

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФМАТ  В.И. Ряжских  
«21» февраля 2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

дисциплины

«Конструирование турбонасосных агрегатов  
жидкостных ракетных двигателей»

**Специальность** 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

**Специализация** Проектирование жидкостных ракетных двигателей

**Квалификация выпускника** инженер

**Нормативный период обучения** 5 лет и 6 м.

**Форма обучения** очная

**Год начала подготовки** 2023

Автор программы



/ А.А. Афанасьев /

Заведующий кафедрой  
Ракетных двигателей



/ В.С. Рачук /

Руководитель ОПОП



/ В.С. Рачук /

Воронеж 2023

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1.1. Цели дисциплины

Обеспечить высокую профессиональную подготовку инженеров-конструкторов в области практического применения основных идей и методов конструирования турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей.

### 1.2. Задачи освоения дисциплины

Изучение основных принципов конструирования турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей; классификации турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей; специальных конструктивных решений, обеспечивающих максимальную экономичность и работоспособность турбонасосных агрегатов; методов прочностных расчетов элементов конструкции турбонасосных агрегатов; методов испытаний насосов и турбин ТНА, их элементов.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Конструирование турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений блока Б1

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Конструирование турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-4: способен конструировать агрегаты пневмогидравлических схем двигателей и энергетических установок летательных аппаратов

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-4	Знать конструктивные схемы ТНА, типы насосов и турбин, применяемых в ТНА, виды расчетов на прочность элементов конструкции ТНА ЖРД, конструкцию, основные элементы и характеристики ТНА, виды испытаний насосов и турбин ТНА ЖРД, их элементов;
	Уметь классифицировать турбонасосные агрегаты жидкостных ракетных двигателей, разрабатывать конструктивные схемы турбонасосных агрегатов ЖРД, проводить расчеты напряженно-деформированного состояния элементов ТНА, выбирать режимы испытаний элементов ТНА, оптимизировать затраты на разработку новых образцов ТНА;
	Владеть навыками работы с современными САД системами, методиками подбора конструкционных материалов для элементов, инженерными методами

	расчета на прочность элементов ТНА ЖРД, методологией определения динамических и статических нагрузок в элементах конструкций ТНА ЖРД, актуальными методиками проектирования агрегатов подачи
--	--

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Конструирование турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей» составляет 5 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий  
**очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		9
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	72	72
В том числе:		
Лекции	18	18
Практические занятия (ПЗ)	18	18
Лабораторные работы (ЛР)	36	36
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>72</b>	<b>72</b>
<b>Курсовой проект</b>	+	+
Часы на контроль	36	36
Виды промежуточной аттестации - экзамен	+	+
Общая трудоемкость: академические часы	180	180
зач.ед.	5	5

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

**5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий**

**очная форма обучения**

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Особенности конструкции ТНА ЖРД	Система системы питания ЖРД. Особенности схем си-стемы питания ЖРД с дожиганием и без дожигания. Одно- и двухблочные турбонасосные агрегаты. Конструктивные схе-мы ТНА, нагрузки, действующие на элементы ТНА. Силовые схемы ТНА. Насосы, применяемые в турбонасосных агрегатах жид-костных ракетных двигателей. Осевые, центробежные и шнекоцентробежные насосы. Конструкция, основные элемен-ты и характеристики.	2	2	6	12	22

		Турбины, применяемые в ТНА ЖРД. Одно- и многоступенчатые турбины. Типы, конструкции, основные элементы и характеристики. Сравнение областей применения осевых и радиально-осевых турбин. Опоры роторов ТНА. Основные виды опор, применяемых в ТНА ЖРД. Особенности применения гидродинамических и гидростатических подшипников. Уплотнения насосов и турбин ТНА. Основные виды уплотнений. Контактные и бесконтактные уплотнения. Основные преимущества и недостатки. Области применения, конструктивные схемы.					
2	Особенности конструкции ТНА ЖРД	Уплотнительные комплексы. Разгрузка роторов ТНА от действия осевых и радиальных сил. Основные способы разгрузки роторов от действия осевых сил. Автоматические разгрузочные устройства, принцип их действия и основные характеристики. Алгоритм разработки автоматических разгрузочных устройств, их конструктивные схемы. Радиальные силы в турбонасосных агрегатах. Отводящие устройства насосов, основные способы снижения радиальных сил в насосах. Бустерные насосы, типы, конструктивные схемы, основные характеристики. Области применения струйных и лопастных бустерных насосов. Характеристики и особенности работы струйных насосов. Конструктивные схемы бустерных насосов. Потребный напор бустерного насосного агрегата. Особенности конструкции турбонасосных агрегатов кислородно-водородных жидкостных ракетных двигателей	2	2	6	12	22
3	Прочность элементов ТНА ЖРД	Статическая прочность и деформации элементов ТНА. Нагрузки, действующие на элементы конструкции, виды и классификация. Основные гипотезы, допущения, касающиеся свойств материала, геометрии, конструкции и особенностей нагружения. Прочность лопаток и дисков рабочих колес насосов и турбин ТНА. Прочность лопаток и дисков осевых и центро-стремительных турбин,	2	2	6	12	22

