



КГЭУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИАТЭ

*Наименование института*

С.О. Гапоненко

« 25 » 03 20 26 г.

### РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.В.ДЭ.01.01.02 Динамика и прочность газовых турбин

*(Код и наименование дисциплины в соответствии с РУП)*

Направление подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение  
*(Код и наименование направления подготовки)*

Направленность(и) \*  
(профиль(и)) Цифровой инжиниринг при проектировании и  
диагностике газотурбинных установок  
*(Наименование направленности (профиля) образовательной программы)*

Квалификация Бакалавр  
*(Бакалавр / Магистр)*

г. Казань, 2026

Программу разработал(и):

Наименование кафедры	Должность, уч.степень, уч.звание	ФИО разработчика
ЭМС	Доцент, канд. физ-мат. наук	Клейдман Ольга Владимировна

Согласование	Наименование подразделения	Дата	№ протокола	Подпись
Одобрена	ЭМС	16.03.2026	8	_____ Зав.каф., д.т.н., доц. Мингалеева Г. Р.
Согласована	ЭМС	16.03.2026	8	_____ Зав.каф., д.т.н., доц. Мингалеева Г. Р.
Согласована	Учебно-методический совет института ИАТЭ	17.03.2026	7	_____ Директор, к.т.н., доц. Гапоненко С.О.
Одобрена	Ученый совет института ИАТЭ	17.03.2026	7	_____ Директор, к.т.н., доц. Гапоненко С.О.

## 1. Цель, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине

*(Цель и задачи освоения дисциплины, соответствующие цели ОП)*

Целью освоения дисциплины «Динамика и прочность газовых турбин» является формирование у студентов системных знаний в области динамики и прочности элементов газовых турбин, а также умений применять эти знания для выполнения оценочных и верификационных расчетов с использованием современных методов цифрового инжиниринга в целях обеспечения надежности и эффективности проектируемых газотурбинных установок с учётом колебаний, ползучести, термоусталости, трещиностойкости, износа.

Задачами дисциплины являются:

- сформировать знания о физических принципах нагружения, критериях прочности и динамической устойчивости элементов ГТУ;
- изучение конструкций узлов и деталей турбин, подверженных вибрации, специфических условий их работы, способов математического описания процессов;
- развить умения выбирать и применять математические модели для оценки напряжённо-деформированного состояния и динамического поведения типовых узлов турбин;
- привить навыки постановки и проведения верификационных расчётов на прочность и колебания в среде специализированного ПО (на примере ANSYS Mechanical на основе МКЭ);
- научить анализировать результаты численных расчётов, формулировать выводы и конструктивные рекомендации по повышению ресурса и надёжности.

Компетенции и индикаторы, формируемые у обучающихся:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора
ПК-2 Способен к проектированию газотурбинных установок и двигателей с применением методов цифрового инжиниринга	ПК-2.1 Проводит комплекс расчетов элементов газотурбинных установок и двигателей с применением специализированного ПО

## 2. Место дисциплины в структуре ОП

Предшествующие дисциплины (модули), практики, НИР, др. «Математика», «Программное обеспечение и программирование в профессиональной деятельности», «Начертательная геометрия и инженерная графика», «Материаловедение и технология конструкционных материалов», «Механика», «Теоретические основы теплотехники», «Технологии машиностроения», «Методы моделирования и исследования», «Проектно-конструкторская деятельность в энергомашиностроении», «Энергетические установки и двигатели», «Вычислительная механика деформирования и разрушения».

Последующие дисциплины (модули), практики, НИР, др. «Разработка конструкций газотурбинных установок», «Диагностика газотурбинных

установок», производственная практика (преддипломная), подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы, НИР.

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1. Структура дисциплины

Для очной формы обучения

Вид учебной работы	Всего ЗЕ	Всего часов	Семестр(ы)
			7
ОБЩАЯ ТРУДОЕМКОСТЬ ДИСЦИПЛИНЫ	3	108	108
КОНТАКТНАЯ РАБОТА*	-	42	42
АУДИТОРНАЯ РАБОТА	0,94	34	34
Лекции	0,5	18	18
Практические (семинарские) занятия	0,44	16	16
Лабораторные работы	-	0	0
САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА ОБУЧАЮЩЕГОСЯ	2,06	74	74
Проработка учебного материала	2,06	74	74
Курсовой проект	0	0	0
Курсовая работа	0	0	0
Подготовка к промежуточной аттестации	0	0	0
Промежуточная аттестация:			3
			-

#### 3.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и видам занятий

Разделы дисциплины	Всего часов	Распределение трудоемкости по видам учебной работы				Формы и вид контроля	Индексы индикаторов формируемых компетенций
		лекции	лаб. раб.	пр. зан.	сам. раб.		
Раздел 1	52	10	0	8	34	ТК1	ПК-2.1
Раздел 2	28	4	0	4	20	ТК2	ПК-2.1
Раздел 3	28	4	0	4	20	ТК3	ПК-2.1
Зачет	0				0	<b>ОМ 1</b>	ПК-2.1
<b>Итого за 7 семестр</b>	<b>108</b>	<b>18</b>	<b>0</b>	<b>16</b>	<b>74</b>		
<b>ИТОГО</b>	<b>108</b>	<b>18</b>	<b>0</b>	<b>16</b>	<b>74</b>		

#### 3.3. Содержание дисциплины

**Раздел 1.** Введение в деформации, прочность и износ турбин, численные методы решения, МКЭ.

Тема 1.1. Условия работы и свойства материалов, используемых при проектировании турбомашин. Законы деформирования и критерии прочности

при умеренных температурах. Ползучесть и длительная прочность материалов. Законы знакопеременного (циклического) деформирования и критерии прочности при малоциклового усталости. Многоцикловая усталость и расчет долговечности. Трещинообразование и трещиностойкость. Коррозионный и эрозионный износ в турбомашинах. Демпфирующая способность конструкционных материалов.

