

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета

\_\_\_\_\_ Левихин А.А.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ ВНУТРЕННЯЯ ГАЗОДИНАМИКА ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Направление/специальность подготовки	24.04.05 Двигатели летательных аппаратов
Специализация/профиль/программа подготовки	Авиационная и ракетно-космическая теплотехника
Уровень высшего образования	Магистратура
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	
5	10	4	144	68	34	0	34	76	36	0	40	ЭКЗ.

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

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

24.04.05 Двигатели летательных аппаратов

год набора группы: 2025

Программу составил:

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

\_\_\_\_\_

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  
ВНУТРЕННЯЯ ГАЗОДИНАМИКА ЭНЕРГОУСТАНОВОК**

**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:

ОПК-2 — Способен использовать современные информационные технологии при выполнении научных исследований и разработок; использовать стандартные пакеты прикладных программ; способен к алгоритмизации процесса вычислений при проведении исследований; организовывать и соблюдать требования информационной безопасности в профессиональной деятельности

ПК-2.1 — Способен проводить работы по экспериментальным исследованиям и/или вычислительному моделированию теплообмена изделий авиационной и ракетно-космической техники, анализировать и обобщать результаты

Формированию компетенций служит достижение следующих результатов образования:

### **ОПК-2**

*знания:*

на уровне представлений: базовые теоретические знания в области физических процессов, характерных для задач внутренней газодинамики энергоустановок; методики расчета газодинамических и технологических процессов внутренней газодинамики двигателей;

на уровне воспроизведения: основные физические свойства газодинамических процессов; особенности течений с нестационарным подводом энергии; особенности тепловой защиты энергоустановок;

на уровне понимания: принципы применения современных информационных технологий в науке и предметной деятельности;

*умения:*

теоретические: использовать математический аппарат и информационные технологии при исследовании задач внутрикамерной газовой динамики;

практические: выбирать информационные технологии, в том числе современные средства компьютерной графики, для исследования газодинамических процессов в энергоустановках;

*навыки:*

владение общими подходами к физико-математическому моделированию газовых течений в энергоустановках; владение методиками проведения типовых расчетов газодинамики и теплообмена.

### **ПК-2.1**

*знания:*

на уровне представлений: методики расчета газодинамических и технологических процессов внутренней газодинамики двигателей;

на уровне воспроизведения: основные физические свойства газодинамических процессов; особенности течения в каналах со вдувом; особенности течений с нестационарным подводом энергии; особенности тепловой защиты энергоустановок;

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

*умения:*

теоретические: применять указанные выше законы для формирования математических моделей расчёта внутренних течений в энергоустановках; использовать математический аппарат и информационные технологии при исследовании задач внутрикамерной газовой динамики;

практические: применять разнообразные методы физико-математического анализа, позволяющие оценить характер течений, определить газодинамические характеристики и параметры теплообмена;

*навыки:*

владение общими подходами к физико-математическому моделированию газовых течений в энергоустановках; владение основными способами и приемами обработки результатов анализа многокомпонентных смесей.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина **ВНУТРЕННЯЯ ГАЗОДИНАМИКА ЭНЕРГОУСТАНОВОК** является дисциплиной **обязательной части блока 1** программы подготовки по направлению *24.04.05 Двигатели летательных аппаратов*.

Содержание дисциплины является логическим продолжением дисциплин: **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ**.

Содержание дисциплины является основой для освоения дисциплин: **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МЕХАНИКИ**.

Предварительные компетенции, сформированные у обучающегося до начала изучения дисциплины:

- ОПК-4 — Способен использовать основные положения, законы и методы естественных наук и математики, разработки физических и математических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов для постановки и решения научно-технических задач по направлению подготовки

