

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УТВЕРЖДАЮ
Директор по образовательной
деятельности

_____ С.Т. Князев
«__» _____

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА МОДУЛЯ

Код модуля	Модуль
1162478	Динамика и прочность турбомашин

Екатеринбург

Перечень сведений о рабочей программе модуля	Учетные данные
Образовательная программа 1. Системный инжиниринг и цифровое проектирование	Код ОП 1. 07-29.03.01/33.01
Направление подготовки 1. Энергетическое машиностроение; 2. Инженерные науки	Код направления и уровня подготовки 1. 13.03.03; 2. 07-29.03.01

Программа модуля составлена авторами:

№ п/п	Фамилия Имя Отчество	Ученая степень, ученое звание	Должность	Подразделение
1	Блинов Виталий Леонидович	кандидат технических наук, доцент	Доцент	турбин и двигателей
2	Комаров Олег Вячеславович	кандидат технических наук, доцент	Заведующий кафедрой	турбин и двигателей
3	Недошивина Татьяна Анатольевна	кандидат технических наук, доцент	Доцент	турбин и двигателей

Согласовано:

Управление образовательных программ

Р.Х. Токарева

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОДУЛЯ **Динамика и прочность турбомашин**

1.1. Аннотация содержания модуля

Модуль «Динамика и прочность турбомашин» направлен на изучение конструкций деталей и узлов турбомашин, расчетных и экспериментальных методов анализа прочностного и вибрационного состояния деталей и узлов газотурбинных двигателей в процессе их жизненного цикла.

1.2. Структура и объем модуля

Таблица 1

№ п/п	Перечень дисциплин модуля в последовательности их освоения	Объем дисциплин модуля и всего модуля в зачетных единицах
1	Динамика и прочность турбомашин	7
ИТОГО по модулю:		7

1.3. Последовательность освоения модуля в образовательной программе

Пререквизиты модуля	1. Теоретические основы турбостроения
Постреквизиты и кореквизиты модуля	1. Специальные вопросы проектирования и конструирования газотурбинных установок

1.4. Распределение компетенций по дисциплинам модуля, планируемые результаты обучения (индикаторы) по модулю

Таблица 2

Перечень дисциплин модуля	Код и наименование компетенции	Планируемые результаты обучения (индикаторы)
1	2	3
Динамика и прочность турбомашин	ПК-10 - Способен принимать обоснованные решения о конструктивном исполнении деталей и узлов газотурбинной техники, используя методы тепловых, и газодинамических	З-1 - Описать конструктивные элементы деталей, их связи с общей конструкцией агрегата, условия работы деталей турбомашин и важнейшие факторы, определяющие их надежность У-1 - Выбирать методы распределения напряжений и деформаций в конструкциях деталей и узлов газотурбинной техники, в том числе при колебаниях

	<p>расчетов и цифровые инструменты</p>	<p>У-2 - Обосновано выбирать конструктивные элементы деталей и узлов газотурбинной техники на основе термодинамических и прочностных расчетов</p> <p>П-1 - Иметь практический опыт моделирования и управления прочностью и надежностью деталей турбомашин, применяя цифровые инструменты</p>
	<p>ПК-13 - Способен в составе коллектива исполнителей проводить испытания деталей, узлов и агрегатов авиационной техники, анализировать результаты и согласовывать внесение изменений в конструкторскую и технологическую документацию со службами опытного производства</p>	<p>З-1 - Характеризовать методы экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния деталей и узлов турбомашин</p> <p>У-1 - Анализировать результаты расчетных и экспериментальных исследований для разработки рекомендации по улучшению эксплуатационных показателей надежности</p> <p>П-1 - Предлагать рекомендации по внесению изменений в конструкцию деталей, узлов и агрегатов двигателя на основе анализа результатов расчетного и экспериментального исследований динамики и прочности</p>

1.5. Форма обучения

Обучение по дисциплинам модуля может осуществляться в очной формах.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
Динамика и прочность турбомашин

Рабочая программа дисциплины составлена авторами:

№ п/п	Фамилия Имя Отчество	Ученая степень, ученое звание	Должность	Подразделение
1	Плотников Петр Николаевич	доктор технических наук, профессор	Профессор	турбин и двигателей

Рекомендовано учебно-методическим советом института Уральская передовая инженерная школа
«Цифровое производство»

Протокол № 1 от 01.02.2023 г.

