процесс возникновения завихренности или турбулентности, что связано с переходом газодинамической системы от неравновесного состояния к локально-равновесному. Показано, что описать такие процессы можно только с помощью двух систем координат или решая уравнения одновременно численно и аналитически.

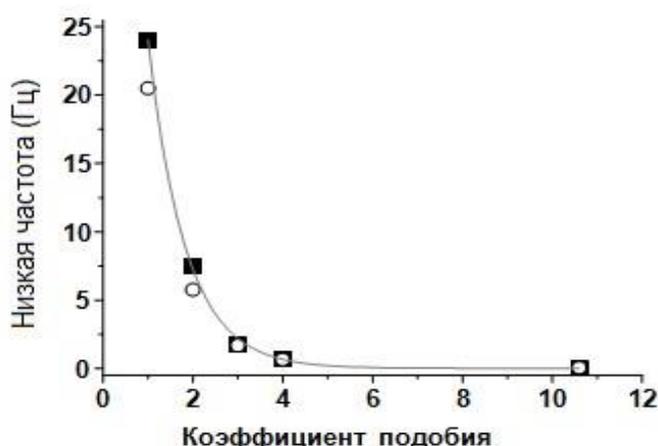
ЭВОЛЮЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВИХРЯ В ВЯЗКОМ ТЕПЛОПРОВОДНОМ ГАЗЕ

Т.А. Петрова, Ф.В. Шугаев

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва

Построена и применена новая процедура нахождения осциллирующих решений системы уравнений Навье-Стокса для кругового цилиндра, опирающегося на плоскость в сжимаемом вязком теплопроводном газе в приближении малой начальной завихренности, использующая сетки Коробова для вычисления кратных интегралов [1]. Показано, что благодаря диффузии завихренности возникает генерация звука одиночным цилиндрическим вихрем. Определен акустический спектр и собственные частоты такого акустического излучения для различных параметров вихрей.

Обнаружено, что для плотности и давления имеют место высокочастотные осцилляции, модулированные низкими частотами и что значения собственных частот зависят только от начальных геометрических размеров вихревого цилиндра и не зависят от интенсивности начальной завихренности. Показано также, что собственные частоты экспоненциально уменьшаются при увеличении геометрического коэффициента подобия цилиндра (см. рисунок).



Низкочастотные колебания. Зависимость собственных частот от геометрического коэффициента подобия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрова Т.А., Шугаев Ф.В. Частота акустического излучения цилиндрического вихря // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2015. — № 4. — С.31–35.

О СКОРОСТИ РОСТА ВОЗМУЩЕНИЙ В ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ КУЭТТА

Д.Е. Пивоваров, Н.В. Никитин
Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Проведено численное исследование эволюции возмущений в развитом турбулентном течении Куэтта в плоском канале при числах Рейнольдса от $Re=400$ до $Re=2100$. Трехмерные уравнения Навье–Стокса с условиями периодичности в двух однородных пространственных направлениях решаются численно конечно-разностным методом [1]. Результаты расчетов развитых турбулентных течений хорошо согласуются с имеющимися в литературе данными. Рассчитанные установившиеся турбулентные течения используются затем в качестве основных течений для изучения процесса развития на их фоне возмущений. Для этого уравнения Навье–Стокса для возмущений решаются параллельно с уравнениями для основного течения. В согласии с результатами предыдущих исследований [2,3] показано, что амплитуда малых возмущений растет в среднем экспоненциально по времени, что отвечает наличию, по меньшей мере, одного положительного показателя Ляпунова в хаотических системах.

Ляпуновский спектр в турбулентном течении Куэтта рассчитывался ранее в [4]. При этом было рассмотрено минимальное число Рейнольдса $Re=400$ в минимально возможной расчетной области. Вычисленное в [4] значение старшего показателя Ляпунова $\lambda_1^+ = 0.007$ оказалось в три раза меньшим, чем оценки $\lambda_1^+ \approx 0.021$, полученные в [2,3] на основании анализа турбулентных течений Пуазейля в круглой трубе и плоском канале. В качестве возможного объяснения полученного расхождения авторы [4] предполагают особенность течения Куэтта и малость числа Рейнольдса. Оба эти предположения противоречат выводам работ [2,3] об универсальности λ_1^+ (т.е. независимости от числа Рейнольдса и конкретного вида течения) для класса пристенных турбулентных течений.

Предположения работы [4] опровергаются результатами наших расчетов. Малость λ_1^+ объясняется малостью размеров расчетной области, использовавшейся в [4]. При увеличении пространственных периодов скорость роста малых возмущений стремится к универсальному значению $\lambda_1^+ \approx 0.021$, полученному в [2,3] даже при минимальном $Re=400$. Близкие значения λ_1^+ получаются и при больших Re . Таким образом нами подтверждены выводы работ [2,3] об универсальности λ_1^+ для пристенных турбулентных течений по крайней мере для рассмотренного диапазона низких чисел Рейнольдса.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-01-00140-а).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Nikitin N. Finite-difference method for incompressible Navier-Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates. *J. Comp. Phys.*, 217(2), 759-781, 2006.
2. Nikitin N. On the rate of spatial predictability in near-wall turbulence. *J. Fluid Mech.*, 614, 495-507, 2008.
3. Никитин Н.В. О скорости роста возмущений в пристенных турбулентных течениях. *Изв. РАН, МЖГ*, №5, с.27-32, 2009.
4. Inubushi, M., Takehiro, S-I, Yamada, M. Regeneration cycle and the covariant Lyapunov vectors in a minimal wall turbulence. *Phys. Rev. E*, 92, 023022, 2015.

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Р.А. Плавник, И.Н. Завьялов, Е.В.Пляшков

Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

В настоящее время имеются крупные запасы углеводородов, извлечение которых требует развития нетрадиционных методов добычи, одним из которых является метод кислотной обработки пласта. Суть метода заключается в закачке в пласт кислот способных растворять часть скелета и создавать высокопроницаемые каналы. Однако в настоящий момент процесс фильтрации с изменением фазового состава фильтрующихся компонент из-за химических превращений изучен мало.

Ранее было обнаружено, что фильтрационный изотермический процесс с выделением газовой фазы может быть нестабильным [1,2]. При этом фильтрация окислителя происходит волнами, названными «вторичными волнами окисления».

Целью данной работы является лабораторное исследование зависимости частоты и амплитуды вторичных волн окисления от градиента давления вызывающего фильтрацию. Для проведения экспериментальной работы использовалась плоская ячейка, образованная двумя прозрачными пластинами из поликарбоната с внутренним пространством размерами 350x160x15 мм. В верхней части ячейки установлены выходы трубок, соединенных с перистальтическим насосом, и система поддержания постоянного давления из тонких трубочек. Вдоль ячейки располагаются 15 датчиков давления с шагом 20 мм. В начале эксперимента ячейка заполнялась стеклобисером, смешанным с восстановителем (пищевой содой), после чего смесь насыщалась минеральным маслом. Далее через подающую трубку закачивался окислитель (раствор лимонной кислоты). В результате фильтрации окислителя через модель пористой среды, наблюдались вторичные волны окисления, возникающие с некоторым постоянным периодом.

В экспериментах на датчиках давления наблюдались периодические колебания давления, пример показаний датчиков давления представлен на рис.1. Изменение профилей давления при прохождении волны окисления представлено на рис.2. Спектр колебаний давления представлен на рис. 3. График зависимости периода колебаний от градиента давления представлен на рис. 4.

В результате экспериментальной работы было установлено, что период колебания давления во вторичных волнах окисления не зависит или слабо зависит от градиента давления (рис.4).

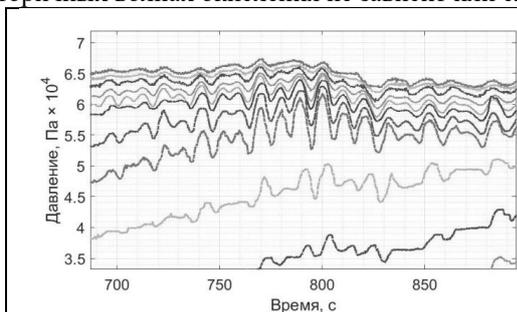


Рис. 1. Показания датчиков давления

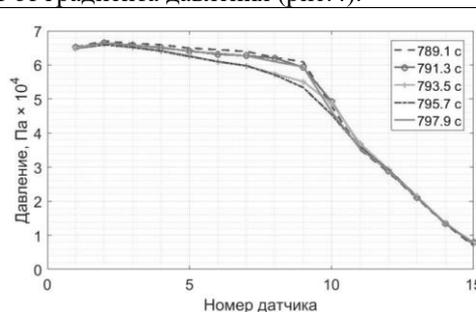


Рис. 2. Профили давлений при прохождении волны окисления

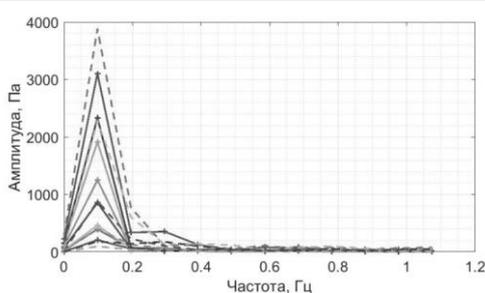


Рис. 3. Спектр колебаний давления

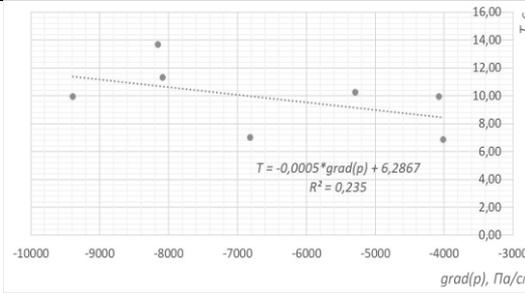


Рис. 4. Зависимость периода колебаний давления от градиента давления

Литература

1. Konyukhov A.V., Zavalov I.N. Numerical investigation of oscillatory multiphase flow in porous medium with chemically active skeleton //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. – Т. 774. – №. 1. – С. 012059.
2. Konyukhov A.V., Zavalov I.N. Influence of time-delayed reaction on stability and transition to self-oscillating mode of multiphase flow in porous medium // Turbulent Mixing and Beyond Sixth International Conference Tenth Anniversary Program, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Italy, 2017, P. 22.

О МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ ДВИЖЕНИЙ ПРАНДТЛЯ 2-ОГО РОДА

Н.В. Попеленская, В.О. Пиманов, Н.В. Никитин
Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Дискуссия о механизме возникновения вторичных движений в турбулентных течениях в прямых трубах некруглого сечения ведется со времен опытов Никурадзе с трубами прямоугольного и треугольного поперечного сечения. Обнаруженные в этих опытах специфические отклонения в распределениях средней скорости в угловых областях Прандтль объяснил наличием упорядоченного движения в поперечной к направлению основного потока плоскости. Сейчас такие движения именуется вторичными движениями Прандтля 2-ого рода. Они наблюдаются только в турбулентных течениях в отличие от вторичных движений 1-ого рода, возникающих вследствие искривления линий тока (например, в непрямых трубах) как в турбулентных, так и в ламинарных течениях. Турбулентные вторичные движения не велики по интенсивности, редко превышая величину в 3% от максимальной скорости потока, однако они вносят существенный вклад в поперечный перенос импульса, тепла, примеси.

В однородных вдоль направления основного потока установившихся течениях вторичные движения характеризуются распределением средней продольной завихренности Ω_x , удовлетворяющей уравнению

$$V \frac{\partial \Omega_x}{\partial y} + W \frac{\partial \Omega_x}{\partial z} - \nu \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Omega_x = S, \quad S = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{v'^2} - \overline{w'^2}) + \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) (-\overline{v'w'})$$

Здесь V , W и v' , w' – поперечные компоненты скорости осредненного и пульсационного движения, черта означает осреднение. В некруглых трубах каждое из двух слагаемых в выражении для источникового члена S дает ненулевой вклад, благодаря чему уравнение для Ω_x имеет ненулевое решение. В настоящее время отсутствуют надежные экспериментальные данные, позволившие бы оценить вклад тех или иных механизмов в формирование источника S даже в простейших случаях течений в трубах прямоугольного/квадратного сечений. В наибольшей степени это относится к распределению в потоке сдвигового напряжения Рейнольдса $\overline{v'w'}$. Так, например, в экспериментах [1] было получено, что определяющий вклад в формирование S вносит анизотропия нормальных напряжений Рейнольдса (1-ое слагаемое в выражении для S), а в [2] сделан противоположный вывод о доминировании 2-ого слагаемого. Начиная с 90-х годов, прямые расчеты турбулентных течений в трубах квадратного сечения позволили прояснить ситуацию. В [3] рассчитаны оба слагаемых выражения для S и обнаружено, что оба они одинаково важны в определении Ω_x . Более того, обнаружилось, что два слагаемых имеют противоположные знаки и в значительной степени нейтрализуют друг друга. Этот эффект в еще более выраженной форме был выявлен при расчете турбулентных течений в трубах эллиптического сечения [4]. Все это указывает на то, что представление источникового члена в уравнении для средней продольной завихренности в виде градиентов рейнольдсовых напряжений не является продуктивным.

В настоящей работе выполнены расчеты турбулентных течений в трубах прямоугольного сечения. Использовался метод [5]. Проведен анализ альтернативного вида источникового члена:

$$S = \overline{\omega'_x \frac{\partial u'}{\partial x}} - \overline{u' \frac{\partial \omega'_x}{\partial x}} + \overline{\omega'_y \frac{\partial u'}{\partial y}} - \overline{v' \frac{\partial \omega'_x}{\partial y}} + \overline{\omega'_z \frac{\partial u'}{\partial z}} - \overline{w' \frac{\partial \omega'_x}{\partial z}}$$

Обнаружено, что распределение S по сечению трубы в значительной степени определяется первыми двумя слагаемыми последнего выражения, каждое из которых вносит примерно половину общего вклада. Остальные слагаемые значительно уступают по значению и не имеют выраженной формы. Обнаруженное согласуется с механизмом образования продольных вихрей, найденном ранее в локализованных турбулентных структурах [6].

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФИ (гранты 17-01-00140-а, 16-05-00004-а и 18-08-00074-а).

ЛИТЕРАТУРА.

1. E. Brundrett and W. D. Baines. The production and diffusion of vorticity in duct flow. *J. Fluid Mech.*, 19, 375-394, 1964.
2. F. B. Gessner. The origin of secondary flow in turbulent flow along a corner. *J. Fluid Mech.*, 58, 1-25, 1973.
3. S. Gavrilakis. Numerical simulation of low-Reynolds number turbulent flow through a straight square duct. *J. Fluid Mech.*, 244, 101-129, 1992.
4. Воронова Т.В., Никитин Н.В. Результаты прямого расчета турбулентного течения в трубе эллиптического сечения. *Изв. РАН МЖГ*, 2, 59-70, 2007.
5. Nikitin N. Finite-difference method for incompressible Navier-Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates. *J. Comp. Phys.*, 217(2), 759-781, 2006.
6. Никитин Н.В., Пиманов В.О. О поддержании колебаний в локализованных турбулентных структурах в трубах. *Изв. РАН, МЖГ*, №1, с.68-76, 2018.

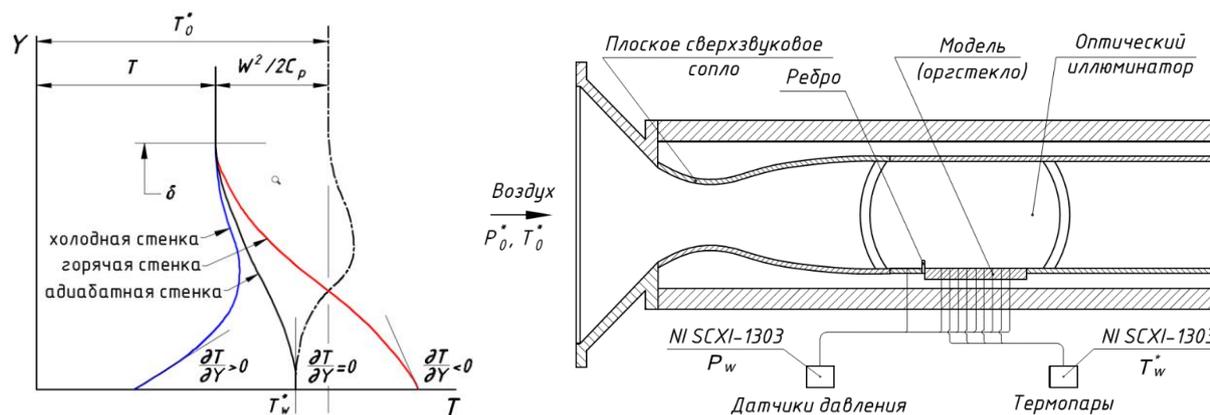
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА В СЛЕДЕ ЗА РЕБРОМ

С.С. Попович, Ю.А. Виноградов, М.М. Стронгин
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Интенсивность теплообмена при сверхзвуковых скоростях течения оценивают по коэффициенту теплоотдачи, который с учетом эффектов сжимаемости определяется отношением теплового потока в стенку q_w к разности между температурой стенки T_w и температурой восстановления T_w^* [1]. В практике инженерных и научных расчетов T_w^* определяется через коэффициент восстановления температуры r , показатель адиабаты γ , полную температуру в потоке T_0^* и число Маха M (1). Коэффициент восстановления температуры аппроксимируется для ламинарного и турбулентного безотрывного режима обтекания пластины и тел вращения с гладкими образующими. Данные аппроксимации не работают при наличии градиента давления на стенке, усложнении формы поверхности или воздействии сильных возмущений (скачки уплотнения, отрывные течения):

$$T_w^* = \frac{T_0^* \cdot \left(1 + r \cdot \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M^2\right)}{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M^2\right)} = \begin{cases} \approx T_0^* (M \ll 1) \\ \approx r \cdot T_0^* (M \gg 1) \end{cases}$$

Стенка, обтекаемая сверхзвуковым потоком воздуха, испытывает на себе эффект аэродинамического нагрева в результате возникновения градиента температуры в пограничном слое. На рисунке показаны возможные профили температуры в пограничном слое, определяющиеся локальной температурой стенки (нагретая, охлажденная или теплоизолированная – адиабатная). На рисунке также показана постановка экспериментального исследования.



Температура восстановления в эксперименте определяется с помощью методики обработки, позволяющей уже в процессе запуска установки определить тепловой поток в стенку и затем экстраполировать его до нулевого значения [2]. Температура стенки в этом случае и будет являться температурой восстановления. Число Маха набегающего потока составило 2.3, давление торможения 600 кПа, температура торможения 293 К, расход воздуха – около 4 кг/с. Температура восстановления и коэффициент теплоотдачи определялись при варьировании высоты ребра (от 2 до 12 мм), при толщине пограничного слоя на срезе сопла около 6 мм.

В заключение в докладе дается анализ возможности применения обнаруженного эффекта снижения температуры восстановления в следе за ребром в сверхзвуковом потоке на эффективность процесса безмашинного энергоразделения в потоке сжимаемого газа [3].

Работа выполняется при поддержке гранта РФФ №14-19-00699.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.I. Leontiev, S.S. Popovich, M.M. Strongin, Y.A. Vinogradov. Adiabatic wall temperature and heat transfer coefficient influenced by separated supersonic flow. EPJ Web of Conferences, 2017, 159, 1-5, DOI: 10.1051/epjconf/201715900030.
2. Ю.А. Виноградов, С.С. Попович, М.М. Стронгин. Экспериментальное исследование коэффициента восстановления температуры и интенсификации теплоотдачи при течении на плоской стенке за ребром сверхзвукового потока сжимаемого газа. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 11, 55-75, DOI: 10.7463/1116.0849557.
3. Y.A. Vinogradov, A.G. Zditovets, A.I. Leontiev, S.S. Popovich, M.M. Strongin. Experimental research of shock wave processes influence on machineless gas flow energy separation effect. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 891, 012080, DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012080.

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ВОЛНОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Прокофьев В.В., Филатов Е.В.

Научно исследовательский институт механики МГУ им. Ломоносова, Москва 119192, Россия

В работе даны результаты экспериментальных исследований эффективности судовых волновых движителей (ВД) различных типов на модели судна-катамарана в условиях килевой качки. Ранее был предложен и исследован «прямоточный волновой движитель», работа которого никак не связана с качкой самого судна, чем он принципиально отличается от известных «машущих» ВД судов. В предлагаемой работе исследуется влияние килевой качки на эффективность прямоточного ВД, кроме того при одинаковых условиях проведены сравнительные исследования эффективности ВД различных типов (кроме прямоточного ВД исследовались гибкая пластина (плавник), качающаяся пластина с упругими связями, движитель типа подводный парус). Исследовалось влияние на эффективность размещения ВД на корпусе судна, а также глубины погружения ВД машущего типа. Показано, что в условиях килевой качки при носовом размещении эффективность прямоточного ВД уменьшается по сравнению с эффективностью при отсутствии качки, но применение пластины стабилизатора на корме судна поднимает эффективность ВД до прежнего уровня. При этом эффективность прямоточного ВД находится на уровне машущих ВД типа плавник или пластины с упругими связями. Наличие кормовой пластины-стабилизатора значительно увеличивает эффективность носовой качающейся пластины или плавника во всем исследованном диапазоне волн, в то время как в случае паруса присутствие стабилизатора приводит к сдвигу зависимости скорости от частоты волн в сторону низких частот. Сравнение между различными ВД машущего типа, показало заметное преимущество движителя типа подводный парус.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-08-00807.

БИГАРМОНИЧЕСКИЕ АТТРАКТОРЫ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Д.А. Рязанов, И.Н. Сибгатуллин, МГУ им. М.В. Ломоносова

Е.В. Ерманиук, Институт гидродинамики Лаврентьева РАН

С момента открытия аттракторов внутренних волн появилось множество работ, показывающих с помощью натуральных и численных экспериментов, что волновые аттракторы являются не просто забавным математическим феноменом, но и играют важную роль в динамике стратифицированных и вращающихся систем, таких как глубоководный океан и астрофизические объекты. Было показано, что возникновение аттракторов является общим положением, а не исключительным случаем. В реальности приливные течения на Земле возникают под совместным действием притяжения Луны, Солнца и вращения. Астрофизические объекты также часто являются объектом воздействия нескольких приливных сил. Поэтому с прикладной точки зрения важно рассмотреть бигармоническое внешнее воздействие с сопоставимыми и разными амплитудами и определение результирующего течения, которое может быть описано как взаимодействие двух аттракторов, либо как течения с аттрактором и без. В нашей работе описывается модель бигармонических аттракторов, определены диапазоны частот для их успешного моделирования. Получены установившиеся режимы, демонстрирующие взаимодействие волновых аттракторов, генерируемых от каждой из частот, соответствующих определённому аттрактору. Впервые показано, что при малых амплитудах внешних воздействий взаимодействие аттракторов имеет характер интерференции лишь в зонах пересечения аттракторов по линейной теории. При изменении аспектного соотношения вертикальных и горизонтальных масштабов в несколько раз изменяется характер течения у боковых стенок и при тех же самых амплитудах происходит быстрое развитие малых возмущений и переход к волновой турбулентности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 15-01-06363-а.

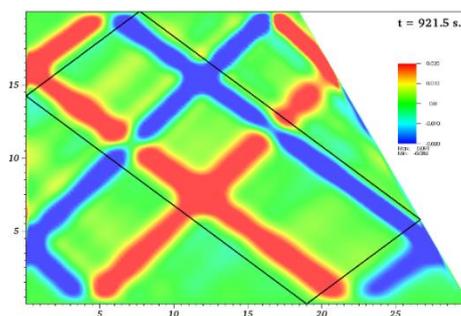


Рис. 1 Пример поля вертикальной компоненты скорости при бигармоническом внешнем воздействии.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В РАСШИРЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ С МАЛЫМИ УГЛАМИ РАСКРЫТИЯ

А.И. Решмин, А.Д. Чичерена, С.Х. Тепловодский, В.В. Трифионов
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Проведены экспериментальные и расчетные исследования характеристик течения в коническом диффузоре с малыми углами раскрытия. На вход в диффузор подавалось развитое турбулентное течение. Расчет проводился с использованием трехпараметрической модели турбулентности [1]. Расчеты проводились, при числах Рейнольдса на входе в диффузор от 1000 до 10000 и с углами раскрытия меньше 4° . В зависимости от угла раскрытия в расчетах, течение в диффузоре происходило, при положительном, отрицательном или нулевом продольном градиенте давления. Получены характеристики течения на выходе диффузора, а также в различных сечениях вдоль диффузора. Результаты расчетов сравнивались с ранее полученными экспериментальными данными для диффузоров с углами раскрытия $\sim 0.6^\circ$ и $\sim 1.2^\circ$ [2], получено хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных.