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 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		ОПК-2	ПК-2.1
5	10	<b>Раздел 1. Особенности внутренней газодинамики реактивных двигателей на химической энергии.</b> Жидкостные ракетные двигатели. Основные узлы и агрегаты. Форсунки и распыл жидкостного ракетного топлива. Охлаждение двигателя. Твердотопливные ракетные двигатели. Нестационарные режимы течения. Изменение объема камеры сгорания. Воздушно-реактивные двигатели. Конструирование воздухозаборных устройств. Режимы горения. Комбинированные установки. Особенности конструкции. Детонационные двигатели. Особенности функционирования. Процессы в детонационной волне.	13	7	7	0	6	20	20
5	10	<b>Раздел 2. Модели и методы решения задач внутрикамерной газодинамики.</b> Построение физико-математической модели. Особенности внутренних течений. Моделирование газодинамических и тепловых процессов. Моделирование турбулентных течений.	26	16	6	10	10	15	15
5	10	<b>Раздел 3. Течения в каналах со вдувом.</b> Основные подходы. Течение в плоском и осесимметричном канале, течение в канале с несимметричным вдувом, течение в кольцевом канале, течение во вращающемся канале, течение в канале с нестационарным вдувом. Влияние турбулентности на характеристики течения в канале. Химически реагирующие течения.	34	23	9	14	11	15	15
5	10	<b>Раздел 4. Двухфазные течения.</b> Движение частиц в канале со вдувом. Влияние массовых сил на движение частицы. Влияние дисперсной фазы на характеристики частиц в канале. Течение с химическими реакциями и горением частиц.	25	16	8	8	9	15	15
5	10	<b>Раздел 5. Газодинамика проточных трактов и сопловых каналов.</b> Модели и методы решения задач сопловой газовой динамики. Механизмы управления вектором тяги. Запуск сопла. Нестационарные течения с подводом энергии.	10	6	4	2	4	10	10
5	10	<b>Раздел 6. Курсовой проект.</b> Написание курсового проекта по индивидуальному заданию.	36	0	0	0	36	25	25
Всего за 10 семестр			144	68	34	34	76	100	100
Всего по дисциплине			144	68	34	34	76	100	100

#### 3.2. Аудиторный практикум

№ п/п	Номер и наименование раздела дисциплины	Тема практического занятия	Объем, ауд. часов
1	Раздел 2. Модели и методы решения задач внутрикамерной газодинамики.	Исследование методов моделирования течений характерных для задач внутренней газодинамики.	10
2	Раздел 3. Течения в каналах со вдувом.	Исследование методов моделирования двумерных течений в каналах со вдувом. Исследование особенностей моделирования трехмерных течений в каналах со вдувом.	14
3	Раздел 4. Двухфазные течения.	Исследование методов моделирования двухфазных течений в энергоустановках. Моделирование течений с химическими реакциями и горением частиц.	8
4	Раздел 5. Газодинамика проточных трактов и сопловых каналов.	Моделирование сопловых течений.	2
Всего за 10 семестр			34

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

№ п/п	Номер и наименование раздела дисциплины	Содержание учебного задания	Объем, часов
1	Раздел 1. Особенности внутренней газодинамики реактивных двигателей на химической энергии.	Изучение материала раздела.	6
2	Раздел 2. Модели и методы решения задач внутрикамерной газодинамики.	Изучение материала раздела.	1
3		Выполнение практического задания № 1 "Моделирование процессов внутренней газодинамики".	9
4		Изучение материала раздела.	2
5	Раздел 3. Течения в каналах со вдувом.	Выполнение практического задания № 2 "Моделирование течения в канале со вдувом".	9
6		Изучение материала раздела.	2
7	Раздел 4. Двухфазные течения.	Выполнение практического задания № 3 "Моделирование движения частиц в потоке".	7
8		Изучение материала раздела.	4
9	Раздел 6. Курсовой проект.	Выполнение курсового проекта по индивидуальному заданию. Анализ процессов и формирование математических моделей. Проведение вычислительного моделирования. Анализ результатов. Подготовка пояснительной записки, доклада и презентации.	36
Всего за 10 семестр			76

#### 3.4. Курсовой проект

СОДЕРЖАНИЕ ЭТАПА	ПЕРИОД ИСПОЛНЕНИЯ (недели семестра)	ПЛАНИРУЕМОЕ ВРЕМЯ (час)
Этап 1. Обсуждение с руководителем содержания работы. Определение целей и постановка задач работы. Разработка плана работы над проектом.	1 - 2	6
Этап 2. Анализ литературы по тематике курсового проекта. Анализ протекающих процессов и формирование математических моделей.	3 - 8	11
Этап 3. Проведение вычислительного моделирования. Анализ результатов численного	9 - 16	14

моделирования.		
Этап 4. Подготовка пояснительной записки, доклада и презентации.	17 - 17	5
<b>Всего за 10 семестр</b>		36

#### 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
10					Отч. по ПЗ	ДР		Отч. по ПЗ		ДР		Отч. по ПЗ	КВ		Отч. по ПЗ	ДР	

Условные обозначения:

- ДР – диагностическая работа;
- Отч. по ПЗ – отчет по практическому заданию;
- КВ – контрольные вопросы;
- КП – курсовой проект.

