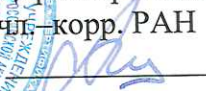


**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук**



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИТПМ СО РАН  
чл.-корр. РАН

 А.Н. Шиплюк  
«27» 09 2018 г.

**ДИНАМИКА ВЯЗКОГО ГАЗА, ТУРБУЛЕНТНОСТИ И СТРУЙ**

Рабочая программа дисциплины

Направление подготовки аспирантов Института 01.06.01 – «Математика и механика»,

Направленность: 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

**Квалификация выпускника**

Исследователь. Преподаватель - исследователь.

**Форма обучения - очная**

Новосибирск 2018

## Содержание

Аннотация	3
1. Цели освоения дисциплины	4
2. Место дисциплины в структуре ООП	5
3. Компетенции обучающегося, формируемые при освоения дисциплины	5
4. Структура и содержание дисциплины	7
5. Образовательные технологии	9
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов	9
7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания	10
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	11
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины	11
10. Банк обучающих материалов, рекомендации по организации самостоятельной работы аспирантов	12
11. Банк контролирующих материалов	12

## Аннотация

Программа курса «Динамика вязкого газа, турбулентности и струй» составлена в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 01.06.01 «математика и механика».

Цели курса – описать основные понятия и методы решения задач, возникающих при изучении динамики движения вязкого газа.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, семинарские занятия, контрольные работы, домашние задания, консультации, самостоятельная работа аспиранта.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: Осуществляется контроль посещения лекций. Предусмотрено проведение коллоквиума, который проводится в середине семестра. Часть времени на лекциях отводится обсуждению с аспирантами практических задач.

Промежуточная аттестация: зачет.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 академических часа:

- занятия лекционного типа – 26 часов;
- занятия семинарского типа – 4 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра – 24 часа;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче зачета и зачет) – 18 часов.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, семинарского типа, групповые консультации, зачет) составляет 34 часа.

Работа с обучающимися в интерактивных формах составляет 4 часа.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (период сессии) (в часах)	
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем (консультации, зачет)
		Лекции	Семинары	Лабораторные занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8
	72	26	4		24	14	4
Всего 72 часа / 2 зачетных единицы из них: - контактная работа 34 часа							



## 1. Цели освоения дисциплины

Дисциплина (курс) "Динамика вязкого газа, турбулентности и струй" имеет своей целью описать основные понятия и методы решения задач, возникающих при изучении динамики движения вязкого газа. Большинство излагаемых в нем вопросов с разной степенью полноты освещены в ряде монографий, приведенных в списке литературы. Некоторые специальные вопросы рассмотрены в научных статьях, также отраженных в списке литературы.

Цель данного курса – приблизить серьезные научные труды и монографии по специальным темам, таким, как теория пограничного слоя или теория гидродинамической устойчивости, к элементарным учебным курсам. Выделены проблемы, имеющие первостепенное значение в работах, связанных с изучением течения реальных газов. Основное внимание уделено описанию течения газа с доминирующим влиянием диссипативных эффектов, вызванных наличием у газа внутреннего трения – вязкости. Некоторые вопросы, описание которых для сжимаемых сред громоздко, проанализированы на примере несжимаемой жидкости. В курсе выделены отдельные проблемы, иллюстрирующие влияние вязкости среды наиболее наглядно и дающие представление об основных методах решения задач, важных для практического использования.

Из приложений результатов теории течения вязкого газа к практическим задачам отмечаются только два, наиболее существенных. Совершенствование формы современных летательных аппаратов ведет к тому, что в их полном аэродинамическом сопротивлении удельный вес сопротивления, вызванного вязкостью, неуклонно растет. В последние годы появляется все большее число научных работ, направленных на поиск способов воздействия на течение в пограничном слое с целью снизить сопротивление вязкого трения. Вторая проблема связана с аэродинамическим нагревом аппаратов, летящих с большими скоростями. Проблема эта настолько важна, что стала лимитирующей при проектировании летательных аппаратов типа «Буран» или ВКС (воздушно-космический самолет).

