

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**  
**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**  
**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

УТВЕРЖДАЮ  
 Декан факультета

\_\_\_\_\_  
 Юнаков Л. П.  
 (подпись) ФИО  
 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ ДИНАМИКА ВЯЗКИХ ЖИДКОСТИ, ГАЗА И СТРУЙ

Направление/специальность подготовки	24.03.05 Двигатели летательных аппаратов
Специализация/профиль/программа подготовки	Авиационная и ракетно-космическая теплотехника
Уровень высшего образования	Бакалавриат
Форма обучения	Очная
Факультет	А Ракетно-космической техники
Выпускающая кафедра	А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА
Кафедра-разработчик рабочей программы	А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

КУРС	СЕМЕСТР	ОБЩАЯ ТРУДОЁМКОСТЬ (ЗАЧЕТНЫХ ЕДИНИЦ)	ЧАСЫ (по наличию видов занятий)									ВИД ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ
			ОБЩАЯ ТРУДОЁМКОСТЬ	АУДИТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ				САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА				
				ВСЕГО	ЛЕКЦИИ	ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	ВСЕГО	КУРСОВОЙ ПРОЕКТ	КУРСОВАЯ РАБОТА	ДРУГИЕ ВИДЫ САМОСТ. РАБОТЫ	
4	7	3	108	51	34	0	17	57	0	0	57	ЭКЗ.

*ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ*

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА СОСТАВЛЕНА В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО СТАНДАРТА ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ (ФГОС ВО)

**24.03.05 Двигатели летательных аппаратов**

год набора группы: 2024

Программу составили:

Кафедра А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА  
Брыков Никита Александрович, к.т.н., доцент, доцент

\_\_\_\_\_

Кафедра А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА  
Лаптинская Мария Михайловна, ассистент

\_\_\_\_\_

Программа рассмотрена  
на заседании кафедры-разработчика  
рабочей программы **А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА**

Заведующий кафедрой Тетерина И.В., к.т.н., доц.

\_\_\_\_\_

Программа рассмотрена  
на заседании выпускающей кафедры

**А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА**

Заведующий кафедрой Тетерина И.В., к.т.н., доц.

\_\_\_\_\_

# **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ ДИНАМИКА ВЯЗКИХ ЖИДКОСТИ, ГАЗА И СТРУЙ**

## **Разделы рабочей программы**

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО
3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ
4. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ
5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ
6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

## **Приложения к рабочей программе дисциплины**

- Приложение 1. Аннотация рабочей программы
- Приложение 2. Технологии и формы обучения
- Приложение 3. Фонды оценочных средств

# 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПСК-1.1 — способность использовать знания фундаментальных разделов естественнонаучного и профессионального циклов для понимания физической сущности рабочих процессов энергетических установок авиационной и ракетно-космической техники
ПСК-1.2 — способность разрабатывать физические и математические модели процессов, протекающих в двигателях и энергоустановках летательных аппаратов

Формированию компетенций служит достижение следующих результатов образования:

## **ПСК-1.1**

*знания:*

на уровне представлений: основными аналитическими и численными методами решения алгебраических и дифференциальных уравнений и их систем; законы и основные физико-математические модели переноса теплоты и массы применительно к теплотехническим и теплотехнологическим установкам и системам;

на уровне воспроизведения: основные физические свойства жидкостей и газов, общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов, особенности физического и математического моделирования одномерных и трехмерных, дозвуковых и сверхзвуковых, ламинарных и турбулентных течений идеальной и реальной несжимаемой и сжимаемой жидкостей;

на уровне понимания: принципы применения современных информационных технологий в науке и предметной деятельности; основные методы теоретического и экспериментального исследования физических и химических явлений, методы поиска и обработки информации как вручную, так и с применением современных информационных технологий;

*умения:*

теоретические: использовать математический аппарат и информационные технологии при изучении естественнонаучных дисциплин;

практические: рассчитывать гидродинамические параметры потока жидкости (газа) при внешнем обтекании тел и течения в каналах (трубах), проточных частях гидро-газодинамических машин, анализировать результаты решения конкретных задач с целью построения более совершенных моделей;

*навыки:*

владение методиками проведения типовых гидро- газодинамических расчетов оборудования и трубопроводов, основами расчета процессов тепломассопереноса в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования.

## **ПСК-1.2**

*знания:*

на уровне представлений: основными аналитическими и численными методами решения алгебраических и дифференциальных уравнений и их систем; законы и основные физико-математические модели переноса теплоты и массы применительно к теплотехническим и теплотехнологическим установкам и системам;

на уровне воспроизведения: основные физические свойства жидкостей и газов, общие законы и уравнения статики, кинематики и динамики жидкостей и газов, особенности физического и математического моделирования одномерных и трехмерных, дозвуковых и сверхзвуковых, ламинарных и турбулентных течений идеальной и реальной несжимаемой и сжимаемой жидкостей;

на уровне понимания: принципы применения современных информационных технологий в науке и предметной деятельности; основные методы теоретического и экспериментального исследования физических и химических явлений, методы поиска и обработки информации как вручную, так и с применением современных информационных технологий;