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

- диагностическая работа;
- отчет по практическому заданию;
- контрольные вопросы;
- курсовой проект.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- экзамен.

## 5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1. Основная литература по дисциплине:

1. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011, 60 экз.
2. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Течения газа с частицами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 9 экз.
3. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010, 6 экз.
4. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012, 63 экз.
5. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017, 50 экз.
6. М. С. Яковчук. . Вычислительные технологии решения задач механики жидкости и газа. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2013, эл. рес.

### 5.2. Дополнительная литература по дисциплине:

не требуется.

### 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/> — Главная – 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. Проектор;
2. Ansys Multiphysics 2019 Teaching Advanced;
3. 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 **ВНУТРЕННЯЯ ГАЗОДИНАМИКА ЭНЕРГОУСТАНОВОК** является дисциплиной **обязательной части блока 1** программы подготовки по направлению *24.04.05 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*:

ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии при выполнении научных исследований и разработок; использовать стандартные пакеты прикладных программ; способен к алгоритмизации процесса вычислений при проведении исследований; организовывать и соблюдать требования информационной безопасности в профессиональной деятельности;

ПК-2.1 Способен проводить работы по экспериментальным исследованиям и/или вычислительному моделированию теплообмена изделий авиационной и ракетно-космической техники, анализировать и обобщать результаты.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с исследованием процессов и оптимизации характеристик в энергетических установках различных типов. Содержание дисциплины ориентировано на выработку навыков, необходимых для исследовательской и проектно-конструкторской деятельности специалиста в области создания новой техники и интенсификации рабочих процессов в изделиях высокой технологии, а также для активного владения методами расчетного моделирования внутренней газодинамики и теплообмена в энергоустановках.

Программой дисциплины предусмотрены следующие **виды контроля**:

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

- диагностическая работа;
- отчет по практическому заданию;
- контрольные вопросы;
- курсовой проект.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- экзамен.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет **4 з.е., 144 ч.** Программой дисциплины предусмотрены лекционные занятия (**34 ч.**), практические занятия (**34 ч.**), самостоятельная работа студента (**76 ч.**).

## ТЕХНОЛОГИИ И ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

### Рекомендации по освоению дисциплины для студента

Трудоемкость освоения дисциплины составляет 144 ч., из них 68 ч. аудиторных занятий, и 76 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.
<b>Раздел 1. Особенности внутренней газодинамики реактивных двигателей на химической энергии.</b>		
Изучение материала раздела.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017 (1 - 4)	6
Итого по разделу 1		6
<b>Раздел 2. Модели и методы решения задач внутрикамерной газодинамики.</b>		
Изучение материала раздела.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017 (1)	1
Выполнение практического задания № 1 "Моделирование процессов внутренней газодинамики".	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011 (Введение, 1)	9
Итого по разделу 2		10
<b>Раздел 3. Течения в каналах со вдувом.</b>		
Изучение материала раздела.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017 (3)	2
Выполнение практического задания № 2 "Моделирование течения в канале со вдувом".	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011 (2)	9
Итого по разделу 3		11
<b>Раздел 4. Двухфазные течения.</b>		
Изучение материала раздела.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Течения газа с частицами: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008 (1 - 3)	2
Выполнение практического задания № 3 "Моделирование движения частиц в потоке".	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011 (4)	7
Итого по разделу 4		9
<b>Раздел 5. Газодинамика проточных трактов и сопловых каналов.</b>		
Изучение материала раздела.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017 (2 - 4)	4
Итого по разделу 5		4
<b>Раздел 6. Курсовой проект.</b>		
Выполнение курсового проекта по индивидуальному заданию. Анализ процессов и формирование математических моделей. Проведение вычислительного моделирования. Анализ результатов. Подготовка пояснительной записки, доклада и презентации.	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Течения газа с частицами: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008 (Все главы) М. С. Яковчук. . Вычислительные технологии решения задач механики жидкости и газа: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2013 (Все главы) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011 (Все главы) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010 (Все главы) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012 (Все главы) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017 (Все главы)	36

Итого по разделу 6	36
--------------------	----

## ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

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

- диагностическая работа
- контрольные вопросы;
- отчет по практическому заданию;
- курсовой проект;
- 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.