Цели дисциплины:

№ цели	Содержание цели
<b>Аспирант будет иметь представление</b>	
1	Об основных этапах, проблемах и современных тенденциях развития динамики вязкого газа и турбулентности
2	О методах расчета простейших слоистых течений
3	О течении газа при малых скоростях и большой вязкости
4	О пограничном слое в несжимаемой жидкости и в сверхзвуковом потоке газа
5	О гидродинамической устойчивости вязких течений и возникновении турбулентности
6	О методах расчета турбулентных течений
7	О методах расчета сопротивления трения и нагрева летательного аппарата
8	О формировании струйных течений и акустике струй
<b>Аспирант будет знать</b>	
9	Свойства и модели жидкости и газов
10	Основы кинематики и динамики жидкостей и газов
11	Основы теории слоистых течений
12	Понятия и уравнения динамики вязкого газа



13	Основы теории пограничного слоя
14	Основные понятия теории гидродинамической устойчивости, причин возникновения турбулентных режимов и методов управления течениями
15	Полуэмпирические модели турбулентности и приемы их применения к конкретным задачам
16	Современные модели турбулентных течений
17	Методики расчета сопротивления и нагрева тел в газовом потоке
<b>Аспирант будет уметь</b>	
18	Пользоваться уравнениями динамики вязкого газа, ставить математически корректно задачи и граничные условия
19	Рассчитывать простейшие течения сжимаемого газа
20	Оценивать характеристики пограничного слоя при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях потока
21	Определять добавочное аэродинамическое сопротивление, возникающее за счет вязкости и тепловые потоки к телу

Для достижения поставленной цели выделяются задачи курса:

1. Обучение постановке физической задачи динамики движения вязкого газа (вывод основных уравнений, постановка граничных условий, задачи при малых и больших числах Рейнольдса, переходные процессы при переходе ламинарного течения в турбулентное);
2. Обучение базовым методам, используемым при расчете сопротивления трения и тепловых потоков (линеаризация уравнений, асимптотические методы, автомодельные решения, полуэмпирический подход);
3. Обучение простым методам оценке влияния вязкости, основанных на сведениях о сложных течениях к простым каноническим случаям (учет сжимаемости, учет трехмерности течения);
4. Решение конкретных задач по оценке сжимаемости на течение (точные решения, оценка влияния пограничного слоя, влияние ламинарно-турбулентного перехода, применение полуэмпирических подходов).

## **2. Место дисциплины в структуре ОПП**

Данная дисциплина относится к группе вариативных дисциплин Блока 1 направления подготовки аспирантов Института - 01.06.01 - "Математика и механика" в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) по направленности - механика жидкости, газа и плазмы (физико-математические, технические науки).

## **3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины "Динамика вязкого газа, турбулентности и струй "**

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

способность свободно владеть фундаментальными разделами математики и механики, необходимыми для решения научно-исследовательских задач механики жидкости, газа и плазмы (ПК-1);

способность использовать знания современных проблем и новейших достижений механики жидкости газа и плазмы в своей научно-исследовательской деятельности (ПК-2);

способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области механики жидкости, газа и плазмы, а также решать их с помощью современной

аппаратуры, оборудования, информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (ПК-3).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:** основные представления о физике влияния диссипативных процессов на особенности течения жидкости и газа; корректную постановку физической задачи динамики вязкого газа (основные уравнения и граничные условия); свойства и модели жидкости и газов; основы кинематики и динамики жидкостей и газов; основы теории слоистых течений; основные понятия теории гидродинамической устойчивости, причины возникновения турбулентных режимов и методов управления течениями; полуэмпирические модели турбулентности и приемы их применения к конкретным задачам; современные модели турбулентных течений; методики расчета сопротивления и нагрева тел в газовом потоке; физику формирования струйных течений и акустику струй.
- **Уметь:** провести оценки влияния вязкости на течение, оценить сопротивление трения и тепловые потоки, влияние сжимаемости и пространственности течения; пользоваться уравнениями динамики вязкого газа, ставить математически корректно задачи и граничные условия; рассчитывать простейшие течения сжимаемого газа; оценивать характеристики пограничного слоя при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях потока; определять добавочное аэродинамическое сопротивление, возникающее за счет вязкости и тепловые потоки к телу.
- **Владеть:** методами теории динамики вязкого газа; математическими приемами постановки задач и граничных условий; простейшими приемами оценки характеристик пограничного слоя при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях потока, добавочного аэродинамического сопротивления, возникающего за счет вязкости и тепловые потоки к телу.