Экспериментальные и расчетные данные показали, что диффузоре, после начального участка, формируется турбулентное течение. Параметры турбулентного течения на выходе из диффузора определяются только числом Рейнольдса и не зависят от условий на входе, пока эти условия достаточны для формирования турбулентного течения.

Расчеты показали, что при увеличении длины диффузора турбулентное течение затухает и плавно переходит в ламинарное.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Г Лущик., А.А. Павельев, А.Е. Якубенко. Трехпараметрическая модель сдвиговой турбулентности // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1978. № 3. С. 13 - 25.
2. А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский, В.В. Трифионов. Турбулентное течение в круглом безотрывном диффузоре при числах Рейнольдса меньших 2000 // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 2. С. 121 - 130.

БИФУРКАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В НАКЛОНЕННОЙ ПОЛОСТИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Сагитов Р.В.¹, Шарифулин А.Н.²

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Рассматриваются стационарные конвективные течения вязкой несжимаемой жидкости в наклонённой вертикальной прямоугольной полости со свободными границами. Между двумя изотермическими сторонами прямоугольника (длиной L), которые являются горизонтальными при отсутствии наклона, поддерживается постоянный перепад температур Θ . Остальные стороны (высотой H) являются теплоизолированными. Задача характеризуется углом наклона α и безразмерными критериями: числом Грасгофа $Gr = \frac{g\beta\Theta H^3}{\nu^2}$, числом Прандтля $Pr = \frac{\nu}{\chi}$, соотношением сторон $B = L/H$. Исследования проводилось для $Pr = 10$, $B = \sqrt{2}$, $0 < Gr \leq 657.5$, $-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$.

Для описания движения жидкости использовались безразмерные уравнения тепловой конвекции в приближении Буссинеска. Краевая задача для случая малых возмущений состояния механического равновесия сводится к задаче Релея, решение которой дает следующее выражение для критических чисел Грасгофа: $Gr_c = \left(\frac{m^2 \pi^2}{B^2} + n^2 \pi^2 \right)^3 / \frac{m^2 \pi^2}{B^2} Pr$.

Первые три критические числа Грасгофа: $Gr_1 = 65.75$, $Gr_2 = 131.5$, $Gr_3 = 360.1$ соответствуют возмущениям с $n = 1$, $m = 1, 2, 3$, представляющих собой одно-, двух- и трехваловые движения, соответственно.

Путем решения многомерным методом Ньютона системы алгебраических уравнений, полученной дискретизацией уравнений тепловой конвекции на прямоугольной сетке 101×101 , были построены бифуркационные диаграммы. Для $\alpha = 0^\circ$ при $Gr = Gr_1$, $Gr = Gr_2$ и $Gr = Gr_3$ в результате вилочной бифуркации отщепляются по две ветви, соответствующие одно-, двух- и трехваловым нелинейным режимам стационарной конвекции, соответственно.

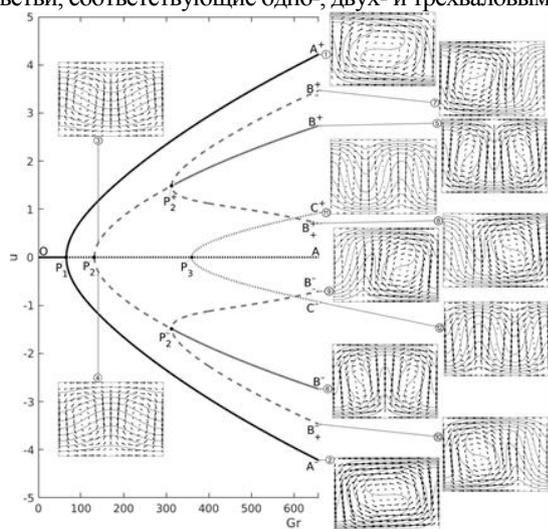


Рис. 1 Бифуркационная диаграмма для $\alpha = 0^\circ$

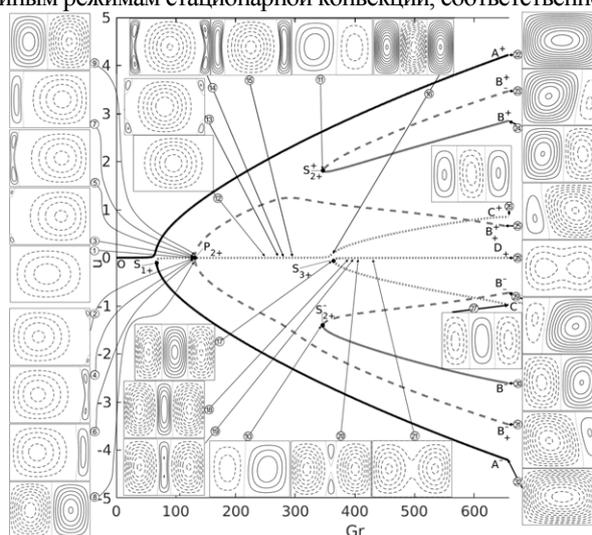


Рис. 2 Бифуркационная диаграмма для $\alpha = 0.1^\circ$

Исследование на устойчивость показало, что одноваловые режимы устойчивы, трехваловые – неустойчивы. Двухваловые режимы неустойчивы до числа Грасгофа $Gr_2^\pm = 312.9$, при $Gr = Gr_2^\pm$ каждая ветвь, соответствующая двухваловому режиму, посредством вилочной бифуркации разделяется на две неустойчивые и одну устойчивую ветви.

Анализ бифуркационной диаграммы, построенной для малого наклона полости $\alpha = 0.1^\circ$, показал, что все вилочные бифуркации для $\alpha = 0^\circ$, кроме второй бифуркации равновесия, являются структурно неустойчивыми.

Определяя значения параметров, при которых якобиан системы для амплитуд малых возмущений равен нулю, на плоскости параметров (α, Gr) построили четыре бифуркационные кривые, которые разделяют области параметров, где существуют один, три, пять, семь, девять стационарных режимов.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Cliffe K. A., Winters K. H. A numerical study of the cusp catastrophe for Bénard convection in tilted cavities //Journal of Computational Physics. – 1984. – Т. 54. – №. 3. – С. 531-534.
2. Mizushima J., Adachi T. Sequential transitions of the thermal convection in a square cavity //Journal of the Physical Society of Japan. – 1997. – Т. 66. – №. 1. – С. 79-90
3. Mizushima J., Hara Y. Routes to unicellular convection in a titled rectangular cavity // J. Physical Society of Japan. 2000. Vol. 69.№ 8. P. 2371-2374.

ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В ТРЕХМЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВНЕШНЕГО ПОТОКА

Д.С. Сбоев¹, С.А. Баранов¹, И.А. Моралев², С.Н. Толкачев¹

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Предыдущие экспериментальные исследования ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое скользящего крыла при повышенной степени турбулентности внешнего потока [1-4] в основном ограничивались случаями умеренной интенсивности внешних возмущений до 0.6%. В [4, 5] были изучены некоторые особенности перехода при более высоком уровне внешних пульсаций около 1%, однако использованная модель крыла с ламинаризованным профилем и большим участком практически безградиентного пограничного слоя не позволила получить подробные данные о развитии возмущений в областях с отрицательным градиентом давления достаточной пространственной протяженности. Кроме того, работы [4, 5] в основном посвящены исследованию зоны непосредственного разрушения ламинарного режима течения. Таким образом, экспериментальные данные о переходе в трехмерном пограничном слое при высоком уровне внешней турбулентности неполны. Некоторые вопросы, например, о возможной роли в процессе перехода в таких условиях алгебраической неустойчивости, изучены недостаточно.

В настоящем сообщении описаны эксперименты по переходу в трехмерном пограничном слое, развивавшемся на модели стреловидной плоской пластины с наведенным отрицательным градиентом давления при скорости потока 12-24 м/с. Потенциальное течение во внешнем потоке моделировалось при помощи искривленных фальшстенок в рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы ЦАГИ Т-124. Исследования такого пограничного слоя при невозмущенном внешнем потоке показали, что в области измерений данное течение не зависит от размаха модели и хорошо моделирует пограничный слой скользящего крыла на участке разгона потока в области интенсивной неустойчивости поперечного течения. Повышенная степень турбулентности около 0.9% создавалась с помощью установленной на срезе сопла сетки, ранее использованной в [4, 5]. Эксперименты проведены в естественных условиях без внесения в пограничный слой каких-либо контролируемых возмущений. Однониточным датчиком термоанемометра в пограничном слое исследованы двумерные поля скорости в плоскостях, перпендикулярных поверхности модели. Кроме того, измерялось распределение давления по пластине, а также были выполнены измерения поперечных корреляций продольной компоненты скорости в перпендикулярно внешней линии тока направлении.

Результаты экспериментов показали, что в пограничном слое отсутствовали заметные признаки развития стационарных возмущений неустойчивости поперечного течения. Поле пульсаций скорости также слабо зависело от трансверсальной координаты. Рост интегральной по спектру энергии нестационарных возмущений в зависимости от продольной координаты на начальном участке развития был экспоненциальным, а не линейным, как это наблюдается в двумерных пограничных слоях при повышенной внешней турбулентности. Характерного для алгебраической неустойчивости степенного роста бегущих мод не отмечено. Частотные спектры пульсаций с плоской областью низких частот и спаданием высокочастотной части спектров по степенному закону типичны для неустойчивости поперечного течения. В направлении поперек пограничного слоя заметных отличий в развитии низко- и высокочастотных компонент в спектрах не обнаружено. Наблюдалось интенсивное развитие высокочастотных спектральных компонент в пограничном слое на всей протяженности зоны измерений. Измерения поперечных корреляций показали, что в направлении, близком к направлению распространения наиболее неустойчивых колебаний поперечного течения, типичным видом возмущений в пограничном слое являются волновые пакеты.

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что в пограничном слое с отрицательным градиентом давления при степени внешней турбулентности около 1% преобладают нестационарные возмущения неустойчивости поперечного течения. Лишь некоторые признаки в развитии низкочастотных компонент могут свидетельствовать о существовании алгебраически растущих полосчатых структур, однако явных свидетельств этого обнаружено не было.

ЛИТЕРАТУРА.

1. H. Deyhle, H. Bippes Disturbance growth in an unstable three-dimensional boundary layer and its dependence on environmental conditions. *J. Fluid Mech.*, 1996, 316, 73-113.
2. T. Kurian, J.H.M. Fransson, P.H. Alfredsson Boundary layer receptivity to free-stream turbulence and surface roughness over a swept flat plate. *Phys. Fluids*, 2011, 23 (3), 034107.
3. V.I. Borodulin, A.V. Ivanov, Yu.S. Kachanov, A. Hanifi Laminar-turbulent transition delay on a swept wing. *International Conference on Methods of Aerophysical Research, Perm, Russia, Proceedings, Part II*, 2016, 36–37.
4. А.Ф. Киселев, Д.С. Сбоев, С.Л. Чернышев Особенности ламинарно-турбулентного перехода в трехмерном пограничном слое при повышенной внешней турбулентности. *ДАН*, 2014, 454(6), 665-668.
5. A.Ph. Kiselev, V.A. Kuzminsky, D.S. Sboev The laminar-turbulent transition zone in 2D and 3D boundary layers with emphasis on effect of free stream turbulence. *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2014)*, 2014, St. Petersburg, Russia.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ, ВЫЗВАННОГО ДЕЙСТВИЕМ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

И.О. Сбоев

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Конвективные струи или тепловые плюмы (thermal plume) являются одними из самых распространенных форм движений жидкости. Зачастую даже довольно сложное ламинарное конвективное течение можно представить в виде совокупности одиночных тепловых плюмов, формирующихся под действием локальных неоднородностей температуры, и сложным образом взаимодействующих друг с другом в рассматриваемом объеме [1].

Наряду с тепловыми встречаются также концентрационные плюмы, природа которых заключается, как правило, в том, что внутри некоторой среды распространяется вещество с другим значением плотности. Такие течения (chemical fronts) чаще всего возникают в ходе экзотермических реакций на границе слоя жидкости [2]. В ряде ситуаций структуры и механизмы движения струй различной природы оказываются схожи друг с другом. Однако, ввиду широкой распространенности именно естественной конвекции представляет особый интерес изучение так называемых развивающихся тепловых плюмов (starting thermal plume). В связи с этим, настоящая работа посвящена проблеме формирования и эволюции конвективной струи в слое невозмущенной жидкости под действием локализованного источника тепла и измерению кинематических характеристик движения жидкости как для нестационарного, так и для установившегося течений.

Экспериментальная установка включает в себя цилиндрическую полость ($D = 84.0 \pm 0.2$ мм, $H = 40.2 \pm 0.2$ мм), заполненную дистиллированной водой. Снизу слой жидкости ограничен круглой пластиной из оргстекла толщиной 25.0 ± 0.2 мм, а сверху - массивом из алюминия толщиной 7.0 ± 0.1 мм. В центре основания полости располагается медный нагреватель в форме круга диаметром $d = (9.90 \pm 0.05)$ мм, также модель содержит две дифференциальные термопары (рис. а). Данные с термопары с периодом 250 мс поступают на микровольтметр, а затем передаются в компьютер. В этом случае их удается преобразовать в определенный сигнал и отправить на подключенный к источнику питания регулятор температуры. Таким образом, необходимую температуру нагревателя можно поддерживать вблизи заданной уставки путем регулирования мощности тока, пропускаемого через резистор сопротивлением (130 ± 3) Ом. Для визуализации течения применяется лазер постоянного действия с длиной волны 532 нм, а съемка проводится с частотой 60 Гц.

После включения источника питания тепло от резистора начинает передаваться медному теплообменнику, а спустя некоторое время в жидкости механическое равновесие сменяется струйным течением, и нагретая жидкость начинает всплывать в центре слоя, образуя тепловой плюм. Для измерения температуры жидкости на высоте h над нагревателем находится спай сигнальной термопары. Таким образом, по изменению показаний этой термопары определяется момент достижения температурным возмущением верхней границы. Измерив время, за которое плюм достигает высоты h , можно вычислить среднюю скорость его распространения при различных степенях подогрева.

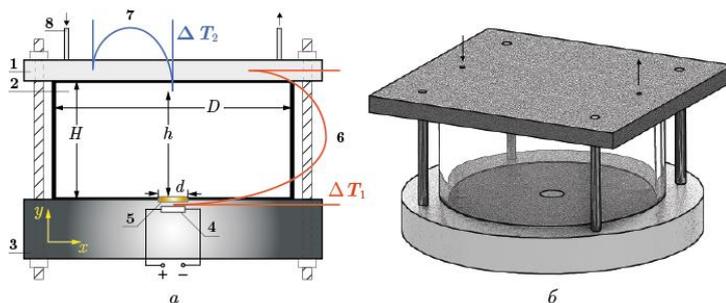
Для развивающегося вдали от границ конвективного потока в качестве управляющего параметра берется число Рэля $Ra_L = g\beta\Delta T_1 L^3 / \nu\chi$. Параметром длины $L = S/P$ выступает отношение площади поверхности медного нагревателя к его периметру (для круга $L = d/4$), т.к. именно их отношение является определяющим в задачах о неустановившемся течении от компактных источников тепла [3]. Результаты настоящей работы сопоставляются с работами других авторов, в частности обсуждается известный степенной закон, связывающий скорость роста плюма с интенсивностью локализованного подогрева.

Структура установившегося в полости движения жидкости исследована с применением светоотражающих частиц и лазерного ножа в плоскости $z=0$. При помощи методов PIV были построены средние поля скорости $\mathbf{v}(x,y)$ установившегося движения, и найдена зависимость максимальной скорости течения от степени подогрева, которая характеризуется определенным по высоте слоя числом Рэля Ra_H . В ходе работы исследовано поведение жидкости вблизи поверхности алюминиевого массива и описана структура течения вблизи твердой боковой границы полости при различных температурах источника.

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

ЛИТЕРАТУРА.

1. Lappa M. Some considerations about the symmetry and evolution of chaotic Rayleigh–Bénard convection: The flywheel mechanism and the “wind” of turbulence. *Comptes Rendus Mécanique*, 2011, 339(9), 563-572.
2. Almarcha C. et al. Active role of a color indicator in buoyancy-driven instabilities of chemical fronts, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2010, 1(4), 752-757.
3. Bergman, T.L., Incropera, F.P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, UK, 2011, 1050 p.



ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЫХОДА ГИДРОДИОДА НА РАБОЧИЙ РЕЖИМ

Семёнов А.Б., Кураев А.А.

Новосибирский государственный технический университет.

Под гидродиодом в данном исследовании понимается сосуд с одной мембраной, перфорированной коноидальными отверстиями, установленными внутри сосуда по нормали к вектору инерционного ускорения осциллирующей жидкости.

Цель данной работы – оценить время необходимое для выхода гидродиода на рабочее значение напора на выходе.

Разнорасходность наблюдается вследствие того, что слева направо втекает жидкости больше, чем справа налево (Рис. 1).

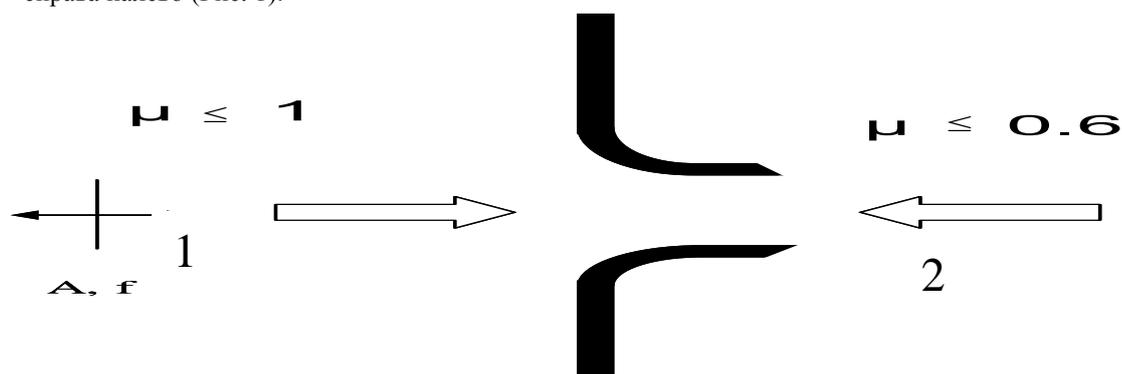


Рис. 1 Направление втекания жидкости в отверстие перфорации в мембране.

Здесь A – амплитуда вибрации мембраны, f – частота вибрации мембраны.

На рис. 2 представлена зависимость напора на выходе одномембранной модели гидродиода от времени при постоянном ускорении осцилляций P_a скорости потока.

$\Delta h_{\text{пъез}}$, М

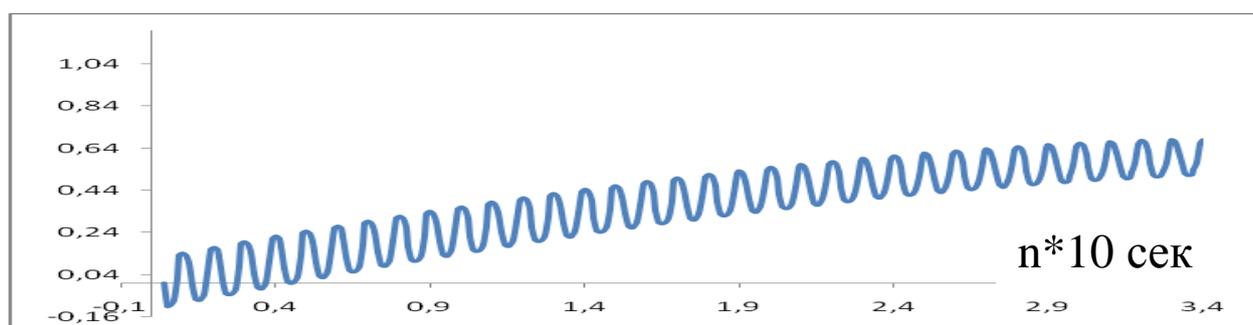


Рис. 2. Зависимость напора на выходе гидродиода от времени при выходе гидродиода на режим насыщения.

Приведённая на рисунке 2 длительность времени выхода гидродиода на стабильный режим работы совпадает с экспериментальными данными - 36 секунд.

ОСОБЕННОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА С КОЛЬЦЕВЫМИ ВЫСТУПАМИ И ВЫЕМКАМИ НА ПОВЕРХНОСТИ

М.М. Симоненко¹, С.В. Гувернюк¹, А.Ф. Зубков¹, А.Г. Кузьмин²

¹НИИ механики МГУ, Москва

²СПбГУ, Санкт-Петербург

Конструктивные особенности в виде выступов и выемок на поверхности осесимметричных тел широко встречаются во многих технических приложениях. Несмотря на относительно простую геометрию, при сверхзвуковом обтекании таких тел под углом атаки формируется довольно сложное отрывное течение. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования трехмерного сверхзвукового обтекания осесимметричной модели с кольцевым выступом (в форме прямой кольцевой ступеньки) и с кольцевой выемкой (в форме прямоугольной каверны). Приведены, кроме того, результаты численного моделирования трехмерного сверхзвукового обтекания цилиндрического тела с кольцевым прямоугольным выступом под углом атаки. Решения нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, получены с помощью вычислительной программы ANSYS CFX-15, основанной на методе конечных объемов.

Экспериментальная модель включала цилиндрический корпус 1 диаметром $D=46$ мм и выдвижную штангу 2 диаметром $d=30$ мм, рис. 1. На свободном конце штанги 2 устанавливался конический наконечник 3. Были изготовлены наконечники с различными углами раствора (полуугол раствора $\beta=10, 20$ и 30°) и диаметром основания D_C , равным диаметру корпуса D или штанги d . Длина штанги L (расстояние между корпусом 1 и основанием конического наконечника 3) варьировалась в диапазоне 56-160 мм. В случае $D_C=D$ элементы модели образовывали кольцевую выемку прямоугольного сечения длиной L с равновеликими выступами h переднего и заднего уступов, рис. 1.а. В случае $D_C=d$ моделировался прямоугольный кольцевой выступ высотой h , рис. 1.б. Испытания проведены в аэродинамической трубе А-7 НИИ механики МГУ при $M=3$, $Re_1=3.5 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$. В ходе экспериментов варьировались протяженность тела перед выступом, протяженность каверны и угол атаки. Измерялось давление на торце корпуса на расстоянии $h/3$ от поверхности штанги и осуществлялась визуализация структуры течения.

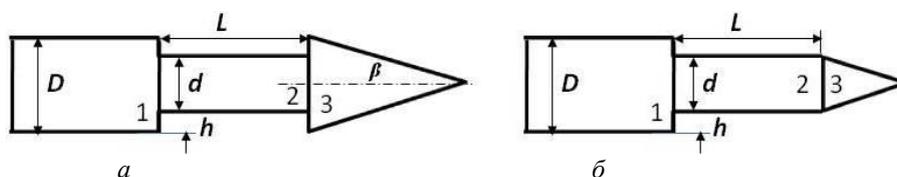


Рис. 1. Схема экспериментальной модели: а – с кольцевой каверной; б – с кольцевым выступом

Для рассмотренных моделей найдены диапазоны изменения варьируемых параметров, при которых наблюдается повышение давления на подветренной стороне поверхности выступа (заднего уступа выемки). Такой характер поведения давления можно объяснить развитием на подветренной стороне поперечного отрыва и формированием в подветренной области пары продольных вихрей, вследствие чего происходит поперечный отток газа от плоскости симметрии в двух противоположных направлениях с сопутствующим уменьшением толщины пограничного слоя. В результате высоконапорный поток на подветренной стороне тела проникает в область отрыва, взаимодействуя с выступом (задним уступом выемки) в условиях, характерных для невязкого взаимодействия. Данное объяснение подтверждается результатами численного моделирования трехмерного сверхзвукового обтекания цилиндрического тела с кольцевым выступом под углом атаки, рис. 2.