*умения:*

теоретические: использовать математический аппарат и информационные технологии при изучении естественнонаучных дисциплин; строить математические модели физических явлений, химических процессов, экологических систем;

практические: рассчитывать гидродинамические параметры потока жидкости (газа) при внешнем обтекании тел и течения в каналах (трубах), проточных частях гидро- газодинамических машин, анализировать результаты решения конкретных задач с целью построения более совершенных моделей; использование современного специализированного программного обеспечения;

*навыки:*

владение методиками проведения типовых гидро- газодинамических расчетов оборудования и трубопроводов, основами расчета процессов тепломассопереноса в элементах теплотехнического и теплотехнологического оборудования.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина **ДИНАМИКА ВЯЗКИХ ЖИДКОСТИ, ГАЗА И СТРУЙ** является дисциплиной **части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1**, программы подготовки по направлению 24.03.05 *Двигатели летательных аппаратов*.

Содержание дисциплины является логическим продолжением дисциплин: **МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА, ТЕРМОДИНАМИКА**.

Содержание дисциплины является основой для освоения дисциплин: **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССОВ**.

Предварительные компетенции, сформированные у обучающегося до начала изучения дисциплины:

- ОПК-1 — Способен применять естественнонаучные и общетехнические знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности
- ОПК-5 — Способен использовать современные подходы и методы решения профессиональных задач в области авиационной и ракетно-космической техники
- ОПК-6 — Способен анализировать, систематизировать и обобщать информацию о современном состоянии и перспективах развития отрасли двигателестроения и энергетической техники

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 ч.

#### 3.1. Содержание (дидактика) дисциплины

КУРС	СЕМЕСТР	Наименование разделов и дидактических единиц	ВСЕГО	Аудиторные занятия в контактной форме			Самостоятельная работа студентов	Формируемая компетенция, %	
				ВСЕГО	Лекции	Практические занятия		ПСК-1.1	ПСК-1.2
4	7	<b>Раздел 1. Ламинарное течение.</b> Уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости. Слоистые течения вязкой жидкости. Точные решения уравнений Навье-Стокса. Нестационарные течения. Течение в окрестности критической точки. Вращательное движение жидкости.	20	10	6	4	10	20	20
4	7	<b>Раздел 2. Конвективные течения.</b> Критерии подобия. Приближение Буссинеска. Свободноконвективный пограничный слой на вертикальной стенке. Свободноконвективное течение в полости. Смешанная конвекция.	18	8	4	4	10	20	20
4	7	<b>Раздел 3. Течение газа в трубах.</b> Изотермическое движение газа в горизонтальном трубопроводе. Закон сохранения энергии в механической форме. Установившееся неизотермическое движение реального газа в горизонтальном трубопроводе. Течение вязкой жидкости в трубах с искусственной и естественной шероховатостью.	18	8	4	4	10	20	20
4	7	<b>Раздел 4. Турбулентные течения.</b> Возникновение турбулентности. Средние и пульсационные величины. Операция осреднения. Корреляционные характеристики турбулентности. Спектральный анализ турбулентных течений. Пристенная турбулентность. Проблема замыкания и основные подходы к ее решению. Модели турбулентности. Подходы и методы вычислительного моделирования турбулентных и струйных течений вязкой жидкости и газа. Струйные течения и течения в следах.	52	25	20	5	27	40	40
Всего за 7 семестр			108	51	34	17	57	100	100
Всего по дисциплине			108	51	34	17	57	100	100

#### 3.2. Аудиторный практикум

№ п/п	Номер и наименование раздела дисциплины	Тема практического занятия	Объем, ауд. часов
1	Раздел 1. Ламинарное течение.	Рассмотрение типовых задач: течения Пуазейля, течение Куэтта, течение между вращающимися цилиндрами, первая и вторая задачи Стокса	4
2	Раздел 2. Конвективные течения.	Особенности моделирования конвективных течений в современных специализированных программных средах. Разбор примеров.	4
3	Раздел 3. Течение газа в трубах.	Особенности моделирования ламинарного и турбулентного течения в трубах с помощью современных специализированных программных сред. Разбор примеров.	4
4	Раздел 4. Турбулентные течения.	Особенности моделирования турбулентного пограничного слоя с помощью современных специализированных программных сред. Разбор примеров.	5
<b>Всего за 7 семестр</b>			17

#### 3.3. Самостоятельная работа студента (СРС)

№ п/п	Номер и наименование раздела дисциплины	Содержание учебного задания	Объем, часов
1	Раздел 1. Ламинарное течение.	Выполнение практического задания №1 на тему "Ламинарное течение".	6
2		Изучение материала раздела.	4
3	Раздел 2. Конвективные течения.	Изучение материала раздела.	4
4		Выполнение практического задания №2 на тему "Моделирование конвективного течения".	6
5	Раздел 3. Течение газа в трубах.	Изучение материала раздела.	4
6		Выполнение практического задания №3 на тему	6

		"Моделирование течения газа в трубе".	
7	Раздел 4. Турбулентные течения.	Изучение материала раздела.	17
8		Выполнение практического задания №4 на тему "Моделирование турбулентного пограничного слоя".	10
Всего за 7 семестр		57	

#### 4. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

СЕМЕСТР	НЕДЕЛИ СЕМЕСТРА																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
7			Отч. по ПЗ			ДР	Отч. по ПЗ			ДР		Отч. по ПЗ			Отч. по ПЗ	ДР	

Условные обозначения:

- ДР – диагностическая работа;
- Отч. по ПЗ – отчет по практическому заданию.