		особенности и порядок прочностного расчета.					
4	Прочность элементов ТНА ЖРД	Напряжения, возникающие в рабочих лопатках: напряжения растяжения от центробежных сил, напряжения изгиба от газодинамических сил, изгиб лопаток центробежными силами. Нагрузки, приложенные к диску осевой турбины, расчетная схема для определения нагрузок. Критические скорости вращения, понятие о прецессии, демпферы. Понятие о критической угловой скорости роторов турбонасосных агрегатов. Докритический (жесткий) и сверх-критический (гибкий) валы. Понятие о прецессии ротора. Влияние гироскопического момента на критические угловые скорости ротора.	4	4	6	12	26
5	Испытания элементов ТНА ЖРД	Основные виды испытаний элементов ТНА, выбор модельных режимов. Прочностные испытания роторных и корпусных деталей.	4	4	6	12	26
6	Испытания элементов ТНА ЖРД	Балансировка роторов: низкочастотные и высокочастотные испытания. Испытания подшипников и уплотнений.	4	4	6	12	26
<b>Итого</b>			<b>18</b>	<b>18</b>	<b>36</b>	<b>72</b>	<b>144</b>

## 5.2 Перечень лабораторных работ

Неделя семестра	Наименование лабораторной работы
<b>1. Особенности конструкции ТНА ЖРД</b>	
2	Конструкция и основные параметры турбонасосного агрегата ЖРД III ступени ракеты-носителя «Союз» – РД0110, конструкция элементов ТНА.
4	Конструкция и основные параметры турбонасосного агрегата ЖРД III ступени ракеты-носителя «Союз-2» – РД0124, конструкция элементов ТНА.
6	Конструкция и основные параметры турбонасосного агрегата двигателя I ступени ракеты-носителя «Протон» – РД-253.
8	Конструкция турбонасосного агрегата двигателей II и III ступеней ракеты-носителя «Протон» – РД0210/0211, РД0212, конструкция элементов ТНА.
14	Конструкция турбонасосного агрегата двигателя II ступени ракеты-носителя «Энергия» – РД0120, особенности конструкции элементов ТНА.
16	Конструкция лопастных бустерных турбонасосных агрегатов на примере двигателей РД0120, РД0124, RL60.
18	Конструкция и основные параметры преднасосов двигателей II и III ступеней ракеты-носителя «Протон» – РД0210/0211, РД0212. Особенности проектирования струйных преднасосов.
18	Зачетное занятие
<b>2. Прочность элементов ТНА ЖРД</b>	
10	Балансировка роторов ТНА, прочностные испытания элементов конструкции ТНА.
<b>3. Испытания элементов ТНА ЖРД</b>	
12	Гидравлические испытания насосов, газодинамические испытания турбин турбонасосных агрегатов ЖРД

## 6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины предусматривает выполнение курсового проекта в 9 семестре для очной формы обучения.

