

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
1163160	Теория турбомашин

Екатеринбург

Перечень сведений о рабочей программе модуля	Учетные данные
Образовательная программа 1. Газовые, паровые турбины и двигатели внутреннего сгорания	Код ОП 1. 13.03.03/33.01
Направление подготовки 1. Энергетическое машиностроение	Код направления и уровня подготовки 1. 13.03.03

Программа модуля составлена авторами:

№ п/п	Фамилия Имя Отчество	Ученая степень, ученое звание	Должность	Подразделение
1	Калинин Илья Александрович	без ученой степени, без ученого звания	Преподаватель	турбин и двигателей
2	Марченко Юрий Глебович	без ученой степени, без ученого звания	Преподаватель	турбин и двигателей

Согласовано:

Управление образовательных программ

Р.Х. Токарева

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОДУЛЯ Теория турбомашин

1.1. Аннотация содержания модуля

Модуль «Теория турбомашин» включает в себя дисциплину «Теория турбомашин». Дисциплина направлена на изучение процессов, конструктивного исполнения и методов расчета основного элемента турбомашин – турбинной ступени. В ходе изучения модуля студент получает базовые знания процессов, проходящих в элементах энергетических машин, и получает умения проводить расчеты и оптимизацию этих элементов, как аналитическими методами, так и с применением численных средств.

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	Теория турбомашин	7
ИТОГО по модулю:		7

1.3. Последовательность освоения модуля в образовательной программе

Пререквизиты модуля	1. «Гидрогазодинамика» 2. Теплотехника 3. Механика
Постреквизиты и кореквизиты модуля	1. Теплотехника 2. Материалы энергетических установок 3. Расчет и проектирование паровых турбин 4. Расчет и проектирование газовых турбин

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
Теория турбомашин	ОПК-3 - Способен проводить исследования и изыскания для решения прикладных	З-2 - Характеризовать возможности доступной исследовательской аппаратуры для реализации предложенных приемов и методов решения поставленных прикладных

	<p>инженерных задач относящихся к профессиональной деятельности, включая проведение измерений, планирование и постановку экспериментов, интерпретацию полученных результатов</p>	<p>инженерных задач относящихся к профессиональной деятельности</p> <p>У-3 - Анализировать и объяснить полученные результаты исследований и изысканий</p> <p>П-2 - Представить интерпретацию полученных результатов в форме научного доклада (сообщения)</p> <p>П-3 - Составить план проведения исследований и изысканий, включающий перечень необходимых ресурсов и временные затраты</p>
	<p>ПК-4 - Способен осуществлять прочностные, гидродинамические и теплотехнические расчеты с учетом особенностей рабочих процессов в энергетических машинах и установках</p>	<p>З-10 - Изложить физические основы и математические модели процессов преобразования энергии и теплового, гидравлического и газодинамического расчетов энергетических машин и турбоустановок</p> <p>У-10 - Анализировать результаты расчетных и экспериментальных исследований и разрабатывать рекомендации по улучшению эксплуатационных показателей надежности оборудования</p>
	<p>ПК-5 - Способен принимать обоснованные решения на стадии проектирования деталей, узлов и турбоустановок, разработки тепловых схем турбомашин, используя методы тепловых и газодинамических расчетов и САПР</p>	<p>З-11 - Описать конструктивное устройство, рабочие процессы, принципы работы и особенности компоновки основного и вспомогательного оборудования энергоустановок</p> <p>У-4 - Принимать обоснованные решения на стадии проектирования, обеспечивающие надежную и экономичную работу турбомашин</p> <p>П-3 - Иметь практический опыт расчетов и конструирования деталей и турбоустановок с использованием САПР</p> <p>П-4 - Применять современные программные продукты, позволяющие моделировать и управлять прочностью и надежностью деталей турбомашин</p>

1.5. Форма обучения

Обучение по дисциплинам модуля может осуществляться в очной и заочной формах.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
Теория турбомашин

Рабочая программа дисциплины составлена авторами:

№ п/п	Фамилия Имя Отчество	Ученая степень, ученое звание	Должность	Подразделение
1	Калинин Илья Александрович	без ученой степени, без ученого звания	Преподавате ль	турбин и двигателей
2	Марченко Юрий Глебович	без ученой степени, без ученого звания	Преподавате ль	турбин и двигателей

Рекомендовано учебно-методическим советом института Уральский энергетический

Протокол № 8 от 05.07.2023 г.