**Текущий контроль успеваемости** студентов проводится в дискретные временные интервалы в следующих формах:

- диагностическая работа;
- отчет по практическому заданию.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- экзамен.

## 5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1. Основная литература по дисциплине:

1. В. Н. Емельянов. . Моделирование свободноконвективных течений в технических объектах. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2013, эл. рес.
2. И. А. Белов, С. А. Исаев. . Моделирование турбулентных течений. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2001, 16 экз.
3. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Моделирование крупных вихрей в расчётах турбулентных течений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, эл. рес.
4. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, В. А. Зазимко. . Турбулентные струи - статистические модели и моделирование крупных вихрей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013, 30 экз.
5. М. С. Яковчук. . Вычислительные технологии решения задач механики жидкости и газа. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2013, эл. рес.
6. Н. А. Брыков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Динамика вязкой жидкости. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2021, 16 экз.
7. Н. А. Брыков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Динамика вязкой жидкости. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2021, эл. рес.

### 5.2. Дополнительная литература по дисциплине:

1. А. Дж. Рейнольдс. . Турбулентные течения в инженерных приложениях. М.: Энергия, 1979, 2 экз.
2. Г. Шлихтинг. . Теория пограничного слоя. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974, 2 экз.

### 5.3. Периодические издания:

не требуются.

### 5.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины, электронные библиотечные системы:

1. <https://urait.ru/> — Образовательная платформа «Юрайт». Для вузов и ссузов.;
2. <https://e.lanbook.com/> — ЭБС Лань;
3. [http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com\\_irbis&view=irbis&Itemid=474](http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=474) — Фундаментальная библиотека БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

### Современные профессиональные базы данных:

1. <https://rusneb.ru> – Национальная электронная библиотека (НЭБ);
2. <https://cyberleninka.ru/> - Научная электронная библиотека «Киберленинка»;  
<http://www.rfbr.ru/rffi/ru/library> - Полнотекстовая электронная библиотека Российского фонда фундаментальных исследований.

### Информационные справочные системы:

1. Техэксперт – Информационный портал технического регулирования: Нормы, правила, стандарты РФ;
2. [http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com\\_irbis&view=irbis&Itemid=457](http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=457) - БД ГОСТов собственной генерации БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова;
3. <http://www.consultant.ru/>- КонсультантПлюс- информационный портал правовой информации.

### 5.5. Программное обеспечение:

1. Ansys Multiphysics 2019 Teaching Advanced;
2. Matlab 2015a SP1.

### 5.6. Информационные технологии:

взаимодействие с обучающимися посредством ЭИОС Moodle БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

## **6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **6.1. Лекционные занятия:**

специализированные требования по оборудованию отсутствуют; аудитория с посадочными местами по количеству студентов; доска.

### **6.2. Практические занятия:**

1. Ansys Multiphysics 2019 Teaching Advanced;
2. Matlab 2015a SP1.

### **6.3. Прочее:**

1. рабочее место преподавателя, оснащенное компьютером с доступом в Интернет;
2. рабочие места студентов, оснащенные компьютерами с доступом в Интернет, предназначенные для работы в электронной образовательной среде.

### Аннотация рабочей программы

Дисциплина **ДИНАМИКА ВЯЗКИХ ЖИДКОСТИ, ГАЗА И СТРУЙ** является дисциплиной **части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1**, программы подготовки по направлению 24.03.05 *Двигатели летательных аппаратов*. Дисциплина реализуется на факультете А Ракетно-космической техники БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова кафедрой А9 ПЛАЗМОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА.

Дисциплина нацелена на формирование компетенций:

ПСК-1.1 способность использовать знания фундаментальных разделов естественнонаучного и профессионального циклов для понимания физической сущности рабочих процессов энергетических установок авиационной и ракетно-космической техники;

ПСК-1.2 способность разрабатывать физические и математические модели процессов, протекающих в двигателях и энергоустановках летательных аппаратов.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с математическим описанием вязких эффектов при течении жидкости и газа. Дисциплина направлена на выработку навыков, необходимых для исследовательской деятельности в области создания новой техники и интенсификации рабочих процессов в изделиях высоких технологий, а также для проведения исследований процессов и оптимизации их характеристик в энергетических установках различных типов, для активного владения методами расчетного моделирования турбулентного течения и тепломассопереноса.

Программой дисциплины предусмотрены следующие **виды контроля**:

**Текущий контроль успеваемости** студентов проводится в дискретные временные интервалы в следующих формах:

- диагностическая работа;
- отчет по практическому заданию.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- экзамен.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 3 з.е., **108 ч**. Программой дисциплины предусмотрены лекционные занятия (**34 ч.**), практические занятия (**17 ч.**), самостоятельная работа студента (**57 ч.**).