#### 4. Структура и содержание дисциплины "Динамика вязкого газа, турбулентности и струй "

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 часа.  
Структура дисциплины в модульном виде представлена ниже:



Разделы дисциплины приведены в таблице:

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов, и трудоемкость (в часах)					Промежуточная аттестация (период сессии) (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	
				Лекции	Семинары	Лабораторные работы		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Введение.	1	2	2				
2.	Примеры точного решения уравнений динамики вязкого газа.	2	4	2			2	
3.	Ползущие движения.	3	4	2			2	

4.	Ламинарный пограничный слой.	4	4	2			2	
5.	Автомодельные решения уравнений пограничного слоя.	5	4	2			2	
6.	Приближенные однопараметрические методы.	6	4	2			2	
7.	Стационарный пограничный слой на пластине в газовом потоке.	7	4	2			2	
8.	Контрольная по задачам пограничного слоя	8	2		2			
9.	Трехмерные пограничные слои.	9	4	2			2	
10.	Спутное течение за пластиной.	10	4	2			2	
11.	Гидродинамическая неустойчивость.	11	4	2			2	
12.	Турбулентные течения.	12	4	2			2	
13.	Коллоквиум	13	2		2			
14.	Свободная турбулентность.	14	4	2			2	
15.	Динамика струйных течений и излучение звука струям	15	4	2			2	
16.	Консультация		2					2
17.	Самостоятельная подготовка аспирантов к зачету		14					14
18.	Зачет		2					2
Итого			72	26	4		24	18

№ п/п	Темы лекционных занятий
1.	Введение. Уравнения движения. Уравнение неразрывности. Уравнения Навье-Стокса. Уравнение энергии. Замыкание уравнений движения. Граничные и начальные условия. Безразмерная запись уравнений движения.
2.	Примеры точного решения уравнений динамики вязкого газа. Обобщенное течение Куэтта. Течение Куэтта между нагретыми плоскостями. Течение Гагена-Пуазейля. Несколько замечаний о применимости полученных результатов.
3.	Ползущие движения. Обтекание шара. Приближение Стокса. Обтекание шара. Приближение Озеена. Течение в слое смазки.
4.	Ламинарный пограничный слой. Уравнения пограничного слоя. Уравнения Прандтля. Интегральные характеристики пограничного слоя. Отрыв пограничного слоя. Область применимости уравнений пограничного слоя.
5.	Автомодельные решения уравнений пограничного слоя. Решения Фокнера-Скэн. Задача Блазиуса.
6.	Приближенные однопараметрические методы. Интегральное условие импульсов. Метод Кармана-Польгаузена.
7.	Стационарный пограничный слой на пластине в газовом потоке. Распределение скорости. Интеграл Крокко.



8.	Трехмерные пограничные слои. Пространственный пограничный слой на скользящем крыле. Установившиеся осесимметричные пограничные слои. Пограничный слой на конусе в продольном сверхзвуковом потоке. Особенности развития возмущений в ударных слоях.
9.	Спутное течение за пластиной.
10.	Гидродинамическая неустойчивость. Метод малых возмущений. Приближение параллельного течения. Уравнение Орра-Зоммерфельда. Задача на собственные значения. Модели расчета положения ламинарно-турбулентного перехода.
11.	Турбулентные течения. Уравнения Рейнольдса. Гипотеза Буссинеска. "Путь перемешивания" Прандтля. Гипотеза подобия Кармана. Универсальные законы распределения скоростей. Турбулентное течение в трубах. Связь между законом сопротивления и распределением скоростей. Универсальные законы распределения скоростей для больших чисел Рейнольдса. Универсальный закон сопротивления для гладких труб при больших числах Рейнольдса. Турбулентный пограничный слой на плоской пластине
12.	Свободная турбулентность. Развитие во времени слоя раздела. Плоский след. Спутное течение за решетками из стержней.
13.	Динамика струйных течений и излучение звука струям. Моделирование микро- и нанотечений.