#### Контрольные вопросы

Ответы на контрольные вопросы по определенным разделам дисциплины осуществляются в устной форме. Студенту задаются 3 вопроса в рамках изучаемого раздела, для успешной аттестации необходимо правильно ответить на 2 и выше вопросов. Ответ на вопрос должен быть правильным, содержательным, аргументированным.

Список контрольных вопросов.

1. Моделирование газодинамических процессов: размерность модели; уровень физической сложности.
2. Особенности внутренних течений в каналах со вдувом.
3. Особенности внутренних течений в условиях действия массовых сил.
4. Особенности течений в предсопловом и сопловом объемах.
5. Модель вихревого течения невязкой жидкости.
6. Течение в плоском и осесимметричном канале.
7. Кинематические и интегральные характеристики течения.
8. Течение в кольцевом канале.
9. Теплообмен в канале с проницаемыми стенками.
10. Модель слоистой гидравлики.
11. Подходы к описанию трехмерных течений.
12. Описание течений в переменных скорость-вихрь скорости.
13. Моделирование крупных вихрей турбулентного течения в канале со вдувом.
14. Основные уравнения движения частицы в канале со вдувом.
15. Влияние массовых сил на движение частицы в потоке.
16. Течения с химическими реакциями.
17. Влияние дисперсной фазы на характеристики турбулентности.

#### Отчет по практическому заданию

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 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 по результатам 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.

#### Курсовой проект

Курсовой проект представляется в печатном виде в формате, соответствующим «Положению по содержанию, оформлению, организации выполнения и защиты курсовых проектов и курсовых работ БГТУ. СМК-П-4.2-12» от 24 ноября 2015 г. Защита курсового проекта проходит в форме доклада студента по выполненной работе и ответов на вопросы членов комиссии. В ходе защиты КП обучающиеся должны продемонстрировать культуру речи при изложении своих мыслей, логичность в постановке и изложении материала, необходимые начальные знания по существу обсуждаемой темы.

В случае, если оформление курсового проекта и поведение студента во время защиты соответствуют указанным требованиям, студент получает оценку:

- оценка «отлично» выставляется, при правильном выполнении курсового проекта, правильных ответов студента на вопросы преподавателя от 90 до 100%;
- оценка «хорошо» выставляется, при незначительных ошибках в содержании курсового проекта, правильных ответов студента на вопросы преподавателя от 75 до 90%;
- оценка «удовлетворительно» выставляется, при незначительных ошибках в содержании курсового проекта, правильных ответов

студента на вопросы преподавателя от 50 до 75%.

- оценка «не защитил» выставляется, при значительных ошибках в содержании курсового проекта, при допущении принципиальных ошибок в ответах на вопросы преподавателя - правильных ответов менее 50%.

Основаниями для снижения оценки за курсовой проект могут служить:

- небрежное выполнение,
- низкое качество графического материала (неверный выбор масштаба чертежей, отсутствие указания единиц измерения на графиках),
- незначительные ошибки при ответах на теоретические вопросы.

Курсовой проект не может быть принят и подлежит переработке в случае:

- несоответствия заданию на курсовое проектирование;
- отсутствия необходимых разделов,
- отсутствия необходимого графического материала,
- некорректной обработки результатов вычислений.