## ТЕХНОЛОГИИ И ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

### Рекомендации по освоению дисциплины для студента

Трудоемкость освоения дисциплины составляет 108 ч., из них 51 ч. аудиторных занятий, и 57 ч., отведенных на самостоятельную работу студента.

Рекомендации по распределению учебного времени по видам самостоятельной работы и разделам дисциплины приведены в таблице.

Контроль освоения дисциплины производится в соответствии с Положением о текущем, рубежном контроле успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся.

Формы контроля и критерии оценивания приведены в приложении 3 к Рабочей программе.

Наименование работы	Рекомендуемая литература	Трудоемкость, час.
Раздел 1. Ламинарное течение.		
Выполнение практического задания №1 на тему "Ламинарное течение".	Г. Шлихтинг. . Теория пограничного слоя: М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974 (7-15) Н. А. Брыков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Динамика вязкой жидкости: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2021 (1-4) Н. А. Брыков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Динамика вязкой жидкости: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2021 (1-4)	6
Изучение материала раздела.	Динамика вязкой жидкости: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2021 (1-4)	4
Итого по разделу 1		10
Раздел 2. Конвективные течения.		
Изучение материала раздела.	В. Н. Емельянов. . Моделирование свободноконвективных течений в технических объектах: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2013 (1)	4
Выполнение практического задания №2 на тему "Моделирование конвективного течения".		6
Итого по разделу 2		10
Раздел 3. Течение газа в трубах.		
Изучение материала раздела.	А. Дж. Рейнольдс. . Турбулентные течения в инженерных приложениях: М.: Энергия, 1979 (4) Г. Шлихтинг. . Теория пограничного слоя: М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974 (20)	4
Выполнение практического задания №3 на тему "Моделирование течения газа в трубе".		6
Итого по разделу 3		10
Раздел 4. Турбулентные течения.		
Изучение материала раздела.	И. А. Белов, С. А. Исаев. . Моделирование турбулентных течений: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2001 (1-9) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Моделирование крупных вихрей в расчётах турбулентных течений: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008 (1-5) М. С. Яковчук. . Вычислительные технологии решения задач механики жидкости и газа: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2013 (8) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, В. А. Зазимко. . Турбулентные струи - статистические модели и моделирование крупных вихрей: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013 (1-3)	17
Выполнение практического задания №4 на тему "Моделирование турбулентного пограничного слоя".		10
Итого по разделу 4		27

## ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств, позволяющие оценить результаты обучения по данной дисциплине, включают в себя:

- диагностическая работа
- отчет по практическому заданию;
- экзамен.

### Критерии оценивания

#### Диагностическая работа

Диагностическая работа проводится в форме теста в ЭИОС Moodle:

- при правильном ответе менее чем на 60% вопросов - не аттестация;
- при правильном ответе на 60% вопросов и более - аттестация.

#### Отчет по практическому заданию

Отчет по практическому заданию (ПЗ)

Отчет по ПЗ представляется в печатном виде в формате, предусмотренном шаблоном отчета по ПЗ.

Отчет по ПЗ должен содержать:

- постановку задачи, математическую модель и основные расчетные соотношения используемых методов решения;
- схему расчетной области с характеристиками сетки, краевыми и начальными условиями, реализованными в решаемом варианте;
- графическое представление полученных результатов;
- содержание исследовательского задания, результаты вычислительного моделирования, анализ и выводы по проведенным исследованиям.

#### Защита ПЗ

Защита ПЗ проходит в форме доклада студента по выполненной работе и ответов на вопросы преподавателя. Процедура защиты включает ответы на вопросы преподавателя по работе и разделу курса. В ходе защиты ПЗ обучающиеся должны продемонстрировать знания, умения и навыки:

- культуру речи при изложении своих мыслей, логичность в постановке и изложении материала,
- понимание постановки задачи, знание основных элементов математической модели, формулировка начальных и граничных условий, обоснование основных упрощающих положений;
- умение определить место исследованного явления в конкретных технических процессах и устройствах;
- умение анализировать полученные результаты и умение прогнозировать характер процессов в технических устройствах на основании полученных данных;
- умение самостоятельно модифицировать математические модели и программные средства для целей конкретизации или расширения области приложения моделей, использованных в работе.

Оценка защиты работы выставляется по 100 бальной шкале с учётом:

- выполнение ПЗ – 40 баллов,
- оформление пояснительной записки – 20 баллов,
- защита результатов, ответы на вопросы и их логика, культура речи – 40 баллов.

ПЗ считается принятой при наборе более 80 баллов.

Перечень практических заданий:

- Практического задания №1 на тему "Ламинарное течение".
- Практического задания №2 на тему "Моделирование конвективного течения".
- Практического задания №3 на тему "Моделирование течения газа в трубе".
- Практического задания №4 на тему "Моделирование турбулентного пограничного слоя".

Примеры выполненных практических заданий приведены в УМК дисциплины.