## 5. Образовательные технологии

В учебном процессе широко используются активных и интерактивных формы проведения занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся. Демонстрация основных физических явлений проводится на действующих аэродинамических установках, таких как аэродинамические трубы ИТПМ СО РАН Т-327, Т-325, Т-324, Т-326, Т-313, АТ-303, ИТ-302, на моделях летательных аппаратов и их элементов. В процессе обучения используются серии видеofilьмов по авиационной тематике, плакаты, видео-презентации. Аспиранты привлекаются к семинарам института, в том числе к интерактивному видео -семинару по аэрогидромеханике (фундаментальные исследования) ЦАГИ-ИТПМ-СПбГПУ-НИИМех МГУ.

## 6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов.

1. Маслов А. А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В. Введение в динамику вязкого газа. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010.
2. Маслов А. А., Миронов С.Г. Динамика вязкого газа в примерах и задачах. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010.

Система контроля включает текущий (по ходу семестра) контроль освоения практического материала, а также зачет.

Текущий контроль по практике: осуществляется в ходе семестра путем проведения контрольных работ и приема обязательных заданий.

Окончательная оценка работы аспиранта в течение семестра происходит на зачете. Зачет проводится в конце семестра по билетам, в устной форме.

## 7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания

Освоение компетенций оценивается по двухбалльной шкале «сформирована / не сформирована». Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции сформирована в полном объеме в части, относящейся к содержанию дисциплины.

### Контролирующие материалы

Формы контроля

**Итоговый контроль.** Для контроля усвоения дисциплины учебным планом предусмотрен зачет.

**Текущий контроль.** Осуществляется контроль посещения лекций. Предусмотрено проведение коллоквиума, который проводится в середине семестра. Часть времени на лекциях отводится обсуждению со аспирантами практических задач.

#### 7.1 Суммарная оценка

Для оценки достижений аспирантов в ходе изучения дисциплины применяется балльно-рейтинговая система. Рейтинг аспиранта определяется как сумма оценки его деятельности в течение семестра и оценки, полученной на зачете:

Таблица 1

Семестр	Максимальное количество баллов	
	В течение семестра	Зачет
1-ый	60	40

Максимальное количество баллов, которое может набрать аспирант - 100. Максимальный балл проставляется за качественное и своевременное выполнение работ по всем видам деятельности.

#### 7.2. Оценка видов деятельности аспирантов в семестре

Распределение баллов за деятельность в течение семестра определяется в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2

Вид деятельности	Количество баллов	
	Максимальное	Достаточное для допуска к зачету
Контрольная работа (2 работы)	10 (2x5)	5
Участие в конференциях или подготовка реферата	10	5
Практические занятия	10	5
Общее количество баллов	30	15

##### 7.2.1. Выполнение контрольных работ

В течение семестра запланировано проведение коллоквиума и контрольная работа.

Результаты контрольной работы оцениваются в баллах.

##### 7.2.3. Практические занятия

В начале каждого практического занятия проводится короткий опрос аспирантов по теме занятия с целью выявить уровень их подготовки. Активность аспиранта на семинаре и подготовка его к занятию оценивается по 5-ти балльной системе.



### 7.3. Зачет

К зачету допускаются аспиранты, набравшие не менее 30 баллов в течение семестра. Зачет проводится в устной форме. На зачете аспиранту предлагается устно ответить на теоретический вопрос, указанный в билете и решить задачу. Баллы на зачете выставляются в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3

Составляющие зачета	Максимальное количество баллов
Теоретический вопрос	20
Задача	10
Дополнительные вопросы	10
<b>Общее количество баллов</b>	<b>40</b>

Продолжительность подготовки к ответу 100 минут. Продолжительность ответа на билет – 10 минут. Список вопросов представлен ниже.