Примеры тем для курсового проектирования:

- Аэродинамика высокоскоростного летательного аппарата.
- Моделирование газодинамических процессов, сопровождающих работу систем управления вектором тяги.
- Вычислительное моделирование газо- и термодинамических параметров летательного аппарата.
- Численное моделирование рационального метода наведения ракеты-перехватчика с подводным стартом в высоких широтах.
- Исследование аэродинамических характеристик тел в вихревом следе над экраном.
- Моделирование движения ЛА с учетом работы аэромеханических систем.
- Численное моделирование охлаждения аэродинамических поверхностей с использованием технологии термоэлектронной эмиссии.
- Исследование ударно-волновой структуры в воздухозаборнике ГЛА.
- Вычислительное моделирование струйных и сопловых течений.
- Численное решение задач газовой динамики с учетом физико-химических превращений.
- Моделирование течений в компрессорах авиадвигателей.
- Газодинамика и аэроакустика авиадвигателей.
- Исследование летных характеристик малоразмерного вертоплана.
- Вычислительное моделирование высокоскоростного турбокомпрессора.

### **Экзамен**

Допуск к экзамену возможен только при условии успешной защиты заданий аудиторного практикума и получения положительной оценки (отлично, хорошо или удовлетворительно) за защиту курсового проекта. Экзамен, включает в себя два контрольных вопроса по выбору преподавателя из списка вопросов для собеседования по разделам дисциплины.

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.

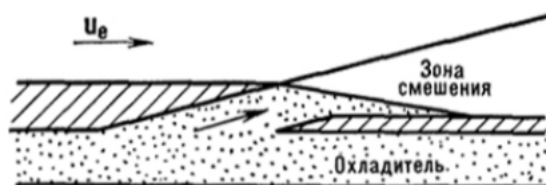
КУРС	СЕМЕСТР	Наименование разделов и дидактических единиц	ВСЕГО	Аудиторные занятия в контактной форме			Самостоятельная работа студентов	Формируемая компетенция, %		НАИМЕНОВАНИЕ ОЦЕНОЧНОГО СРЕДСТВА
				ВСЕГО	Лекции	Практические занятия		ОПК-2	ПК-2.1	
5	10	Раздел 1. Особенности внутренней газодинамики реактивных двигателей на химической энергии.	13	7	7	0	6	20	20	Контрольные вопросы
5	10	Раздел 2. Модели и методы решения задач внутрикамерной газодинамики.	26	16	6	10	10	15	15	Отчет по практическому заданию
5	10	Раздел 3. Течения в каналах со вдувом.	34	23	9	14	11	15	15	Отчет по практическому заданию
5	10	Раздел 4. Двухфазные течения.	25	16	8	8	9	15	15	Отчет по практическому заданию
5	10	Раздел 5. Газодинамика проточных трактов и сопловых каналов.	10	6	4	2	4	10	10	Отчет по практическому заданию
5	10	Раздел 6. Курсовой проект.	36	0	0	0	36	25	25	Курсовой проект
Всего за 10 семестр			144	68	34	34	76	100	100	
Всего по дисциплине			144	68	34	34	76	100	100	

## Оценочные материалы по дисциплине ВНУТРЕННЯЯ ГАЗОДИНАМИКА ЭНЕРГОУСТАНОВОК

**ОПК-2 - Способен использовать современные информационные технологии при выполнении научных исследований и разработок; использовать стандартные пакеты прикладных программ; способен к алгоритмизации процесса вычислений при проведении исследований; организовывать и соблюдать требования информационной безопасности в профессиональной деятельности**

- № 1 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов  
Какие из перечисленных двигателей являются химическими двигателями?
- А) Жидкостный двигатель  
Б) Твердотопливный двигатель  
В) Ядерный двигатель  
Г) Воздушно-реактивный двигатель
- № 2 Прочитайте текст и установите последовательность  
Опишите последовательность действий при постановке задачи в САЕ-пакете.
- А) Построение сеточной модели  
Б) Выбор численного метода  
В) Проведение вычислений  
Г) Построение геометрической модели  
Д) Формирование математической модели, основных допущений и замыкающих соотношений  
Е) Задание граничных условий  
Ж) Задание начальных условий  
З) Постпроцессинг, обработка результатов
- № 3 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов  
Чтобы организовать непрерывное ускорение потока в канале нужно (возможно несколько ответов):
- А) произвести изменение геометрии канала: в дозвуковой части канала организовать сужающие стенки, а в сверхзвуковой - расширяющие, при этом в критическом сечении реализуется звуковое течение.  
Б) 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.  
В) 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.  
Г) организовать непрерывное ускорение потока в канале невозможно
- № 4 Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ  
В моделях турбулентности k-epsilon и k-omega величины k, epsilon и omega означают
- № 5 Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ  
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.
- № 6 Прочитайте текст и установите соответствие  
Установите соответствие методов тепловой защиты стенок энергоустановок