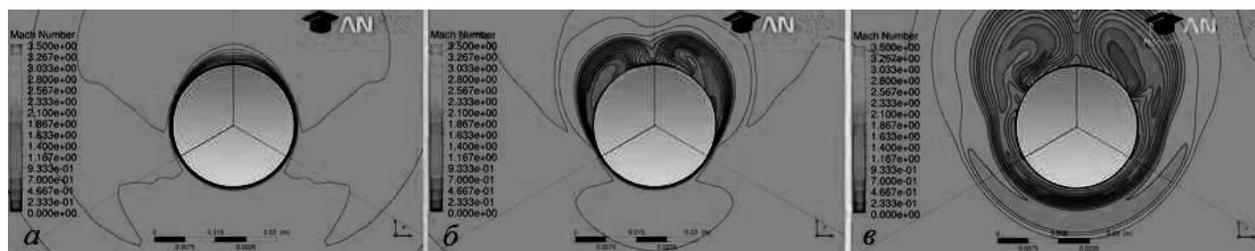


Рис. 2. Поля чисел Маха при обтекании тела с кольцевым выступом ($L=160$ мм, $h=8$ мм) под углом атаки 10° в плоскости, перпендикулярной оси тела, на расстоянии от выступа: а – 90; б – 40; в – 10 мм.

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

О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ В ВАКУУМЕ

Г.М. Сисоев, А.Н. Осипцов
Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
А.А. Коротеев
Московский Авиационный Институт, Москва

Рассматривается линейная устойчивость течения пленки жидкости в вакууме. При отсутствии неустойчивости Кельвина-Гельмгольца [1,2], связанной с наличием окружающего газа, основным механизмом волнообразования становится охлаждение пленки тепловым излучением с ее поверхности. Это приводит к формированию неравномерного распределения температуры поперек пленки, и, в случае зависимости вязкости жидкости от температуры, к неустойчивости вследствие вязкой стратификации [3]. Вычисления собственных значений задачи Орра-Зоммерфельда показали, что длина волны неустойчивых возмущений близка к толщине пленки, а их скорость немного превышает ее среднюю скорость.

Для жидкости, чей коэффициент поверхностного натяжения увеличивается с уменьшением температуры, также найден динноволновый механизм неустойчивости. Эта неустойчивость связана с формированием погранслойных профилей продольной скорости жидкости вследствие охлаждения свободных поверхностей пленки при удалении от начального сечения течения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-01-00057).

ЛИТЕРАТУРА.

1. H.V. Squire. Investigation of the instability of a moving liquid film. *British Journal of Applied Physics*, 1953, 4(6), 167-169.
2. W.A. Sirignano, C. Mehring. Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, 26(4-6), 609-655.
3. R. Govindarajan, K.C. Sahu. Instabilities in viscosity-stratified flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46, 331-353.

СОЧЕТАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КАНАЛОВ С РЕЗКИМ ПОВОРОТОМ ПОТОКА

Е.М. Смирнов, Д.О. Панов, В.В. Рис

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

В ряде инженерных устройств исходно предписанная стесненность пространства, в котором располагаются каналы с рабочей или охлаждающей средой, обуславливает неизбежное наличие участков с резким поворотом потока. Наглядный пример - это трехмерные каналы с резким поворотом на 180° (U-образные каналы), входящие в системы внутреннего конвективного охлаждения лопаток газовых турбин и статоров мощных электрических турбогенераторов. Резкий поворот потока приводит обычно к возникновению обширного отрыва и, как следствие, к большим потерям давления. Это порождает большой интерес к оптимизации геометрических форм стенки/стенок канала на участке поворота. Сегодня задачи оптимизации проточных частей все чаще решаются с применением методов и средств вычислительной гидродинамики. Результат оптимизации зависит, однако, от подхода к моделированию турбулентности. В случае течений с обширным отрывом RANS-модели часто оказываются недостаточно точными, а использование вихререзающих подходов с аккуратным разрешением пристенных слоев сопряжено с чрезмерными вычислительными затратами. Практический выход из этой ситуации сегодня может состоять в сочетании разных подходов, а именно: в использовании RANS-подхода для массовых расчетов поля течения и значений целевой функции, по которой проводится оптимизация, и в последующей уточняющей оценке полученного выигрыша посредством сопоставления значений целевой функции и полей течения, рассчитанных с применением вихререзающего подхода только лишь для исходной и найденной условно-оптимальной формы.

В первой части доклада представляются результаты сопоставительных и валидационных расчетов, проведенных с применением конечно-объемного кода второго порядка точности для U-образного канала квадратного сечения, включая случай вращения канала относительно поперечной оси (отношение радиуса поворота внутренней стенки к стороне сечения составляло 0,15). Течение в данном канале, детально изученное экспериментально в [1], характеризуется наличием интенсивных вторичных течений и развитой зоной отрыва в области за поворотом. Сопоставительные расчеты выполнены на основе трех подходов. В первом случае решались нестационарные уравнения Рейнольдса (URANS-подход) при их замыкании по SST-модели турбулентности Ментера с введенной поправкой на кривизну линий тока и вращение. Во втором случае использовался LES-подход с подсеточной моделью турбулентности, известной как WALE [2], без использования пристенных функций. В третьем случае применялся метод IDDES [3], который является гибридным RANS-LES методом и позволяет проводить вихререзающие расчеты течений при высоких числах Рейнольдса на ресурсах с существенно меньшей, по сравнению с «чистым» LES, вычислительной производительностью. Расчеты были выполнены и сопоставлены при разных значениях $Re=O(10^4 \dots 10^5)$. Установлено, в частности, что LES и IDDES решения, полученные при $Re=(2 \dots 4) \cdot 10^4$, находятся в очень хорошем согласии [4], в отличие от случая URANS-подхода. Расчеты валидационной направленности для условий экспериментов [1] ($Re = 10^5$) проводились только по методам URANS и IDDES. Рассчитанные по методу IDDES поля течения находятся в хорошем соответствии с опытными данными, и в превосходном согласии по потерям давления [4]. Метод URANS дает на 20% меньшие значения потерь, при этом расчетное поле течения во второй половине поворота и за ним сильно расходится с результатами измерений.

Вторая часть доклада посвящена методике и результатам оптимизации формы внутренней стенки внешне того же U-образного канала (исходно внутренняя стенка до и после поворота была прямолинейной). Использовалась многопараметрическая процедура оптимизации с динамическим построением поверхности целевой функции (потерь давления на участке поворота) на основе URANS-решений. Оптимальные формы внутренней стенки были найдены как для неподвижного, так и вращающегося (в ту или иную сторону) канала; во всех случаях проточная часть приобретала конфузурно-диффузурный характер, а зоны отрывного течения кардинально уменьшались. Уточняющая оценка получаемого выигрыша проводилась посредством сопоставления решений по вихререзающим подходам для исходной и оптимальной геометрии. Во всех случаях было достигнуто уменьшение величины потерь давления в два и более раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.C. Cheah, H. Iacovides, D.C. Jackson, H. Ji, B.E. Launder. LDA investigation of the flow development through rotating U-ducts. *Journal of Turbomachinery*, 1996, 118 (3), 590–596.
2. F. Nicoud, F. Ducros. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 1999, 62 (3), 183–200.
3. M.L. Shur, P.R. Spalart, M.Kh. Strelets, A.K. Travin. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities. *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29 (6), 1638–1649.
4. Д.О. Панов, В.В. Рис, Е.М. Смирнов. Вихререзающее численное моделирование трехмерного турбулентного течения в канале с резким поворотом на 180 градусов. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, 2017, т. 10, № 4, с. 21–33.

РАЗВИТИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННО-КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ОДНОРОДНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Е.Б. Соболева

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

Знания о распространении примеси в почвах, грунтах и горных породах актуальны для различных областей жизнедеятельности человека, таких как альтернативная энергетика, экология, эффективное природопользование. Ряд проблем обусловлен наличием областей повышенной концентрации примеси. Настоящее исследование ориентировано, главным образом, на функционирование геотермальных резервуаров, являющихся возобновляемым источником энергии и использующих глубинное тепло Земли [1]. Оценки показывают, что при содержании в резервуаре концентрированных растворов конвекция, вызванная присутствием примеси может существенно превосходить тепловую конвекцию, обусловленную геотермическим градиентом [2]. В таких условиях влиянием температурных неоднородностей можно пренебречь и рассматривать конвективное движение под действием градиентов концентрации примеси.

Выполнено численное моделирование концентрационно-конвективных течений двухкомпонентной жидкости в прямоугольной пористой области, в которой первоначально содержится чистая вода в неподвижном состоянии. На верхней границе области задается постоянная концентрация примеси. Примесь от верхней границы диффундирует в объем, образуя концентрационный пограничный слой повышенной плотности. Под действием силы тяжести пограничный слой теряет устойчивость, что ведет к развитию концентрационной конвекции. Задача заключается в исследовании всех этапов конвективного движения и массопереноса от формирования концентрационного пограничного слоя и потери устойчивости до развития стохастического движения. Математическая модель включает уравнения неразрывности, Дарси и переноса примеси с учетом диффузии в пористой среде с переменными свойствами [3] и замыкается линейным уравнением состояния. На основе математической модели разработан конечно-разностный численный код, который использовался ранее [2, 4-6].

Проведено исследование концентрационной конвекции в однородных и неоднородных резервуарах, имеющих горизонтальный низкопроницаемый внутренний слой. При достижении инородного слоя течение замедляется, содержание соли над слоем увеличивается, что со временем приводит к качественным изменениям в структуре конвекции. Изучено влияние инородного слоя на глубину проникновения и суммарное количество примеси, скорость конвективного движения.

Автор благодарит Г.Г. Цыпкина за полезные обсуждения. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 16-11-10195).

ЛИТЕРАТУРА

1. С.В. Алексеенко, В.Ю. Бородулин, Н.А. Гнутась, М.И. Низовцев, Н.Н. Смирнова. Проблемы и перспективы развития петротермальной энергии (обзор). – Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 1. С. 1-16.
2. E. Soboleva. Numerical Simulation of Haline Convection in Geothermal Reservoirs. – Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 891. P. 012105.
3. J. Bear and A. Cheng. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport (Springer, 2010). 834 p.
4. Е.Б. Соболева. Метод численного исследования динамики соленой воды в почве. – Математическое моделирование. 2014. Т. 26. № 2. С. 50-64.
5. Е.Б. Соболева, Г.Г. Цыпкин. Численное моделирование конвективных течений в грунте при испарении воды, содержащей растворенную примесь. – Известия Академии Наук. Механика жидкости и газа. 2014. № 5. С. 88-99.
6. Е.Б. Соболева, Г.Г. Цыпкин. Режимы концентрационной конвекции при испарении грунтовых вод, содержащих растворенную примесь. – Известия Академии Наук. Механика жидкости и газа. 2016. № 3. С. 70-78.

ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ СВОЙСТВ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ДИНАМИКУ И УСТОЙЧИВОСТЬ СЛОЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ФЛОТИРУЮЩЕЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

И.Н. Солдатов, Н.В. Ключева

Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород

Для описания потенциальных волновых движений свободной поверхности жидкости с частицами твердого вещества, которые, плавая на поверхности, обладают некоторой массой и пренебрежимо мало взаимодействуют друг с другом в процессе колебаний, в работе Petters A.S. была предложена модель жидкости с инерционной поверхностью, иначе называемой флотирующей жидкостью. Позднее потенциальные движения идеальной флотирующей жидкости рассматривались в работах Mandal B.N., Габова С.А. и др. Широкий класс вихревых движений был обойден вниманием исследователей. Между тем, движение жидкости нельзя считать потенциальным в таких технических устройствах как центрифуги и сепараторы, где нередко приходится сталкиваться с всплыванием легких частиц на поверхность жидкости с образованием тонкого слоя.

В работе мы даём вывод неклассических граничных условий на свободной поверхности вязкой флотирующей жидкости в поле гироскопической и центробежной сил. Динамическое граничное условие на свободной поверхности в равномерно вращающейся с угловой скоростью Ω системе координат в пренебрежении малой силой тяжести имеет вид

$$\frac{\rho_s}{\sqrt{q}} \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} + \frac{1}{2} \nabla (\Omega \times \mathbf{r})^2 - 2 \mathbf{v} \times \Omega \right) \Big|_{\nabla F} = (p_a - p) \nabla F + 2\mu (\nabla F \cdot \nabla) \mathbf{v} + \mu \nabla F \times \text{curl } \mathbf{v}$$

где ρ_s – погонная плотность инерционной поверхности, q – детерминант метрического тензора, $F = 0$ – уравнение свободной поверхности. Найдено решение линеаризованной задачи о распространении гироскопических волн $\mathbf{v} = \hat{\mathbf{v}}_m(r) e^{i(kz + m\varphi - \omega t)}$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ($\hat{\mathbf{v}}_m = (u_m, v_m, w_m)^T$) во флотирующей жидкости, находящейся в полости равномерно вращающегося цилиндра:

$$w_m = \sum_{j=1}^3 w_{m,j}, \quad w_{m,j} = C_{2j-1} H_m^{(1)}(\lambda_j r) + C_{2j} H_m^{(2)}(\lambda_j r), \quad u_m = \sum_{j=1}^3 \left(\frac{im(\kappa_j - k)}{\lambda_j^2 r} w_{m,j} + \frac{ik}{\lambda_j} w_{m-1,j} \right)$$

$$v_m = \sum_{j=1}^3 \left(\frac{m(\kappa_j - k)}{\lambda_j^2 r} w_{m,j} - \frac{\kappa_j}{\lambda_j} w_{m-1,j} \right), \quad p_m = -\sum_{j=1}^3 \left(\frac{2}{\kappa_j} w_{m,j} \right),$$

где $H_m^{(1)}(\lambda_j r)$, $H_m^{(2)}(\lambda_j r)$ – функции Ганкеля, $\lambda_j^2 = \kappa_j^2 - k^2$, k – аксиальное волновое число, κ_j – корень уравнения $-ik\omega - 2i\Omega k + \nu \kappa^3 = 0$. Проанализировано влияние плотности инерционной поверхности, вязкости и толщины центрифугированного слоя жидкости, а также отношения частоты волны к угловой скорости вращения цилиндра на действительную и мнимую часть волнового числа распространяющихся мод. На рис. 2 показаны зависимости действительных частей безразмерных аксиальных волновых чисел $k_r = \text{Re}(k)$ нескольких низших мод от отношения частот $\tau = \omega/\Omega$ при $m=1$, $\delta = b/a = 0.7$, $E = \nu/(\Omega a^2) = 10^{-6}$ и двух различных $P = \rho_s/(\rho a)$: $P = 0$ (сплошные кривые) и $P = 0.5$ (пунктирные кривые).

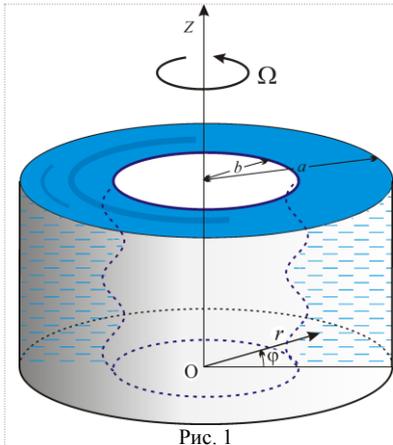


Рис. 1

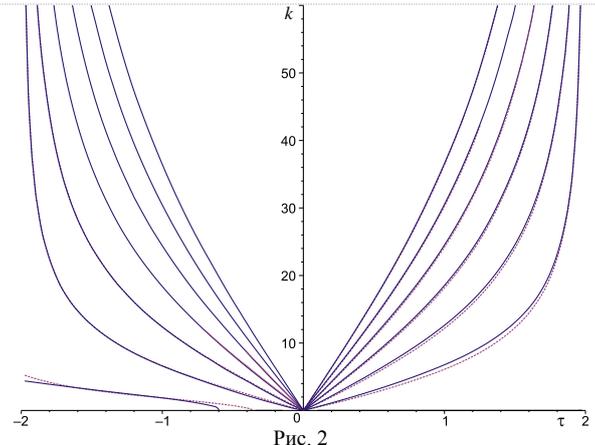


Рис. 2

Используя уравнение

$$\tau_i \left\{ \left[\int_V \mathbf{v}_{mm} \mathbf{v}_{mm}^* dV + 2\pi\delta \left((\delta + 3P) h_{mm} h_{mm}^* + P \mathbf{v}_{mm} \mathbf{v}_{mm}^* \right) \right]_{r=\delta} \right] + 2\pi P \frac{\delta^2}{|\tau|^2} \left[u_{mm} \frac{\partial u_{mm}^*}{\partial r} \right]_{r=\delta} \right\} = -2E \int_V \mathbf{e} \mathbf{e}^* dV$$

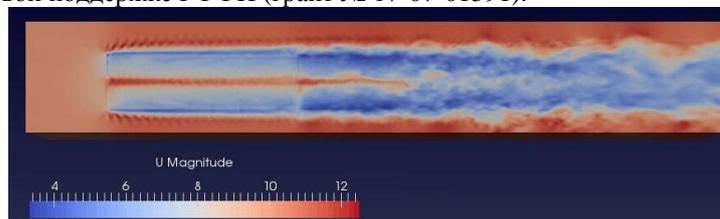
(где $\tau_i = \text{Im } \tau$, \mathbf{e} – тензор скоростей деформаций) определены границы изменения τ_i и условия возникновения неустойчивости.

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВИХРЕВЫХ СЛЕДОВ МОДЕЛЬНЫХ ВЕТРОУСТАНОВОК С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

С.В. Стрижак, М.Д. Калугин, К.Б. Кошелев, А.С. Крючкова,
Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

Методы, используемые для расчётов работы ветроустановок в атмосферном пограничном слое, находятся на стадии активного развития. На базе решателей для несжимаемой жидкости в составе открытого пакета OpenFOAM коллективом авторов из NREL была разработана тематическая библиотека SOWFA, в составе которой имеется несколько решателей, в том числе для расчёта атмосферного пограничного слоя методом крупных вихрей. Модель Actuator Line Model, присутствующая в библиотеке SOWFA, может быть использована для расчёта течения вблизи вращающихся лопастных турбин на фиксированной расчётной сетке, что значительно экономит вычислительные ресурсы и упрощает процесс счёта. Инженерная методика, используемая в модели, основана на представлении вращающихся лопастей в виде набора профилей с табулированными коэффициентами аэродинамических сил, в то время как их действие на поток моделируется посредством добавления в уравнение движения аэродинамической силы, спроецированной на расчётную сетку. В настоящей работе с использованием решателя pisoFoamTurbine, проводилось численное моделирование задач на базе экспериментов, организованных группами в Университете NTNU (Норвегия) [1]. В трубных экспериментах исследовались режимы работы двух модельных ветроустановок для случая $Re=10^5$. Ветроустановки располагались на разных расстояниях друг от друга: $x/D = 2.77; 5.18; 9.00$. Характерная скорость на оси ротора на высоте $N_{hub} = 0.827$ м задавалась $U_{ref} = 11.5$ м/с. Решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замкнутых при помощи полуэмпирической модели турбулентности, оказывается неэффективным при моделировании течений с нестационарными крупномасштабными вихревыми структурами. Для моделирования течения целесообразно использовать модель крупных вихрей. Крупномасштабные вихревые структуры рассчитывались при помощи интегрирования фильтрованных уравнений Навье-Стокса [3]. Для получения фильтрованных уравнений использовался коробочный фильтр. Мелкие вихри, размер которых не превышал шага расчетной сетки, моделировались с помощью динамической модели Смагоринского. Для дискретизации уравнений использовался метод конечных объемов. Полученные уравнения для связи скорости и давления решались итерационным алгоритмом PIMPLE. На входе расчетной области на средние значения накладывались случайные возмущения. На стенке задавалось условия непротекания. На выходе задавались условия продолжения потока. Расчетная схема имела второй порядок точности по времени и пространству. При расчёте использовались неструктурированные расчётные сетки в 4-8 миллионов ячеек. На рисунке показано поле скорости для двух ветроустановок в момент времени $t=2$ секунды.

Известно, что метод главных компонент (Proper Orthogonal Decomposition – POD) успешно используется для анализа динамики турбулентных вихревых следов для тел простой формы. Метод оценки динамики вихревых структур, их энергии основан на использовании метода главных компонент, предложенного в работе [3], в форме разработанной библиотеки в Apache Spark в ИСП РАН [4]. Фреймворк Apache Spark предназначен для распределенной отказоустойчивой обработки данных в оперативной памяти вычислительного кластера. Полученные поля скорости были обработаны в программе ScalaPOD с целью оценки вклада главных мод в общую кинетическую энергию турбулентных структур в следе ветроустановок в различные моменты времени. Была сформирована корреляционная матрица для значения скорости с размерностью $21 \times 21, 51 \times 51$. В результате расчета получено, что первые 4 главные моды содержат 90% общей энергии. Расчеты проводились на вычислительном кластере ИСП РАН на 24-96 ядрах. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-07-01391).



ЛИТЕРАТУРА

1. J. Bartl, L. Sætran. Blind test comparison of the performance and wake flow between two in-line wind turbines exposed to different turbulent inflow conditions. *Wind Energ. Sci.*, 2017. v. 2, 55–76.
2. К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: Физматлит. 2008. – 368 с.
3. L. Sirovich L. Turbulence and the dynamics of coherent structures, Part I: coherent structures. // *Q. Appl. Math.* 1987. XLV, 561–571.
4. M.D. Kalugin, S.V. Strijhak. Implementation of POD and DMD methods in apache spark framework for simulation of unsteady turbulent flow in the model combustor. ECCOMAS Congress 2016 - Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. 2016, 857-864.

ИНЕРЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И ОСРЕДНЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ

С.В. Субботин¹, А.С. Кропачева¹, В.В. Дьякова²

¹Лаборатория вибрационной гидромеханики,

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

²Кафедра прикладной физики,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Экспериментально исследуется динамика жидкости в неравномерно вращающемся (либрирующем) цилиндре, скорость вращения которого в лабораторной системе отсчета изменяется по закону $\Omega(t) = \Omega_{rot} [1 + \varepsilon \sin(\Omega_{lib} t)]$, где Ω_{rot} – средняя скорость вращения, Ω_{lib} – частота либраций, ε – амплитуда либраций. Либрации приводят к возникновению осциллирующего движения в пограничных слоях, в результате чего местах соединения боковой и торцевых стенок цилиндра рождаются инерционные волны (рис. 1а). Последние распространяются в объем жидкости вдоль характеристических поверхностей, расположенных под углом $\theta = \arcsin(\Omega_{lib} / 2\Omega_{rot})$ к оси вращения [1]. Обнаружено, что вблизи мест отражения инерционной волны от боковой стенки полости в пограничном слое Стокса возникает осредненное течение в виде осесимметричных тороидальных вихрей (рис. 1б). Скорость осредненного движения в вихрях пропорциональна квадрату амплитуды либраций. При определенных частотах инерционные волны испытывают пространственный резонанс, в результате чего в некоторые фазы либраций возбуждаются инерционные моды, которые являются собственными модами колебаний жидкости для данной геометрии полости [1]. Резонансное возбуждение инерционных мод приводит не только к интенсификации осредненного движения, но и модифицирует структуру течения в пограничном слое.

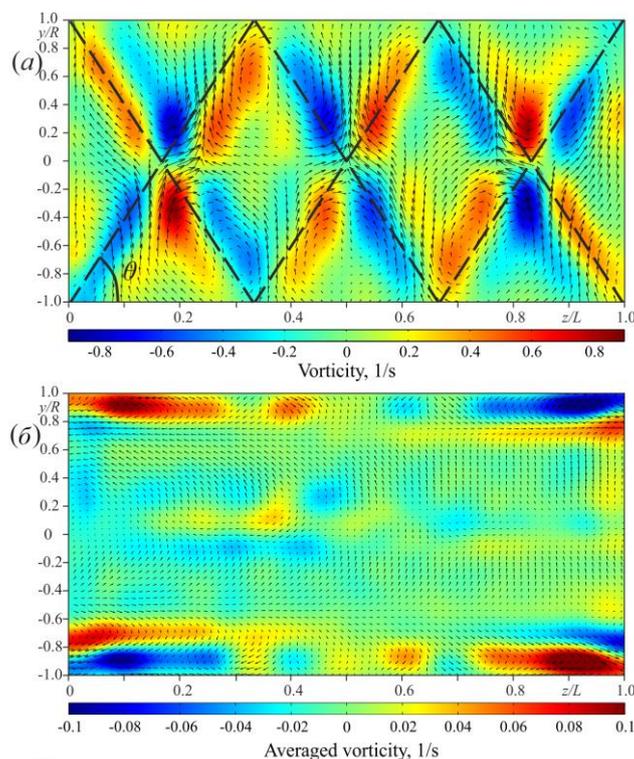


Рис. 1. Структура мгновенного (в фазе либраций $\Omega_{lib} t = 0$) и осредненного течения в осевом сечении полости при $\Omega_{lib} / \Omega_{rot} = 1.68$ и $\varepsilon = 0.1$. Цветом показана завихренность. Штриховыми линиями на фрагменте а показаны траектории распространения инерционных волн, рассчитанные по формуле $\theta = \arcsin(\Omega_{lib} / 2\Omega_{rot})$

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (проект МК-1994.2018.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей. Л.: Гидрометеиздат. 1975. С. 304.

ОСРЕДНЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПОЛОСТИ С ЭЛАСТИЧНОЙ СТЕНКОЙ, ЗАЖАТОЙ МЕЖДУ ДВУМЯ КОЛЕБЛЮЩИМИСЯ ГРАНИЦАМИ

С.В. Субботин¹, В.Г. Козлов¹, Р.Р. Сабиров²

¹Лаборатория вибрационной гидромеханики,

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

²Кафедра прикладной физики,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Экспериментально исследуются осредненные потоки, возбуждаемые в сфероидальной полости с эластичной упругой стенкой, зажатой между двумя колеблющимися границами. Периодические деформации приводят к возникновению осциллирующего движения в вязком пограничном слое Стокса. Последнее является источником осредненного течения, структура которого зависит от типа колебаний.

При поперечных колебаниях границ полость периодически сжимается и восстанавливается форму, при этом осредненное течение имеет вид двух пар тороидальных вихрей, ориентированных поперек оси вибраций (рис. 1) [1]. При тангенциальных колебаниях полость совершает вращательные вибрации, а ее форма в лабораторной системе отсчета остается неизменной. В этом случае генерируются осредненные потоки в виде вихрей, вытянутых вдоль оси поворота полости. Для обоих типов вибрационного воздействия характерна трансформация осредненного течения с безразмерной частотой $\omega = \Omega R^2 / \nu$ (здесь Ω – частота вибраций, R – радиус полости в недеформированном состоянии, ν – кинематическая вязкость жидкости), которая определяет отношение толщины пограничного слоя к размеру полости. С уменьшением безразмерной частоты толщина пограничного слоя возрастает, при этом в пределе низких ω направление движения жидкости в вихрях противоположно тому, что наблюдается в пределе высоких частот [1].

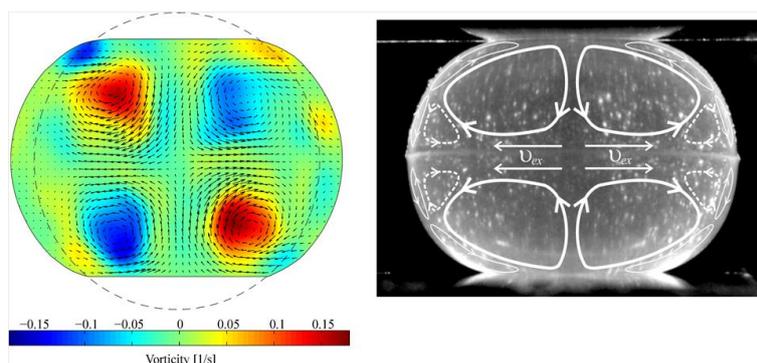


Рис. 1. Структура осредненного течения при поперечных колебаниях границ в осевом сечении (слева – поле завихренности, справа – схема потоков). Штриховой линией на левом фрагменте показана граница недеформированной полости; на правом фрагменте сплошные толстые линии показывают вторичные потоки жидкости в объеме полости, штриховые линии – приэкваториальные вихри, тонкие линии – потоки в пограничных слоях

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 16-31-60099 мол_а_дк).

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов В.Г., Сабиров Р.Р., Субботин С.В. Осредненные течения в осциллирующей сфероидальной полости с эластичной стенкой // Изв. РАН. МЖГ. 2018. №2 (в печати).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ АТТРАКТОРОВ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

Сюй Сюлинь, МГУ им. М.В. Ломоносова
И.Н. Сибгатуллин, МГУ им. М.В. Ломоносова
Е.В. Ерманюк, Институт гидродинамики Лаврентьева РАН
Leo Maas, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands
Thierry Dauxois, Ecole Normale Supérieure de Lyon, France

Инерционные волны во вращающихся жидкостях подчиняются особому дисперсионному соотношению, определяющему лишь направление их распространения по отношению к направлению вращения. В замкнутых геометриях это приводит к новым правилам игры в бильярд при отражении пучков волн от границ: сохраняется угол с направлением вращения, в результате возникают явления фокусировки и разфокусировки при отражении от наклонных границ, причём фокусировка в общем случае превалирует и в результате при наличии монохроматического источника волн возникают замкнутые пути — волновые аттракторы, впервые описанные Лео Маасом.

В настоящей работе мы исследуем трёхмерные режимы, возникающие при монохроматическом воздействии различного типа на вращающиеся слои с наклонными стенками. Воздействия могут соответствовать приливным эффектам, либрации, или полностью аксиально симметричному воздействию.

Мы впервые описали трёхмерную структуру волнового аттрактора во вращающейся системе координат при приливном воздействии, и показали, что аттрактор перекручивается в азимутальном направлении, так что в азимутальном сечении вращающаяся картина «инь-янь». Это возникает по причине отсутствия осе симметричности аттрактора и наличия угла между распространением волны и радиальным направлением. Также мы описали неустойчивость аттракторов большой амплитуды и показали, что триадный резонанс возникает не в плоскости трапеции, как ранее было нами показано для внутренних волн в квазидвумерной постановке, а в азимутальном направлении, причём вторичные волны бегут в разных направлениях. Анализ спектра также показал формирование среднего течения на фоне образования аттрактора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 15-01-06363-а.

TURBULENCE ANISOTROPIZATION UNDER THE ACTION OF EXTERNAL BODY FORCES

Semion Sukoriansky

Department of Mechanical Engineering, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel

Most of practically important turbulent flows are exposed to external factors, such as density stratification, solid body rotation, external magnetic fields, etc. Some of these extra strains support wave solutions in linearized problems (e.g. gravity waves in stably stratified flows, inertial waves in rotating flows, Alfvén waves in MHD turbulence) that lead to complex wave-turbulence interactions in fully non-linear formulation. In addition, the extra strains may render the large-scale flows strongly anisotropic. We present an investigation of turbulence anisotropization by external body forces (gravity, rotation and magnetic friction) using the quasi-normal scale elimination (QNSE) theory of turbulence. This theory uses a recursive procedure of averaging over infinitesimal bands of modes starting from the smallest turbulent scales. The approximation of quasi-normality is used in a weak sense for the modes been eliminated and is complemented by the “renormalization” of eddy viscosity. Thus, the QNSE theory belongs in the class of the quasi-normal eddy-damped theories of turbulence. In the limit of weak extra strain, the theory becomes completely analytical and yields simple expressions for anisotropic eddy viscosities and eddy diffusivities. In addition, the theory provides expressions for various one-dimensional spectra that quantify turbulence anisotropization.

Tendency to two-dimensionalization is clearly seen in flows with solid body rotation and magnetic friction. Four different eddy viscosities emerge in rotating case, reflecting both directional and componental anisotropization. Three of them decrease relative to the eddy viscosity in non-rotating flows while one increases; the horizontal (normal to the vector of rotation) viscosity decreases at the fastest rate. This behavior is indicative of the increasing redirection of the energy flux to larger scales, the phenomenon that can be associated with the energy backscatter or inverse energy cascade. Anisotropization of stably stratified flow is different; in this flow the effective viscosity in the vertical direction decreases but remains finite while the vertical diffusivity diminishes on large scales where stratification is strong. On the other hand, both horizontal viscosity and diffusivity increase on large scales compared with the case of neutral stratification.

On largest, planetary scales, quasi-two-dimensional turbulence undergoes additional anisotropization due to latitudinal variation of Coriolis parameter and ensuing generation of Rossby waves. In certain range of parameters, typical to giant planets, the flow attains some quasi-one-dimensional features with strong zonal east-west jets dominating the largest scales. The concentration of energy in the zonal components and breaking of isotropy are caused by the strongly anisotropic spectral energy transfer and the stabilization of zonal mean flow by meridional gradient of the planetary vorticity. This regime is a subset of geostrophic turbulence and has been coined *zonostrophic* turbulence.

ЛИТЕРАТУРА.

1. S. Sukoriansky and B. Galperin. QNSE theory of turbulence anisotropization and onset of the inverse energy cascade by solid body rotation. *J. Fluid Mech.*, 2016, vol. 805, pp. 384-421.
2. S. Sukoriansky and E. Zemach. Theoretical study of anisotropic MHD turbulence with low magnetic Reynolds number. *Physica Scripta*, 2016, vol. 91(3), pp. 034001(14 pp).
3. S. Sukoriansky and B. Galperin. An analytical theory of the buoyancy-Kolmogorov subrange transition in turbulent flows with stable stratification. *Phil. Transactions of the Royal Society A*, 2013, vol. 371, pp. 1-35.
4. S. Sukoriansky, B. Galperin, and I. Staroselsky, A quasinormal scale elimination model of turbulent flows with stable stratification. *Physics of Fluids*, 2005, vol. 17 (8), 085107-1-28.
5. B. Galperin, S. Sukoriansky, and N. Dikovskaya. Zonostrophic turbulence. *Physica Scripta*, 2008, T132 014034 (7pp).
6. B. Galperin, R.M.B.Young, S. Sukoriansky, N. Dikovskaya, P. L. Read, A. J. Lancaster, and D. Armstrong. Cassini observations reveal a regime of zonostrophic macroturbulence on Jupiter. *Icarus*, February 2014, vol. 229, pp. 295–320.

УТОЧНЕННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭВОЛЮЦИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НАД НЕРОВНЫМ ДНОМ

Л.В. Талалушкина, П.В. Лобовиков

Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород

Внутренние гравитационные волны – вид волновых движений в слоистой (стратифицированной) жидкости (газе). Внутренние волны могут существовать не только при скачкообразном изменении плотности, но и при ее непрерывном распределении по глубине. Простейший устойчивый случай – внутренние волны на границе раздела двух однородных несжимаемых жидкостей, из которых нижняя имеет большую плотность. Внутренние волны являются типичным явлением в атмосфере и гидросфере Земли, оказывают существенное влияние на процессы, происходящие внутри жидкости, практически никак не проявляясь на поверхности воды. Динамика таких волн крайне сложна из-за их нелинейности. Особенный интерес представляют локализованные возмущения, описываемые в слабонелинейном пределе фундаментальными неизлучающими решениями упрощенных моделей (эволюционных уравнений). Для моделирования внутренних волн обычно используются уравнения семейства Кортевега–де Вриза (КдВ), имеющие переменные коэффициенты в случае неоднородной среды [1].

В настоящей работе получено эволюционное уравнение Кортевега – де Вриза второго порядка с переменными коэффициентами (пКдВ2) для двухслойной жидкости с неровным дном, аналогично уравнению для поверхностных волн в однородной жидкости представленному в работе [2]. Для решения поставленной в работе задачи была выбрана система компьютерной алгебры Maple, в которой был написан программный комплекс, содержащий в себе процедуру асимптотического вывода уравнения пКдВ2.

Рассматриваем систему уравнений невязкой несжимаемой стратифицированной жидкости с неровным дном, которая сводится в нашем случае к системе двух уравнений Лапласа с граничными условиями. Имеем дело с двумя слоями разной плотности и толщины. Вся жидкость в каждом слое однородна. На границах раздела слоев запишем кинематические и динамические граничные условия, выполняющие роль условий «сшивки» для рассматриваемых функций, также записывается условие не протекания на дне, с учетом переменного дна. В предположении малости амплитуд распространяющихся возмущений граничные условия могут быть сведены к более простому виду путем разложения всех неизвестных функций, в них входящих, в ряды Тейлора по малым отклонениям от невозмущенного уровня. Используя слабонелинейную теорию, все члены результирующих рядов будем раскладывать в степенные ряды по малому параметру. Для того чтобы получить уравнение пКдВ2 необходимо выписывать уравнения при каждом порядке малости для ε . Таким образом, получаем уравнение пКдВ2 для внутренних волн на границе раздела в двухслойной жидкости с переменным дном.

Коэффициенты для этого уравнения, с учетом переменной глубины дна до второго порядка малости включительно были получены впервые. Проведено численное моделирование в рамках полученного уравнения и уравнений Гарднера и пКдВ, проведено сравнение поведения их решений в случае неровного дна, имеющего углубление и/или возвышение, при различной амплитуде изменения формы дна. Для исследования внутренних волн выбраны масштабы близкие к реальным условиям в океане. Моделирование производилось с помощью адаптированной неявной псевдо-спектральной схемы [3] с контролем сохранения интегралов массы и энергии. Подобный код неоднократно использовался для моделирования волновых процессов различной природы [4,5].

Показано, что, 1) в отличие от поверхностных волн, для слабонелинейных внутренних волн в горизонтально-неоднородной двухслойной жидкости в рамках пКдВ возможно явление конкуренции нелинейности и неоднородности, 2) изменения амплитуды солитона в рамках полученного уравнения происходит по классическому сценарию.

Литература

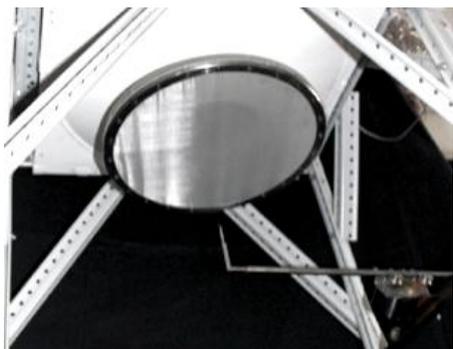
1. X. Zhou, R. Grimshaw The effect of variable currents on internal solitary waves // Dynamics of Atmospheres and Oceans, 1989, V.14, p.17–39.
2. A. Karczewska, P. Rozmej, E. Infeld Shallow-water soliton dynamics beyond the Korteweg–de Vries equation // Phys. Rev. E. 90, p.012907-1-8, 2014
3. B. Fornberg A practical guide to pseudospectral methods // Cambridge University Press 1998, 231 p.
4. E. Pelinovsky, O. Polukhina, A. Slunyaev & T. Talipova Internal solitary waves // Chapter 4 in the book “Solitary Waves in Fluids”. WIT Press. Southampton, Boston. 2007. P. 85 – 110.
5. O. E. Kurkina, A. A. Kurkin A, T. Soomere, E. N. Pelinovsky, E.A. Rouvinskaya Higher-order (2+4) Korteweg–de Vries–like equation for interfacial waves in a symmetric three-layer fluid // Phys. Fluids. 2011. Vol. 23. No. 11. P. 116602-1 – 13.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АРХИМЕДОВОЙ СИЛЫ

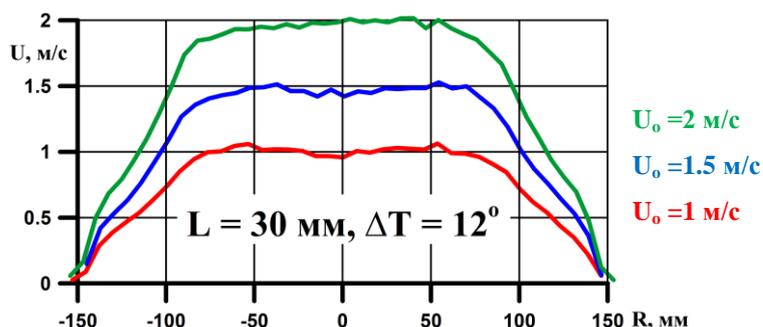
С.Х. Тепловодский, Ю.С. Зайко, А.И. Решмин, В.В. Трифонов, А.Д. Чичерина
Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Проведено экспериментальное исследование воздушной затопленной струи с низкой интенсивностью турбулентности диаметром 300 мм при воздействии на нее выталкивающей силы, возникающей при нагреве поступающего на вход формирующего устройства воздуха. Изучено влияние архимедовых сил на течение начального участка струи, где скорость в ядре потока сохраняется.

Для формирования струи использована специально разработанная технология. Основным элементом формирующего струю устройства являлся сверхкороткий диффузор - круглый короткий диффузор с проницаемой перегородкой в выходном сечении [1].

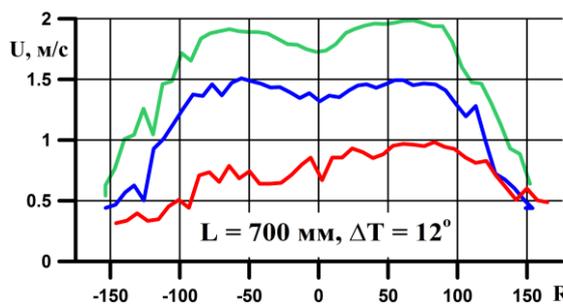


Устройство формирования ламинарной затопленной струи диаметром 300 мм.

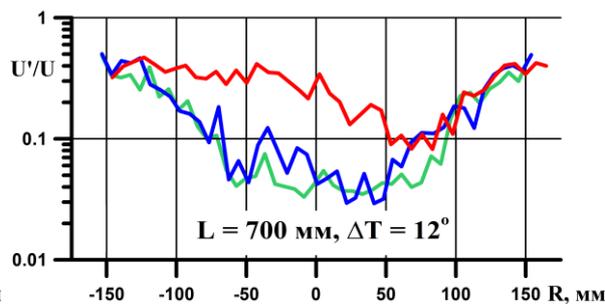


Распределение осевой скорости по диаметру струи при $\Delta T = 12^\circ$.
Минимальная скорость для преодоления сил Архимеда при $L=0.8$ м, $\Delta T=15^\circ$ - $U = 0.9$ м/с

Проведены подробные измерения характеристик формируемой затопленной струи на различных удалениях от её начала, на различных скоростных режимах, при различных подогревах воздуха, как для свободной струи, так и в условиях натекания струи на горизонтальную плоскую поверхность. Измерения скорости потока делались с помощью проволочного термоанемометра. Использовались датчики скорости с термокомпенсацией 55P81. Датчики располагались на устройстве перемещения, допускающем позиционирование с точностью 0.2 мм.



Параметры течения перед натеканием нагретой струи на горизонтальную поверхность



Результаты измерений параметров потока нагретого до 30° С воздуха на расстоянии меньше 1 диаметра струи от поверхности показывают, что если начальная скорость на оси струи больше 1.0 м/с, то профиль скорости в струе почти не отличается от начального. При начальной скорости потока в центре струи 1 м/с всплывание струи становится заметным, симметрия потока нарушается.

Показана возможность применения разработанной технологии в газодинамической установке для организации локальной абактериальной зоны в мобильной установке медицинского назначения.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Reshmin A., Sudarikova A., Teplovodskii S., Zayko J. Technology for formation of axisymmetric jet with long laminar region. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 894, 012080.

ПОДАВЛЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ

С.Н. Толкачев¹, С.А. Баранов¹, Д.С. Сбоев¹, И.А. Моралев², М.В. Устинов¹
1. Центральный аэрогидродинамический институт; 140180, Жуковский, Россия
2. Институт высоких температур РАН; 125412, Москва, Россия

Ламинаризация несущих поверхностей в настоящее время рассматривается в качестве одной из основных возможностей для снижения аэродинамического сопротивления самолета. На стреловидном крыле доминирующим механизмом перехода является развитие неустойчивости поперечного течения. В условиях низкой степени турбулентности набегающего потока переход определяется стационарными возмущениями.

Методика подавления наиболее неустойчивых мод путем модификации структуры пограничного слоя с помощью менее усиливающейся моды (так называемая «мода-защитник») была предложена и успешно испытана Сариком [1]. Продолжением этой идеи является использование диэлектрического барьерного разряда (ДБР) для возбуждения «моды-защитника».

Исследование влияния ДБР на структуру пограничного слоя проводилось в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-124 ЦАГИ. Трехмерный пограничный слой был организован над верхней плоскостью модели скользящей плоской пластины с криволинейными верхними и боковыми стенками, имитирующими распределение градиента давления, характерное для стреловидного крыла. Модель с углом скоса 35°, размахом 998 мм, хордой 2100 мм, толщиной 20 мм была изготовлена из органического стекла. Передняя кромка модели эллиптическая с длиной большой полуоси 80 мм. Ось X ортогональна передней кромке и отсчитывается от неё.

Эксперименты проводились при скорости набегающего потока $U_{fs} = 30$ м/с. Исследование структуры пограничного слоя проводилось с помощью термоанемометрии. ДБР актуатор общей длиной 390 мм размещался параллельно передней кромке в 110 мм от неё. Конструктив был рассчитан для зажигания микрозарядов (подробное описание дано в [2]) с шагом 5 мм в положении $X = 125$ мм для возбуждения «моды-защитника». На актуатор подавалось синусоидальное напряжение амплитудой 2.5 кВ и частотой 65 кГц. Для возбуждения наиболее неустойчивой стационарной моды («целевая») с длиной волны 7.62 мм на переднюю кромку в положение $X = 75$ мм размещался набор цилиндрических элементов шероховатости $20 \text{ мкм} \times 1 \text{ мм}$.

Анализ термоанемометрических измерений в нескольких положениях по X показал эффективность ДБР для возбуждения «защитника». Одновременное развитие «целевой» моды и «защитника» исследовалось в области $X = 280\text{--}650$ мм. Показано (Рис. 1, слева), что «мода-защитник» амплитудой 3% подавляет развитие «целевой моды» в области $X = 580\text{--}600$ мм. Ниже по течению амплитуда «целевой моды» для режима с ДБР равна естественному режиму без ДБР.

Обнаружено увеличение пульсаций скорости во всех позициях, в которых проводились измерения. Спектральный анализ показал, что увеличение пульсаций происходит из-за возбуждения бегущей моды неустойчивости поперечного течения в диапазоне 100–600 Гц. Включение актуатора приводит к ускорению процесса перехода, что иллюстрируется увеличением высокочастотной области спектра вдали от передней кромки (см. Рис. 1, справа).

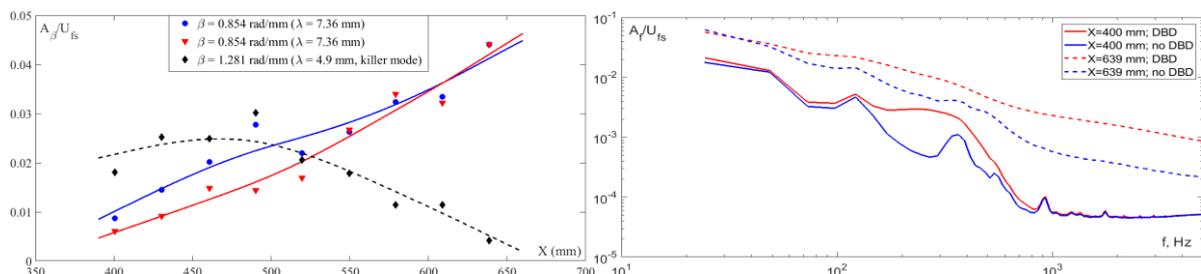


Рис 1: Развитие стационарных мод (слева): «целевая мода» с ДБР (красная); «целевая мода» без ДБР (синяя); «мода-защитник» (черная). Осредненные по размаху амплитудные спектры (справа) для режимов с ДБР (красный) и без (синий) в двух положениях по X : 400 мм (сплошные линии); 639 мм (пунктирные линии).

Эксперименты показали потенциал использования ДБР для управления ламинарно-турбулентным переходом за передней кромкой. Однако ключевой проблемой, которую при этом предстоит решить в будущих исследованиях – возбуждение бегущих возмущений актуатором.

ЛИТЕРАТУРА.