Примерная тематика курсового проекта: «Конструирование турбонасосного агрегата»

Задачи, решаемые при выполнении курсового проекта:

Вариант	Рабочее тело	Dвт, мм	D0, мм	D1, мм	D2, мм	B1, мм	B2, мм	D <sub>ср</sub> , мм	h <sub>СА</sub> , мм	N, кВт	n, об/мин	Давление на входе в насос, МПа	КПД насоса, %	Массовый расход через насос кг/с	Давление на входе в турбину, МПа	π,;	T, К
1	Метан	35	55	50	110	12	6	105	5,5	1250	45000	0,5	68	15,5	12	1,8	400
2	Кислород	40	60	55	125	18	9	115	15	4500	40000	1,1	67	62	12,5	1,2	720
3	Водород	30	55	50	150	18	6	220	12	2500	50000	0,8	72	5,5	9,5	1,6	800
4	Керосин	75	105	90	205	15	9	190	8	2700	65000	0,7	65	12	20	1,4	1030
5	Водород	25	60	60	170	12	5	220	4	3000	45000	0,6	62	11	14	1,9	750
6	Кислород	45	90	80	200	16	9	175	9,5	1500	45000	1,1	67	25	13	2,1	720
7	Метан	20	50	40	115	10	4	100	4	400	50000	0,6	71	3,5	10	1,5	950
8	Керосин	45	95	80	160	18	7,5	140	7	1800	42000	0,75	57	24	16	1,6	900
9	Водород	28	42	38	90	8	3	85	3,5	800	95000	0,4	64	2,8	12,5	1,9	380
10	Керосин	85	130	115	280	35	18	110	14	8000	30000	0,55	67	63	28	2,2	800
11	Водород	30	60	45	145	15	5,5	130	5	1500	60000	0,8	61	6,1	18	1,8	750
12	Керосин	65	100	95	240	20	11	220	9	2500	50000	0,9	75	31	30	1,3	950
13	Водород	50	85	75	140	12	6	150	5	1050	50000	0,7	59	5,4	18	1,9	1030
14	Кислород	70	115	100	265	28	14	300	11	5000	42000	0,9	69	74	24	2,2	700
15	Метан	15	60	50	180	15	5,5	220	5	750	60000	0,65	65	8	11,5	1,5	740
16	Керосин	12	24	23	55	8	3	70	3	180	50000	20	35	0,6	11	1,3	1073
17	Водород	115	190	180	320	30	15	305	12	9000	30000	15	62	12	27,5	1,4	400
18	Кислород	35	55	50	130	12	8	125	6	1100	55000	1,0	53	17	19	1,7	650
19	Метан	40	80	75	195	14	7,5	200	6	1600	45000	0,85	68	13,5	21	1,8	850
20	Керосин	150	250	210	460	45	20	195	16	11000	25000	2,4	65	83	22	1,7	900
21	Водород	12	35	30	100	10	5	95	4	1250	75000	12	77	7,1	18	2,0	720

$$b_{CA} = 2h_{CA}, \text{ мм}; h_{PK} = h_{CA} + 0,1 h_{CA}, \text{ мм}; h_{PK} = b_{PK}$$

ТН – расположение рабочих колес турбины и насоса относительно опор

М – межопорное расположение

К – консольное расположение

Например, МК – рабочее колесо турбины расположено между опорами, а рабочее колесо насоса – консольно относительно опор

Курсовой проект включает в себя графическую часть и расчетно-пояснительную записку.

## 7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

**7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания**

### 7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-4	Знать конструктивные схемы ТНА, типы насосов и турбин, применяемых в ТНА, виды расчетов на прочность элементов конструкции ТНА ЖРД, конструкцию, основные элементы и характеристики ТНА, виды испытаний насосов и турбин ТНА ЖРД, их элементов;	Устный опрос	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь классифицировать турбонасосные агрегаты жидкостных ракетных двигателей, разрабатывать конструктивные схемы турбонасосных агрегатов ЖРД, проводить расчеты напряженно-деформированного состояния элементов ТНА, выбирать режимы испытаний элементов ТНА, оптимизировать затраты на разработку новых образцов ТНА;	Устный опрос	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть навыками работы с современными САД системами, методиками подбора конструкционных материалов для элементов, инженерными методами расчета на прочность элементов ТНА ЖРД, методологией определения динамических и статических нагрузок в элементах конструкций ТНА ЖРД, актуальными методиками проектирования агрегатов подачи	Устный опрос	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 9 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ПК-4	Знать конструктивные схемы ТНА, типы насосов и турбин, применяемых в ТНА, виды расчетов на прочность элементов конструкции ТНА	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов

	ЖРД, конструкцию, основные элементы и характеристики ТНА, виды испытаний насосов и турбин ТНА ЖРД, их элементов;					
	Уметь классифицировать турбонасосные агрегаты жидкостных ракетных двигателей, разрабатывать конструктивные схемы турбонасосных агрегатов ЖРД, проводить расчеты напряженно-деформированного состояния элементов ТНА, выбирать режимы испытаний элементов ТНА, оптимизировать затраты на разработку новых образцов ТНА;	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	Владеть навыками работы с современными САД системами, методиками подбора конструкционных материалов для элементов, инженерными методами расчета на прочность элементов ТНА ЖРД, методологией определения динамических и статических нагрузок в элементах конструкций ТНА ЖРД, актуальными методиками проектирования агрегатов подачи	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

**7.2 Примерный перечень оценочных средств (типичные контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)**

**7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию**

1. В состав схемы системы питания ЖРД входят:

а) камера сгорания;

- б) газогенератор;*
- в) турбонасосный агрегат;*
- г) дроссель.*

*2. Бустерные насосные агрегаты входят в состав:*

- а) горячих агрегатов;*
- б) агрегатов системы питания;*
- в) агрегатов управления и регулирования;*
- г) агрегатов обвязки.*

*3. Схема системы питания двигателя с дожиганием генераторного газа содержит:*

- а) предкамерную турбину;*
- б) автономную турбину;*
- в) свободную турбину;*
- г) биротативную турбину.*

*4. Схема системы питания двигателя с дожиганием генераторного газа содержит:*

- а) дожимную ступень насоса;*
- б) шестеренный насос;*
- в) поршневой насос;*
- г) черпаковый насос.*

*5. Схема системы питания двигателя без дожигания генераторного газа содержит:*

- а) предкамерную турбину;*
- б) автономную турбину;*
- в) свободную турбину;*
- г) биротативную турбину.*

*6. Одноблочный турбонасосный агрегат жидкостного ракетного двигателя содержит:*

- а) только одно рабочее колесо насоса или турбины;*
- б) все, необходимые для работы двигателя, насосы и турбины, расположенные на одном валу с одной частотой вращения;*
- в) насосы и турбины с разными частотами вращения, скомпонованные в отдельные блоки;*
- г) зубчатый редуктор.*

*7. Двухблочный турбонасосный агрегат жидкостного ракетного двигателя содержит:*

- а) только одно рабочее колесо насоса или турбины;*
- б) все, необходимые для работы двигателя, насосы и турбины, расположенные на одном валу с одной частотой вращения;*
- в) насосы и турбины с разными частотами вращения, скомпонованные в отдельные блоки;*
- г) зубчатый редуктор.*

*8. Редукторный турбонасосный агрегат жидкостного ракетного двигателя содержит:*

- а) шкив;*

б) игольчатый подшипник;

в) клиновой ремень;

г) зубчатый редуктор.

9. Утечка через целевое уплотнение при одинаковом уплотнительном зазоре и перепаде давления меньше утечек через лабиринтное уплотнение:

а) существенно меньше;

б) меньше;

в) больше;

г) не отличается.

10. Посадка подшипника на вал турбонасосного агрегата выполняется, как правило:

а) по переходной посадке;

б) с гарантированным зазором;

в) с гарантированным натягом.

### **7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач**

1. К внутренним нагрузкам относят:

а) перепады давления жидких и газобразных сред;

б) статическое давление;

в) статическое давление и перепады давления жидких и газобразных сред;

г) динамическое давление.

2. К внутренним нагрузкам относят:

а) температурные поля;

б) температурные поля и градиенты температуры;

в) градиенты температуры;

г) среднюю температуру конструкции.

3. К внутренним нагрузкам относят:

а) газодинамические нагрузки в трактах двигателя;

б) гидродинамические нагрузки в трактах двигателя;

в) газодинамические и гидродинамические нагрузки в трактах двигателя;

г) гидростатические и гидродинамические нагрузки в трактах двигателя.

4. К внутренним нагрузкам относят:

а) избыточное наружное давление;

б) недостаточное наружное давление;

в) градиент изменения наружного давления;

г) перепад между внутренним и наружным давлением.

5. К внутренним нагрузкам относят:

а) пульсации давления;

б) амплитуду пульсаций давления;

в) среднее давление;

г) максимальное давление.