1)

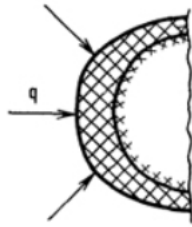


2)

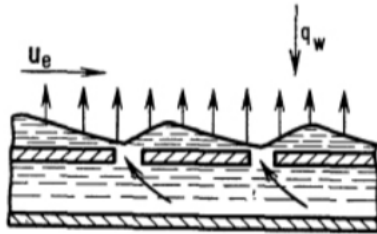
А) Радиационное охлаждение

Б) Теплопоглощающее покрытие





3)



В) Заградительное охлаждение

Г) Пленочное охлаждение

№ 7 Прочитайте текст и установите последовательность

Детонационную волну можно разделить на определенные характерные области. Расположите данные области в правильной последовательности:

А - Зона индукции

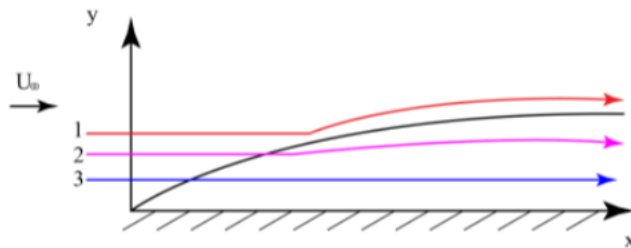
Б - Продукты детонации

В - Зона химических реакций

Г - Ударная волна

№ 8 Прочитайте текст и установите соответствие

Сопоставьте



А) Линия тока вязкой жидкости в пограничном слое

Б) Линия тока невязкой жидкости

В) Линия тока вне пограничного слоя

№ 9 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа

Какой пограничный слой соответствует большему сопротивлению трения

А) ламинарный

Б) турбулентный

В) не зависит от типа пограничного слоя

Г) зависит от характеристик течения

№ 10 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа

Для описания турбулентного движения Рейнольдс предположил, что

А) для описания турбулентных пульсаций скорости и давления необходимо осреднение вязких сил

Б) существующие в потоке мгновенные проекции скорости и давления необходимо заменить пульсационными значениями

В) большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, а эффекты более мелких вихрей моделируются с использованием правил подсеточного замыкания

Г) существующие в потоке мгновенные проекции скорости и давления можно представить как сумму их осредненных и пульсационных значений

№ 11 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов

В уравнении энергии

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + u \frac{dp}{dx} + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$$

третий член в правой части отвечает за

- А) тепловой поток за счет сжатия
- Б) тепловой поток за счет трения
- В) тепловой поток за счет теплопроводности
- Г) тепловой поток за счет конвекции

№ 12 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа  
Для какой модели турбулентности  $y^+ < 1$ ?

- А) k- $\omega$  SST
- Б) k- $\epsilon$  realizable
- В) vt-92
- Г) Spalart-Allmaras

**ПК-2.1 - Способен проводить работы по экспериментальным исследованиям и/или вычислительному моделированию теплообмена изделий авиационной и ракетно-космической техники, анализировать и обобщать результаты**

№ 1 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа  
Пограничный слой в идеальной жидкости:

- А) всегда ламинарный
- Б) всегда турбулентный
- В) ламинарный, переходный или турбулентный в зависимости от числа Re
- Г) отсутствует

№ 2 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов  
Какие газодинамические характеристики определяют скорость горения заряда РДТТ?

- А) давление в камере сгорания
- Б) давление окружающей среды
- В) начальная температура топлива
- Г) скорость истечения газового потока из сопла РД
- Д) скорость течения газового потока в камере сгорания

№ 3 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов  
Какие элементы могут быть введены в сверхкритическую часть сопла для изменения направления вектора тяги?

- А) газовые рули
- Б) закрылки
- В) периферийные рули
- Г) внутренние интресепторы
- Д) внешние интресепторы
- Е) элероны

№ 4 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа  
Какая из моделей турбулентности более достоверно описывает течение вблизи стенок?