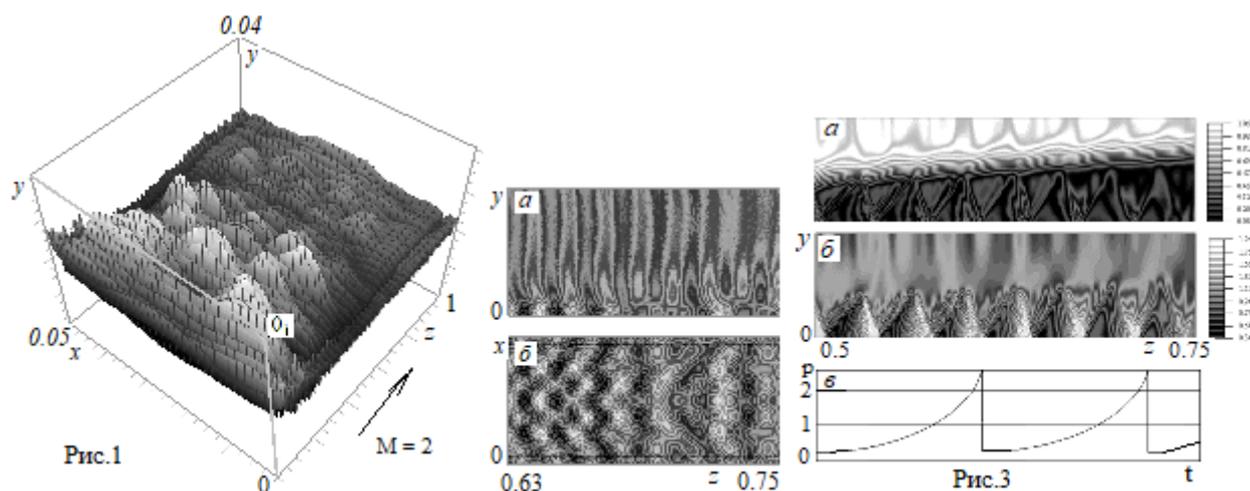
1. Saric, W., Carrillo, R.B., Reibert, M.S.: Leading-edge roughness as a transition control mechanism. AIAA 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, January 12-15, 1998, Reno, Nevada, AIAA-98-0781.
2. Moralev I, Bityurin V, Firsov A, Sherbakova V., Selivonin I., Ustinov M. Localized micro-discharges group DBD vortex generators - disturbances source for active transition control. In: Proc. 7th EUCASS - European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). Milan, Italy, 2017, p.266.

НЕЛИНЕЙНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ЛАМИНАРНО - ТУРБУЛЕНТНОМ ПЕРЕХОДЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Р.Я. Тугазаков, И.И. Липатов

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Интерес многих исследователей к процессу перехода объясняется как прикладной стороной вопроса, в частности, определением аэродинамических характеристик обтекаемых тел, так и желанием дополнить теоретические познания о природе данного сложного явления. В монографии [1] подробно изложены теоретические подходы на решение данной проблемы с точки зрения неустойчивости пограничного слоя в сверхзвуковом потоке газа. Современные экспериментальные результаты по относительной восприимчивости трёхмерного сверхзвукового пограничного слоя к контролируемым возмущениям приведены в [2]. В статьях авторов [3, 4] описаны механизмы образования когерентных структур в задачах, когда на плоскую пластину, обтекаемую сверхзвуковым потоком газа, набегают сильная или акустическая волна. Задачи решались прямым численным моделированием течения газа в рамках уравнений Навье - Стокса без привлечения моделей турбулентности. В [4] при анализе обтекания гармонической волной пластины короткой длины найдены максимальные коэффициенты усиления амплитуды набегающей волны в зависимости от соотношений длины волны с толщиной пограничного слоя и шириной обтекаемой пластины. В настоящей работе продолжены исследования, проведённые в [4], для чисел Рейнольдса больше критического значения, чтобы получить численно картину перехода ламинарного режима в турбулентный.



На рис. 1 представлена мгновенная картина пульсаций давления при пространственном обтекании пластины с $M=2$ и наложенными внешними возмущениями. Картина распада волны Толлмина-Шлихтинга ($M=2$) и последующая турбулизация потока с всплытием вихрей с поверхности пластины дана на рис.2 в поперечном центральном сечении и на поверхности пластины. На рис. 3 приведены картины наклонных интенсивных акустических волн, образованных из-за нелинейного усиления внешних возмущений (поля плотности и давления, $M=4$). Здесь же приведено поведение по времени величины давления на поверхности пластины в области максимального усиления внешних возмущений. В работе показано, что области максимального усиления возрастают температура и энтропия. Волны, образующиеся внутри пограничного слоя, порождают на его границе вихри, диаметры которых в 4-5 раз меньше длины набегающей волны. При $z \geq 0.8$ интенсивность волн падает, происходит интенсивное распространение пульсаций в поперечном направлении, что соответствует турбулизации потока.

Работа поддержана грантом Министерством образования и науки РФ (договор №14.G39.31.0001 от 13.02.2017 г.) и грантом РФФИ (№ 17-01-00129 а).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Гапонов С. А., Маслов А. А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках.— Новосибирск: Наука, 1980, с. 143.
2. Kosinov A.D., Kolosov G.L., Panina A.V., et al. Experiments on relative receptivity of three-dimensional supersonic boundary layer to controlled disturbances and its development//Progress in Flight Physics, 2013, vol. 5, p. 69-80.
3. Липатов И.И., Тугазаков Р.Я. Механизм образования пульсаций давления при падении ударной волны на пограничный слой// Ученые записки ЦАГИ, 2013, Т.XLIV, № 1, с. 62-74.
4. Lipatov I. I. and Tugazakov R. Ya. Generation of Coherent Structures in Supersonic Flow past a Finite-Span Flat Plate// Fluid Dynamics, 2015, vol. 50, No. 6, p. 793– 799.

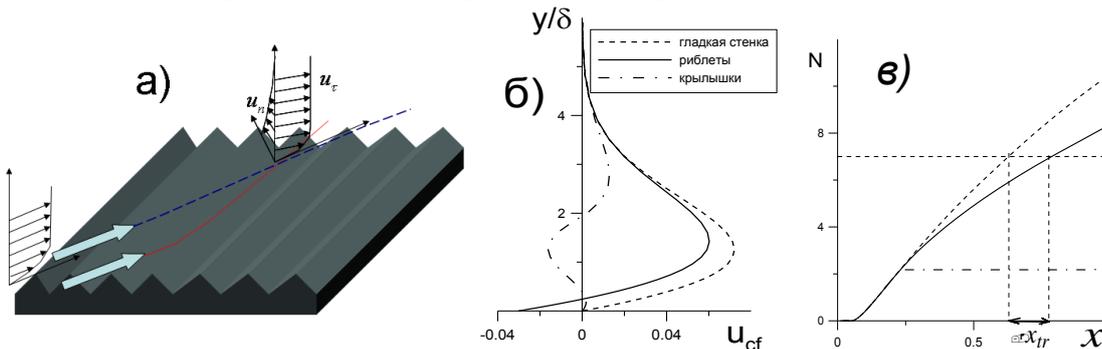
УПРАВЛЕНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫМ ПЕРЕХОДОМ НА СТРЕЛОВИДНОМ КРЫЛЕ С ПОМОЩЬЮ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

М.В. Устинов

Центральный Аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), Жуковский

Естественная ламинаризация обтекания за счет создания благоприятного градиента давления неприменима на стреловидном крыле из-за неустойчивости поперечного течения в пограничном слое. Гибридная ламинаризация (сочетание отсоса пограничного слоя вблизи передней кромки с разгоном потока на остальной его части) является единственным надежным способом сохранения ламинарного режима течения. Однако ее практическое применение технически сложно. Альтернативные способы затягивания перехода с помощью периодически расположенных элементов шероховатости или диэлектрического барьерного разряда недостаточно эффективны. По этой причине поиск принципиально новых способов управления ламинарно-турбулентным переходом на стреловидном крыле остается актуальной задачей.

В докладе предложено использовать с этой целью микрорельеф поверхности в виде ребер либо крылышек, расположенных под углом к внешним линиям тока. Такой рельеф способен отклонить вектор скорости в пристеночной части пограничного слоя в направлении противоположном поперечному течению. Воздействие риблетов на основное течение в пограничном слое и неустойчивые возмущения описывалось моделью высоты проникновения [1], справедливой для малой по сравнению с толщиной пограничного слоя их высоты. Влияние на пограничный слой рельефа в виде крылышек моделировалось добавлением в уравнения импульса объемной силы, противоположной по знаку аэродинамической силе, действующей на крылышки, установленные на единице площади поверхности. При этом объемная сила считалась однородной по размаху, однако изменялась по вертикальной координате пропорционально подъемной силе и сопротивлению отдельных сечений крылышек. Для определения подъемной силы и сопротивления крылышек использовались зависимости аэродинамических коэффициентов от угла атаки, найденные из численного моделирования обтекания прямоугольного крыла при числе Рейнольдса 300 в [2].



В качестве основного течения для оценки влияния микрорельефа на ламинарно-турбулентный переход использовалось автомодельное течение Фолкнера-Скэна-Кука для угла стреловидности $\chi=35^\circ$ и степенного закона распределения продольной составляющей скорости на внешней границе с показателем степени 0.3. Число Рейнольдса, вычисленное по характерной толщине пограничного слоя $\delta=(\nu L/U_\infty)^{1/2}$ на расстоянии L от передней кромки, составляло $R=1000$. Расчеты выполнялись для двух форм микрорельефа: риблетов с высотой проникновения 0.1δ с углом наклона ребер 20° и треугольных крылышек высотой 2δ и суммарной площадью 1.5% площади поверхности установленных под углом атаки 10° к внешним линиям тока. Микрорельеф начинался с расстояния $0.2L$ от передней кромки. Воздействие микрорельефа на профиль скорости поперечного течения в конечном сечении $x=L$ показано на части б рисунка. Влияние на него риблетов сосредоточено в пристеночной части пограничного слоя. Уменьшение ими максимальной скорости поперечного течения не превышает 20%. Рельеф в виде крылышек отклоняет вектор скорости по всей толщине пограничного слоя и практически полностью устраняет неустойчивость поперечного течения. Воздействие микрорельефа на максимальные коэффициенты усиления стационарных мод неустойчивости поперечного течения (N-факторы) показано на части в рисунка. При критическом значении N-фактора равном 7 риблеты увеличивают длину ламинарного участка на 25%, а крылышки практически устраняют нарастание возмущений. Расчеты, выполненные при больших числах Рейнольдса, показали, что эта форма микрорельефа может обеспечить увеличение длины ламинарной области в 3-4 раза. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-01-00705).

ЛИТЕРАТУРА

1. Luchini P., Manzo M., Pozzi A. Resistance of a grooved surface to parallel and cross-flow. – J. Fluid Mech, 1991, v.228, p. 87-109.
2. Taira K, Colonius T Three-dimensional flows around low-aspect-ratio flat-plate wings at low Reynolds numbers// J. Fluid Mech, 2009, V. 623, p. 187-207.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВЫХ ЛАМИНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ И НА ЗЕМЛЕ

А.И. Федюшкин

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
НИИ «Курчатовский институт»*

В работе приводятся результаты численного моделирования гидродинамики и тепломассопереноса ламинарных (стационарных и квазистационарных) течений, но при высоких определяющих параметрах, обсуждаются некоторые нелинейные особенности ламинарных течений, которые нельзя получить, решая данные задачи аналитическими методами.

Одним из проявлений нелинейности ламинарных течений от определяющих параметров является существование максимума расслоения (температурного или концентрационного) в зависимости от безразмерных чисел, характеризующих интенсивность перемешивания жидкости в замкнутом объеме.

Кроме эффекта максимума температурного (концентрационного) расслоения в данной работе рассмотрены результаты численного моделирования гидродинамики и тепломассопереноса и обсуждаются особенности ламинарных течений следующих задач:

- 1) Рассмотрена задача о нарушении симметрии и стационарности течения в плоском диффузоре/конфузоре в невесомости.
- 2) Показано влияние нелинейного характера зависимости скорости естественно-конвективного течения от приложенного горизонтального градиента температуры на образование различных стационарных структур течения и появление противотоков основному течению в длинных горизонтальных слоях при пониженной и нормальной гравитации.
- 3) Приводятся результаты управления конвективным тепломассопереносом при выращивании монокристаллов. Показано влияние управляемых вибраций на тепломассоперенос в расплаве, на форму фронта кристаллизации и на толщины пограничных слоев.
- 4) Задача об изменении формы и положения границы раздела при термокапиллярной конвекции и влиянии ускорения силы тяжести на положение границы раздела двухслойной системы «вода-воздух».

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВИХРЕВЫХ КОНФИГУРАЦИЙ НА ПЛОСКОСТИ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ

А.М.Филимонова, В.Н.Говорухин

Институт математики, механики и компьютерных наук им.И.И.Ворovichа, ЮФУ, Ростов-на-Дону

Математические модели динамики невязкой несжимаемой жидкости в геофизических приближениях широко используются в исследованиях, в частности, для изучения вихревых конфигураций в атмосфере. В настоящей работе представлены результаты вычислительных экспериментов анализа динамики вихревых конфигураций в присутствии силы Кориолиса (на γ -плоскости).

Математически такая задача формулируется в виде системы уравнений в терминах завихренности и функции тока вида:

$$\frac{D\omega}{Dt} \equiv \omega_t + \psi_y \omega_x - \psi_x \omega_y = 0, \quad \omega + f = -\Delta\psi + \Lambda^2\psi, \quad (1)$$

где t – время, x, y – координаты на плоскости, γ, Λ – параметры, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $f = f(r) = f_0 + \frac{1}{2}\gamma r^2$ – планетарная завихренность, $\omega = \omega(x, y)$ – абсолютная завихренность, а индексы означают дифференцирование по переменной. В случае, когда $\gamma = f_0 = \Lambda = 0$, задача (1) является уравнениями Эйлера динамики идеальной, несжимаемой жидкости на плоскости. Из первого уравнения (1) следует, что абсолютная завихренность ω пассивно переносится жидкими частицами. Второе уравнение связывает абсолютную завихренность ω и функцию тока ψ . Задача рассматривается на всей плоскости.

Для анализа динамики и взаимодействия вихревых конфигураций разработан вариант метода вихрей-ячейках, основанный на подходах работ [1-4]. В основе метода лежат следующие положения:

- Абсолютная завихренность ω в начальный момент времени задается дискретно в N частицах и переносится пассивно вектором скорости $v = (-\psi_y, \psi_x)$.
- Поле абсолютной завихренности $\omega(x, y)$ на каждом временном шаге аппроксимируется кусочно-непрерывным набором кубических полиномов, коэффициенты которых находятся методом наименьших квадратов, а поле планетарной завихренности пересчитывается по явным формулам.
- Функция тока ψ в каждый момент времени приближается отрезком ряда Фурье $\sum_{i=1}^{k_x} \sum_{j=1}^{k_y} \psi_{ij}(t) g_{ij}(x, y)$, где $g_{ij}(x, y)$ – базисные тригонометрические функции, а $\psi_{ij}(t)$ – неизвестные коэффициенты функции тока, которые находятся проекционным методом Бубнова-Галеркина.
- Динамика жидких частиц описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений: $\dot{x} = -\psi_y, \dot{y} = \psi_x$, которая решается при помощи псевдосимплектического метода Рунге-Кутты.
- Расчетной областью является прямоугольник $D = \{-a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b\}$, на границах которого заданы периодические краевые условия для ψ . Результаты расчетов рассматриваются в области $D_1 = \{-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}\}$.
- Для исследования интенсивности взаимодействия вихревых пятен реализован алгоритм вычисления локальных показателей Ляпунова.

В докладе представлены результаты тестовых расчетов по проверке адекватности численной схемы. С помощью численных экспериментов изучены динамика мультипольных вихревых конфигураций в отсутствие силы Кориолиса, а также влияние параметра γ на взаимодействие вихревых пятен и порождаемые процессы перемешивания. С помощью расчетов на больших временах исследована зависимость вида финальных конфигураций от начальных вихревых структур и величины параметра γ . Показано, что наличие силы Кориолиса может как интенсифицировать процессы взаимодействия вихревых пятен, так и тормозить их.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Govorukhin V.N., Il'in K.I. Numerical study of an inviscid incompressible flow through a channel of finite length. // International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2008, pp.1-19.
2. Говорухин В.Н. Вариант метода вихрей в ячейках для расчета плоских течений идеальной несжимаемой жидкости // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2011. Т.51 №6. С. 1133-1147.
3. Govorukhin V. A meshfree method for the analysis of planar flows of inviscid fluids // Lecture Notes in Computational Science and Engineering Vol. 89, 2013, pp. 171-180.
4. Говорухин В.Н. Численный анализ динамики распределенных вихревых конфигураций // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2016. т.56, N8, с.1491-1505.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ДВИЖЕНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ МИКРОЧАСТИЦ

Е.А. Франц¹, Г.С. Ганченко¹, В.С. Шелистов¹, Н.В. Никитин², Е.А. Демёхин^{1,2}

¹Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Краснодарский филиал)

²Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Настоящая работа посвящена изучению влияния электроосмотических эффектов на электрофорез – движение частиц в растворе электролита под воздействием приложенного электрического поля. Классическим случаем является рассмотрение заряженных диэлектрических частиц, которому посвящено множество работ – от исследований Гельмгольца и Смолуховского при слабых полях до обобщений Ярива и Шнитцера [1]. Существуют также работы, рассматривающие проводящие частицы; например, в [2] показано, что проводимость поверхности существенно снижает мобильность частицы (под которой обычно понимается отношение установившейся скорости движения к напряжённости поля). Особый случай представляют частицы с «полупроводящей» поверхностью, которая избирательно пропускает ионы раствора. Модель идеально селективной поверхности сформулирована в [3], но последующие работы до сих пор оставляют открытыми ряд вопросов, включая самый главный – вычисление мобильности частицы для всего диапазона напряжённостей поля. Рассмотрение же более сложных типов поверхностей (локально проводящие, мозаичные, поверхности с частичной селективностью) до сих пор не проводилось.

Особенности электрофореза частицы с ионоселективной поверхностью связаны с проявлением эффектов, характерных для электроосмотического движения электролита около ионообменных мембран. Поведение электролита при этом качественно соответствует мембранной системе: при малой напряжённости поля около частицы образуется практически однородный двойной слой (электроосмос 1 рода); при увеличении напряжённости с одной стороны частицы формируется зона пространственного заряда (электроосмос 2 рода); при очень сильных полях движение электролита становится хаотическим. В отличие от проводящей частицы, мобильность здесь не снижается, а, наоборот, повышается с увеличением напряжённости.

В настоящей работе электрофорез моделируется численно, а в предельных случаях делаются аналитические оценки. Используется упрощённая модель, пренебрегающая распределением заряда внутри частицы (аналогично работе [3]), однако она качественно воспроизводит наблюдаемые в экспериментах эффекты и довольно точно оценивает мобильность частицы в слабых и умеренных полях. Отмечается, что мобильность полупроницаемой частицы не подчиняется формуле Гельмгольца-Смолуховского. В работе приводятся характерные распределения концентраций ионов электролита и его скорости, а также электрического потенциала. Кроме того, применённая модель качественно воспроизводит резкое локальное повышение концентрации электролита, наблюдаемое в некоторых экспериментах [4]. В работе делается оценка границ применимости используемой модели, и даются прогнозы по её совершенствованию.

Работа выполнена в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 16-08-00643) и Российского научного фонда (№ 17-79-10343).

ЛИТЕРАТУРА.

1. O. Schnitzer, E. Yariv. Macroscale description of electrokinetic flows at large zeta potentials: Nonlinear surface conduction. *Physical Review E*, 2012, 86, 021503.
2. B. Figliuzzi, W.H.R. Chan, J.L. Moran, C.R. Buie. Nonlinear electrophoresis of ideally polarizable particles. *Physics of Fluids*, 2014, 26, 102002.
3. I. Rubinstein, L. Shtilman. Voltage against current curves of cation-exchange membranes. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* 1979, 75, 231.
4. S.-C. Wang, H.-H. Wei, H.-P. Chen, M.-H. Tsai, C.-C. Yu, H.-C. Chang. Dynamic superconcentration at critical-point double-layer gates of conducting nanoporous granules due to asymmetric tangential fluxes. *Biomicrofluidics*, 2008, 2(1), 014101.

Моделирование безмашинного энергоразделения в пористой трубке

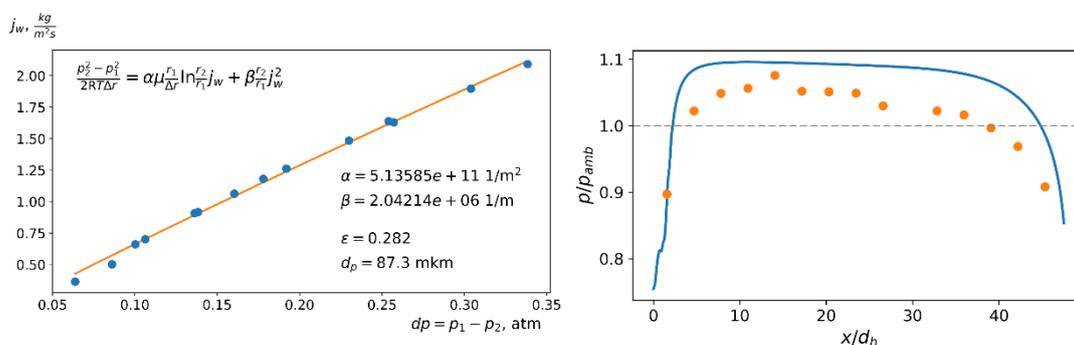
Д.Е. Хазов

НИИ механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва

Энергоразделение представляет собой перераспределение полной энергии потока без совершения им технической работы и теплообмена с окружающей средой, в результате которого в потоке возникают горячие и холодные области. Если подобные процессы протекают в устройстве, не имеющем подвижных частей, приводимых в движение газом то речь идёт о безмашинном энергоразделении.

Эккерт [1] предложил два основных физических механизма, вызывающих энергоразделение. Первый — это дисбаланс между потоками тепла, выделившимися в результате работы сил вязкости в газе и тепла отведённого за счёт механизма теплопроводности. Второй — вихревые течения и связанные с ними пульсации давления. В работах [2] и [3] проведено экспериментальное исследование безмашинного энергоразделения, основанного на первом механизме. Как известно дисбаланс между процессами выделения тепла в результате вязкой диссипации и отвода тепла теплопроводностью из пристенных областей приводит к искривлению профиля температуры торможения. В зависимости от значения молекулярного числа Прандтля, которое, в зависимости от вида рабочего тела может принимать значения меньше, равно или больше единицы, температура торможения пристенных слоев будет меньше, равна или больше начальной температуры торможения, соответственно. Для воздуха $Pr = 0,7$, следовательно, если организовать отсос пристенных «охлажденных» слоев, то среднemasовая температура оставшегося потока возрастет.

В настоящей работе проведено численное моделирование устройства, аналогичного исследованному в [2] и [3]. Устройство представляет собой профилированное сверхзвуковое сопло ($d_{cr} = 3$ мм, $A_{exit}/A_{cr} = 1.14$) сопряженное с цилиндрической пористой трубкой ($d_{in} = 3.5$ мм; $d_{out} = 10.5$ мм; $L = 150$ мм).



На базе уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу, с привлечением уравнений $k - \omega$ sst модели турбулентности была построена математическая модель рассматриваемого устройства. Величина потока массы j_w через пористую стенку определялась из модифицированного уравнения Дарси (уравнение Дарси-Форхгеймера). Значения коэффициентов уравнения α и β получены из обработки экспериментальных данных (см. рисунок (справа)).

В работе проводится валидация предложенной математической модели в широком диапазоне изменения параметров (на основе данных [2] и [3]). В качестве примера на рисунке (справа) приведено сопоставление экспериментального (символы) и расчётного (сплошная кривая) распределения давления по длине пористой трубки для случая полного давления на входе $p_0^* = 1.97$ атм. Как видно из рисунка, для рассматриваемых условий в пористой трубке наблюдаются как режимы вдува ($p < p_{amb}$), так и режимы отсоса из трубки ($p > p_{amb}$).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект № 14-19-00699.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Eckert E.R.G. Cross transport of energy in fluid streams // *Warme-und Stoffubertragung*.— 1987. — No. 21. — P. 73–81.
2. Yu A. Vinogradov, A. G. Zditovets, and M. M. Strongin. Experimental investigation of the temperature stratification of an air flow through a supersonic channel with a central body in the form of a porous permeable tube. *Fluid Dynamics*, 48(5):687–696, 2013.
3. А. И. Леонтьев, А. Г. Здитовец, Ю. А. Виноградов, М. М. Стронгин, Н. А. Киселёв, Д. Е. Хазов. ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В КОМБИНИРОВАННОМ КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых "XXXIII Сибирский теплофизический семинар", посвященный 60-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Тезисы докладов, ISBN 978-5-89017-049-1, стр. 46–46. Институт теплофизики СО РАН Новосибирск, 2017.