6. К внутренним нагрузкам относят:

- а) нагрузки, вызванные гидроударом;*
- б) нагрузки, вызванные перегрузками при полете;*
- в) нагрузки, вызванные температурой компонентов топлива;*
- г) нагрузки, вызванные движением топлива в баках.*

*7. К внешним нагрузкам относят:*

- а) нагрузки, вызванные гидроударом;*
- б) нагрузки, вызванные перегрузками при полете;*
- в) нагрузки, вызванные температурой компонентов топлива;*
- г) нагрузки, вызванные движением топлива в баках.*

*8. К внешним нагрузкам относят:*

- а) статические нагрузки от столба жидкости в баках;*
- б) ударные нагрузки при разделении ступеней;*
- в) пульсации тяги двигателя;*
- г) гидроудары в полостях двигателя.*

*9. Запас статической прочности по напряжениям определяется как:*

- а) отношение предела прочности материала детали при максимально возможной температуре к наибольшему из значений главных напряжений;*
- б) отношение предела прочности материала детали при максимально возможной температуре к среднему значению главных напряжений;*
- в) отношение предела прочности материала детали при номинальной температуре к наибольшему из значений главных напряжений;*
- г) отношение предела прочности материала детали при номинальной температуре к среднему значению главных напряжений.*

*10. Какой вид напряжений не относится к напряжениям возникающим в рабочих лопатках осевой турбины:*

- а) напряжения растяжения от центробежных сил;*
- б) напряжения изгиба от газодинамических сил;*
- в) напряжения изгиба лопаток центробежными силами;*
- г) напряжения лопаток от передачи крутящего момента.*

### **7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач**

*1. Модельные гидравлические испытания насосов, как правило, выполняют:*

- а) на воздухе;*
- б) на фреоне;*
- в) на воде;*
- г) на машинном масле.*

*2. При модельных гидравлических испытаниях насосов определяют:*

- а) частные напорные характеристики;*
- б) динамические характеристики ротора;*
- в) универсальные напорные характеристики;*
- г) расходные характеристики уплотнений.*

*3. Модельные газодинамические испытания турбин, как правило, выполняют:*

- а) на воздухе;*

- б) на фреоне;*
- в) на газообразном азоте;*
- г) на водяном паре.*
- 4. При модельных гидравлических испытаниях турбин определяют:*
  - а) абсолютный расход;*
  - б) мгновенный расход;*
  - в) относительный расход;*
  - г) приведенный расход.*
- 5. Прочностные испытания роторных деталей выполняют:*
  - а) нагружением давлением;*
  - б) нагружением температурой;*
  - в) нагружением вращением;*
  - г) нагружением вибрационными нагрузками.*
- 6. Прочностные испытания корпусных деталей выполняют:*
  - а) нагружением давлением;*
  - б) нагружением температурой;*
  - в) нагружением вращением;*
  - г) нагружением вибрационными нагрузками.*
- 7. Критическая частота вращения это:*
  - а) частота вращения, совпадающая с собственной частотой ротора;*
  - б) частота вращения, совпадающая со скоростью звука;*
  - в) частота вращения, совпадающая с разрушающей частотой вращения ротора;*
  - г) частота вращения, совпадающая с собственной частотой двигателя.*
- 8. Главный вектор дисбаланса:*
  - а) суммарный дисбаланс, приведенный к плоскостям коррекции;*
  - б) суммарный дисбаланс, приведенный к центру масс;*
  - в) суммарный дисбаланс, приведенный к опорам ротора;*
  - г) суммарный дисбаланс, приведенный к рабочему колесу насоса.*
- 9. Модельные испытания подшипников выполняют:*
  - а) для определения запасов работоспособности подшипника;*
  - б) для определения критической частоты вращения;*
  - в) для определения осевых сил, действующих на ротор;*
  - г) для определения радиальных сил, действующих на ротор.*
- 10. Какой коэффициент запаса прочности по статическим напряжениям является предпо-читательным при проектировании элементов ТНА:*
  - а) 120;*
  - б) 9;*
  - в) 1,4;*
  - г) 1,05.*