Для того, чтобы набрать максимальное количество баллов на зачете аспирант должен представить полный ответ на теоретический вопрос билета, правильное решение задачи и ответить на дополнительные вопросы, касающиеся основных определений курса.

Для подготовки ответов на дополнительные вопросы дополнительного времени не предоставляется.

### 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) Рекомендованная литература к теоретическому курсу:

1. Маслов А. А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В. Введение в динамику вязкого газа. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010.
2. Маслов А. А., Миронов С.Г. Динамика вязкого газа в примерах и задачах. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010.

б) Дополнительная литература:

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Физматлит, 1973.
3. Лойцянский Л. Г. Ламинарный пограничный слой. М.: Физматлит., 1962.
4. Шкадов В. Я., Запрынов З. Д. Течения вязкой жидкости. М.: МГУ, 1984.
5. Седов Л. И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. Т.1, 2.
6. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы НГУ.

### 9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Компьютеры, видеопроекторы.
- Действующие аэродинамические трубы ИТПМ СО РАН Т-327, Т-325, Т-324, Т-326, Т-313, АТ-303, ИТ-302, модели летательных аппаратов и их элементов.
- Серия видеофильмов по авиационной тематике.
- Плакаты.
- Видео-презентации.

## **10. Банк обучающих материалов, рекомендации по организации самостоятельной работы аспирантов, выполнению курсовых проектов и лабораторных работ**

1. Маслов А. А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В. Введение в динамику вязкого газа. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010, -168с.
2. Маслов А. А., Миронов С.Г. Динамика вязкого газа в примерах и задачах. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010, -76с.

## **11. Банк контролирующих материалов**

а) Билеты.

### **№1**

1. Течение Хегена-Пуазейля в трубе.
2. Понятие о нейтральной кривой.

### **№2**

1. Осредненные и пульсационные величины. Уравнения Рейнольдса.
2. Касательные напряжения и отрыв пограничного слоя.

### **№3**

1. Гидродинамическая теория смазки.
2. Способы управления в пограничном слое.

### **№4**

1. Уравнения Прандтля. Общие свойства пограничного слоя.
2. Понятия о турбулентном движении.

### **№5**

1. Пограничный слой на пластине. Задача Блазиуса.
2. Влияние шероховатости на сопротивление труб, песочная шероховатость.

### **№6**

1. Решения Фонкера-Скэн.
2. Свободная турбулентность (общие положения).

### **№7**

1. Спутное течение вдали от пластины (ламинарное).
2. Переход и его связь с устойчивостью.

### **№8**

1. Уравнение Лайтхилла. Шум турбулентных струй.
2. Обтекание шара (поправка Озеена).

### **№9**

1. Стационарный пограничный слой на пластине в газовом потоке. Преобразования Дородницына. Интеграл Крокко.
2. Закон подобия Рейнольдса как следствие уравнений движения.

### **№10**

1. Метод малых возмущений. Уравнение Орра-Зоммерфельда.
2. Понятие толщины потери импульса и толщины вытеснения, их физический смысл.

### **№11**

1. Осредненные и пульсационные величины. Уравнение Рейнольдса.



2. Касательные напряжения и срыв пограничного слоя.

**№12**

1. Степенные законы распределения скоростей для турбулентных течений. Их связь с законом сопротивлений Блазиуса.
2. Понятие пограничного слоя, его общие свойства.

**№13**

1. Универсальный закон сопротивления для гладких труб при больших числах Рейнольдса.
2. Пространственный пограничный слой на скользящем крыле.

**№14**

1. Турбулентный пограничный слой на пластине. Однопараметрический расчет на основе степенного распределения для скоростей.
2. Ползущие движения (общие положения, постановка задачи).

**№15**

1. Свободная турбулентность. Спутное течение позади решетки из стержней.
2. Осесимметричный слой. Переменные Степанова-Манглера.

**№16**

1. Универсальные законы распределения скоростей для больших чисел Рейнольдса.
2. Законы подобия.