Тема 1.2. Основы метода конечных элементов (МКЭ) в численных расчетах, используемых при проектировании элементов турбин. Практическое применение метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Основные стадии программирования в ANSYS. Препроцессорная подготовка, приложение нагрузки, задание граничных условий, выбор анализа, постпроцессор. Методика работы с программой при решении статических прочностных задач.

Тема 1.3. Прочность элементов статора. Тепловые расширения паровой турбины. Напряжения и деформации корпусов турбин в условиях упругости. Ползучесть и длительная прочность элементов корпуса. Диафрагмы турбомашин. Подшипники турбомашин и их динамические характеристики. Методы расчета.

### **Раздел 2. Прочность и колебания рабочих лопаток турбин**

Тема 2.1. Рабочие лопатки газовых турбин. Растяжение и изгиб рабочих лопаток, влияние центробежных и аэродинамических сил, влияние связей. Температурные поля, ползучесть и длительная прочность рабочих лопаток турбин. Прочность замковых соединений лопаток с ротором. Применение МКЭ.

Тема 2.2. Причины колебаний лопаток. Свободные колебания, собственные частоты и главные формы колебаний лопаток и численные методы расчёта. Влияние вращения на собственные частоты колебаний лопаток и пакетов. Вынужденные колебания лопаток. Вибрационная надежность лопаточного аппарата турбомашин.

### **Раздел 3. Прочность дисков и роторов, и колебания роторов турбин**

Тема 3.1. Условия работы дисков и роторов. НДС в дисках и роторах в условиях упругости и ползучести. Трещиностойкость дисков в условиях коррозионной среды. Применение МКЭ.

Тема 3.2. Причины колебаний роторов. Инерция поворота и гироскопическое действие дисков. Самовозбуждающиеся колебания ротора. Вибрационная надежность турбоагрегатов.

### **3.4. Тематический план практических занятий**

1. Трещиностойкость. Определение критической величины трещины  $l_{кр}$ , которая обнаружена в корневом сечении лопатки или на расточке цельнокованого ротора турбин.

2. Прочность элементов статора. Диафрагмы турбин, определение прогибов, напряжений, коэффициентов запаса по длительной прочности аналитическими методами;

3. Напряжения и деформации корпусов турбин. Расчёт фланцев

горизонтального разъёма. Применение МКЭ.

Динамические характеристики подшипников турбин;

4. Ползучесть и длительная прочность материалов. Определение удлинения рабочей лопатки газовой турбины за время  $t$  тыс.ч, работающей при постоянной температуре. Определение времени до разрушения при определённой температуре и остаточного ресурса. Аналитические методы расчёта;

5. Расчёт в ANSYS НДС рабочей лопатки газовой турбины с учётом действия центробежной силы и ползучести.

6. Вынужденные колебания лопаток. Отстройка от резонансов и вибрационная диаграмма;

7. Расчёт НДС диска турбины с учётом ползучести в ANSYS.

8. Динамика ротора. Определение частоты собственных колебаний и критические угловые скорости вращения ротора с учётом гироскопического эффекта и угловой инерционности диска, влиянии эффекта на частоты в зависимости от расположения диска ротора.

### 3.5. Тематический план лабораторных работ

Данный вид работы не предусмотрен учебным планом.

### 3.6. Курсовой проект /курсовая работа

Данный вид работы не предусмотрен учебным планом.

## 4. Оценивание результатов обучения

Оценивание результатов обучения по дисциплине осуществляется в рамках текущего контроля и промежуточной аттестации, проводимых по балльно-рейтинговой системе (БРС).

Шкала оценки результатов обучения по дисциплине:

Код компетенции	Код индикатора компетенции	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Уровень сформированности индикатора компетенции			
			Высокий	Средний	Ниже среднего	Низкий
			от 85 до 100	от 70 до 84	от 55 до 69	от 0 до 54
			Шкала оценивания			
			отлично	хорошо	удовлетворительно	неудовлетворительно
			Зачтено			не зачтено
ПК-2	ПК-2.1 Проводит комплекс расчетов элементов газотурбинных установок и двигателей с	знать: - основы механики деформируемого твёрдого тела применительно к элементам ГТУ, методы расчёта на	Студент самостоятельно извлекает новые знания по темам дисциплины	Студент демонстрирует уверенно аналитические знания. Уровень	Студент демонстрирует знание-знакомство, знание-копию.	Уровень знаний ниже минимальных требований, имеют