#### Экзамен

Экзамен, включает в себя два контрольных вопроса по выбору преподавателя из списка вопросов для собеседования по разделам дисциплины.

Для получения оценок за экзамен «хорошо» или «отлично» требуется выполнение всех контрольных мероприятий по дисциплине, предусмотренных рабочей программой.

Знания, умения и навыки студентов определяются следующим образом:

Оценки «отлично» заслуживает студент, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоивший основную и знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой. Как правило, оценка «отлично» выставляется студентам, усвоившим взаимосвязь основных понятий дисциплины в их значении для приобретаемой профессии, проявившим творческие способности в понимании, изложении и использовании учебного материала.

Оценки «хорошо» заслуживает студент, обнаруживший полное знание учебного материала, успешно выполняющий предусмотренные в программе задания, усвоивший основную литературу, рекомендованную в программе. Как правило, оценка «хорошо» выставляется студентам, показавшим систематический характер знаний по дисциплине и способным к их самостоятельному пополнению и обновлению в ходе дальнейшей учебной работы и профессиональной деятельности.

Оценки «удовлетворительно» заслуживает студент, обнаруживший знания основного учебного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по специальности, справляющийся с выполнением заданий, предусмотренных программой, знакомый с основной литературой, рекомендованной программой. Как правило, оценка «удовлетворительно» выставляется студентам, допустившим погрешности в ответе на экзамене и при выполнении экзаменационных заданий, но обладающим необходимыми знаниями для их устранения под руководством преподавателя.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, обнаружившему пробелы в знаниях основного учебного материала, допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение или приступить к профессиональной деятельности по окончании вуза без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

Перечень экзаменационных вопросов представлен в УМК дисциплины.

Паспорт фонда оценочных средств

КУРС	СЕМЕСТР	Наименование разделов и дидактических единиц	ВСЕГО	Аудиторные занятия в контактной форме			Самостоятельная работа студентов	Формируемая компетенция, %		НАИМЕНОВАНИЕ ОЦЕНОЧНОГО СРЕДСТВА
				ВСЕГО	Лекции	Практические занятия		ПСК-1.1	ПСК-1.2	
4	7	Раздел 1. Ламинарное течение.	20	10	6	4	10	20	20	Отчет по практическому заданию
4	7	Раздел 2. Конвективные течения.	18	8	4	4	10	20	20	Отчет по практическому заданию
4	7	Раздел 3. Течение газа в трубах.	18	8	4	4	10	20	20	Отчет по практическому заданию
4	7	Раздел 4. Турбулентные течения.	52	25	20	5	27	40	40	Отчет по практическому заданию
Всего за 7 семестр			108	51	34	17	57	100	100	
Всего по дисциплине			108	51	34	17	57	100	100	

## Критерии оценивания

### ПСК-1.1

*Вопросы открытого типа:*

- № 1 В моделях турбулентности k-epsilon и k-omega величины  $k$ ,  $\epsilon$  и  $\omega$  означают
- № 2 Верно ли утверждение, что при течении газа в трубе относительная шероховатость не влияет на критическое число Рейнольдса
- № 3 Как известно начиная с некоторого малого размера турбулентные вихри под воздействием вязкости диссипируют в тепло. Характерный размер минимальных вихрей определяется колмогоровским масштабом, который является наименьшим масштабом в турбулентном потоке.

Напишите формулу для расчета пространственного колмогоровского масштаба, используя обозначения:

$\epsilon$  - средняя скорость рассеивания кинетической энергии турбулентности,

$\nu$  - кинематическая вязкость жидкости.

- № 4 Как называется вязкая жидкость, тензор напряжений которой есть линейная функция тензора скоростей деформации
- № 5 Верно ли утверждение, что на границе струи, истекающей в неподвижную однородную среду, давление равно внешнему давлению этой среды?
- № 6 Верно ли утверждение, что на МКС (международная космическая станция) есть естественная конвекция.
- № 7 Рассматривается течение Куэтта (верхняя стенка имеет скорость  $u$  и температуру  $T_1$ , нижняя стенка неподвижна и имеет температуру  $T_2$ , причём  $T_2 > T_1$ . Как будет выглядеть температурный профиль?
- № 8 Критериальное число характеризующее отношение кинетической энергии потока к энтальпии называется
- № 9 Критериальное число характеризующее отношение времени пребывания жидкой частицы в рассматриваемой области течения к характерному времени нестационарного процесса называется
- № 10 Верно ли утверждение, что силы вязкого трения при турбулентном и ламинарном течениях равны

*Вопросы закрытого типа:*

- № 1 Рассмотрим течение вблизи колеблющейся плоской стенки. Слой жидкости, приводимый стенкой в колебательное движение, имеет некоторую толщину  $h$ . Как будет меняться величина  $h$  при уменьшении вязкости?