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Авторы:

- Калинин Илья Александрович, Преподаватель, турбин и двигателей
- Марченко Юрий Глебович, Преподаватель, турбин и двигателей

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	
P1.T1	Введение	Предмет, задачи, содержание и структура дисциплины. Учебная литература по дисциплине.
P1.T2	Энергетические машины и турбомашин	Виды турбомашин: паровая и газовая турбина; компрессор. Устройство и работа простейших ПТУ и ГТУ. Конструктивная схема паровой (газовой) турбины. Основные элементы.
P2	Турбинная ступень	
P2.T1	Основные уравнения движения сжимаемой жидкости	Уравнение состояния. Уравнение идеального газа; уравнение идеального пара; таблицы и диаграммы водяного пара. Зависимости для термодинамических свойств водяного пара, используемые в расчетах на ЭВМ. Уравнение неразрывности. Уравнение количества движения. Уравнение сохранения энергии.
P2.T2	Ступень как основной	Принцип действия ступени. Конструктивная схема ступени;

	элемент турбомашин	основные элементы ступени, их назначение.
P2.T3	Преобразование энергии	Преобразование энергии в осевой турбинной ступени. Качественное описание процессов, происходящих в ступени, в сопловых и рабочих каналах, в межлопаточных зазорах. Кинематика потока, треугольники скоростей и их использование при анализе работы ступени. Активный и реактивный принципы преобразования энергии в турбинной ступени.
P3	Геометрические параметры ступени	
P3.T1	Понятие турбинной (лопаточной) решетки	Типы решеток: сопловые, рабочие. Изображение решеток в меридиональном и цилиндрическом сечении. Профили лопаток, их основные части: входная и выходная кромка; выпуклая часть (спинка) и вогнутая часть (корытце) профиля. Форма спинки профиля в выходной части профиля: выпуклая, прямая, вогнутая, сложная.
P3.T2	Геометрические параметры ступени	Характерные абсолютные размеры ступени, профиля и решетки профилей: диаметры, высоты лопаток, осевая ширина, хорда, толщина входной и выходной кромок, шаг профилей, угол установки профилей в решетке и т.д. Каналы, образованные профилями в решетке; основные участки канала; входной; собственно канал; косой срез; горло канала.
P3.T3	Относительные геометрические характеристики (параметры) решеток	Верность; относительная высота (длина) решетки; относительный шаг, относительная толщина выходной кромки, эффективный угол выхода, конфузорность и степень расширения канала. Угол поворота канала. Каналы конфузорные (суживающиеся) и расширяющиеся (сопла Лавалья); активные решетки профилей с каналом постоянного сечения.
P4	Течение рабочего тела в каналах турбинной ступени	
P4.T1	Использование уравнений движения сжимаемой жидкости для анализа	Выводы/соотношений для определения скорости газа (пара) на выходе из сопла при идеальном (теоретическом) процессе расширения. Параметры торможения. Критическая скорость

	истечения газа (пара) из сопл	потока и критическое отношение давлений Расход рабочего тела через сопло при критическом истечении. Приведенный (относительный) расход. Приближенное уравнение (уравнение эллипса) для определения приведенного расхода. Реальное течение газа (пара) в каналах.
P4.T2	Расширение пара в косом срезе решетки	Возможность достижения сверхзвуковой скорости в суживающейся решетке, отклонение потока рабочего тела от направления, определяемого эффективным углом выхода. Формула Бэра для определения угла отклонения потока; использование величины относительного расхода q при расчетах угла отклонения потока; предельная степень расширения потока в косом срезе решетки и её расчет. Расчет отклонения потока в расширяющихся решетках.
P4.T3	Построение процесса расширения газа (пара) в соплах в h-s диаграмме	Применение уравнения сохранения энергии при изображении истечения рабочего тела из сопловых каналов h-s диаграмме. Располагаемый теплоперепад. Сработанный теплоперепад. Потери в соплах.
P4.T4	Построение процесса расширения газа (пара) в рабочих каналах в h-s диаграмме	Применение уравнения сохранения энергии при изображении расширения рабочего тела в рабочих каналах h-s диаграмме. Располагаемый теплоперепад. Сработанный теплоперепад. Потери в рабочих каналах.
P4.T5	Построение процесса расширения газа (пара) в турбинной ступени в h-s диаграмме	Располагаемый теплоперепад ступени. Располагаемый и адиабатический теплоперепады ступени. Потери с выходной скоростью.
P4.T6	Степень реактивности	Понятие степени реактивности; термодинамическая и кинематическая степень реактивности. Активные и реактивные ступени. h-s диаграммы расширения рабочего тела в активной и реактивной ступенях. Влияние степени реактивности на конструкцию, экономичность и мощность ступени (турбины).
P5	Экономичность ступени	
P5.T1	Относительный лопаточный КПД ступени	Определение относительного лопаточного КПД ступени $\eta_{ол}$. Коэффициент использования энергии с выходной скорости и