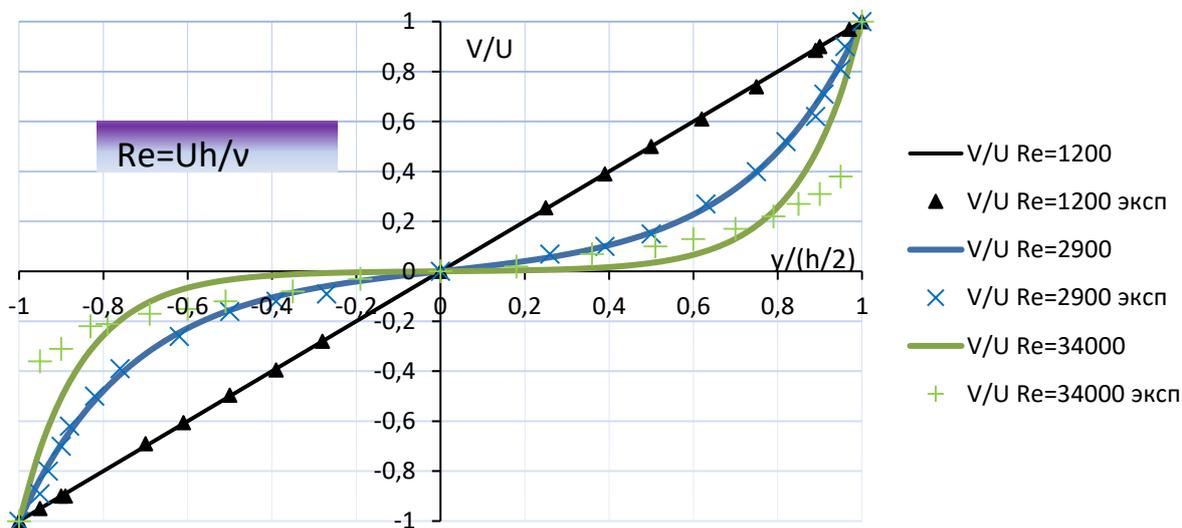
АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА, ЗАПИСАННЫХ С УЧЕТОМ ПРОИЗВОДСТВА ЭНТРОПИИ, В ПЛОСКОЙ ЗАДАЧЕ КУЭТТА

О.Н. Хатунцева

Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация
«Энергия» имени С.П. Королёва», г. Королев

Работа посвящена описанию течения несжимаемой жидкости, расположенной между двумя параллельными плоскими стенками, движущимися с постоянными скоростями в противоположных направлениях в собственных плоскостях – плоскому течению Куэтта. Течение происходит под действием сил вязкого трения, действующих на жидкость, и сдвигового напряжения параллельного стенкам. Единственным аналитическим решением этой задачи в стационарном случае (также как и в задаче Пуазейля) является выражение, при любых значениях числа Рейнольдса соответствующее ламинарному режиму течения. Оно описывает линейный профиль скорости. Решение этой задачи, также как и решение задачи Пуазейля, является устойчивым в линейном приближении (для бесконечно малых возмущений). Данный вывод плохо соотносится с огромным количеством экспериментов, в которых при достаточно больших числах Рейнольдса практически невозможно “удержать” жидкость в ламинарном состоянии - происходит потеря устойчивости и переход к турбулентному режиму течения. В качестве попыток разрешения возникающих противоречий в вопросах устойчивости обычно выдвигаются предположения о неустойчивости течений к конечным возмущениям. Однако в такой постановке не вполне понятным остается отсутствие других (помимо ламинарных) квазистационарных аналитических решений УНС, к переходу к которым и должны стремиться режимы течения при потере устойчивости.

Учет производства энтропии в уравнениях Навье-Стокса, обусловленного возбуждением стохастических пульсаций в потоке жидкости, позволил теоретически (аналогично тому, как это сделано для нахождения решений в задаче Пуазейля [1]) найти два решения задачи течения жидкости в плоской задаче Куэтта. Одно из них соответствует ламинарному режиму течения, второе – турбулентному. Первое решение реализуется при любых значениях числа Рейнольдса и характеризуется линейным профилем скорости во всей области течения жидкости, второе – реализуется только при достаточно больших значениях числа Рейнольдса и характеризуется профилем скорости, пропорциональным гиперболическому синусу с параметром, зависящим от значения числа Рейнольдса. Найдено критическое значение числа Рейнольдса, при котором возможен переход от ламинарного к турбулентному режиму течения. Приведено сравнение результатов с имеющимися экспериментальными данными [2].



ЛИТЕРАТУРА.

1. О.Н. Хатунцева О возможности описания турбулентности с помощью уравнений Навье-Стокса с модифицированными левыми частями – полными производными по времени. Тезисы докладов XXII Международной конференции “Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность”. 2016 г. Звенигород.
2. Г. Шлихтинг Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.

ВЛИЯНИЕ КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЛЕГКОЙ ЖИДКОСТИ НАД ТЯЖЕЛОЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Г.Г. Цыпкин

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

Движения воды и пара, перенос примесей в почвах и грунтах во многом определяют экологическое состояние регионов [1]. Натурные наблюдения выпадения солей в осадок свидетельствуют о неустойчивости уровня грунтовых вод, на котором происходит испарение воды или конденсация пара.

Формулируется задача об устойчивости поверхности фазового перехода, разделяющей области грунта, насыщенные водой и влажным воздухом соответственно. Предполагается, что область влажного воздуха (легкая жидкость), контактирующая с атмосферой, располагается над областью, насыщенной водой. В нижней области происходит фильтрация воды, а в верхней – диффузионный перенос пара. Система основных уравнений включает законы сохранения, закон Дарси и уравнения состояния. На поверхности раздела выполняется условие баланса массы H_2O . Течение рассматривается в полосе, ограниченной сверху атмосферой, а снизу – водоносным горизонтом. Предполагается наличие градиента капиллярного давления [2]. При постоянных граничных значениях давления и влажности задача допускает стационарное решение [3]. В зависимости от физических условий реализуются два случая, соответствующие испарению воды и конденсации пара. В режиме испарения реализуется только одно стационарное решение, а в режиме конденсации существуют два решения, соответствующие двум положениям уровня грунтовых вод.

Методом нормальных мод исследована устойчивость поверхности раздела. Показано, что поверхность испарения может быть неустойчивой только при существовании градиента капиллярного давления. В этом случае реализуется единственный тип перехода к неустойчивости, когда дестабилизация происходит одновременно при всех волновых числах (рис.1). Результаты расчетов показывают, что незначительные градиенты и абсолютные величины капиллярного давления вызывают неустойчивость конфигурации, когда легкая жидкость находится над тяжелой.

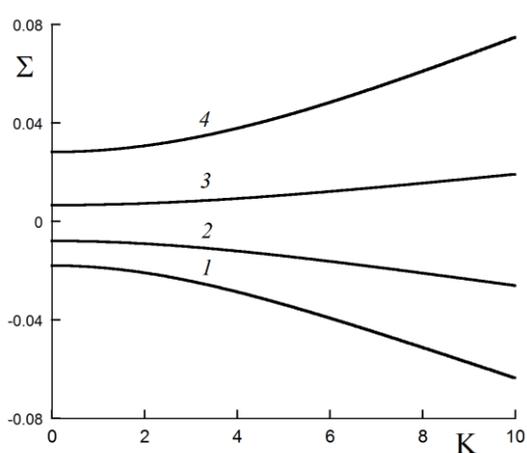


Рис.1

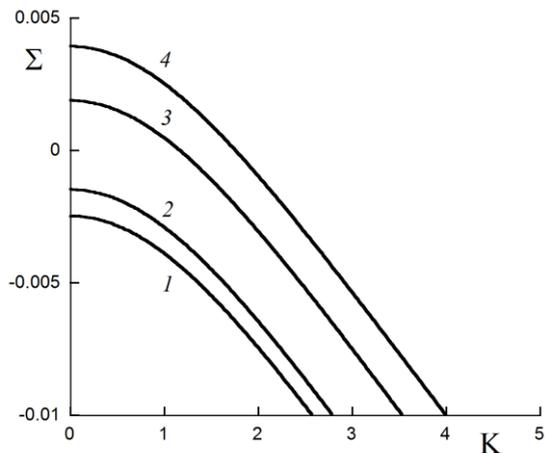


Рис.2

Найдено, что в режиме конденсации одно решение, соответствующее меньшей глубине, всегда неустойчиво. Другое решение может быть как устойчивым, так и неустойчивым. Найдены два сценария развития неустойчивости. Первый сценарий качественно аналогичен переходу к неустойчивости при испарении. При реализации второго сценария происходит сближение и слияние двух решений и в сверхкритической области решение стационарной задачи перестает существовать. При слиянии решений дисперсионная кривая устойчивого решения касается оси $\Sigma=0$ и потеря устойчивости происходит при нулевом волновом числе (рис. 2). Этот сценарий реализуется также в нейтральной среде с нулевым капиллярным давлением. За порогом неустойчивости рассматриваемые течения исчезают, быстро развиваясь в некоторый нестационарный режим.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №~16-11-10195.

ЛИТЕРАТУРА.

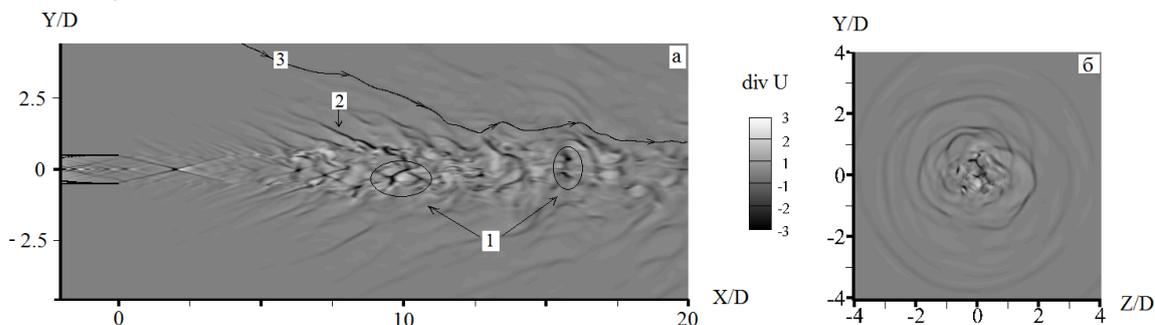
1. D.A. Rose, F. Konukcu1, J.W. Gowing. Effect of watertable depth on evaporation and salt accumulation from saline groundwater // Aust. J. Soil Res., 2005, 43, 565--573.
2. В.А. Шаргатов. О неустойчивости фронта фазового перехода жидкость – пар в неоднородных пористых смачиваемых средах // Изв.РАН. МЖГ, 2017, № 1, 148-159.
3. А.Т. Иlichev, G.G. Tsyppkin, D.T. Pritchard, C.N. Richardson. Instability of the salinity profile during the evaporation of saline groundwater // J. Fluid Mech., 2008, 614, 87 – 104.

ОСОБЕННОСТИ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ ПРИ БОЛЬШИХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

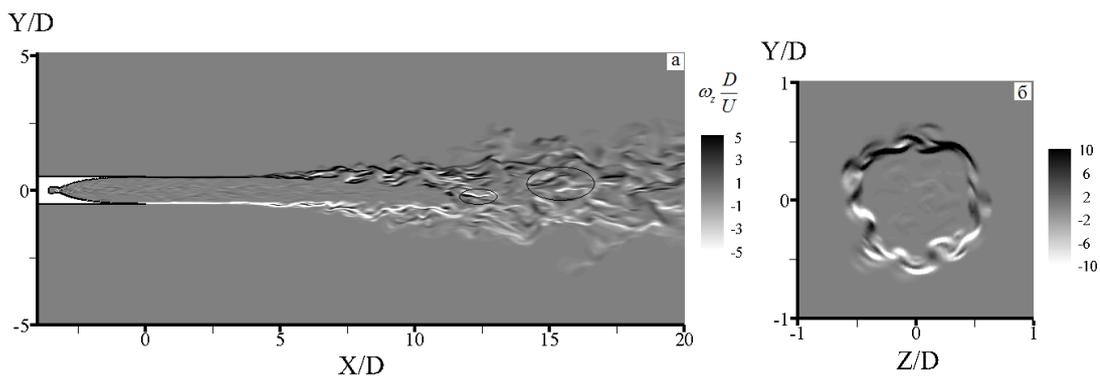
С.А. Чепрасов

Центральный Институт Авиационного Моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

По мере увеличения числа Маха влияние сжимаемости на турбулентность в струе начинает возрастать. Анализ литературы показывает, что большинство работ по струйным течениям со сверхзвуковыми скоростями ограничиваются числами Маха 3 - 4. В данной работе представлены результаты моделирования методом крупных вихрей (LES) круглой затопленной струи при числе Маха $M = 5$. Оцениваются возможности метода крупных вихрей при описании турбулентности и эффектов сжимаемости в случае высоких значений числа Маха. Анализируются структурные особенности турбулентности, возникающие в этом течении.



Проявление эффектов сжимаемости можно увидеть на данном рисунке, где изображено пространственное распределение значений дивергенции скорости в продольном и поперечном сечении ($X=10D$) струи. Это распределение обладает свойством асимметрии, т.е. содержит области с отрицательными значениями, в несколько раз превосходящими положительные. Области, обозначенные цифрой 1, с отрицательными выбросами дивергенции являются локальными скачками уплотнения или «shocklets». Вблизи струи, так же видны скачки уплотнения. Один из таких скачков уплотнения обозначен цифрой 2. Эти скачки уплотнения являются фронтом волн Маха. Угол наклона этих возмущений к оси струи составляет $\alpha \approx 25^\circ$, что соответствует углу Маха для рассмотренной струи, т.е. $\sin \alpha \approx 1/M_{co}$, где $M_{co} \approx 2.4$ конвективное число Маха. В поперечном сечении эти возмущения представляют собой дуги окружности. Таким образом, возникающие вблизи поверхности струи скачки уплотнения располагаются на боковой поверхности конуса Маха. При этом траектории эжекционного течения вблизи струи так же направлены под углом Маха. Такая картина течения вблизи струи связана с тем, что волны Маха имеют N – образную структуру и к скачкам уплотнения примыкает область с пониженным давлением, которая и направляет эжекционное течение. Таким образом, в представленном расчете методом крупных вихрей удалось воспроизвести такие особенности течения и шума сверхзвуковой турбулентной струи, как «локальные скачки уплотнения» и волны Маха.



Важной особенностью турбулентности, которая была установлена в ходе анализа результатов моделирования, состоит в том, что в распределении завихренности наблюдаются анизотропные турбулентные структуры. На представленном рисунке эти вихри выделены овалом. Такие структуры не характерны для свободной турбулентности в дозвуковых струях, где продольный масштаб не более чем в два раза превышает поперечный. В случае больших скоростей истечения продольная компонента скорости значительно превышает поперечную и окружную, - $u_1 \gg u_2 \approx u_3$. Поэтому и в уравнении переноса завихренности преобладают конвективные слагаемые вида $u_1 \partial \omega_1 / \partial x_1 \gg u_1 \partial \omega_1 / \partial x_1 \approx u_3 \partial \omega_3 / \partial x_3$. Такое неоднородное распределение компонент конвективного слагаемого в уравнении для переноса завихренности и приводит к вытягиванию вихрей в направлении движения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-01-00035).

АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЙ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ ПРИ БОКОВОМ ОБОГРЕВЕ

Черепанов И. Н., Сидоров А.С., Смородин Б. Л.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Смеси, содержащие твердые примеси, подвержены разделению в поле тяжести земли. В случае грубодисперсных сред тяжелая примесь выпадает в осадок. Если размер частиц порядка 10-100нм, то примесь способна оставаться во взвешенном состоянии за счет теплового движения молекул. Величиной, характеризующей степень гравитационной стратификации жидкости, является седиментационная длина l_s , определяющая высоту, на которой концентрация примеси уменьшается в e раз [1].

Если в неоднородно нагретой жидкости градиент температуры отклоняется от вертикали, равновесие невозможно и возникает конвективное течение [2]. При боковом обогреве ячейки с вертикально стратифицированной коллоидной суспензией могут возникать течения, отличающиеся по интенсивности и структуре от течений однородной смеси [3,4].

В работе проведено экспериментальное исследование конвекции магнитной жидкости (коллоидной суспензии) в вертикальном канале при боковом обогреве. При помощи инфракрасной камеры были получены поля распределения температуры на вертикальной границе слоя (Рис. 1а), свидетельствующие о существовании асимметричных течений: вертикальный размер ячеек растет по мере удаления от дна слоя. Обработка полученных данных позволила определить эволюцию конвективных валов во времени, определить их размер и время жизни (Рис. 1 б).

Для объяснения сложной картины пространственно-временной эволюции течений проведено численное моделирование системы в рамках приближения Буссинеска, в котором полагается линейная зависимость плотности от концентрации и температуры [2]. Показано, что начальное распределение концентрации примеси по высоте, характеризующееся экспоненциальным градиентом, может в результате эволюции приводить к образованию асимметричных слоистых течений, наблюдаемых в эксперименте.

Однако, только учет начальной гравитационной стратификации отдельных наночастиц не дает даже качественного соответствия эволюции результатов моделирования с экспериментальными. Для достижения соответствия расчетных и экспериментальных данных, необходимо учитывать возможность образования агрегатов, имеющих меньшую седиментационную длину, чем для отдельных наночастиц, а тем же сложный состав жидкости носителя. Оба этих фактора создают первоначальный профиль концентрации, характеризующийся эффективной длиной седиментации. Качественно похожая картина экспериментальных данных и результатов моделирования течения наблюдалась при выборе эффективной длины седиментации в четыре раза меньшей, чем дает оценка параметров для наножидкости.

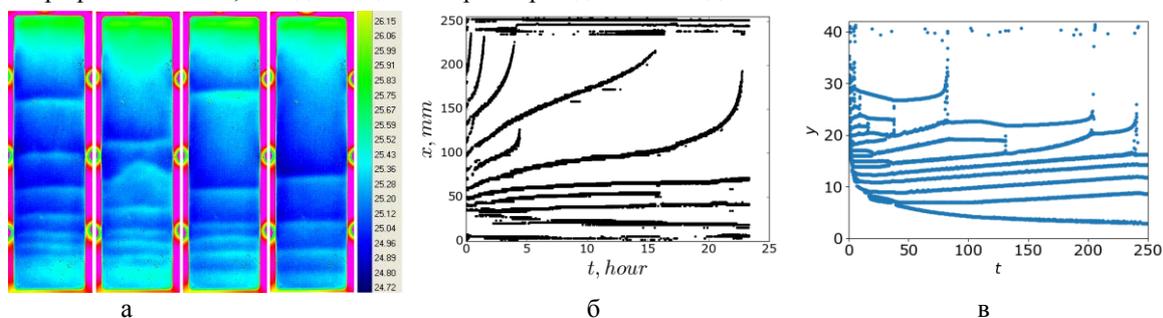


Рис. 1

а) экспериментальные термограммы течения; б) треки границ конвективных вылов, полученные в эксперименте; в) при численном моделировании.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-31-60074).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Raikher Yu.L., Shliomis M.I. On the kinetics of establishment of the equilibrium concentration in a magnetic suspension // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*.– 1993.– Vol 122.– pp. 93-97
2. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Непомнящий А. А. Устойчивость конвективных течений // М.: Наука.– 1989.– Вып. 0.– с. 320
3. Черепанов И. Н. Течение коллоида в горизонтальной ячейке при подогреве сбоку // *Вычислительная Механика сплошных сред*.– 2016.– Вып. Т. 9, No 2.– с. 135 -144
4. Cherepanov, I.N., Smorodin, B.L. Convective Flow of a Colloidal Suspension in a Vertical Slot Heated from Side Wall// *Microgravity Sci. Technol.* (2017). <https://doi.org/10.1007/s12217-017-9575-4>

Эволюция акустического излучения ансамбля вихревых колец в воздухе

Черкасов Д.Ю., Шугаев Ф.В.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра квантовой статистики и теории поля.

Исследована эволюция акустического излучения от ансамбля вихревых колец в воздухе на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса. Вихревые структуры (вихревые кольца и цилиндрические вихри) играют важную роль в излучении звука в газовых потоках. Исследована эволюция акустического излучения, испускаемого ансамблем вихревых колец в воздухе. Анализ основан на нестационарных уравнениях Навье-Стокса. Система уравнений Навье-Стокса сводится к параболической системе с постоянными коэффициентами при старших производных. Используются разложения искомым функций в ряд по степеням малого параметра. Завихренность определена внутри тороида при $t = 0$. Остальные параметры газа полагаются постоянными во всем пространстве в начальный момент времени. Решение выражается через кратные интегралы, которые рассчитываются с помощью сеток Коробова [1]. В результате получается решение в виде степенного ряда с кратными интегралами при постоянных коэффициентах. Первый член ряда определяет свойства акустического излучения при малой начальной завихренности, которая служит малым параметром [2]. Проанализирована эволюция осцилляции плотности воздуха вблизи ансамбля вихревых колец излучения с течением времени. Получен спектр частот колебаний плотности воздуха вблизи ансамбля вихревых колец на разных стадиях. На рисунках 1 и 2 представлены осцилляции и их спектр на ранней стадии после возмущения.

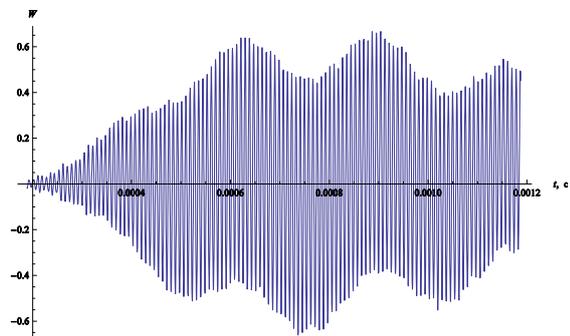


Рис. 1

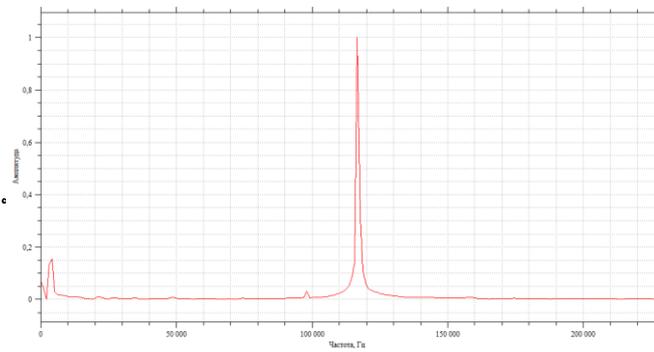


Рис. 2

На рисунках 3 и 4 представлены осцилляции и их спектр на поздней стадии после возмущения.

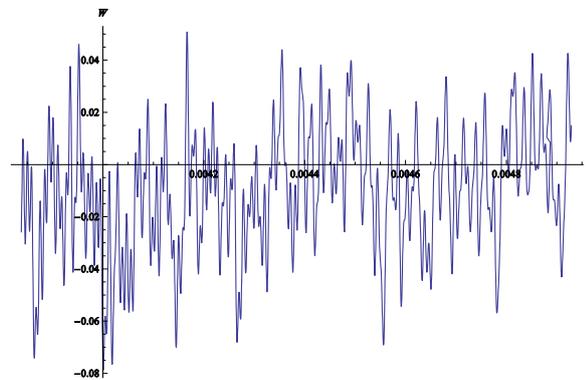


Рис. 3

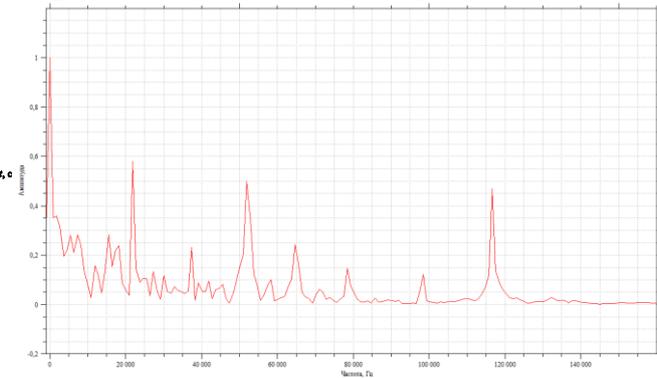


Рис. 4

Решение системы нестационарных уравнений Навье-Стокса при малой начальной завихренности использовано для исследования эволюции ансамбля. Показано, что имеет место передача энергии от высокочастотных осцилляций к низкочастотным. Одновременно происходит хаотизация течения. Сравнение осцилляций плотности в случае одиночного кольца [2] и ансамбля показывает, что во втором случае частотный спектр имеет более сложный характер, а хаотизация наступает быстрее.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Коробов, Н.М. Теоретико-числовые методы в приближенном анализе. М.: Физматгиз, 1963.
2. Shugaev, F.V.; Cherkasov, D.Y.; Solenaya, O.A. Acoustic radiation by 3D vortex rings in air. Aerospace 2015, 2, 627-636.