- А) k- $\epsilon$  model
- Б) k- $\omega$  model
- В) одинаково
- Г) ни одна не применима для описания данного течения

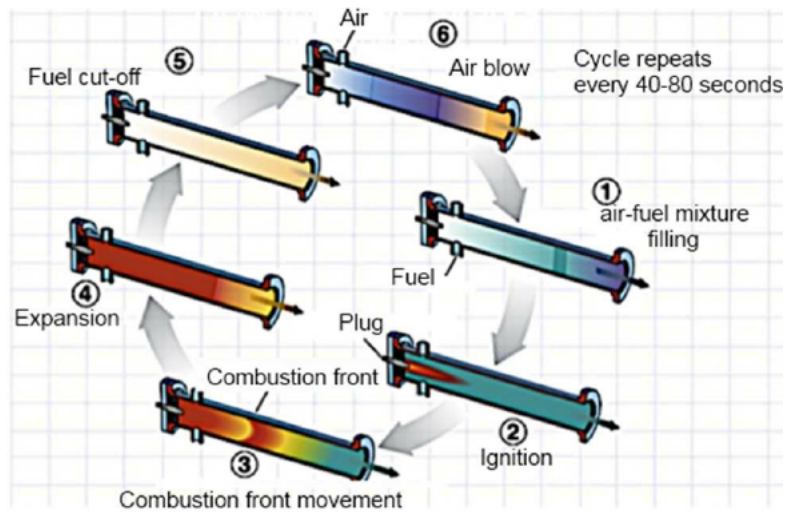
№ 5 Прочитайте текст и установите соответствие  
Приведите соответствие названия методов управления вектором тяги с их иллюстрацией

- 1) А) Газодинамические метод
- 2) Б) Использование газовых рулей
- 3) В) Поворотные сопла

№ 6 Прочитайте текст и установите соответствие

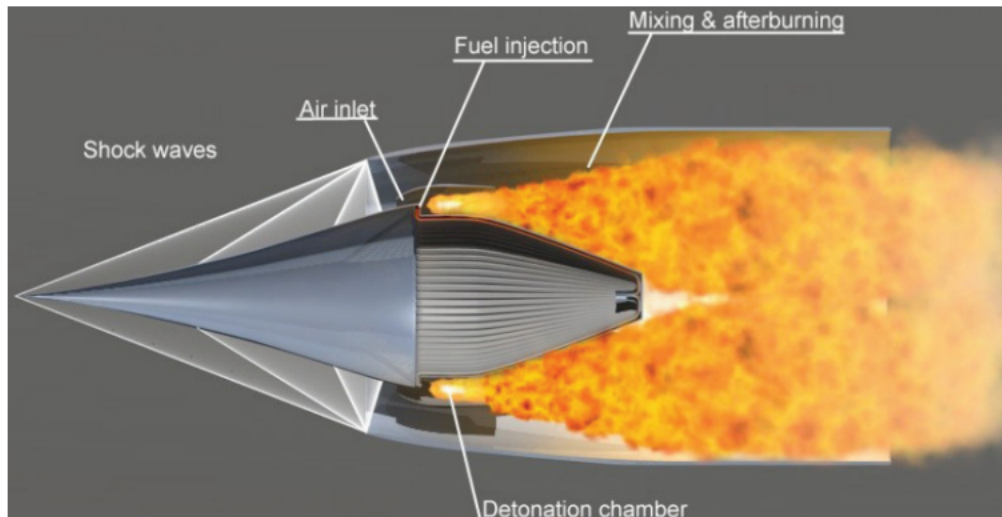
На серии рисунков представлены схемы детонационных двигателей. Установите соответствие названию детонационных двигателей их схеме.

1 -



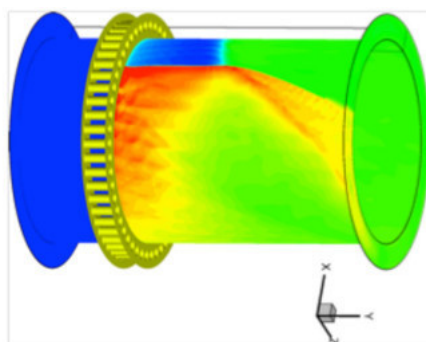
А - Импульсный детонационный двигатель с высокочастотным резонатором