		его влияние на относительный лопаточный КПД ступени.
P5.T2	Характеристический коэффициент ступени	Понятие фиктивной скорости C_f для ступени. Характеристическое отношение скоростей $X_f = u/C_f$ для ступени. Зависимость относительного лопаточного КПД от характеристики ступени x_f степени реактивности и коэффициентов скорости λ и λ_0 . Формула Банки. Определение максимального значения КПД $\lambda_{0\text{ол}}$ и оптимального значения характеристического отношения скоростей. Оптимальные треугольники скоростей.
P6	Потери в турбомашинах	
P6.T1	Классификация потерь	Классификация потерь в турбомашинах: внешние, внутренние, дополнительные. Внутренние потери: потери при течении рабочего тела в сопловых и рабочих каналах. Коэффициенты потерь и коэффициенты скорости. Потери с выходной скоростью.
P6.T2	Пограничный слой	Пограничный слой: ламинарный и турбулентный пограничные слои. Число Рейнольдса. Влияние элементов шероховатости поверхности лопаток на пограничный слой. Коэффициент трения и коэффициент потерь в каналах. Коэффициент скорости. Коэффициент расхода для канала.
P6.T3	Потери энергии при обтекании турбинных решеток	Профильные потери, их составляющие: потери на трение, кромочные (выходные) потери, волновые потери. Концевые потери. Потери от взаимодействия решеток. Потери от нерасчетного угла входа потока.
P7	Особые типы ступеней	
P7.T1	Ступени скорости	Принцип действия. Особенности процесса расширения пара. Основные характеристики. Область применения. Расчет двухвенечной ступени скорости.
P7.T2	Другие типы ступеней	Ступени с парциальным подводом рабочего тела. Ступени с регулируемой (изменяемой) сопловой решеткой - регулирующие ступени. Регулирование количества сопловых каналов с помощью клапанов и регулирующих поворотных диафрагм. Ступени с поворотными лопатками. Ступень Баумана.
P8	Расчет турбинной ступени по	

	среднему диаметру	
P8.T1	Метод треугольников скоростей	Метод треугольников скоростей как первое приближение при расчете любых ступеней. Задаваемые и принимаемые величины. Выбор степени реактивности. Выбор отношения скоростей $u/cф$. Последовательность расчета: при заданном располагаемом теплоперепаде; при заданном (принятом) значении среднего (корневого) диаметра ступени.
P8.T2	Размеры решеток	Определение размеров решеток. Расчет треугольников скоростей. Выбор профилей сопловой и рабочей решетки. Учет требований по прочности рабочих лопаток. Определение относительного лопаточного КПД и мощности ступени.
P8.T3	Профили и их аэродинамические характеристики	Классификация и обозначение профилей лопаток. Атлас профилей МЭИ. Выбор профиля по атласу. Выбор угла установки, шага и других параметров; определение угла поворота профиля. Определение размеров решеток. Аэродинамические характеристики решеток: коэффициент потерь энергии, коэффициент расхода, угол выхода потока. Зависимость аэродинамических характеристик от режимных и геометрических параметров. Обобщенные аэродинамические характеристики турбинных решеток. Обобщение экспериментальных данных по коэффициентам потерь энергии, коэффициентам расхода и углам выхода от геометрических и режимных факторов. Графическое представление обобщенных аэродинамических характеристик. Формулы для расчета аэродинамических характеристик, коэффициенты скорости и коэффициенты потерь. Определение основных размеров турбинных решеток.
P8.T4	Усилия на лопатках	Силы, действующие на рабочие лопатки. Вращающий момент ступени. Мощность ступени. Связь окружной мощности с мощностью на лопатках и теплоперепадом ступени.
P9	Расчет ступени с учетом изменения параметров потока по радиусу	
P9.T1	Радиальное равновесие	Условия пространственного течения потока в ступени.

	потока	Радиальное равновесие потока в межвенцовом зазоре и на выходе из ступени. Законы закруток решеток: постоянство углов $\alpha_1 = \text{const}$; неизменность по высоте циркуляции скорости потока на выходе сопловой решетки - $\text{cu } r = \text{const}$; постоянство удельного расхода ступени с постоянными по высоте профилями решеток. Ступени с уменьшенным градиентом реактивности. Изменение степени реактивности и других параметров по высоте ступени.
P9.T2	Ступени с большой веерностью	Проектирование ступеней с большой веерностью. Основные характеристики ступени. Выбор закона закрутки решеток. Профилирование решеток. Ступени с саблевидными сопловыми лопатками. Модельные ступени. Последовательность расчета ступени большой веерности.
P10	Относительный внутренний КПД ступени	
P10.T1	Дополнительные потери в ступени	Потери на трение рабочего тела о поверхности диска и концевые поверхности. Потери от парциального подвода рабочего тела. Потери от утечек рабочего тела в ступени. Потери от влажности. Потери от верности. Способы уменьшения дополнительных потерь.
P10.T2	Определение относительного внутреннего КПД ступени	Связь с относительным лопаточным КПД. Зависимость от характеристического коэффициента.
P11	Конструктивное выполнение ступеней и лопаток	
P11.T11	Обзор конструкций турбинных ступеней и их элементов	Конструкция рабочих лопаток в области высокого, среднего и низкого давления. Типы хвостовиков, применяемых различными заводами (ЛМЗ, ТМЗ, ХТГЗ). Типы бандажа. Безбандажные ступени в области низкого давления. Конструкция диафрагм. Сварные и литые диафрагмы. Конструкции сопловых аппаратов, применяемых различными турбинными заводами. Особенности конструкции лопаточного аппарата регулирующих ступеней и сопловых коробок.
P12	Способы повышения	