#### **7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету**

Не предусмотрено учебным планом

### **7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену**

1. Система системы питания ЖРД.
2. Особенности схем системы питания ЖРД с дожиганием и без дожигания.
3. Одно- и двухблочные турбонасосные агрегаты.
4. Конструктивные схемы ТНА.
5. Нагрузки, действующие на элементы ТНА.
6. Силовые схемы ТНА.
7. Насосы, применяемые в турбонасосных агрегатах жидкостных ракетных двигателей.
8. Осевые, центробежные и шнекоцентробежные насосы.
9. Конструкция, основные элементы и характеристики насосов.
10. Турбины, применяемые в ТНА ЖРД.
11. Одно- и многоступенчатые турбины.
12. Типы, конструкции, основные элементы и характеристики турбин.
13. Сравнение областей применения осевых и радиально-осевых турбин.
14. Опоры роторов ТНА.
15. Основные виды опор, применяемых в ТНА ЖРД.
16. Особенности применения гидродинамических и гидростатических подшипников.
17. Уплотнения насосов и турбин ТНА.
18. Основные виды уплотнений.
19. Контактные и бесконтактные уплотнения.
20. Основные преимущества и недостатки типов уплотнений.
21. Области применения, конструктивные схемы контактных и бесконтактных уплотнений.
22. Уплотнительные комплексы.
23. Разгрузка роторов ТНА от действия осевых и радиальных сил.
24. Основные способы разгрузки роторов от действия осевых сил.
25. Автоматические разгрузочные устройства, принцип их действия и основные характеристики.
26. Алгоритм разработки автоматических разгрузочных устройств, их конструктивные схемы.
27. Радиальные силы в турбонасосных агрегатах.
28. Отводящие устройства насосов, основные способы снижения радиальных сил в насосах.
29. Бустерные насосы, типы, конструктивные схемы, основные характеристики.
30. Области применения струйных и лопастных бустерных насосов.
31. Характеристики и особенности работы струйных насосов.
32. Конструктивные схемы бустерных насосов.
33. Потребный напор бустерного насосного агрегата.
34. Особенности конструкции турбонасосных агрегатов кислородно-водородных жидкостных ракетных двигателей.
35. Статическая прочность и деформации элементов ТНА.
36. Нагрузки, действующие на элементы конструкции, виды и классификация.
37. Основные гипотезы, допущения, касающиеся свойств материала, геометрии, конструкции и особенностей нагружения.

38. Прочность лопаток и дисков рабочих колес насосов и турбин ТНА.
39. Прочность лопаток и дисков осевых турбин, особенности и порядок прочностного расчета.
40. Прочность лопаток и дисков центростремительных турбин, особенности и порядок прочностного расчета.
41. Напряжения, возникающие в рабочих лопатках: напряжения растяжения от центробежных сил, напряжения изгиба от газодинамических сил, изгиб лопаток центробежными силами.
42. Нагрузки, приложенные к диску осевой турбины, расчетная схема для определения нагрузок.
43. Критические скорости вращения.
44. Понятие о прецессии ротора.
45. Конструкционное демпфирование.
46. Демпферы сухого трения.
47. Понятие о критической угловой скорости роторов турбонасосных агрегатов.
48. Докритический (жесткий) ротор.
49. Сверхкритический (гибкий) ротор.
50. Влияние гироскопического момента на критические угловые скорости ротора.
51. Основные виды испытаний элементов ТНА.
52. Выбор модельных режимов испытания элементов ТНА.
53. Прочностные испытания роторных деталей.
54. Прочностные испытания роторных деталей.
55. Статическая балансировка роторов.
56. Динамическая балансировка роторов.
57. Низкочастотные испытания роторов.
58. Высокочастотные испытания роторов.
59. Модельные испытания подшипников.
60. Модельные испытания уплотнений.

#### **7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации**

Экзамен проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 10 вопросов и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, задача оценивается в 10 баллов (5 баллов верное решение и 5 баллов за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов – 20.

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 6 баллов.

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 6 до 10 баллов

3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 11 до 15 баллов.

4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 16 до 20 баллов.