2 -



Б - Ротационный детонационный двигатель

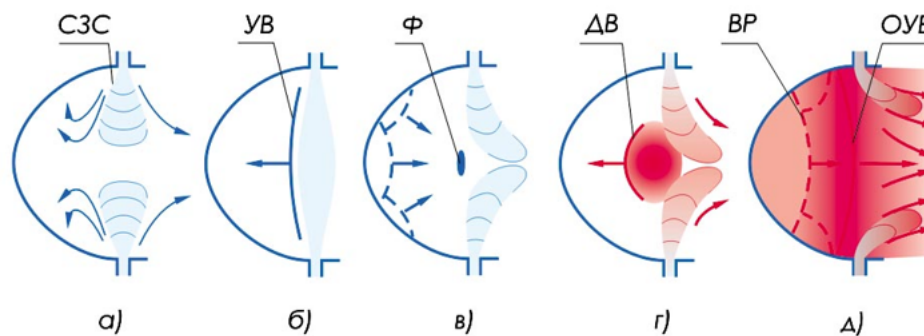
3 -



В - Двигатели стационарной детонацией

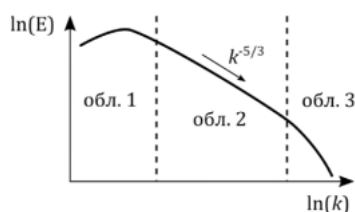
4 -

Г - Двигатель детонацией в периодически перемещающейся ударной волне



Д - Импульс  
детонационного  
двигателя

- № 7 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа  
На рисунке представлены области энергетического спектра турбулентности при высоких значениях числа Рейнольдса.



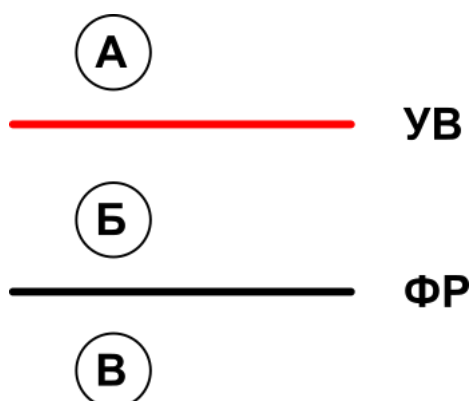
К какой области относится данное утверждение: область соответствует крупномасштабным "энергонесущим" турбулентным вихрям с размерами порядка интегрального линейного масштаба рассматриваемого течения, черпающим энергию из осредненного течения.

- А) Область 1  
Б) Область 2  
В) Область 3  
Г) Ко всем областям
- № 8 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов  
Выберите верные утверждения:
- А) В стехиометрической смеси температура во фронте детонации максимальна, и ей соответствует минимальная длина ячейки.  
Б) Чем выше температура смеси, тем больше скорость химических реакций.  
В) В точке Чепмена-Жуге скорость продуктов превращения относительно скачка сверхзвуковая.  
Г) В состоянии локального термодинамического и химического равновесия скорость прямой химической реакции равна скорости обратной реакции.

- № 9 Прочитайте текст и установите последовательность  
На рисунке схематично изображена детонационная волна в представлении двух фронтов: ударная волна (УВ) и фронт реакций (ФР). Выделены с постоянным давлением

- р1 - перед УВ (область А),  
р2 - за УВ и перед ФР (область Б),  
р3 - после ФР (область В).

Запишите последовательность областей по значению в них давлений (от большего значения к меньшему).



- № 10 Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ  
Для чего в RANS нужны модели турбулентности?

- № 11 Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ

Турбулентность можно определить как совокупность разномасштабных вихрей. Это означает, что турбулентное движение несжимаемой жидк может быть представлено в виде суперпозиции различных вихрей. В таких структурах существует так называемый каскадный перенос энергии: определение каскадному переносу энергии.

№ 12 Прочитайте текст и установите последовательность

Двигательные установки работают по разным термодинамическим циклам в зависимости от особенностей функционирования. Рассматривая следующие циклы:

А) цикл Брайтона (горение при постоянном давлении),

Б) цикл Хамфри (горение при постоянном объеме),

В) цикл Фикетта–Джакобса (горение при постоянном объеме).

Запишите последовательность данных циклов по их КПД от меньшего к большему.