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Авторы:

1.1. Технологии реализации, используемые при изучении дисциплины модуля

- Традиционная (репродуктивная) технология
- Разноуровневое (дифференцированное) обучение
 - Базовый уровень

**Базовый I уровень – сохраняет логику самой науки и позволяет получить упрощенное, но верное и полное представление о предмете дисциплины, требует знание системы понятий, умение решать проблемные ситуации. Освоение данного уровня результатов обучения должно обеспечить формирование запланированных компетенций и позволит обучающемуся на минимальном уровне самостоятельности и ответственности выполнять задания;*

Продвинутый II уровень – углубляет и обогащает базовый уровень как по содержанию, так и по глубине проработки материала дисциплины. Это происходит за счет включения дополнительной информации. Данный уровень требует умения решать проблемы в рамках курса и смежных курсов посредством самостоятельной постановки цели и выбора программы действий. Освоение данного уровня результатов обучения позволит обучающемуся повысить уровень самостоятельности и ответственности до творческого применения знаний и умений.

1.2. Содержание дисциплины

Таблица 1.1

Код раздела, темы	Раздел, тема дисциплины*	Содержание
P1	Общие положения. Прочность материалов.	
P1.T1	Условия работы деталей турбомашин	Особенности условий работы материалов и деталей турбомашин. Виды воздействий. Законы деформирования. Виды напряженно-деформированных состояний деталей турбомашин. Критерии прочности деталей турбомашин. Надежность турбомашин.
P1.T2	Материалы деталей турбомашин и их свойства	Требования к материалам деталей турбомашин. Выбор материалов деталей турбин и компрессоров. Механические характеристики материалов. Выбор допускаемых напряжений и запасов прочности материалов в турбостроении.
P1.T3	Особенности расчетов деталей турбомашин	Расчеты термонапряженных деталей (торможение смежными деталями и смежными волокнами). Усталость, термоусталость и малоцикловая усталость. Ползучесть и длительная прочность материалов. Релаксация напряжений. Концентрация напряжений в деталях турбомашин и меры ее уменьшения. Эрозия материалов в турбомашинах.
P2	Рабочие лопатки турбомашин. Расчеты на прочность.	
P2.T1	Конструкции лопаток.	Конструкции рабочих лопаток. Основные элементы лопатки, расчетные сечения и размеры. Геометрические характеристики сечений лопаток и их расчет.

P2.T2	Расчет лопаток на растяжение	Расчет рабочих лопаток на растяжение под действием центробежных сил (для лопаток постоянного и переменного по высоте сечения). Вытяжка лопаток.
P2.T3	Расчет лопаток на изгиб.	Газодинамические силы и изгибающие моменты, действующие на лопатки. Расчет напряжений изгиба. Суммарные напряжения изгиба и растяжения. Наиболее нагруженные точки поперечных сечений рабочих лопаток.
P2.T4	Расчет лопаток на кручение и изгиб. Термонапряжения	Изгиб и кручение лопаток под действием центробежных сил инерции. Температурные напряжения в лопатках.
P2.T5	Расчет на прочность хвостовиков рабочих лопаток	Расчет на прочность Т-образного, вильчатого, елочного, хвостовиков рабочих лопаток. Концентрация напряжений в хвостовиках. Расчет на прочность хвостовика типа «ласточкин хвост», зубчатого хвостовика рабочей лопатки.
P2.T6	Расчет на прочность бандажей рабочих лопаток	Расчет на прочность ленточного бандажа и шипа лопатки, Расчет бандажной и антивибрационной полки рабочей лопатки.
P3	Роторы и диски турбомашин	
P3.T1	Классификации и конструкции	Классификации и конструкции роторов турбомашин. Конструкции дисков турбин, их классификации. Автофретированные и термофретированные диски. Материалы роторов и дисков.
P3.T2	Расчет на прочность роторов и дисков	Расчет на прочность ротора барабанного типа. Практические приемы расчета дисков сложного профиля. Метод двух расчетов. Расчет температурных напряжений в дисках турбомашин.
P3.T3	Расчет на прочность роторов и дисков	Расчет посадок дисков. Особенности расчета валов турбомашин. Муфты турбомашин, конструкции, расчет на прочность.
P4	Корпуса турбомашин	
P4.T1	Классификации и конструкции корпусов турбомашин	Классификации и конструкции корпусов турбомашин, схемы опирания и обеспечение свободы термических расширений.
P4.T2	Расчет на прочность на прочность корпуса турбомашин	Расчет корпуса турбомашин: определение толщины стенки. Расчет фланцевых соединений корпусов турбин (расчет затяжки, расчет шпильки на прочность, расчет фланца на изгиб).
P5	Системы маслоснабжения турбин и подшипники	
P5.T1	Системы маслоснабжения турбин	Система маслоснабжения турбомашин с насосами объемного типа и центробежными насосами.