	статическую и динамическую прочность	ны. Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок	знаний в объеме, соответствующем программе, имеет место несколько негрубых ошибок	Минимально допустимый уровень знаний, имеет место много негрубых ошибок	место грубые ошибки	
		уметь:				
		- выполнять оценочные аналитические расчёты, строить конечно-элементные модели узлов турбины, проводить их прочностной и модальный анализ с помощью ПО	Студент умеет самостоятельно творчески выполнять действия, связанные с решением исследовательских задач. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Студент умеет самостоятельно выполнять действия по решению нестандартных задач. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с негрубыми ошибками, выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Студент умеет корректно выполнять предписанные действия по инструкции. Продемонстрированы основные умения, решены типовые задачи с негрубыми ошибками, выполнены все задания, но не в полном объеме	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения, имеют место грубые ошибки
		владеть:				
	- методами компьютерного инжиниринга	Продемонстрированы навыки	Продемонстрированы базовые	Имеется минимальный	При решении стандарт	

		для решения задач динамики и прочности в контексте создания цифровых моделей газотурбинной техники; - технологией анализа и интерпретации результатов компьютерного моделирования для выдачи обоснованных конструктивных рекомендаций	при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	ных задач не продемонстрированы базовые навыки, имеют место грубые ошибки
--	--	--	--	--	---	---

Оценочные материалы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации приведены в Приложении к рабочей программе дисциплины.

Полный комплект заданий и материалов, необходимых для оценивания результатов обучения по дисциплине, хранится на кафедре разработчика.

## **5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **5.1. Учебно-методическое обеспечение**

#### **5.1.1. Основная литература**

1. Динамика и прочность турбомашин: учебник / А. Г. Костюк. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва : Издательский дом МЭИ, 2020. - 472 с. - URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383014271.html>. - ISBN 978-5-383-01427-1. - Текст : электронный.

2. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник / А. Г. Костюк [и др.]; под ред. А. Г. Костюка. - М. : Издательский дом МЭИ, 2017. - 557 с. - URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383011577.html>. - ISBN 978-5-383-01157-7. - Текст : электронный.

3. Радин В. П. Метод конечных элементов в динамических задачах сопротивления материалов: учебное пособие / В. П. Радин, Ю. Н. Самогин, В. П. Чирков. - Москва : Физматлит, 2013. - 316 с. - URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922114851.html>. - ISBN 978-5-9221-1485-1. - Текст : электронный

4. Зрелов В. А. Отечественные газотурбинные двигатели. Основные параметры и конструктивные схемы : учебное пособие для вузов / В. А. Зрелов. - Москва : Машиностроение, 2005. - 336 с. : ил. - ISBN 5-217-03254-5. - Текст :

непосредственный.

### 5.1.2. Дополнительная литература

1. Введение в метод конечных элементов: учебное пособие для вузов / В.Н.Шлянников, Б.В.Ильченко. - Казань : КГЭУ, 2004. - 144 с. - ISBN 5-89873-100-8. - Текст : непосредственный.

2. Сахин В. В. Устройство и действие энергетических установок. Кн. 2. Газовые турбины. Теплообменные аппараты : учебное пособие / В. В. Сахин. — Санкт-Петербург : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2015. — 133 с. — ISBN 978-5-85546-865-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/75162>.

3. Шигапов А. Б. Стационарные газотурбинные установки тепловых электрических станций: учебное пособие для вузов / А. Б. Шигапов. - 2-е изд., доп. и перераб. - Казань : КГЭУ, 2009. - 416 с. - ISBN 978-5-89873-226-4. - Текст : непосредственный.

4. Основы современной энергетики: учебник; в 2 т / под ред. Е. В. Аметистова. - 5-е изд., стереотип. - М. : Издательский дом МЭИ, 2019. - Текст : электронный. Т. 1 : Современная теплоэнергетика / А. Д. Трухний [и др.] ; под ред. А. Д. Трухния. - 2019. - 472 с. - URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383013373.html>. - ISBN 978-5-383-01337-3

5. Физические величины: справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. - М. : Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с. - Текст : непосредственный.

6. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. - 2-е изд., испр. - М. : Едиториал УРСС, 2004. - 272 с. - ISBN 5-354-00729-1. - Текст : непосредственный.

7. Бауман Н. Я. Технология производства паровых и газовых турбин / Н. Я. Бауман, М. И. Яковлев, И. Н.

## 5.2. Информационное обеспечение

### 5.2.1. Электронные и интернет-ресурсы

№ п/п	Наименование электронных и интернет-ресурсов	Ссылка
1	Электронно-библиотечная система «Лань»	<a href="https://e.lanbook.com/">https://e.lanbook.com/</a>
2	Электронно-библиотечная система «ibooks.ru»	<a href="https://ibooks.ru/">https://ibooks.ru/</a>
3	Электронно-библиотечная система «book.ru»	<a href="https://www.book.ru/">https://www.book.ru/</a>
4	<a href="http://www.rubricon.com">Энциклопедии, словари, справочники</a>	<a href="http://www.rubricon.com">http://www.rubricon.com</a>
5	Портал "Открытое образование"	<a href="http://npoed.ru">http://npoed.ru</a>
6	Единое окно доступа к образовательным ресурсам	<a href="http://window.edu.ru">http://window.edu.ru</a>
7.	АО «Казанское моторостроительное производственное объединение»	<a href="http://www.kmpo.ru/">http://www.kmpo.ru/</a>
8.	ПАО «ОДК-Сатурн»	<a href="https://www.uec-saturn.ru/">https://www.uec-saturn.ru/</a>
9.	АО «ОДК Пермские моторы»	<a href="https://perm-motors.ru/">https://perm-motors.ru/</a>
10.	АО «ОДК Климов»	<a href="https://www.klimov.ru/">https://www.klimov.ru/</a>
11.	АО «Уральский турбинный завод»	<a href="https://www.utz.ru/">https://www.utz.ru/</a>
12.	ПАО «Калужский турбинный завод»	<a href="https://paoktz.ru/">https://paoktz.ru/</a>