- Увеличиваться

- Уменьшаться

- Не будет изменяться

- Зависит от частоты колебания пластины

- № 2 Число Рейнольдса ( $Re$ ) определяется соотношением:

$$\frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu}, \text{ где } \rho - \text{плотность среды, } u - \text{скорость, } d - \text{характерный размер, } \mu -$$

динамическая вязкость среды

$$\frac{\nu}{\alpha}, \text{ где } \nu - \text{кинематическая вязкость среды, } \alpha - \text{коэффициент}$$

теплопроводности

$$\frac{u^2}{c_p \cdot \Delta T}, \text{ где } u - \text{скорость, } c_p - \text{удельная теплоёмкость при постоянном давлении,}$$

$\Delta T$  - разность температур

$$\frac{k \cdot l}{\lambda}, \text{ где } k - \text{коэффициент теплоотдачи, } l - \text{характерный размер, } \lambda - \text{коэффициент}$$

теплопроводности среды

№ 3 Какой пограничный слой соответствует большему сопротивлению трения

- ламинарный
- турбулентный
- не зависит от типа пограничного слоя
- зависит от характеристик течения

№ 4 Дивергенция  $F$  в цилиндрической системе координат запишется как

$$\operatorname{div}(F) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial F_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2}$$

$$\operatorname{div}(F) = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

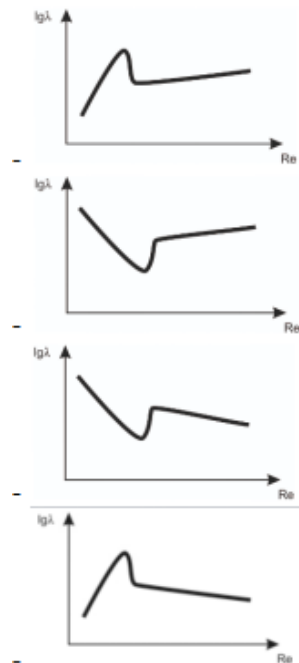
$$\operatorname{div}(F) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r F_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial F_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

$$\operatorname{div}(F) = \frac{\partial F_r}{\partial r} \cdot \bar{q}_r^0 + \frac{1}{r} \frac{\partial F_\varphi}{\partial \varphi} \cdot \bar{q}_\varphi^0 + \frac{\partial F_z}{\partial z} \cdot \bar{q}_z^0$$

№ 5 Чтобы организовать непрерывное ускорение потока в канале нужно

- произвести изменение геометрии канала: в дозвуковой части канала организовать сужающие стенки, а в сверхзвуковой - расширяющие, при этом в критическом сечении реализуется звуковое течение.
- произвести изменение нагрева потока: в дозвуковой части канала организовать интенсивный подогрев потока, а в сверхзвуковой - интенсивный отбор тепла от потока, при этом в критическом сечении реализуется звуковое течение.
- произвести изменение подвода массы в поток: в дозвуковой части канала организовать дополнительный подвод массы газа к потоку, а в сверхзвуковой - отвод массы газа от потока, при этом в критическом сечении реализуется звуковое течение.
- организовать непрерывное ускорение потока в канале невозможно

№ 6 На каком рисунке правильно представлена зависимость безразмерного коэффициента трения от числа  $Re$  для течения в гладких трубах?



№ 7 Для описания турбулентного движения Рейнольдс предположил, что

- существующие в потоке мгновенные проекции скорости и давления необходимо заменить пульсационными значениями
- существующие в потоке мгновенные проекции скорости и давления можно представить как сумму их осредненных и пульсационных значений
- для описания турбулентных пульсаций скорости и давления необходимо осреднение вязких сил
- большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, а эффекты более мелких вихрей моделируются с использованием правил подсеточного замыкания

№ 8 Турбулентность можно определить как совокупность разномасштабных вихрей. Это означает, что турбулентное движение несжимаемой жидкости может быть представлено в виде суперпозиции различных вихрей. В таких структурах существует так называемый каскадный перенос энергии, который можно определить как:

- Происходит передача энергии от более мелких вихрей к более крупным. Наиболее мелкие вихри получают энергию от осредненного течения, передают энергию все более крупным, которые диссипируют в тепло
- Происходит передача энергии от более крупных вихрей к более мелким. Наиболее крупные вихри получают энергию от осредненного течения, передают энергию все более мелким, которые диссипируют в тепло
- Происходит передача энергии от более мелких и крупных вихрей к средним. Наиболее мелкие и крупные вихри получают энергию от осредненного течения, передают энергию средним, которые диссипируют в тепло
- Происходит передача энергии от средних вихрей к более мелким и крупным. Средние вихри получают энергию от осредненного течения. Наиболее мелкие и крупные вихри диссипируют в тепло

№ 9 Какая из моделей турбулентности более достоверно описывает течение вблизи стенок?

- k-epsilon
- k-omega
- одинаково
- ни одна не применима для описания данного течения

№ 10 Представленная система уравнений соответствует приближению Буссинеска для задачи

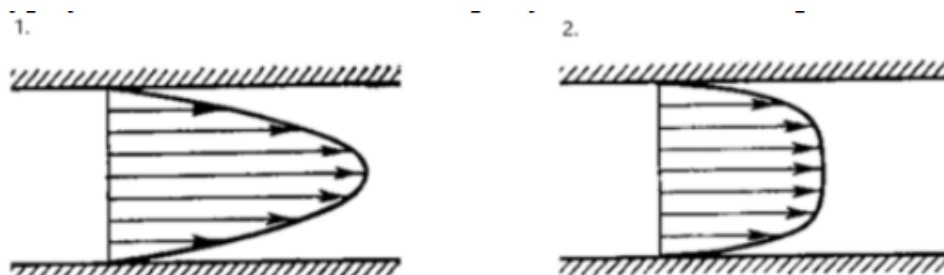
свободной конвекции. Какой член в уравнениях данной системы отвечает за возникновение естественно конвективного течения?