**№17**

1. Обтекание шара (задача Стокса).
2. «Путь перемешивания Прандтля».

**№18**

1. Свободная турбулентность. Развитие во времени слоя раздела.
2. Основные идеи приближенного метода решения уравнений пограничного слоя.

**№19**

1. Свободная турбулентность. Плоский след.
2. Уравнения пограничного слоя в газе. Пределы применимости.

**б) Перечень дополнительных вопросов**

1. Физический смысл отдельных членов уравнений движения и уравнения энергии. Типы граничных условий. Критерии подобия.
2. Примеры слоистых течений. Расчет течения в кольцевом зазоре.
3. Основы подхода к расчету очень вязких течений. Физическое объяснение эффекта гидродинамической смазки. Оценить скорость снижения облака мелкодисперсных капель.
4. Основные допущения при выводе уравнений пограничного слоя. Полученные преимущества и упрощения. Физический смысл интегральных толщин пограничного слоя. Физические причины отрыва пограничного слоя. Асимптотический пограничный слой отсасывания.
5. Закон Блазиуса для сопротивления плоской пластины.
6. Приближенная оценка сопротивления плоской пластины на основе метода Кармана - Польгаузена.
7. Оценить влияние числа Маха на толщину пограничного слоя.

8. Объяснить причины появления поперечных токов пограничного слоя на скользящем крыле. Оценить толщину пограничного слоя на конусе в газовом сверхзвуковом потоке.
9. Пределы применимости решения для ламинарного следа.
10. Линеаризация уравнений движения. Понятие нейтральной кривой. Собственные числа задачи гидродинамической устойчивости. Ламинарно-турбулентный переход пограничного слоя как следствие его неустойчивости.
11. Турбулентная вязкость. Ламинарный подслоя. Физический смысл “длины пути смешения” у Прандтля. Гипотеза подобия турбулентных течений Кармана. Логарифмические законы распределения скоростей в турбулентных течениях. Кривые Никурадзе. Сопротивление плоской пластины с турбулентным пограничным слоем.
12. Примеры течений со свободной турбулентностью.
13. Структура недорасширенных, перерасширенных и расчетных струй.

### в) Задачи

#### Задача 1.

Рассматривается течение между двумя пластинами. На нижней пластине укреплен плавающий элемент – аэродинамические весы, измеряющие касательную силу. Пусть  $R$  – радиус чувствительного элемента,  $2h$  – расстояние между пластинами,  $p_1$  и  $p_2$  – давление в зазоре в передней и задней точках элемента. Найти силу, которую покажут весы.

#### Задача 2.

Рассматривается течение между двумя неподвижными пластинами с одинаковой температурой  $T_0$ . Течение осуществляется за счет перепада давления  $\frac{dp}{dx} = p'$ . Найти распределение температуры и максимальную температуру в потоке.

#### Задача 3.

Рассмотреть течение в кольцевом зазоре между двумя трубами радиуса  $R_1$  и  $R_2$ . Перепад давления  $\Delta p$  на длине трубы  $l$  задан. Найти распределение скорости в зазоре.

#### Задача 4.

В вертикальную трубу с внутренним радиусом  $R$ , заполненную вязкой жидкостью, вставлен невесомый цилиндр длиной  $L$ , радиусом меньшим  $R$  на величину  $h$ . При этом выполняются следующие неравенства:  $L \gg R$  и  $h \ll R$ . Найти стационарную скорость всплывания цилиндра в трубе  $U$ .

#### Задача 5.

Облако мелкодисперсных частиц радиусом  $R$  равномерно опускается на землю. Оценить скорость снижения облака в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$ .

#### Задача 6.

Найти положение максимума давления на опору в клиновидном зазоре (рис.8), если его высота определяется соотношением  $h(x) = \delta(a-x)$ .

#### Задача 7.

Две параллельные, круглые пластинки радиуса  $R$  расположены одна над другой на малом расстоянии  $h$  друг от друга и пространство между ними заполнено жидко-



стью. Пластинки сближаются со скоростью  $u$ , вытесняя жидкость. Найти силу сопротивления сближению пластинок.