## 7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	<p>Система системы питания ЖРД. Особенности схем системы питания ЖРД с дожиганием и без дожигания. Одно- и двухблочные турбонасосные агрегаты. Конструктивные схемы ТНА, нагрузки, действующие на элементы ТНА. Силовые схемы ТНА.</p> <p>Насосы, применяемые в турбонасосных агрегатах жидкостных ракетных двигателей. Осевые, центробежные и шнекоцентробежные насосы. Конструкция, основные элементы и характеристики.</p> <p>Турбины, применяемые в ТНА ЖРД. Одно- и многоступенчатые турбины. Типы, конструкции, основные элементы и характеристики. Сравнение областей применения осевых и радиально-осевых турбин. Опоры роторов ТНА. Основные виды опор, применяемых в ТНА ЖРД. Особенности применения гидродинамических и гидростатических подшипников. Уплотнения насосов и турбин ТНА. Основные виды уплотнений. Контактные и бесконтактные уплотнения. Основные преимущества и недостатки. Области применения, конструктивные схемы.</p>	ПК-4	Тест, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
2	<p>Уплотнительные комплексы.</p> <p>Разгрузка роторов ТНА от действия осевых и радиальных сил. Основные способы разгрузки роторов от действия осевых сил. Автоматические разгрузочные устройства, принцип их действия и основные характеристики. Алгоритм разработки автоматических разгрузочных устройств, их конструктивные схемы. Радиальные силы в турбонасосных агрегатах. Отводящие устройства насосов, основные способы снижения радиальных сил в насосах.</p> <p>Бустерные насосы, типы, конструктивные схемы, основные характеристики. Области применения струйных и лопастных бустерных насосов. Характеристики и особенности работы струйных насосов. Конструктивные схемы бустерных насосов. Потребный напор бустерного насосного агрегата.</p> <p>Особенности конструкции турбонасосных агрегатов кислородно-водородных жидкостных ракетных двигателей</p>	ПК-4	Тест, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
3	<p>Статическая прочность и деформации элементов ТНА. Нагрузки, действующие на элементы конструкции, виды и классификация. Основные гипотезы, допущения, касающиеся свойств материала, геометрии, конструкции и особенностей нагружения.</p> <p>Прочность лопаток и дисков рабочих колес насосов и турбин ТНА.</p> <p>Прочность лопаток и дисков осевых и центростремительных турбин, особенности и порядок прочностного расчета.</p>	ПК-4	Тест, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
4	<p>Напряжения, возникающие в рабочих лопатках: напряжения растяжения от центробежных сил, напряжения изгиба от газодинамических сил, изгиб лопаток центробежными силами. Нагрузки, приложенные к диску осевой турбины, расчетная схема для определения нагрузок.</p> <p>Критические скорости вращения, понятие о прецессии, демпферы. Понятие о критической угловой скорости роторов турбонасосных агрегатов. Докритический (жесткий) и сверхкритический (гибкий) валы. Понятие о прецессии ротора. Влияние гироскопического момента на критические угловые скорости ротора.</p>	ПК-4	Тест, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
5	<p>Основные виды испытаний элементов ТНА, выбор модельных режимов. Прочностные испытания роторных и кор-пусных деталей.</p>	ПК-4	Тест, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
6	<p>Балансировка роторов: низкочастотные и высокочастотные испытания. Испытания подшипников и уплотнений.</p>	ПК-4	Тест, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту

### 7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Защита курсового проекта или отчета по всем видам практик осуществляется согласно требованиям, предъявляемым к работе, описанным в методических материалах. Примерное время защиты на одного студента составляет 20 мин.

## 8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

### 8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

№ п/п	Авторы, составители	Заглавие	Годы издания. Вид издания	Обеспеченность
<b>1. Основная литература</b>				
1	Иванов А.В.	Иванов А.В. Проектирование турбонасосного агрегата ЖРД: учеб. пособие / А.В. Иванов. Воронеж: Воронеж. гос. тех. ун-т, 2012. – 206 с.	2012 печат.	1,0
2	А. А. Афанасьев, Ю. В. Демьяненко, К. В. Кружаев, Д. П. Шматов	Проектирование турбонасосной системы подачи ЖРД: учеб. Пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (1,6 Мб) / А. А. Афанасьев, Ю. В. Демьяненко, К. В. Кружаев, Д. П. Шматов. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2022, 73 с.	2022 электронный ресурс	1,0
3	Иванов А.В., Пупынин А.В.	Иванов А.В. Конструкция двигателей ракеты-носителя «Протон»: учеб. пособие / А.В. Иванов, А.В. Пупынин. Воронеж: ВГТУ, 2012. – 92 с.	2012 печат.	1,0
4	Дорофеев А.А.	Дорофеев А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей: Теория, расчет и проектирование: Учебник / А.А. Дорофеев. 2-е изд.,	2010 печат.	1,0