	эффективности ступени	
P12.T1	Оптимизация ступени	Выбор оптимальных характеристик ступени с учетом дополнительных потерь. Оптимизация турбинных ступеней. Оптимизация изолированной ступени. Оптимизация промежуточной ступени активного и реактивного типа. Оптимизация последних ступеней конденсационных паровых турбин.

1.3. Направление, виды воспитательной деятельности и используемые технологии

Таблица 1.2

Направление воспитательной деятельности	Вид воспитательной деятельности	Технология воспитательной деятельности	Компетенция	Результаты обучения
Формирование социально-значимых ценностей	профориентационная деятельность общение в социальных сетях и электронной почте в системах «студент-преподаватель», «группа студентов-преподаватель», «студент-студент», «студент-группа студентов»	Технология самостоятельной работы Технология анализа образовательных задач	ПК-4 - Способен осуществлять прочностные, гидродинамические и теплотехнические расчеты с учетом особенностей рабочих процессов в энергетических машинах и установках	З-10 - Изложить физические основы и математические модели процессов преобразования энергии и теплового, гидравлического и газодинамического расчетов энергетических машин и турбоустановок

1.4. Программа дисциплины реализуется на государственном языке Российской Федерации .

2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Теория турбомашин

Электронные ресурсы (издания)

1. Акладная, Г. С.; Судовые турбомашини : курс лекций.; Московская государственная академия водного транспорта, Москва; 2013; <http://www.iprbookshop.ru/46851.html> (Электронное издание)

Печатные издания

1. , Цанев, С. В.; Газотурбинные энергетические установки : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. "Теплоэнергетика".; МЭИ, Москва; 2011 (10 экз.)

2. Щегляев, А. В., Трояновский, Б. М.; Паровые турбины : Теория теплового процесса и конструкции турбин : Учебник для студентов энергомашиностр. и теплоэнергет. специальностей вузов : В 2 кн. Кн. 1. ; Энергоатомиздат, Москва; 1993 (80 экз.)

3. Трухний, А. Д., Крупенников, Б. Н., Петрунин, С. В.; Атлас конструкций деталей турбин : Учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлениям "Энергомашиностроение" и "Теплоэнергетика".; Издательство МЭИ, Москва; 2000 (1 экз.)

Профессиональные базы данных, информационно-справочные системы

Артемова Т.Г., Еловицова Г.Г., Комаров О.В., Кистойчев А.В., Неволин А.М., Недошивина Т.А., Скороходов А.В., Федорченко М.Ю. ЭОР (ИПМК) «Эксплуатация компрессорных станций с газотурбинным приводом». 2014. Режим доступа: Портал информационно-образовательных ресурсов УрФУ: <http://study.urfu.ru/Aid/ViewMeta/12016>

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. Официальный интернет-сайт ОАО «Газпром»: <http://www.gazprom.ru/>

2. Зональная научная библиотека <http://lib.urfu.ru/>

3. Интернет-ресурсы: www.power-m.ru; www.utz.ru; www.turboatom.com.ua; https://www.reph.ru;
<https://vti.ru/>; <http://ckti.ru/>

3. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Теория 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	Не используется

		процесса в соответствии с санитарными правилами и нормами	
2	Практические занятия	<p>Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в 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> <p>Подключение к сети Интернет</p>	<p>Р7-Офис Профессиональный (Десктопная версия)</p> <p>Браузер Google Chrome</p> <p>Microsoft Office</p>
3	Самостоятельная работа студентов	<p>Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов</p> <p>Персональные компьютеры по количеству обучающихся</p> <p>Подключение к сети Интернет</p>	<p>Р7-Офис Профессиональный (Десктопная версия)</p> <p>Браузер Google Chrome</p> <p>Microsoft Office</p>
4	Консультации	<p>Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в 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>	Не используется
5	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>	Не используется

		Оборудование, соответствующее требованиям организации учебного процесса в соответствии с санитарными правилами и нормами	
--	--	---	--