### 5.2.2. Профессиональные базы данных / Информационно-справочные системы

№ п/п	Наименование профессиональных баз данных	Адрес	Режим доступа
1	Российская национальная библиотека	<a href="http://nlr.ru/">http://nlr.ru/</a>	<a href="http://nlr.ru/">http://nlr.ru/</a>
2	Платформа SpringerLink	<a href="http://www.link.springer.com">www.link.springer.com</a>	<a href="http://www.link.springer.com">www.link.springer.com</a>
3	КиберЛенинка	<a href="https://cyberleninka.ru/">https://cyberleninka.ru/</a>	<a href="https://cyberleninka.ru/">https://cyberleninka.ru/</a>
4	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU	<a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>	<a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>
5	Национальная электронная библиотека (НЭБ)	<a href="https://rusneb.ru/">https://rusneb.ru/</a>	<a href="https://rusneb.ru/">https://rusneb.ru/</a>
6	Техническая библиотека	<a href="http://techlibrary.ru">http://techlibrary.ru</a>	<a href="http://techlibrary.ru">http://techlibrary.ru</a>
7	eLIBRARY.RU	<a href="http://www.elibrary.ru">www.elibrary.ru</a>	<a href="http://www.elibrary.ru">www.elibrary.ru</a>

### 5.2.3. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение дисциплины

№ п/п	Наименование программного обеспечения	Описание	Реквизиты подтверждающих документов
1	Windows 7 Профессиональная (Starter)	Пользовательская операционная система	ЗАО "СофтЛайнТрейд" №2011.25486 от 28.11.2011 Неискл. право. Бессрочно
2	Office Standard 2007 Russian OLP NL AcademicEdition+	Пакет программных продуктов содержащий в себе необходимые офисные программы	ЗАО "СофтЛайнТрейд" №21/2010 от 04.05.2010 Неискл. право. Бессрочно
3	LMS2 Moodle	ПО для эффективного онлайн-взаимодействия преподавателя и студента	Свободная лицензия Неискл. право. Бессрочно
4	Браузер Chrome	Система поиска информации в сети интернет	Свободная лицензия Неискл. право. Бессрочно
5	Компас-3D V13 Модуль АРМ FEM	Программное обеспечение для трёхмерного моделирования, дополнительный модуль с применением МКЭ в механических задачах	ЗАО "СофтЛайнТрейд" №33659/KZN12 от 04.05.2012 Неискл. право. Бессрочно

6	APM WinMachine	ПО для проведения расчета и проектирования механического оборудования и конструкций в области машиностроения, в том числе с применением МКЭ.	ООО "НТЦ "АПМ" №2018.53027 от 15.10.2018 Неискл. право. Бессрочно
7	ANSYS	ПО для анализа напряженно-деформированного состояния элементов конструкций методом конечных элементов и прогнозирования остаточного ресурса	лицензия

### 6. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Наименование вида учебной работы	Наименование учебной аудитории, специализированной лаборатории	Перечень необходимого оборудования и технических средств обучения
Лекции	Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа	Специализированная учебная мебель, технические средства обучения, служащие для представления учебной информации большой аудитории (мультимедийный проектор, компьютер (ноутбук), экран), демонстрационное оборудование, учебно-наглядные пособия
Практические занятия	Учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации Д-514	Специализированная учебная мебель, технические средства обучения (доска аудиторная, компьютеры в комплекте с монитором, учебные плакаты с изображениями деталей и узлов) и др., лицензионное программное обеспечение
Самостоятельная работа	Компьютерный класс с выходом в Интернет Д-514	Специализированная учебная мебель, компьютеры, технические средства обучения (мультимедийный проектор, компьютер (ноутбук), экран), видеокамеры, программное обеспечение
	Читальный зал библиотеки	Специализированная мебель, компьютерная техника с возможностью выхода в Интернет и обеспечением доступа в ЭИОС, экран, мультимедийный проектор, программное обеспечение

### 7. Особенности организации образовательной деятельности для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Лица с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) и инвалиды имеют возможность беспрепятственно перемещаться из одного учебно-лабораторного

корпуса в другой, подняться на все этажи учебно-лабораторных корпусов, заниматься в учебных и иных помещениях с учетом особенностей психофизического развития и состояния здоровья.

Для обучения лиц с ОВЗ и инвалидов, имеющих нарушения опорно-двигательного аппарата, обеспечены условия беспрепятственного доступа во все учебные помещения. Информация о специальных условиях, созданных для обучающихся с ОВЗ и инвалидов, размещена на сайте университета [www//kgeu.ru](http://www//kgeu.ru). Имеется возможность оказания технической помощи ассистентом, а также услуг сурдопереводчиков и тифлосурдопереводчиков.

Для адаптации к восприятию лицами с ОВЗ и инвалидами с нарушенным слухом справочного, учебного материала по дисциплине обеспечиваются следующие условия:

- для лучшей ориентации в аудитории, применяются сигналы оповещения о начале и конце занятия (слово «звонок» пишется на доске);
- внимание слабослышащего обучающегося привлекается педагогом жестом (на плечо кладется рука, осуществляется нерезкое похлопывание);
- разговаривая с обучающимся, педагогический работник смотрит на него, говорит ясно, короткими предложениями, обеспечивая возможность чтения по губам.