		Система маслоснабжения газовой турбины. Турбинные масла. Требования к маслам, свойства турбинных масел и их эксплуатационные характеристики.
P5.T2	Подшипники турбомашин	Классификации подшипников турбомашин. Преимущества и недостатки подшипников скольжения. Факторы, влияющие на несущую способность опорных подшипников скольжения. Принцип работы опорного подшипника. Методика расчета опорного подшипника скольжения. Подшипники качения. Классификация. Принципы работы.
P6	Колебания механических систем. Колебания лопаток	
P6.T1	Общие вопросы механических колебаний	Понятие о колебаниях. Классификация колебательных систем и колебательных процессов. Общее уравнение движения при колебаниях системы с одной степенью свободы. Свободные колебания системы без трения. Свободные колебания системы с трением. Вынужденные колебания систем под воздействием внешней гармонической силы. Поперечные колебания прямого стержня с распределенной массой (параметрами).
P6.T2	Колебания не вращающихся рабочих лопаток	Колебания единичных лопаток. Виды. Формы. Причины колебаний лопаток. Определение частот и форм собственных колебаний единичной лопатки. Влияние различных факторов на частоты собственных колебаний рабочих лопаток.
P6.T3	Колебания вращающихся рабочих лопаток	Частота собственных колебаний вращающейся лопатки. Формы колебаний пакетов лопаток. Напряжения в лопатке при колебаниях. Пакетный множитель. Частота собственных колебаний лопаток переменного профиля. Крутильные колебания лопаток.
P6.T4	Вибронадежность лопаточного аппарата	Вибронадежность лопаточного аппарата. О частотной отстройке лопаток. Вибрационная диаграмма.
P7	Колебания дисков	
P7.T1	Колебания дисков	Формы колебаний дисков. Уравнение изгиба диска при колебаниях. Колебания вращающихся дисков. Диаграмма колебаний вращающегося диска.

P8	Колебания роторов и валов турбомашин	
P8.T1	Критические частоты вращения валов	Критическая частота вращения вертикального и горизонтального вала на примере невесомого вала с одним диском. Критическая частота вращения вала постоянного диаметра. Влияние гироскопического момента диска на частоту собственных колебаний вала
P8.T2	Колебания роторов	Влияние различных факторов на критические частоты вращения валов турбомашин. Причины колебаний роторов турбомашин.
P8.T3	Автоколебания роторов турбомашин	Самовозбуждающиеся колебания ротора за счет сил масляного возбуждения. Самовозбуждающиеся колебания ротора за счет венцовых сил.
P8.T4	Вибрационное состояние турбоагрегатов	Анализ вибрационного состояния турбоагрегатов. Нормирование вибрации. Нормы вибрации подшипников и валопроводов турбин. Меры снижения вибрации турбоагрегатов.
P8.T5	Вибронадежность турбомашин	Устойчивость роторной системы. Влияние балансировки и неустойчивости свойств ротора на его вибрацию. Крутильные колебания ротора.

1.3. Направление, виды воспитательной деятельности и используемые технологии

Таблица 1.2

Направление воспитательной деятельности	Вид воспитательной деятельности	Технология воспитательной деятельности	Компетенция	Результаты обучения
Профессиональное воспитание	учебно-исследовательская, научно-исследовательская	Технология анализа образовательных задач	ПК-13 - Способен в составе коллектива исполнителей проводить испытания деталей, узлов и агрегатов авиационной техники, анализировать результаты и согласовывать внесение изменений в конструкторскую и технологическую документацию со службами	З-1 - Характеризовать методы экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния деталей и узлов турбомашин У-1 - Анализировать результаты расчетных и экспериментальных исследований

			опытного производства	для разработки рекомендации по улучшению эксплуатационны х показателей надежност
--	--	--	--------------------------	---

1.4. Программа дисциплины реализуется на государственном языке Российской Федерации .