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= \underbrace{-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}}_1 + \underbrace{\nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)}_2 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= \underbrace{-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}}_3 + \underbrace{\nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)}_4 - \underbrace{\beta g (T - T_0)}_5 \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} &= \underbrace{a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)}_6 + \underbrace{\frac{q_v}{\rho c}}_7 \end{aligned}$$

## ПСК-1.2

Вопросы открытого типа:

- № 1 Тонкий слой жидкости, в котором существенно проявляется влияние вязкости  
 № 2 Верно ли утверждение, что жидкость, в которой отсутствует внутреннее трение называется идеальной жидкостью  
 № 3 Верно ли утверждение, что на рисунке 1. изображен профиль скорости турбулентного течения, а на рисунке 2. - ламинарного течения?



- № 4 Верно ли утверждение, что при байпасном ламинарно-турбулентном переходе, связанным с высокой степенью турбулентности внешнего потока, отсутствует участок линейной неустойчивости, на котором развиваются волны Толлмина-Шлихтинга  
 № 5 Верно ли утверждение, что гипотеза Буссинеска для моделей турбулентности утверждает пропорциональность девиаторной части тензора турбулентных напряжений тензору скоростей деформаций?  
 № 6 Верно ли утверждение, что при течении газа в трубе переходный режим почти не зависит от относительной шероховатости  
 № 7 Верно ли утверждение, что при течении газа в трубе, чем меньше относительная шероховатость, тем в большем диапазоне чисел Рейнольдса наблюдается обычное турбулентное движение, соответствующее гладким трубам  
 № 8 Рассматривается течение Куэтта в канале, где верхняя стенка имеет температуру  $T_1$ , а нижняя стенка теплоизолирована. Нарисуйте распределение температуры?  
 № 9 Верно ли утверждение, что ламинарный пограничный слой соответствует большему сопротивлению трения, чем турбулентный?  
 № 10 Нарисуйте зависимость относительной шероховатости от числа Рейнольдса для случая течения газа в в гладкой трубе.

Вопросы закрытого типа:

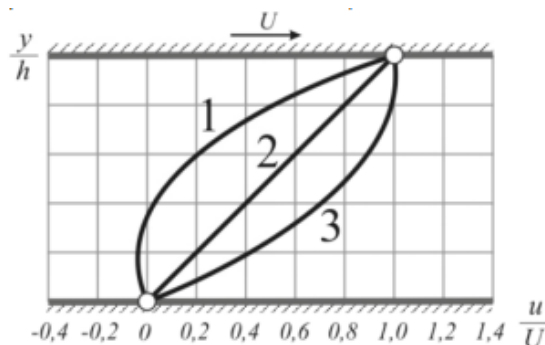
- № 1 Пограничный слой в идеальной жидкости:  
 - всегда ламинарный  
 - всегда турбулентный  
 - ламинарный, переходный или турбулентный в зависимости от числа  $Re$   
 - отсутствует  
 № 2 Представлено одно из уравнений стационарного ламинарного пограничного слоя.

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Что оно характеризует?

- Уравнение неразрывности
- Уравнение изменения количества движения
- Уравнение сохранения энергии
- Уравнение состояния

№ 3 На рисунке отображены распределения скорости вязкой несжимаемой жидкости между двумя параллельными пластинами, одна из которых покоится, а другая движется в своей плоскости с постоянной скоростью  $U$ . Какое из распределений скорости отражает простое течение Куэтта (течением чистого сдвига)?



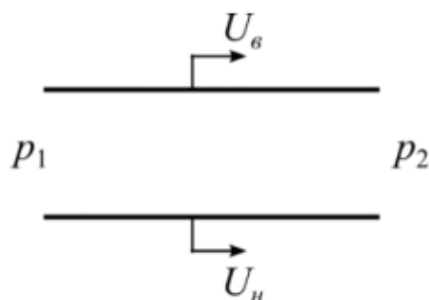
- 1
- 2
- 3

- нет правильного ответа

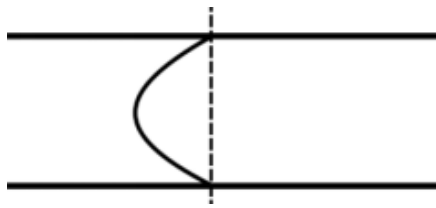
№ 4 Рассматривается течение газа в трубе. Какое из утверждений является правильным?