Компенсация затруднений речевого и интеллектуального развития слабослышащих обучающихся проводится путем:

- использования схем, диаграмм, рисунков, компьютерных презентаций с гиперссылками, комментирующими отдельные компоненты изображения;
- регулярного применения упражнений на графическое выделение существенных признаков предметов и явлений;
- обеспечения возможности для обучающегося получить адресную консультацию по электронной почте по мере необходимости.

Для адаптации к восприятию лицами с ОВЗ и инвалидами с нарушениями зрения справочного, учебного, просветительского материала, предусмотренного образовательной программой по выбранному направлению подготовки, обеспечиваются следующие условия:

- ведется адаптация официального сайта в сети Интернет с учетом особых потребностей инвалидов по зрению, обеспечивается наличие крупношрифтовой справочной информации о расписании учебных занятий;
- педагогический работник, его собеседник (при необходимости), присутствующие на занятии, представляются обучающимся, при этом каждый раз называется тот, к кому педагогический работник обращается;
- действия, жесты, перемещения педагогического работника коротко и ясно комментируются;
- печатная информация предоставляется крупным шрифтом (от 18 пунктов), тотально озвучивается;
- обеспечивается необходимый уровень освещенности помещений;
- предоставляется возможность использовать компьютеры во время занятий и право записи объяснений на диктофон (по желанию обучающихся).

Форма проведения текущей и промежуточной аттестации для

обучающихся с ОВЗ и инвалидов определяется педагогическим работником в соответствии с учебным планом. При необходимости обучающемуся с ОВЗ, инвалиду с учетом их индивидуальных психофизических особенностей дается возможность пройти промежуточную аттестацию устно, письменно на бумаге, письменно на компьютере, в форме тестирования и т.п., либо предоставляется дополнительное время для подготовки ответа.

## **8. Методические рекомендации для преподавателей по организации воспитательной работы с обучающимися.**

Методическое обеспечение процесса воспитания обучающихся выступает одним из определяющих факторов высокого качества образования. Преподаватель вуза, демонстрируя высокий профессионализм, эрудицию, четкую гражданскую позицию, самодисциплину, творческий подход в решении профессиональных задач, в ходе образовательного процесса способствует формированию гармоничной личности.

При реализации дисциплины преподаватель может использовать следующие методы воспитательной работы:

- методы формирования сознания личности (беседа, диспут, внушение, инструктаж, контроль, объяснение, пример, самоконтроль, рассказ, совет, убеждение и др.);

- методы организации деятельности и формирования опыта поведения (задание, общественное мнение, педагогическое требование, поручение, приучение, создание воспитывающих ситуаций, тренинг, упражнение, и др.);

- методы мотивации деятельности и поведения (одобрение, поощрение социальной активности, порицание, создание ситуаций успеха, создание ситуаций для эмоционально-нравственных переживаний, соревнование и др.)

При реализации дисциплины преподаватель должен учитывать следующие направления воспитательной деятельности:

### *Гражданское и патриотическое воспитание:*

- формирование у обучающихся целостного мировоззрения, российской идентичности, уважения к своей семье, обществу, государству, принятым в семье и обществе духовно-нравственным и социокультурным ценностям, к национальному, культурному и историческому наследию, формирование стремления к его сохранению и развитию;

- формирование у обучающихся активной гражданской позиции, основанной на традиционных культурных, духовных и нравственных ценностях российского общества, для повышения способности ответственно реализовывать свои конституционные права и обязанности;

- развитие правовой и политической культуры обучающихся, расширение конструктивного участия в принятии решений, затрагивающих их права и интересы, в том числе в различных формах самоорганизации, самоуправления, общественно-значимой деятельности;

- формирование мотивов, нравственных и смысловых установок личности, позволяющих противостоять экстремизму, ксенофобии, дискриминации по социальным, религиозным, расовым, национальным

признакам, межэтнической и межконфессиональной нетерпимости, другим негативным социальным явлениям.

*Духовно-нравственное воспитание:*

- воспитание чувства достоинства, чести и честности, совестливости, уважения к родителям, учителям, людям старшего поколения;

- формирование принципов коллективизма и солидарности, духа милосердия и сострадания, привычки заботиться о людях, находящихся в трудной жизненной ситуации;

- формирование солидарности и чувства социальной ответственности по отношению к людям с ограниченными возможностями здоровья, преодоление психологических барьеров по отношению к людям с ограниченными возможностями;

- формирование эмоционально насыщенного и духовно возвышенного отношения к миру, способности и умения передавать другим свой эстетический опыт.

*Культурно-просветительское воспитание:*

- формирование эстетической картины мира;

- формирование уважения к культурным ценностям родного города, края, страны;

- повышение познавательной активности обучающихся.

*Научно-образовательное воспитание:*

- формирование у обучающихся научного мировоззрения;

- формирование умения получать знания;

- формирование навыков анализа и синтеза информации, в том числе в профессиональной области.