		перераб. и доп. / М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 463 с.		
5	Иванов А.В., Белоусов А.И., Дмитренко А.И.	Иванов А.В. Турбонасосные агрегаты кислородно-водородных ЖРД / А.В. Иванов, А.И. Белоусов, А.И. Дмитренко. Воронеж: ВГТУ, 2011. – 283 с.	2011 печат.	1,0
<b>2. Дополнительная литература</b>				
Л2.1	Иванов А.В.	Иванов А.В. Расчет и профилирование шнекоцентробежного насоса турбонасосного агрегата ЖРД: учеб. пособие / А.В. Иванов - Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2010. – 120 с.	2010 печат.	1,0
Л2.2	Иванов А.В., Заложных И.С., Барбарош К.О.	Иванов А.В. Основы построения трехмерных моделей деталей ракетных двигателей в среде NX7.5 учеб. пособие / А.В. Иванов, И.С. Заложных, К.О. Барбарош. Воронеж: ВГТУ, 2014. – 155 с.	2014 печат.	1,0
Л2.3	Иванов А.В. , Коробченко В.А., Шостак А.В.	Иванов А.В. Конструкция и проектирование уплотнений проточной части: учеб. пособие / А.В. Иванов, В.А. Коробченко, А.В. Шостак. Воронеж: Воронеж. Гос. тех. Ун-т, 2005. – 86 с.	2005 печат.	1,0
<b>3 Методические разработки</b>				
Л3.1	А.В. Иванов Д.П. Шматов А.А. Пригожин А.А. Цыганов	Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Конструирование турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей» для студентов специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; Сост. А.В. Иванов, Д.П. Шматов, А.А. Пригожин, А.А. Цыганов. Воронеж, 2015. 26 с. (412-2015)	2015 электронный ресурс	1,0

**8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:**

1. Microsoft Win Pro 10
2. Acrobat Pro 2017
3. NX Academic
4. 7 zip
5. Google Chrome
6. LibreOffice
7. Mozilla Firefox
8. Ansys, MathCAD
9. OppenOffice

10. <http://www.edu.ru/> - образовательный портал
11. <http://window.edu.ru>, <https://wiki.cchgeu.ru> - информационные справочные системы
12. [elibrary.ru](http://elibrary.ru)
13. <http://vipbook.info> - электронная библиотека
14. [www.iprbookshop.ru](http://www.iprbookshop.ru) – электронная библиотека

## **9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

Аудитория № 153 (ул. Ворошилова, 20, 8 эт.), укомплектованная специализированной мебелью для обучающихся и преподавателя, оборудованная мультимедиа-проектором и экраном, для проведения лекционных и практических занятий.

Аудитории № 154, № 149 (ул. Ворошилова, 20, 8 эт.), укомплектованные специализированной мебелью для обучающихся и преподавателя для проведения лекционных и практических занятий.

Специализированная аудитория, оснащенная персональными компьютерами и специальным программным обеспечением для лабораторных работ - учебная аудитория № 134 (ул. Ворошилова, 20, 7 эт.), укомплектованная специализированной мебелью и оборудованная техническими средствами обучения: персональными компьютерами с лицензионным программным обеспечением с возможностью подключения к сети «Интернет» и доступом в электронную информационно-образовательную среду университета.

Специализированная лаборатория гидрогазодинамики, оснащенная стендами для лабораторных работ: стенд для определения характеристик насосов; стенд для определения характеристики турбины.

## **10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

По дисциплине «Конструирование турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей» читаются лекции, проводятся практические занятия и лабораторные работы, выполняется курсовой проект.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков проектирования. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Методика выполнения курсового проекта изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсового проекта должны

своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой курсового проекта, защитой курсового проекта.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Лабораторная работа	Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных для подготовки к ним необходимо: следует разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: <ul style="list-style-type: none"><li>- работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций;</li><li>- выполнение домашних заданий и расчетов;</li><li>- работа над темами для самостоятельного изучения;</li><li>- участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;</li><li>- подготовка к промежуточной аттестации.</li></ul>
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед экзаменом оценкой три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.

## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
1			
2			
3			