- Относительная шероховатость не влияет на критическое число Рейнольдса
- Переходный режим также почти не зависит от относительной шероховатости
- Чем меньше относительная шероховатость, тем в большем диапазоне чисел Рейнольдса наблюдается обычное турбулентное движение, соответствующее гладким трубам
- При больших числах  $Re$ , (тем больше, чем меньше относительная шероховатость) коэффициент сопротивления перестает зависеть от числа Рейнольдса и определяется только относительной шероховатостью. При этом значения коэффициента растут вместе с относительной шероховатостью

№ 5 Рассматривается течение между плоскими пластинами



При каких параметрах будет следующий профиль скорости:



-  $p_2 > p_1$ ,  $U_v = 1$ ,  $U_n = 0$

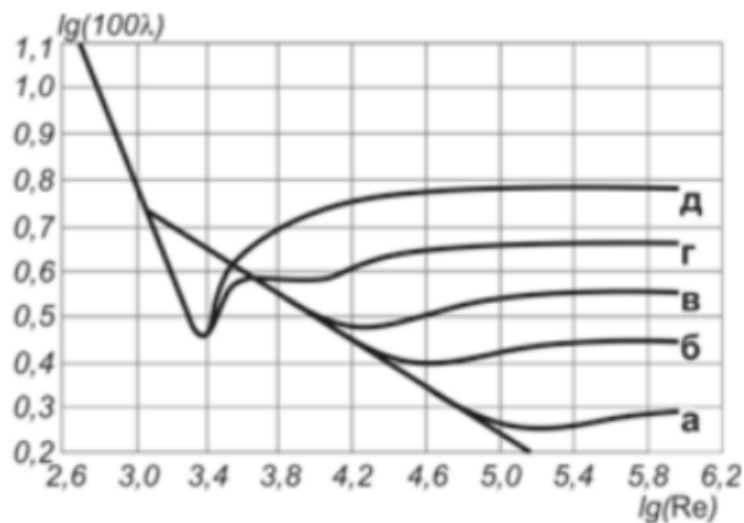
-  $p_2 > p_1$ ,  $U_v = U_n = 0$

-  $p_1 > p_2$ ,  $U_v = U_n = 0$

-  $p_1 > p_2$ ,  $U_v = -1$ ,  $U_n = 1$

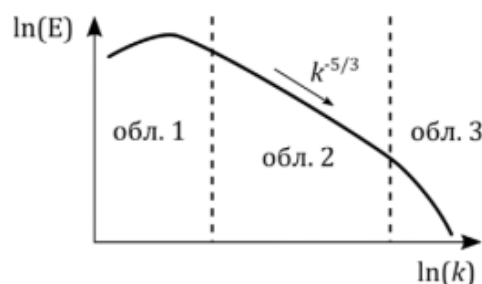
№ 6

На графике отображена зависимость относительной шероховатости от числа Рейнольдса. Какой из перечисленных кривых имеет максимальную относительную шероховатость



№ 7

На рисунке представлены области энергетического спектра турбулентности при высоких значениях числа Рейнольдса.



К какой области относится данное утверждение: область соответствует крупномасштабным "энергонесущим" турбулентным вихрям с размерами порядка интегрального линейного масштаба рассматриваемого течения  $L$ , черпающим энергию из осредненного течения.

- Область 1

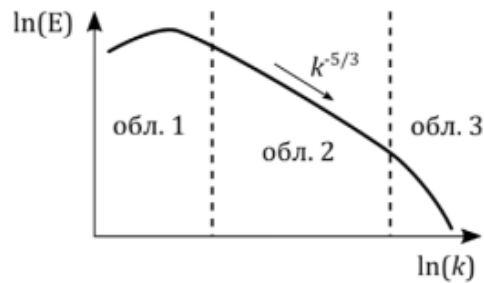
- Область 2

- Область 3

- Ко всем областям

№ 8

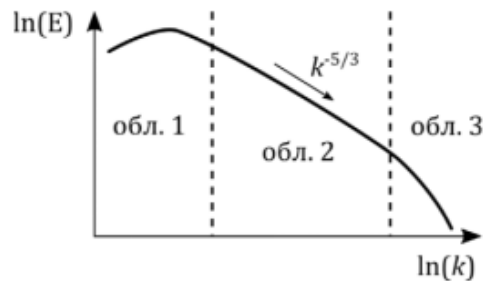
На рисунке представлены области энергетического спектра турбулентности при высоких значениях числа Рейнольдса.



К какой области относится данное утверждение: в данной области влияние молекулярной вязкости не проявляется, и энергия турбулентности не генерируется и не диссипирует, а лишь передается от более крупных вихрей к менее крупным вихрям.

- Область 1
- Область 2
- Область 3
- Ко всем областям

№ 9 На рисунке представлены области энергетического спектра турбулентности при высоких значениях числа Рейнольдса.



К какой области относится данное утверждение: в области доминируют мелкие вихри с размерами соизмеримыми с колмогоровским масштабом. Вязкая диссипация таких вихрей переводит кинетическую энергию турбулентности в тепло.

- Область 1
- Область 2
- Область 3
- Ко всем областям

№ 10 Какой пограничный слой соответствует большему сопротивлению трения

- ламинарный
- турбулентный
- не зависит от типа пограничного слоя
- зависит от характеристик течения