**Вносимые изменения и утверждения на новый учебный год**

№ п/п	№ раздела внесения изменений	Дата внесения изменений	Содержание изменений	«Согласовано» Зав. каф. реализующей дисциплину	«Согласовано» председатель УМК института (факультета), в состав которого входит выпускающая
1	2	3	4	5	6
1					
2					
3					



КГУ

*Приложение к рабочей  
программе дисциплины*

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования**  
**«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**(ФГБОУ ВО «КГУ»)**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ по дисциплине

*Б1.В.ДЭ.01.01.02 Динамика и прочность турбомашин*  
*(Наименование дисциплины в соответствии с учебным планом)*

---

Направление подготовки \_\_\_\_\_ 13.03.03 Энергетическое машиностроение \_\_\_\_\_  
*(Код и наименование направления подготовки)*

Квалификация \_\_\_\_\_ Бакалавр \_\_\_\_\_  
*(Бакалавр / Магистр)*

г. Казань, 2026



В письменной форме по билетам									0-30
-------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	------

## 2. Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации

Шкала оценки результатов обучения по дисциплине:

Код компетенции	Код индикатора компетенции	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Уровень сформированности индикатора компетенции				
			Высокий	Средний	Ниже среднего	Низкий	
			от 85 до 100	от 70 до 84	от 55 до 69	от 0 до 54	
			Шкала оценивания				
			отлично	хорошо	удовлетворительно	неудовлетворительно	
			Зачтено			не зачтено	
ПК-2	ПК-2.1	знать:					
		- основы механики деформируемого твёрдого тела применительно к элементам ГТУ, методы расчёта на статическую и динамическую прочность	Студент самостоятельно извлекает новые знания по темам дисциплины. Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок	Студент демонстрирует уверенно аналитические знания. Уровень знаний в объеме, соответствующем программе, имеет место несколько негрубых ошибок	Студент демонстрирует знание-знакомство, знание-копию. Минимально допустимый уровень знаний, имеет место много негрубых ошибок	Уровень знаний ниже минимальных требований, имеют место грубые ошибки	
уметь:							
		- выполнять оценочные аналитические расчёты, строить конечно-элементные модели узлов турбины, проводить их прочностной и модальный анализ с помощью ПО	Студент умеет самостоятельно творчески выполнять действия, связанные с решением исследовательских задач.	Студент умеет самостоятельно выполнять действия по решению нестандартных задач. Продемонстрирован	Студент умеет корректно выполнять предписанные действия по инструкции. Продемонстрированы	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения, имеют место грубые ошибки	

			Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	ы все основные умения, решены все основные задачи с негрубыми ошибками, выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	основные умения, решены типовые задачи с негрубыми ошибками, выполнены все задания, но не в полном объеме	
		владеть:				
		- методами компьютерного инжиниринга для решения задач динамики и прочности в контексте создания цифровых моделей газотурбинной техники; - технологией анализа и интерпретации результатов компьютерного моделирования для выдачи обоснованных конструктивных рекомендаций	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки, имеют место грубые ошибки

Оценка **«отлично»** выставляется за выполнение *расчетных работ в семестре; тестовых заданий; глубокое понимание задач динамики и прочности в контексте создания цифровых моделей газотурбинной техники, полные и содержательные ответы на вопросы билета (теоретическое и практическое задание);*

Оценка «хорошо» выставляется за выполнение *расчетных работ в семестре; тестовых заданий; понимание задач динамики и прочности в контексте создания цифровых моделей газотурбинной техники, ответы на вопросы билета (теоретическое или практическое задание);*

Оценка «удовлетворительно» выставляется за выполнение *расчетных работ в семестре и тестовых заданий;*

Оценка «неудовлетворительно» выставляется за слабое и неполное выполнение *расчетных работ в семестре и тестовых заданий.*

### 3. Перечень оценочных средств

Краткая характеристика оценочных средств, используемых при текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации обучающегося по дисциплине:

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Описание оценочного средства
Опрос по разделам (темам)	Знание основных понятий темы/раздела/дисциплины	Перечень определений основных понятий темы/дисциплины
Практическое задание (ПЗ)	Средство оценки умения применять полученные теоретические знания в практической ситуации. Задание направлено на оценивание компетенций по дисциплине, содержит четкую инструкцию по выполнению или алгоритм действий	Комплект задач и заданий

### 4. Перечень контрольных заданий или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений и навыков, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения дисциплины

*Пример задания*

**Для текущего контроля ТК1:**

Проверяемая компетенция: ПК-2.1 Проводит комплекс расчетов элементов газотурбинных установок и двигателей с применением специализированного ПО

Вопросы к комплексному заданию ТК1

1. Свойства материалов, используемых при проектировании турбомашин.
2. Критерии прочности при умеренных температурах.
3. Что такое ползучесть материала? Когда необходимо учитывать в расчётах?
4. Длительная прочность материалов.
5. Виды усталости и долговечность.
6. Тепловые расширения паровой турбины.

7. Принцип Лагранжа, на котором основан метод конечных элементов.
8. Что именно должен задать инженер в препроцессоре программы ANSYS, чтобы учесть, например, ползучесть материала?
9. Как неправильное задание граничных условий, имитирующих опоры, в ANSYS может повлиять на результаты расчёта НДС корпуса и всего статора?
10. Основные виды износа материалов в турбине. Как информация о них, полученная из теории (Тема 1.1), должна влиять на этап препроцессорной подготовки геометрической модели для МКЭ-расчёта (Тема 1.2), например, при оценке остаточного ресурса детали?