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ВЫСОКИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА ОСНОВЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР И ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

С.И.Чернышенко, Ч.Жанг, Х.Бутт, М.Бейт-Сади, Имперский Колледж, Лондон

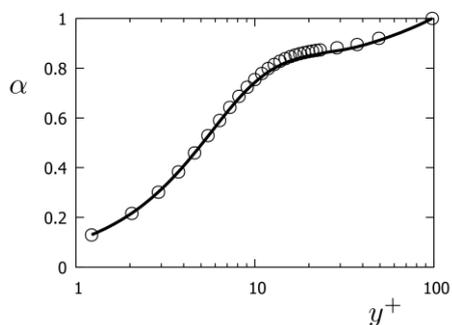


Рис.1. Коэффициент суперпозиции [2]. Теория [3] (кривая) и численный расчет (символы).

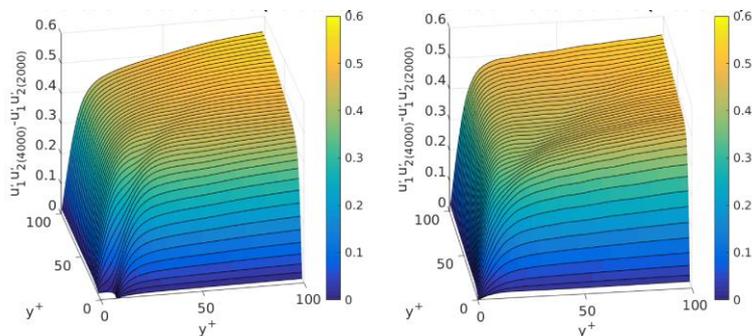


Рис. 2. График $\langle u'(y_1)u'(y_2) \rangle_{Re_\tau=4179} - \langle u'(y_1)u'(y_2) \rangle_{Re_\tau=2003}$, численный расчет (слева) и экстраполяция (справа).

По известным причинам прямое численное моделирование турбулентных течений и эксперименты в аэродинамических трубах проводятся при значениях числа Рейнольдса Re значительно меньших, чем те, которые реализуются во многих практических приложениях. В областях вблизи твердых поверхностей такие результаты обычно экстраполируют на более высокие числа Рейнольдса используя классическую гипотезу универсальности пристенной турбулентности, согласно которой вблизи стенки статистические характеристики течения не зависят от числа Рейнольдса, если они выражены в единицах стенки, то есть обезразмерены на основе осредненного трения на стенке и свойств жидкости. В последние годы, однако, стало известно, что крупномасштабные структуры, существующие вдали от стенки, влияют на пристенную область, и так как их статистические характеристики, выраженные в единицах стенки, зависят от числа Рейнольдса, то и характеристики пристенных течений зависят от числа Рейнольдса. Это означает, что классическая гипотеза универсальности пристенной турбулентности неверна, и требуется альтернативный метод экстраполяции статистических характеристик пристенных турбулентных течений на высокие числа Рейнольдса. Такой альтернативный метод может быть построен на основе теории квазистационарного квазиоднородного взаимодействия крупномасштабных структур и пристенной турбулентности [1-3]. В этой теории все величины обезразмериваются аналогично введению классических единиц стенки, но вместо осредненного трения на стенке используется крупномасштабная составляющая трения. Соответственно, классическая гипотеза универсальности пристенной турбулентности модифицируется путем замены осредненного трения на стенке на крупномасштабную составляющую этого трения. Пример предсказания на основе этой теории показан на Рис. 1, на котором проводится сравнение хорошо известного коэффициента суперпозиции $\alpha(y, y_0)$, полученного из результатов прямого численного моделирования, с выражением для этого коэффициента через осредненный профиль скорости $U(y)$, полученным теоретически в предположении о малости амплитуды крупномасштабных флуктуаций: $\alpha(y) = (U(y) + ydU(y)/dy) / (U(y_0) + y_0dU(y_0)/dy_0)$. Поскольку теория [1-3] заменяет классическую гипотезу универсальности пристенной турбулентности, она может быть использована для экстраполяции результатов, полученных для одного числа Рейнольдса, на другие значения числа Рейнольдса. На Рис. 2 показано сравнение действительного изменения двухточечной автокорреляции скорости $\langle u'(y_1)u'(y_2) \rangle$ при изменении числа Рейнольдса от $Re_\tau = 2003$ до $Re_\tau = 4179$ с изменением, предсказанным теоретически на основе полной базы данных для $Re_\tau = 2003$ и данных только о крупномасштабной составляющей при $Re_\tau = 4179$. Экстраполяция требует знания параметров крупномасштабной составляющей поля скорости течения, которая в реальных условиях должны быть измерена в эксперименте при числе Рейнольдса, на которое производится экстраполяция. Для такого измерения можно использовать несколько датчиков, установленных поперек потока. Такая конструкция было оптимизирована на основе базы данных о турбулентном течении, полученной численно и дала удовлетворительные результаты.

ЛИТЕРАТУРА.

1. S. Chernyshenko, I. Marusic, and R. Mathis. Quasi-steady description of modulation effects in wall turbulence. arXiv:1203.3714, 2012.
2. R. Mathis, N. Hutchins, and I. Marusic. A predictive inner-outer model for streamwise turbulence statistics in wall-bounded flows. J. Fluid Mech., 681:537–566, 2011.
3. C. Zhang and S.I. Chernyshenko. Quasisteady quasihomogeneous description of the scale interactions in near-wall turbulence. Phys. Rev. Fluids, 1:014401, May 2016.

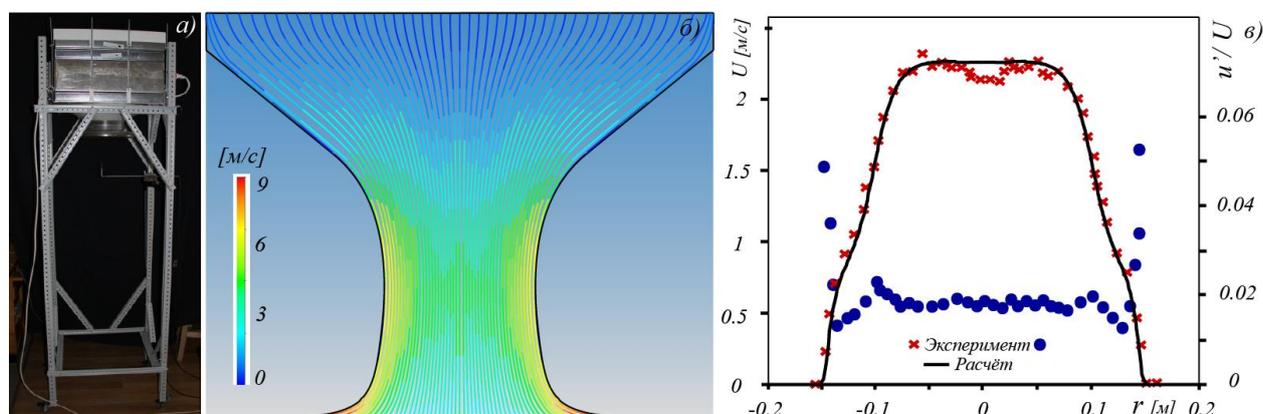
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ПО СОЗДАНИЮ ЛОКАЛЬНОЙ ЧИСТОЙ ЗОНЫ

А.Д. Чичерина, Ю.С. Зайко, А.И. Решмин, С.Х. Тепловодский, В.В. Трифонов
Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Одним из эффективных способов снижения затрат при создании комплексов чистых помещений является зонирование чистого помещения на локальные участки, которые могут отличаться друг от друга как классом чистоты воздушной среды, так и функциональным назначением. Таким образом, внутри помещения низкого класса чистоты над критичными местами технологического процесса могут быть созданы зоны более высокого класса чистоты. Устройства по созданию локальных чистых зон и обеспечению газодинамической защиты объектов применяются во всех сферах, где существуют повышенные требования к чистоте воздушной среды, например, на высокоточном производстве и в медицине.

На основе технологии формирования затопленных струй большого диаметра с увеличенной длиной начального ламинарного участка[1] разработана экспериментальная установка для создания локальной чистой зоны, которая представляет собой воздушный цилиндр высотой 800 мм и диаметром 300 мм. Данная технология заключается в следующем: в начальном потоке воздуха снижают турбулентные пульсации скорости посредством использования различных детурбулизаторов; далее поток поступает на устройство формирования профиля скорости струи, центральным элементом которого является короткий диффузор; и полученная струя выходит в окружающее пространство. Основной особенностью технологии является компактность формирующего струю устройства — длина формирующего устройства составляет не более полутора диаметров струи. Установка представляет собой устройство, очищающее окружающий воздух и создающее локальную чистую зону посредством формирования ламинарной струи.

Определены оптимальные характеристики устройства для создания локальной чистой зоны. Проведены экспериментальные исследования затопленных струй, сформированных при помощи детурбулизующих элементов и диффузора, выходной диаметр которого равен 300 мм. Проведено численное моделирование течения в формирующем устройстве, результат которого хорошо согласуется с экспериментальными данными. В процессе микробиологического исследования по оценке эффективности снижения микробной обсемененности воздуха экспериментальная установка продемонстрировала эффективность выше 98,2%.



На рисунке представлена экспериментальная установка(а), линии тока внутри формирующего устройства (б), а также экспериментальный и расчетный профили скорости и турбулентных пульсаций скорости сформированной затопленной струи (в).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Reshmin A., Sudarikova A., Teplovodskii S., Zayko J. Technology for formation of axisymmetric jet with long laminar region. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 894, 012080.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ К ТВЁРДЫМ МИКРОЧАСТИЦАМ

П.В. Чувахов^{1,2}, А.В. Фёдоров^{2,1}

¹Центральный аэродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский

²Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный

Частицы в атмосфере могут быть основным источником неустойчивых возмущений в пограничном слое (ПС), способных привести к ламинарно-турбулентному переходу на аэродинамически гладких телах, летящих со сверхзвуковой скоростью. Проникая в пограничный слой, частицы возбуждают волновые пакеты неустойчивых мод, которые растут вниз по потоку, достигают критических амплитуд и распадаются в турбулентные пятна. Последние сливаются друг с другом, образуя турбулентный пограничный слой.

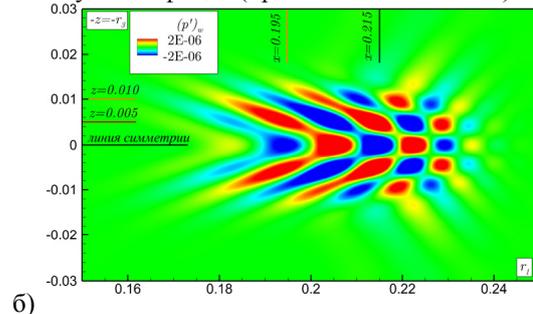
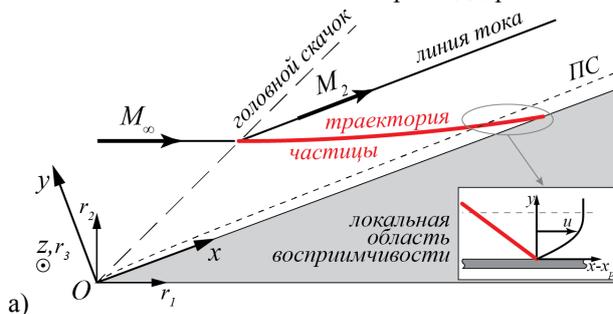
В [1] на базе линейной теории устойчивости (ЛТУ) построена теоретическая модель восприимчивости сверхзвукового ПС к частицам, которые моделировались точечными источниками в линеаризованных уравнениях Навье–Стокса. Цель настоящей работы — проверить и расширить применимость этого подхода с помощью численного моделирования процесса восприимчивости в рамках полных уравнений Навье–Стокса. Численная модель включает три этапа: 1) расчёт невозмущённого поля течения (используется собственный код HFlow); 2) расчёт динамики движения сферической частицы в невозмущённом поле течения с использованием корреляции для коэффициента сопротивления [2]; 3) расчёт поля возмущения, порождённого частицей (собственно, трёхмерное численное моделирование). На этапе 3 точечный источник, математически пропорциональный дельта-функции Дирака, $\delta(\vec{r})$, аппроксимируется функцией Гаусса, $\delta_n(\vec{r}) = A \exp(-0.5|\vec{r} - \vec{r}_p|^2/\sigma^2)$, где \vec{r}_p — вектор декартовых координат частицы, σ — определяет характерный диаметр частицы-источника, равный $2\sigma\sqrt{2}$.

Рассматривается ламинарное обтекание острого клина с полууглом раскрытия 14° , летящего в стандартной атмосфере на высоте 20 км под нулевым углом атаки, число Маха $M_\infty = 4$ (рис. а). Параметры набегающего потока: $T_\infty^* = 216.7$ К, $p_\infty = 5530$ Па, $\rho_\infty^* \approx 0.0889$ кг/м³, $Re_1 = 7.381 \times 10^6$ м⁻¹. Поток за скачком остаётся сверхзвуковым: $M_2 \approx 3.0$. Сферическая частица с радиусом $R_p^* = 10$ мкм и плотностью $\rho_p^* = 1$ г/см³ движется за скачком практически прямолинейно с относительным числом Маха $M_p \approx 0.8$ и числом Рейнольдса $Re_p = 2R_p^* \cdot \rho u / \mu \approx 60$. Непосредственно перед столкновением с поверхностью клина относительная скорость частицы становится сверхзвуковой, $M_p \approx 2$. Звёздочкой отмечены размерные величины; характерный масштаб длины составляет $L^* = 1$ м. Расчёты показали, что:

- Точечный источник в уравнениях Навье–Стокса можно моделировать с помощью функции Гаусса. Он остаётся «точечным» по отношению к толщине пограничного слоя $\delta_{0,99}$ в области столкновения частицы с поверхностью клина уже при $\sigma \lesssim 5 \times 10^{-5}$, когда $2\sigma\sqrt{2}/\delta_{0,99} \lesssim 0.22$.
- Сеточное разрешение частицы-источника в 3 точки по каждому направлению на длину 6σ , где $\delta_n(\vec{r})$ заметно отлична от нуля, приводит к завышению амплитуды сформировавшегося волнового пакета за область столкновения на $\approx 3\%$. При разрешении в 6 точек на 6σ превышение составляет не более 1%.
- Наиболее важной частью полёта частицы является область пограничного слоя, в которой возбуждается до 99% интенсивности волнового пакета.
- Выстрел частицы с поверхности клина порождает волновой пакет, интенсивность которого на 5% слабее, чем в случае полета частицы к поверхности клина. Это говорит о возможности постановки эксперимента по восприимчивости сверхзвукового ПС к частицам путём их выстрела в поток.
- Эволюция формы волнового пакета (рис. б), положение максимума возмущений и углы наклона фронтов волн хорошо согласуются с результатами [1]: амплитуда волнового пакета в численном моделировании превышает соответствующее теоретическое значение не более чем на 30%.

Данные выводы подтверждают корректность теории [1] и применимость численной модели, построенной в настоящей работе.

Работа выполнена в МФТИ при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00821).



ЛИТЕРАТУРА.

- A.V. Fedorov. Receptivity of a supersonic boundary layer to solid particulates. JFM, 737, 2013, p. 105–131.
- Crowe, C. T. Drag coefficient on particles in a rocket nozzle. AIAA J., 5(5), 1967, p. 1021–1022.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА СИММЕТРИЧНОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ

В.И. Шалаев

Московский физико-технический институт, Центральный аэрогидродинамический институт

На основе теории устойчивости динамических систем предложена простая модель устойчивости симметричного отрывного обтекания тел вращения под углом атаки. На основе расчетов получена кривая устойчивости для тонкого конуса. На основе анализа основных физических явлений представлена упрощенная модель взаимодействия электрического разряда с пограничным слоем в виде источника тепловыделения определенной формы. В рамках этого подхода рассмотрена задача управления положением отрыва с целью обеспечения симметрии обтекания тонкого конуса в дозвуковом потоке газа под углом атаки.

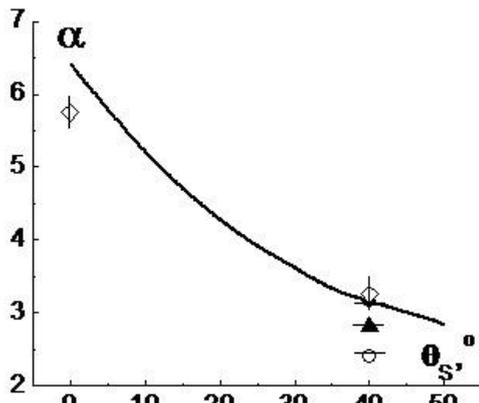


Рис. 1

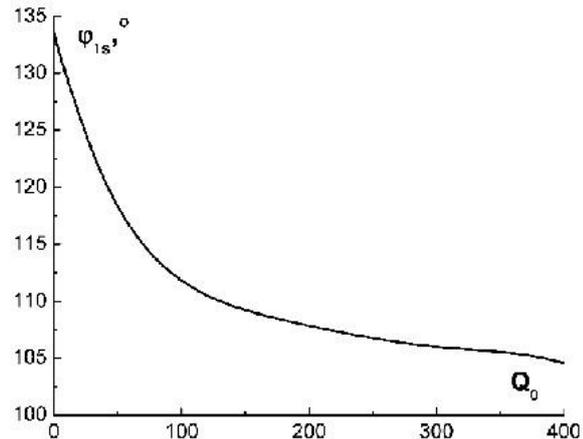


Рис. 2

На рис. 1 приведена рассчитанная с помощью модели точечных вихрей кривая зависимости критического угла атаки α от угла отрыва θ_s , измеряемого от горизонтальной плоскости. В качестве критерия развития неустойчивости рассматривалось, в соответствии с теорией катастроф, появление критической точки высокого порядка в плоскости симметрии поля скорости. Символами указаны экспериментальные данные из различных источников для ламинарного ($\theta_s \approx 0^\circ$) и турбулентного ($\theta_s \approx 130^\circ$) отрывов. Видно, что они хорошо согласуются с расчетами для обоих режимов течения несмотря на простоту модели. Следует отметить, что известные несимметричные решения этой модели не соответствуют действительности, а область их существования лежит за пределом реальных отрывов.

Представлены некоторые результаты расчетов пограничного слоя на конусе с углом полураствора $\delta = 5^\circ$ при наличии электрического разряда, который моделировался источником тепла, при относительном угле атаки $\alpha = \alpha^*/\delta = 3.15$, температуре и скорости набегающего потока $T_\infty = 288.15^\circ K$, $u_\infty = 10$ м/с. На рис. 2 представлена зависимость угла отрыва потока $\varphi_{1s} = \theta_s + 90^\circ$ (полярный угол, измеряемый от линии растекания) от безразмерной интенсивности источника тепла Q_0 . При увеличении Q_0 от 0 до 400 угол отрыва φ_{1s} уменьшается от 133° до 105° . Эти данные показывают, что управление отрывом с помощью разряда наиболее эффективно в диапазоне $Q_0 < 100$, где производная $d\varphi_{1s}/dQ_0$ относительно велика: при увеличении Q_0 до 100 угол отрыва уменьшается до величины $\varphi_{1s} \approx 112^\circ$.

Другой способ управления отрывом – локальный нагрев поверхности – также был изучен в предположениях, описанных выше. Поверхность тела считалась теплоизолированной за исключением узкой полосы, на которой задавалась температура $h_w = T_w/T_\infty > 1$, где T_w – температура стенки, T_∞ – температура набегающего потока. Как показали расчеты, этот метод управления оказался менее эффективным.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту № 18-01-00310.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Shalaev V., Shalaev I. A stability of symmetric vortex flow over slender bodies and control possibility by local gas heating // EUCASS book series. Progress in Flight Physics. Eds: P. Reijasse, D. Knight, M. Ivanov and I. Lipatov. ISBN:978-2-7598-0877-9. 2013, v. 5, pp. 155 -168. <http://dx.doi.org/10.1051/eucass/201305155>.

ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ ФРОНТА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

ЖИДКОСТЬ ПАР В НЕОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

В.А. Шаргатов

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Доклад посвящен задаче о фильтрации и испарении воды на поверхности фазового перехода, а также о диффузии пара, возникающего в результате испарения. Рассматриваются горизонтально-протяженные течения. Такая задача соответствует, например, случаю фильтрации воды из водоносных горизонтов вниз в направлении подземного сооружения, в котором поддерживается искусственная вентиляция. В пространстве, расположенном между водоносным горизонтом и кровлей, находятся вода и смесь воздуха с парами воды. Вода и влажный воздух разделены поверхностью фазового перехода. Такая задача рассматривалась в работах [1–3], где были обнаружены и описаны новые механизмы перехода к неустойчивости.

Анализ устойчивости в [1–3], выполнен в линейном приближении для бесконечно малых гармонических возмущений. Показано, что, если данная задача имеет стационарное решение, соответствующее плоской покоящейся поверхности фазового перехода, то для несмачиваемой среды с постоянным капиллярным давлением это решение может быть как линейно устойчиво, так и неустойчиво.

В [4] исследована устойчивость аналогичных течений по отношению к локализованным возмущениям конечной амплитуды и определены границы применимости выполненного в [1–3] анализа линейной устойчивости. Дестабилизация поверхности движущегося фронта фазового перехода бесконечно малыми возмущениями и локализованными возмущениями конечной амплитуды изучена в [5]. Установлено, что в однородных пористых средах рост возмущений поверхности фазового перехода может происходить, только если среда несмачиваема.

В данной работе показано, что необходимым условием существования нескольких положений равновесия в смачиваемой среде является наличие слоя, в котором капиллярное давление уменьшается (возрастает по абсолютной величине) с глубиной. Построен пример, когда в смачиваемой среде существуют три положения равновесия. Исследована устойчивость плоской поверхности фазового перехода по отношению к бесконечно малым возмущениям и получено дисперсионное соотношение, а также определены условия роста амплитуды возмущений движущейся поверхности фазового перехода.

Показано, что смачиваемой среде в присутствии капиллярных сил дестабилизация плоской поверхности фазового перехода может происходить как при бесконечном волновом числе, так и при нулевом волновом числе, при этом коротковолновая неустойчивость может иметь место даже в том случае, если положение равновесия единственно. Для случая, когда среда состоит из двух слоев, различающихся капиллярным давлением, построена бифуркационная диаграмма, имеющая две точки поворота, и определена устойчивость решений, соответствующих различным ветвям бифуркационной диаграммы.

Аналитически и численно изучены закономерности деформации ограниченной водонасыщенной области в пористой среде с капиллярным давлением, зависящим от одной пространственной координаты. Изменения формы ограниченной водонасыщенной области не происходит, если градиент капиллярного давления одинаков во всех точках ее границы. В этом случае водонасыщенная область перемещается с постоянной скоростью. Если градиент капиллярного давления изменяется вдоль границы жидкости и воздуха, то контактная поверхность деформируется. Показано, что в этом случае деформация контактной поверхности жидкость-газ может приводить к изменению связности водонасыщенной области. Водонасыщенная область может разделиться на две области (дробление или каплеотделение). Две несвязанные водонасыщенные области могут объединиться (слияние). Внутри водонасыщенной области может образоваться замкнутая подобласть, занятая воздухом (образование пузыря).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 16-11-10195.

ЛИТЕРАТУРА.

1. А.Т. Ильичев, Г.Г. Цыпкин. Неустойчивости однородных фильтрационных течений с фазовым переходом. ЖЭТФ, 2008, т.134. № 4. с. 815–830.
2. А.Т. Il'ichev, G.G. Tsytkin. Catastrophic transition to instability of evaporation front in a porous medium. Eur. J. Mech. B Fluids, 2008., v. 27. № 6. p. 665–677.
3. G.G. Tsytkin, A.T. Il'ichev. Gravitational stability of the interface in water over steam geothermal reservoirs. Transp. Porous Media, 2004, v. 55, № 2, p. 183–199.
4. А.Т. Il'ichev, V.A. Shargatov. Dynamics of Water Evaporation Fronts. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2013, v. 53, № 9, p. 1350–1370.
5. V.A. Shargatov, A.T. Il'ichev, G.G. Tsytkin. Dynamics and stability of moving fronts of water evaporation in a porous medium. Int. J. Heat and Mass Transfer. 2015, v. 83, c. 552–561.