*Задача 8.*

В случае равномерного отсоса пограничного слоя на пластине образуется асимптотический профиль отсасывания, не зависящий от продольной координаты. Определить профиль скорости, интегральные толщины пограничного слоя и напряжение трения.

*Задача 9.*

Определить наименьший темп роста давления, при котором может произойти отрыв потока.

*Задача 10.*

Определить толщину потери энергии в пограничном слое  $\Theta^* = \int_0^{\delta} u(1 - u^2) dy$ , где  $u = u^*/U$ . Вывести уравнение для  $\Theta^*(x)$ .

*Задача 11.*

Рассчитать пограничный слой на пластине приближенно. Аппроксимировать распределение скорости в пограничном слое выражением  $u = A \sin(By + C)$ .

*Задача 12.*

Рассчитать пограничный слой в критической точке приближенно. Аппроксимировать распределение скорости в пограничном слое полиномом второй степени.

*Задача 13.*

Применить метод Польгаузена для течения над плоской пластиной  $V(x) = V$ , получить интегральные характеристики пограничного слоя.

*Задача 14.*

Вывести зависимость интегральных толщин пограничного слоя от числа Маха для теплоизолированной пластины. Считать, что число Прандтля  $Pr = 1$ , а  $\mu = T$ .

*Задача 15.*

Два сверхзвуковых потока с температурами торможения  $T_{0I}$ ,  $T_{0II}$  и числом Маха  $M_I$ ,  $M_{II}$  разделены тонкой пластиной. Оценить температуру пластины. Параметры торможения заданы, число Прандтля  $Pr = 1$  и  $\mu = T$ . Дополнительное условие

$$Re_{11} = \frac{u_1}{\nu_1} = \frac{u_2}{\nu_2} = Re_{12}.$$

*Задача 16.*

Тонкая пластина с температурой  $T_w$  обтекается сверхзвуковым потоком с числом Маха  $M$  и температурой торможения  $T_0$ . Найти максимальную температуру в пограничном слое.

*Задача 17.*

Найти какому плоскому течению соответствует течение в окрестности критической точки, где  $r(x) = x$ ;  $U(x) = u_1 x$ .

*Задача 18.*

Доказать неустойчивость к малым возмущениям тангенциального разрыва между двумя слоями невязкой несжимаемой жидкости текущими с разными скоростями.

*Задача 19.*

Вывести коэффициент сопротивления гладкой трубы для степенного распределения скорости. Показать, что при  $n = 1/7$  получим закон Блазиуса.

*Задача 20.*

Найти распределение скорости на удаленном расстоянии за системой равноотстоящих стержней, исходя из выражения для турбулентного напряжения

$$\tau = \rho b k (U_{\max} - U_{\min}) \frac{\partial U}{\partial y}.$$

*Задача 21.*

Найти распределение скорости на удаленном расстоянии от тела толщиной  $d$ . В ка-

честве турбулентного напряжения использовать формулу Прандтля  $\tau = \rho l^2 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$ .

**Программа составлена в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:**

1. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 года № 273-ФЗ;

2. Приказ Министерства образования и науки РФ от 19.11.2013 года № 1259 «Об утверждении порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)»;

3. Федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования по направлениям подготовки кадров высшей квалификации: 01.06.01 - "Математика и механика" - приказ Минобрнауки России от 30.07.2014 г. № 866.

Разработчик: докт. физ.-мат. наук, проф.



А.А.Маслов



**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ В РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ**  
за 20 \_\_\_/20\_\_\_ учебный год

В \_\_\_\_\_ рабочую \_\_\_\_\_ программу

\_\_\_\_\_ для специальности \_\_\_\_\_

вносятся следующие дополнения и/или изменения:

Дополнения \_\_\_\_\_ и \_\_\_\_\_ изменения \_\_\_\_\_ внес

\_\_\_\_\_  
(должность, Ф.И.О., подпись)

Рабочая программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры ТПМ Института  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. \_\_\_\_\_ протокол № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой ТПМ \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)