Типовые задачи:

1. Определить минимальную толщину масляного слоя и температуру нагрева масла в эллиптическом подшипнике при данных нагрузке на подшипник, длине, диаметре, зазоре, угловой скорости ротора, свойствах масла
2. Определить максимальные прогибы и напряжения в диафрагме и сопловой лопатке. Оценить коэффициенты запаса прочности по длительной прочности. Даны давление пара, рабочая температура, геометрические данные, число лопаток, свойства материалов.
3. Рабочая лопатка из жаропрочного сплава работает при постоянной температуре  $T$  и постоянном растягивающем напряжении  $\sigma$ . Для материала лопатки справедлив степенной закон установившейся ползучести. Длина лопатки дана. Требуется: 1) Рассчитать удлинение лопатки  $\Delta L$  за ресурс  $t = 25\ 000$  часов. 2) Используя условие разрушения при достижении деформации  $\varepsilon_{кр} = 0.02$ , оценить время до разрушения  $t_p$  и остаточный ресурс после наработки  $t$ . 3) Назовите, какой именно материальной моделью (например, в ANSYS) и какими входными данными будете описывать такое поведение материала при создании МКЭ-модели для расчета ползучести диска или лопатки. Поясните, зачем в инженерной практике обязательно выполнять такой предварительный оценочный аналитический расчет перед сложным нелинейным МКЭ-моделированием.
4. В корневом сечении рабочей лопатки турбины при дефектоскопии обнаружена поверхностная трещина глубиной  $l = 0.5$  мм. Материал лопатки — жаропрочный никелевый сплав. При рабочей температуре  $750^\circ\text{C}$  его вязкость разрушения  $K_{1c} = 55$  МПа $\cdot\sqrt{\text{м}}$ , коэффициент концентрации напряжений в сечении дан. Максимальное растягивающее напряжение в данном сечении от центробежных сил составляет  $\sigma = 300$  МПа. Требуется: 1) Рассчитать критический размер трещины  $l_{кр}$ , при котором произойдет хрупкое разрушение. 2) Определить, допускается ли дальнейшая эксплуатация лопатки с обнаруженным дефектом согласно правилам, если минимальный требуемый запас  $n = 3.0$ . 3) Кратко пояснить, как результаты такого аналитического расчета используются для настройки параметров расчета усталостного роста трещины в программе (например, в модуле ANSYS Mechanical).

**Для текущего контроля ТК1:**

Проверяемая компетенция: ПК-2.1 Проводит комплекс расчетов элементов газотурбинных установок и двигателей с применением специализированного ПО

Вопросы к комплексному заданию ТК2

1. Причины колебаний лопаток.
2. Классификация колебаний лопаток.
3. Полный комплекс нагрузок, действующих на рабочую лопатку газовой турбины в установившемся режиме. Как эти нагрузки (центробежные, газодинамические, тепловые) учитываются при создании конечно-элементной модели для статического прочностного расчета в ANSYS?
4. Какое влияние на статическую прочность и ресурс лопатки оказывает неравномерное температурное поле по её высоте? Как этот фактор учитывается в аналитической оценке и при задании свойств материала в МКЭ-модели?
5. Принцип работы и основные механизмы нагружения замкового соединения «лопатка-диск». Какие упрощения и особенности необходимо учесть при построении МКЭ-модели для оценки контактных напряжений в этом узле?
6. Принципиальная разница между изолированной лопаткой и лопаткой в пакете (с бандажной лентой или проволокой) с точки зрения их динамических характеристик.
7. Что такое «вибрационная диаграмма» лопаточного аппарата и как она строится? Как инженер использует её для обеспечения вибрационной надежности при проектировании и отстройке от резонансных режимов?
8. Последовательность действий в программном комплексе ANSYS для решения двух задач: а) модального анализа собственных частот и форм колебаний вращающейся лопатки; б) гармонического анализа вынужденных колебаний от периодического возбуждения.

Типовые задачи:

1. Комплексный прочностной анализ рабочей лопатки с учетом ползучести. Рабочая лопатка турбины авиационного ГТД из жаропрочного никелевого сплава, температура газа на входе в ступень, геометрия лопатки, частота вращения ротора, свойства материала при рабочей температуре даны. Параметры установившейся ползучести (степенной закон) также даны. Аналитическая оценка: рассчитать центробежное напряжение в корневом сечении лопатки. Оценить скорость деформации ползучести для полученного напряжения. Расчет в ANSYS: создать пошаговую процедуру построения и настройки МКЭ-модели для решения этой задачи в ANSYS Mechanical.
2. Провести анализ резонансной вибрационной диаграммы. Каким образом надо изменить хорду профиля для обеспечения безопасной работы и для отстройки от резонанса при частоте  $50 \text{ с}^{-1}$ , если коэффициент влияния вращения = 3,2? Даны статическая частота пакетов лопаток на колесе 180 Гц при разбросе  $\pm 5\%$ .

### Для текущего контроля ТКЗ:

Проверяемая компетенция: ПК-2.1 Проводит комплекс расчетов элементов газотурбинных установок и двигателей с применением специализированного ПО.