УСТОЙЧИВОСТЬ СТРУКТУРЫ УДАРНЫХ ВОЛН И ЕДИНСТВЕННОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РИМАНА ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ХОПФА

В.А. Шаргатов¹, А.П. Чугайнова²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

²Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

Нестационарные структуры разрывов типичны, например, для теории детонации, а неустойчивость газодинамических ударных волн может приводить к их распаду на систему волн той же ориентации. Обобщенное уравнение Хопфа

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \varphi(u)}{\partial x} = 0$$

является одним из самых простых уравнений, которое может иметь решения, содержащие разрывы. Далее будем рассматривать $\varphi(u) = (u-1)^4 - (u-1)^2$. Функция $\varphi(u)$ имеет две точки перегиба, поэтому для нее можно построить пример, когда одной и той же скорости «ударной волны» соответствуют три различных состояния за разрывом. Задача Римана о распаде разрыва в этом случае имеет бесконечное несчетное множество автомодельных решений. В работе [1], посвященной исследованию уравнения Хопфа со сложной нелинейностью, для отбора разрывов, использовавшихся для построения решений, выставлялось требование существования стационарной или периодической структуры разрывов. Структура разрывов описывалась обобщенным (в смысле нелинейности) уравнением Кортевега–де Вриза–Бюргерса.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \varphi(u)}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - m \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}, \quad \mu > 0, \quad m > 0$$

В [1] показано, что при $m > 0$ множество разрывов, обладающих стационарной структурой оказывается более сложным. Оно состоит из классических и особых разрывов. Особым называется разрыв, структура которого представляет гетероклиническую фазовую кривую, соединяющие две особые точки типа седла (одна из этих точек - состояние перед разрывом, другая за разрывом). Число особых разрывов растет с увеличением дисперсии. Их количество конечно для заданного значения коэффициента дисперсии, но может быть сколь угодно большим. Нами в [2] и [3] методом функции Эванса была изучена спектральная (линейная) устойчивость стационарных структур, описываемых обобщенным уравнением Кортевега–де Вриза–Бюргерса. Показано, что среди множества особых разрывов устойчив только разрыв, распространяющийся с наименьшей скоростью. Этот разрыв обладает монотонной структурой. Численное моделирование процесса развития возмущений показывает распад такого разрыва и невозможность его осуществления. Исследована также устойчивость неособых допустимых разрывов и выявлено множество устойчивых и неустойчивых структур.

Полученные результаты по исследованию устойчивости классических и особых разрывов дают основание выдвинуть следующие гипотезы. Спектрально устойчив только один особый разрыв, имеющий наименьшую скорость. Он является допустимым. Неособые разрывы, которые нельзя заменить последовательностью спектрально устойчивых разрывов и неопрокидывающихся простых волн, устойчивы и являются допустимыми, даже если не имеют стационарной структуры и спектрально неустойчивы. Неособые разрывы, которые могут быть заменены последовательностью спектрально устойчивых разрывов и неопрокидывающихся простых волн, всегда спектрально неустойчивы и всегда обладают распадной неустойчивостью.

В докладе сделано и обосновано заключение, что допустимыми разрывами следует считать разрывы со стационарной или нестационарной устойчивой структурой. Введение требования устойчивости структуры в понятие допустимости разрывов привело к существенному сокращению множества допустимых разрывов и ликвидировало неединственность решения задачи о распаде произвольного разрыва, обнаруженную в предыдущих исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА.

1. А.Г. Куликовский, А.П. Чугайнова. Классические и неклассические разрывы в решениях уравнений нелинейной теории упругости. Успехи матем. наук, 2008, , т.63, №2. с. 85–152.
2. А.Т. Ильичев, А.П. Чугайнова, В.А. Шаргатов. Спектральная устойчивость особых разрывов. Докл. РАН. Матем. 2015. т. 462. № 5. т. 512–516.
3. А.Г. Куликовский, А.П. Чугайнова, В.А. Шаргатов. Единственность автомодельных решений задачи о распаде произвольного разрыва уравнения Хопфа со сложной нелинейностью. Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2016, т. 56, № 7. с. 1363–1370.

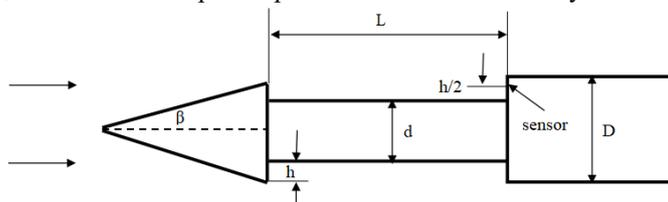
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ТЕЛА С КОЛЬЦЕВОЙ КАВЕРНОЙ

А. С. Шишаева^{1,2}, М. М. Симоненко¹, А.А. Синявин¹, А. А. Аксенов²

¹ Научно-исследовательский институт механики МГУ

² ООО «ТЕСИС»

Течение в кольцевой каверне осесимметричного тела при сверхзвуковом обтекании может быть двух видов: с открытым и замкнутым типами взаимодействия [1-3]. Когда отношение длины каверны к глубине велико, реализуется замкнутое течение. В этом случае внешний сверхзвуковой поток заходит в каверну и присоединяется к поверхности дна каверны, а около переднего и заднего уступов каверны формируются две изолированные области отрыва потока. Когда соотношение между длиной и глубиной мало, реализуется открытое течение, в котором всю каверну от передней до задней стенки занимает дозвуковое отрывное течение, отделенное от внешнего потока турбулентным слоем смешения. На определенном интервале соотношений между длиной и глубиной каверны реализуется аэродинамический гистерезис. В этом случае в зависимости от предыстории течения может реализовываться как открытый, так и замкнутый режим обтекания каверны. Сопротивление обтекаемого тела с замкнутым режимом течения в каверне может существенно превышать сопротивление аналогичного тела с открытым режимом течения. Поэтому важной практической задачей является поиск энергоэффективных способов управления режимами течения в каверне с целью затягивания перехода от открытой каверны к замкнутой. Идея такого управления с помощью теплового источника на дне каверны была предложена в [4], где на примере плоской каверны было показано, что переход от замкнутого к открытому типу сверхзвукового обтекания каверны в области гистерезиса можно осуществить за счет кратковременного теплового импульса.



В данной работе численно исследуется осесимметричное сверхзвуковое обтекание поперечной кольцевой каверны на цилиндрическом теле с коническим наконечником (см. рис). Моделирование выполняется в программном комплексе FlowVision. Проведено исследование сходимости по расчетной области и расчетной сетке, выбрана оптимальная модель турбулентности, получено хорошее совпадение расчета с различными экспериментами для тела с постоянной длиной каверны.

Воспроизведен и исследован наблюдавшийся ранее в эксперименте [5] аэродинамический гистерезис при перестройке схем обтекания кольцевой каверны по мере непрерывного изменения ее длины. Впервые получена оценка диапазонов скоростей изменения длины каверны, при которых реализуются гистерезисные режимы первого или второго рода. Выявлены детали механизмов прямой и обратной перестройки режимов течения в каверне. Проведено исследование влияния теплового источника на течение в области гистерезиса и вне ее. Определены параметры теплового импульса, способного обеспечить перестройку течения в осесимметричной каверне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-01-99623).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Чжен П. Отрывные течения. Том II. М.: Мир, 1973. 280 с.
2. Гаур, И.А., Елизарова Т.Г., Четверушкин Б.Н. Численное моделирование обтекания каверн сверхзвуковым потоком вязкого сжимаемого газа. ИФЖ. 1991. Т. 61. № 4. С. 570-577.
3. Швец А.И. Исследование течения в цилиндрическом вырезе на осесимметричном теле при сверхзвуковом обтекании. Изв. РАН. МЖГ. 2002. №1. С. 123-131.
4. Гувернюк С.В., Синявин А.А. Об управлении гистерезисом сверхзвукового обтекания прямоугольной каверны с помощью теплового импульса. Успехи механики сплошных сред: к 70-летию академика В. А. Левина: сб. науч. тр. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 196-203.
5. Гувернюк С. В., Зубков А. Ф., Симоненко М. М. Экспериментальное исследование сверхзвукового обтекания осесимметричной кольцевой каверны. Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 3. С. 670–679.

О НЕЛИНЕЙНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ПРОНИЦАЕМЫМИ ЦИЛИНДРАМИ

Шапакидзе Л.Д.
Тбилисский Государственный Университет им. И.Джавахишвили,
Институт Математики им. А.Размадзе, Грузия
luiza@rmi.ge, luiza.shapakidze@tsu.ge

Представлены некоторые результаты исследований нелинейной устойчивости течений теплопроводной жидкости между проницаемыми цилиндрами. Предполагается, что цилиндры нагреты до разных температур и на течение действует радиальный поток. Получены условия неустойчивости, бифуркации и переходы к более сложным режимам течений между вертикальными вращающимися и горизонтальными неподвижными цилиндрами с накачиванием жидкости вдоль кольцевого кольца.

TURBULENCE IN A LOCALIZED PUFF IN A PIPE

Alexander Yakhot
Department of Mechanical Engineering, Ben-Gurion University, Beersheva, Israel

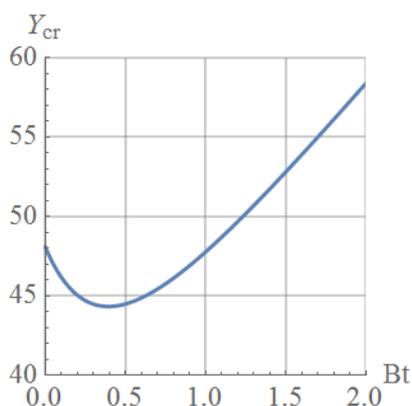
We have performed direct numerical simulations of transient turbulence in a pipe flow for $Re=2,250$ which has been recognized as a threshold for an equilibrium puff. We investigated the structure of an individual puff by considering three-dimensional snapshots over a long time period. To assimilate the velocity data, we applied a conditional sampling based on the location of the maximum energy of the transverse (turbulent) motion. Specifically, at each time instance, we followed a turbulent puff by a three-dimensional moving-window centered at that location. We collected a snapshot-ensemble of the velocity fields acquired over 10,000 time instances (snapshots) inside the moving-window. The considered flow is intermittent and transitional. The velocity field inside the puff shows the dynamics of a developing turbulence. The localized puff is about 12-15 pipe diameters long and the flow regime upstream of its trailing edge and downstream of its leading edge is almost laminar. In the puff core, despite the low Reynolds number, the turbulence statistics becomes similar to a fully-developed turbulent pipe flow and the velocity profile becomes flat in the pipe core and logarithmic near the wall. It is shown that this “fully-developed turbulent gap” is very narrow being about two pipe diameters long.

БИФУРКАЦИЯ ВРАЩЕНИЯ В ТОЧНОМ РЕШЕНИИ МГД УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ТЕЧЕНИЯ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕПОДВИЖНЫМИ НЕПРОНИЦАЕМЫМИ ДИСКАМИ

Н.И. Яворский

Новосибирский государственный университет, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Рассматривается магнитогидродинамическое (МГД) течение вязкой электропроводящей несжимаемой жидкости между двумя неподвижными непроницаемыми дисками. На верхнем диске задан вектор однородной плотности электрического тока, направленный по нормали к поверхности, нижний является диск непроводящим. Исследуется точное решение полной системы МГД-уравнений, принадлежащее к классу течений Кармана, в котором осевая скорость и магнитное поле зависит только от осевой координаты. Задача имеет два безразмерных параметра: величину плотности электрического тока на верхней пластине Y и число Бэтчелора Bt (магнитное число Прандтля). Предполагается, что в задаче нет внешнего источника магнитного поля, который создает осевое магнитное поле. Получено решение для числа Бэтчелора, изменяющегося в диапазоне $0 \leq Bt \leq 2$, который охватывает все возможные практические приложения. Течение жидкости создается электрическим током. Показано, что при малых значениях Y вектор скорости жидкости имеет только осевую и радиальную компоненты. С увеличением Y интенсивность движения увеличивается, и при критическом значении Y происходит бифуркация нового устойчивого режима течения с вращением жидкости, при этом течение без вращения теряет устойчивость. Нетривиальной особенностью полученного нового точного решения является отсутствие осевого магнитного поля, которое необходимо для появления азимутальной компоненты пондеромоторной силы, как это имеет место в обычном МГД динамо. Ниже на рисунке приведена кривая зависимости величины безразмерной плотности критического тока от числа Бэтчелора, при которой имеет место бифуркации вращения.



На рисунке видно, что бифуркация вращения имеет место вплоть до числа $Bt=0$ ($Y_{cr}=48.1$), это соответствует случаю, когда магнитное число Рейнольдса при любом способе его определения равно нулю. Во всем диапазоне чисел Бэтчелора пондеромоторная магнитная сила является источником движения и приводит к бифуркации вращения, в том числе и для случая жидких металлов, для которых число Бэтчелора обычно очень мало. Это свидетельствует о том, что обнаруженное явление спонтанного возникновения вращения можно наблюдать экспериментально. Подавая электрический ток равномерно на плоскую крышку кюветы с электропроводящей жидкостью и диэлектрическим дном, при достижении определённой величины тока можно ожидать спонтанного возникновения вращения жидкости, при этом с одинаковой вероятностью вращения как по часовой стрелке, так и против нее. Согласно рисунку при увеличении числа Бэтчелора от нуля критическая плотность тока сначала уменьшается до $Y_{cr}=44,3425$ при $Bt=0,394$ за счет влияния скорости движения жидкости на распределение и величину магнитного поля. Затем критическая плотность тока начинает увеличиваться, приближаясь к линейной зависимости от числа Бэтчелора. Соответственно, область существования устойчивого вращательного движения сначала увеличивается, а затем уменьшается. Характерная особенность исследованной бифуркации вращения – отсутствие в объеме течения осевого магнитного поля и азимутальной компоненты пондеромоторной силы, появление которой обычно становится причиной возникновения вращения в МГД-динамо. Таким образом, обнаружен новый тип бифуркации вращения в МГД-течении. Основные результаты работы опубликованы в [1].

ЛИТЕРАТУРА.

1. Н.И. Яворский. Спонтанное возникновение вращения в точном решении магнитогидродинамических уравнений для течения между двумя неподвижными непроницаемыми дисками // Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т. 58, №5. С.72-79.

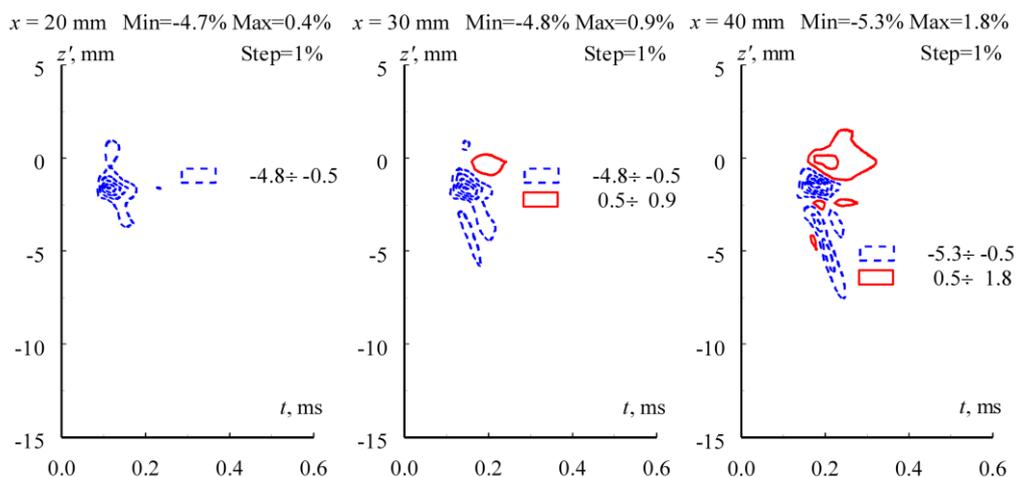
ЭВОЛЮЦИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В ТРЕХМЕРНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

А.А. Яцких, Ю.Г. Ермолаев, А.Д. Косинов, Н.В. Семенов

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

Для исследования процессов ламинарно-турбулентного перехода целесообразным является изучение контролируемых возмущений, обладающих широкополосным частотным и пространственным спектральным составом (волновые пакеты). Контролируемые волновые пакеты могут быть получены с помощью локализованного во времени и в пространстве воздействия на пограничный слой. Первые экспериментальные исследования развития волновых пакетов в пограничном слое были проведены для случая малых скоростей набегающего потока в работе [1]. Последующее развитие подхода локализованных контролируемых возмущений привело к значительному прогрессу в изучении процессов поздних стадий ламинарно-турбулентного перехода дозвуковых пограничных слоев [2,3]. В исследованиях ламинарно-турбулентного перехода дозвуковых пограничных слоев локализованные контролируемые возмущения генерируются как с помощью метода «вдув-отсос», так и вибрирующей поверхностью. Метод возбуждения волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое с помощью поверхностного импульсного тлеющего разряда был предложен и опробован в работах [4,5].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию эволюции локализованных волновых пакетов в трехмерном сверхзвуковом пограничном слое. Эксперименты выполнены в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числах Маха $M=2$ и $2,5$. В экспериментах использовалась модель крыла с углом скольжения передней кромки 40° и чечевицеобразным профилем. Локализованные возмущения генерировались с помощью импульсного электрического разряда на поверхности экспериментальной модели. Измерения пульсаций в пограничном слое проводились с помощью термоанемометра постоянного сопротивления. Контролируемое возбуждение волновых пакетов производилось синхронно с измерениями, что позволило выделить искусственные возмущения из фона естественных пульсаций пограничного слоя.



На рисунке представлены изолинии пульсаций массового расхода волнового пакета при различных значениях продольной координаты для случая числа Маха набегающего потока $M=2$. В пограничном слое скользящего крыла волновой пакет несимметричен, что объясняется наличием поперечного течения. Проведен спектральный анализ развития волнового пакета. Определены наиболее неустойчивые значения поперечных волновых чисел и частот.

Работа выполнена в рамках базового государственного задания (номер гос. регистрации: АААА-А17-117030610125-7).

ЛИТЕРАТУРА.

1. M. Gaster, I. Grant. An experimental investigation of the formation and development of a wave packet in a laminar boundary layer. Proc. R Soc. Lond., A. 1975, 347, 253-269.
2. А.В. Бойко, Г.Р. Грек, А.В. Довгаль, В.В. Козлов. Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. М.; Ижевск: РХД, 2006, 304 с.
3. М.М. Катасонов, В.В. Козлов, Н.В. Никитин, Д.С. Сбоев. Возникновение и развитие локализованных возмущений в круглой трубе и пограничном слое. Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск, 2014, 222 с.
4. А.А. Яцких, Ю.Г. Ермолаев., А.Д. Косинов, Н.В. Семенов. Эволюция волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины. Теплофизика и аэромеханика, 2015, т. 22, №1, с. 17-28
5. А.А. Yatskikh, Y.G. Ermolaev, A.D. Kosinov, N.V. Semionov. Hot-wire visualization of the evolution of localized wave packets in a supersonic flat-plate boundary layer. Journal of Visualization, 2017, 20(3), 549-557.

ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕГО ТЕРМОАНЕМОМЕТРА ПОСТОЯННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ

Яцких А.А., Косинов А.Д., Семенов Н.В., Смородский Б.В., Ермолаев Ю.Г., Колосов Г.Л.
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Изучение закономерностей ламинарно–турбулентного перехода в условиях сверхзвуковых скоростей газовых потоков относится к числу важнейших фундаментальных задач механики жидкости и газа. Положение ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя существенно влияет на аэротермодинамические характеристики и эффективность органов управления сверхзвуковых летательных аппаратов. Экспериментальные и расчетные исследования турбулизации в пристенных сдвиговых течениях продолжают оставаться предметом пристального внимания ученых ведущих научных центров мира. Отсутствие глубоких знаний о закономерностях ламинарно-турбулентного перехода и его чувствительности к изменению различных условий полета затрудняет развитие инженерных методов определения положения ламинарно-турбулентного перехода.

На сегодняшний день активно развиваются численные методы изучения процессов ламинарно-турбулентного перехода. Для прикладного применения прямого численного моделирования и модельных подходов требуются их тщательная верификация. Для корректного сравнения теоретических расчетов и результатов экспериментальных исследований развития как естественных, так и контролируемых возмущений, необходимо разрешить задачу о начальных данных. Необходимы детальные знания о пульсациях пограничного слоя в зависимости от параметров потока.

Наиболее полные данные о течении дают измерения с помощью термоанемометра. Ниточный датчик термоанемометра обладает необходимым высокочастотным откликом и достаточным пространственным разрешением. Известно, что термоанемометр чувствителен к пульсациям массового расхода и температуры торможения [1-7]. Чувствительность к изменению этих величин различна и зависит от относительной температуры нити датчика термоанемометра (температурного напора). Изменением температурного напора возможно разделить пульсации и получить данные об уровне возмущений каждого типа. Такой подход к изучению высокоскоростных потоков хорошо себя зарекомендовал в исследованиях поля возмущений свободного потока в аэродинамических установках. Применительно к экспериментальным исследованиям пульсаций пограничного слоя подобная техника измерений так же используется, однако эти работы в основном посвящены измерениям в турбулентных пограничных слоях. Для изучения ламинарно-турбулентного перехода в высокоскоростных пограничных слоях перспективными являются исследования развития пульсаций скорости, плотности и температуры вниз по потоку в сверхзвуковых пограничных слоях. Исследования влияния таких параметров, как число Маха набегающего потока и геометрии обтекаемой модели могут создать базу для развития теоретических и расчетных методов предсказания положения ламинарно-турбулентного перехода.

В данной работе представлены результаты измерений с помощью термоанемометра постоянного сопротивления в режиме автоматического сканирования по перегревам нити датчика. Описаны технология измерений и процесс обработки экспериментальных данных. Детально изложена процедура калибровки и представлены данные по изучению полей пульсаций в потоке рабочей части аэродинамической трубы Т-325 и в пограничном слое плоской пластины при числах Маха набегающего потока $M = 2$ и $2,5$. По результатам калибровки сканирующего термоанемометра показано, что коэффициенты чувствительности практически не зависят от числа Маха набегающего потока. Для свободного потока в рабочей части Т-325 определены уровни пульсаций температуры торможения и пульсаций массового расхода. Проведено разделение возмущений пограничного слоя на пульсации массового расхода и температуры торможения. Показано, что в процессе ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя на плоской пластине отношение амплитуд пульсаций массового расхода к пульсациям температуры торможения остается постоянным.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 17-19-01289).

ЛИТЕРАТУРА.

1. L.S. Kovasznay. The hot-wire anemometer in supersonic flow. *J. Aeronaut. Sci.* 1950, 17(9), 565 - 584
2. В.А. Лебига, А.Н. Зиновьев, А.Ю. Пак. Применение термоанемометра для измерения характеристик произвольного акустического поля в сжимаемых потоках. *ПМТФ*, 2002, т. 43, №3, с. 176-181.
3. J. Weiss, H. Knauss, S. Wagner, A.D. Kosinov. Constant temperature hot-wire measurements in a short duration supersonic wind tunnel. *The Aeronautical Journal*, 2001, 105(1050), 435-450.
4. A.L. Kistler. Fluctuation measurements in a supersonic turbulent boundary layer. *Phys.Fluids*, 1959, 2, 290-296.
5. A.J. Smits, K. Hayakawa, K.C. Muck. Constant temperature hot-wire anemometer practice in supersonic flows. *Experiments in Fluids*, 1983, 1(1), 83-92.
6. M.V. Morkovin. Fluctuations and hot-wire anemometry in compressible flows. *AGARD Rept 24*. 1956. 102 p.
7. A.D. Kosinov, Yu.G. Yermolaev, N.V. Semionov, G.L. Kolosov, A.V. Panina. To the analysis of the natural pulsation development during laminar-turbulent transition in supersonic boundary layer. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1893, 030073.

Научное издание

**Тезисы XXIII Международной конференции
«Нелинейные задачи теории гидродинамической
устойчивости и турбулентность»**

25 февраля – 4 марта 2018 г.
Московская область, г. Звенигород,
пансионат «Звенигородский» РАН.

Ответственный редактор Н.В. Никитин
Компьютерная верстка Н.В. Попеленская

Публикуется в авторской редакции.

Объем 16 усл. печ. л. Тираж 125 экз.

Издательство Московского университета,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15
(ул. Академика Хохлова, 11).
Тел.: (495)939-32-91. E-mail: secretary-msu-press@yandex.ru

Отпечатано на ризографе НИИ механики МГУ
119192, Москва, Мичуринский пр., 1.