2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Динамика и прочность турбомашин

Электронные ресурсы (издания)

1. Беляев, С. А.; Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС : учебное пособие.; Издательство Томского политехнического университета, Томск; 2015; <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=442071> (Электронное издание)

Печатные издания

1. Костюк, А. Г.; Динамика и прочность турбомашин : учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. "Энергомашиностроение".; МЭИ, Москва; 2007 (21 экз.)
2. Костюк, А. Г.; Сборник задач по динамике и прочности турбомашин : учебное пособие для студентов [вузов], обучающихся по специальностям "Турбиностроение" и "Динамика и прочность машин".; Машиностроение, Москва; 1990 (20 экз.)
3. Манушин, Э. А., Малинин, Н. Н., Суровцев, И. Г.; Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок : Учеб. пособие для вузов.; Машиностроение, Москва; 1990 (11 экз.)
4. Ревзин, Резвин, Б. С.; Газотурбинные установки с нагнетателями для транспорта газа : Справ. пособие.; Недра, Москва; 1991 (26 экз.)
5. Ларионов, И. Д., Ревзин, Б. С.; Прочность лопаток турбин : Текст лекций.; УГТУ-УПИ, Екатеринбург; 1993 (20 экз.)

Профессиональные базы данных, информационно-справочные системы

- 1) eLibrary <http://elibrary.ru/>
- 2) Scopus <http://www.scopus.com/>
- 3) Web of Science <http://apps.webofknowledge.com/>
- 4) EBSCO publishing <http://search.ebscohost.com/>
- 5) ЭБС Университетская библиотека онлайн <http://www.biblioclub.ru/>
- 6) Издательство "Лань" <http://e.lanbook.com/ook.com/>

Материалы для лиц с ОВЗ

Весь контент ЭБС представлен в виде файлов специального формата для воспроизведения синтезатором речи, а также в тестовом виде, пригодном для прочтения с использованием экранной лупы и настройкой контрастности.

Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

- 1) Поисковая система Google <https://www.google.com/>
- 2) Поисковая система Yandex <https://yandex.ru/>

3. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Динамика и прочность турбомашин

Сведения об оснащённости дисциплины специализированным и лабораторным оборудованием и программным обеспечением

Таблица 3.1

№ п/п	Виды занятий	Оснащённость специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения
1	Лекции	Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов Рабочее место преподавателя Доска аудиторная Оборудование, соответствующее требованиям организации учебного процесса в соответствии с санитарными правилами и нормами	Office 365 EDUA5 ShrdSvr ALNG SubsVL MVL PerUsr B Faculty EES
2	Практические занятия	Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов Рабочее место преподавателя Доска аудиторная Персональные компьютеры по количеству обучающихся	Office 365 EDUA5 ShrdSvr ALNG SubsVL MVL PerUsr B Faculty EES ANSYS Academic Teaching Mechanical and CFD (25 tasks)
3	Лабораторные занятия	Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в	Office 365 EDUA5 ShrdSvr ALNG SubsVL MVL PerUsr B Faculty EES

		<p>соответствии с количеством студентов</p> <p>Рабочее место преподавателя</p> <p>Доска аудиторная</p> <p>Оборудование, соответствующее требованиям организации учебного процесса в соответствии с санитарными правилами и нормами</p>	
4	Консультации	<p>Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов</p> <p>Рабочее место преподавателя</p> <p>Оборудование, соответствующее требованиям организации учебного процесса в соответствии с санитарными правилами и нормами</p>	Office 365 EDUA5 ShrdSvr ALNG SubsVL MVL PerUsr B Faculty EES
5	Самостоятельная работа студентов	<p>Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов</p> <p>Подключение к сети Интернет</p>	Office 365 EDUA5 ShrdSvr ALNG SubsVL MVL PerUsr B Faculty EES
6	Текущий контроль и промежуточная аттестация	<p>Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов</p> <p>Рабочее место преподавателя</p> <p>Доска аудиторная</p> <p>Подключение к сети Интернет</p>	Office 365 EDUA5 ShrdSvr ALNG SubsVL MVL PerUsr B Faculty EES