Вопросы к комплексному заданию ТКЗ

1. Причины колебаний роторов.
2. Что такое критическая частота вращения ротора.
3. Основные источники напряжений в диске газовой турбины. Почему напряжения от центробежных сил в диске носят неоднородный характер (распределение по радиусу) и как это учитывается при выборе конструкции диска (постоянной или переменной толщины)?
4. Учет ползучести материала критически важен для оценки долговечности и остаточного ресурса дисков горячей части турбины. Как закон ползучести материализуется в настройках нелинейного статического анализа в МКЭ-программе?
5. Каковы особенности оценки трещиностойкости дисков, работающих в условиях коррозионной среды? Как наличие среды влияет на выбор расчетного критерия и на процедуру оценки остаточного ресурса?
6. Что такое «гироскопический эффект» дисков и как он влияет на зависимость собственных частот роторной системы от скорости вращения?
7. Что понимается под «самовозбуждающимися колебаниями» ротора (например, «масляный вихрь»)? Чем принципиально отличается этот вид неустойчивости от резонансных вынужденных колебаний и почему он особенно опасен?
8. Как динамические характеристики опор (подшипников скольжения) влияют на расчет критических скоростей и анализ устойчивости гибкого ротора? Почему роторную систему всегда рассматривают как совокупность «ротор-опоры-фундамент»?

Типовые задачи:

1. Расчёт НДС диска турбины с учётом ползучести

Диск турбины из жаропрочного сплава. Частота вращения  $n = 8000$  об/мин, температура диска  $T = 650^\circ\text{C}$ . Известны геометрия диска и параметры закона установившейся ползучести материала.

Сформулируйте ключевые отличия в постановке задачи для линейного упругого и нелинейного стационарного анализа с учётом ползучести в ANSYS Mechanical. Какие дополнительные настройки материала и анализа требуются во втором случае?

Примите, что после расчёта в ANSYS получены два поля эквивалентных напряжений: для упругого решения и для решения с учётом ползучести за время  $t = 1000$  ч. В зоне радиальных отверстий под замки лопаток напряжения в расчёте с ползучестью оказались на 15% ниже, чем в упругом. Дайте физическое объяснение этому явлению (перераспределение напряжений вследствие ползучести).

Какой параметр (результат) в постпроцессоре ANSYS является ключевым для оценки остаточного ресурса диска по условию истощения пластичности/ползучести?

2. Для однодискового ротора с невесомым валом на абсолютно жёстких опорах для данных размеров, изгибной жёсткости вала, массе ротора определить критические угловые частоты, пренебрегая угловым смещением диска

3. Динамика ротора с учётом гироскопического эффекта

Двухопорный ротор с одним массивным диском, расположенным несимметрично. Известны масса диска, его полярный и экваториальный моменты инерции, жёсткость вала. Объяснить физическую природу гироскопического эффекта вращающегося диска и его влияние на собственные частоты поперечных изгибных колебаний ротора. Почему это приводит к появлению двух разных критических скоростей для прямой и обратной прецессии?

#### **Для промежуточной аттестации:**

Список примерных вопросов

1. Опишите основные группы нагрузок, действующих на элементы газовой турбины (статор, ротор, лопатки). Как эти нагрузки учитываются при постановке прочностной задачи в CAE-системе (например, ANSYS)?
2. Сравните механизмы разрушения при малоциклового (МЦУ) и многоциклового усталости (МнЦУ). Какие критерии прочности и методы расчета используются для оценки ресурса деталей ГТУ в каждом случае?
3. Объясните физическую природу явления ползучести в материалах рабочих лопаток и дисков. Как учет ползучести влияет на методику оценки их длительной прочности и остаточного ресурса?
4. В чем заключается основная идея метода конечных элементов (МКЭ) и почему он является основным инструментом для решения задач прочности и динамики сложных элементов ГТУ?
5. Опишите основные этапы проведения статического прочностного анализа детали (например, лопатки) в программном комплексе ANSYS: от импорта геометрии до анализа результатов.
6. Каковы основные причины возникновения колебаний рабочих лопаток? Дайте определения свободных и вынужденных колебаний, объясните понятие резонанса и его опасность.
7. Как влияет вращение на спектр собственных частот колебаний изолированной лопатки и лопатки в составе пакета (бандажной лентой)? Как это моделируется в программах, использующих МКЭ?
8. Что такое «вибрационная диаграмма» лопаточного аппарата и как она используется для обеспечения вибрационной надежности при проектировании?
9. Каковы особенности нагружения и расчета на прочность дисков газовых турбин? Объясните характер распределения напряжений от центробежных сил.
10. Перечислите основные причины колебаний роторов турбомашин. Что

такое гироскопический эффект диска и как он влияет на критические скорости вращения ротора?

11. Объясните понятие «динамическая характеристика подшипника скольжения». Почему учет этих характеристик важен для расчета критических скоростей и устойчивости роторной системы?
12. Какие факторы определяют трещиностойкость (вязкость разрушения) материалов дисков и лопаток? Как проводится оценка критического размера трещины в расчетной практике?
13. Проанализируйте методику расчета напряженно-деформированного состояния корпусов (статоров) турбин. Какие нагрузки являются определяющими и как учитываются тепловые деформации?
14. Сформулируйте типовую последовательность действий (алгоритм) инженера-расчетчика при верификации прочности нового диска турбины с использованием методов цифрового проектирования.
15. По результатам МКЭ-анализа получены поля эквивалентных напряжений в диске турбины. Каков дальнейший алгоритм действий инженера для принятия решения о соответствии конструкции критериям прочности и выдачи рекомендаций по ее оптимизации?