

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Российский университет дружбы народов»*

*Инженерная академия*

Рекомендовано МССН

**ПРОГРАММА  
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ**

**Направление подготовки 13.06.01 «Энерго- и теплотехника»**

**Направленность программы (профиль) «Турбوماшины и комбинированные  
установки»**

**Квалификация выпускника Исследователь. Преподаватель-исследователь.**

2021 г.

## **1. Общие положения**

1.1. Ответственность и порядок действий по подготовке и проведению государственного экзамена в РУДН, а также перечень, очередность, сроки прохождения документов, необходимых для осуществления государственного экзамена, между структурными подразделениями определяет Порядок проведения итоговой государственной аттестации обучающихся.

1.2. Государственный экзамен по направлению подготовки 13.06.01 «Энерго- и теплотехника» включает вопросы всех дисциплин аспирантуры по специальности 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные установки».

1.3. Результаты любого из видов аттестационных испытаний, включенных в государственный экзамен, определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

## **2. Цели и задачи государственного экзамена**

**2.1. Целью** государственного экзамена является определение соответствия результатов освоения обучающимися основных образовательных программ требованиям ФГОС ВО.

**2.2. Задачами** государственного экзамена являются:

- проверка качества обучения личности основным естественнонаучным законам и явлениям, необходимым в профессиональной деятельности;
- определение уровня теоретической и практической подготовленности выпускника к выполнению профессиональных задач в соответствии с получаемой квалификацией;
- установление степени стремления личности к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства;
- проверка сформированности устойчивой мотивации к профессиональной деятельности в соответствии с предусмотренными ФГОС ВО видом профессиональной деятельности;
- проверка способности находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях и готовность нести за них ответственность;
- обеспечение интеграции образования и научно-технической деятельности, повышение эффективности использования научно-технических достижений, реформирование научной сферы и стимулирование инновационной деятельности;
- обеспечение качества подготовки в соответствии с требованиями ФГОС ВО.

## **3. Программа государственного экзамена.**

3.1. Государственный экзамен проводится в письменной форме.

3.2. В рамках проведения государственного экзамена проверяется степень освоения выпускников следующих компетенций:

- способностью к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- способностью проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);
- владением методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности (ОПК-1);
- владением культурой научного исследования в том числе, с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий (ОПК-2);
- способностью к разработке новых методов исследований и их применению в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области профессиональной деятельности (ОПК-3);

- знанием основ протекания физико-химических, гидрогазодинамических, тепло- и массообменных процессов (ПК-1);

- владение методами теоретических и экспериментальных исследований в области турбиностроения (ПК-2);

- владение методологией научного исследования в том числе, с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий, используемых в турбиностроении (ПК-3);

- способность к разработке новых методов исследования и их применение в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области газодинамики и надежности турбомашин и комбинированных турбоустановок (ПК-4);

- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования при решении проблем совершенствования паротурбинных установок (ПК-5).

Аспирант должен показать свое умение подбирать и использовать научно-техническую литературу (в том числе периодические научные издания, интернет-источники) а также его способность применять знания, умения и личные качества в соответствии с задачами профессиональной деятельности и направленностью обучения. Государственный экзамен проводится в письменной форме. Предусмотрено наличие 20 билетов с подписью директора департамента машиностроения и приборостроения и печатью организационного отдела Инженерной академии РУДН. В каждом билете 3 вопроса.

3.3. Содержание государственного экзамена: перечень вопросов отражает направленность подготовки аспирантов.

Программа-минимум разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по энергетике, электрификации и энергетическому машиностроению при участии ВТИ им. Дзержинского, Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Московского энергетического института (технического университета):

#### *1. Тепловые циклы турбинных установок*

Принципиальные схемы и тепловые циклы паро- и газотурбинных установок для электростанций, использующих органическое и ядерное топливо.

Комбинированные циклы и схемы парогазовых установок. Тепловая эффективность установок и методы ее повышения. Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии. Перспективные циклы и схемы турбинных и комбинированных установок для электростанций на органическом и ядерном топливе.

#### *2. Механика жидкости и газа*

Кинематика сплошной среды. Движение малой частицы жидкости и теорема Гельмгольца о движении жидкости в общем случае. Потенциальные и вихревые движения в жидкости. Линия тока и вихревая линия. Методы изучения движения жидкости. Циркуляция скорости. Формула Био—Савара.

Основные уравнения движения жидкости. Уравнение неразрывности. Уравнение расхода. Уравнения движения в форме Эйлера, Громеко-Лэмба и Навье—Стокса. Интегральные уравнения движения для идеальной жидкости. Уравнение энергии и его формы.

Одномерная схема течения. Уравнения одномерного течения. Параметры полного торможения. Скорость звука и критическая скорость. Связь безразмерных параметров потока с безразмерными скоростями и критические параметры. Условия перехода через скорость звука.

Приведенный расход и удельный приведенный расход. Газодинамические функции. Осреднение неравномерных потоков и приведение их к одномерной схеме течения.

Потенциальные течения. Плоские потенциальные течения несжимаемой жидкости. Комплексные потенциалы элементарных потоков и их использование для расчетов потенциальных течений. Уравнение для расчета скорости в сжимаемом потоке. Уравнение Н.Е. Жуковского о подъемной силе. Постулат Чаплыгина—Жуковского.

Сверхзвуковые течения. Особенности сверхзвуковых потоков. Характеристики в плоскости течения и в плоскости годографа скорости. Диаграмма характеристик и ее использование для сверхзвуковых потоков. Возникновение скачков уплотнений. Прямой скачок уплотнения и его расчет. Диаграмма ударных поляр. Потери энергии в скачках уплотнения.

Истечение из сопел и непрофилированных отверстий. Переменные режимы суживающихся сопел. Сопло Лавалю и диаграмма переменных режимов сопел Лавалю. Профилированные сопла Лавалю. Истечение из непрофилированных отверстий. Коэффициенты расхода при истечении из щелей с острой кромкой.

Теория подобия и размерностей. Задачи теории подобия. Коэффициенты подобия и числа подобия. П-теорема. Условие физического подобия течения. Критерии подобия. Полное и частичное моделирование.

Течение вязкой жидкости. Точные решения уравнений Навье—Стокса. Ламинарный и турбулентный типы течения. Способы осреднения турбулентных потоков и их основные характеристики. Уравнение Рейнольдса. Пограничный слой. Пути решения уравнений для пограничного слоя. Модели турбулентности. Отрыв пограничного слоя и пути его предотвращения. Численные решения задач МЖГ.

Течение двухфазных и двухкомпонентных сред. Особенности двухфазных течений. Гомогенное течение с постоянной концентрацией второй фазы. Гомогенное течение жидкости с пузырьками газа. Течение двухфазной среды при фазовом равновесии или полном переохлаждении. Тепловые скачки и скачки конденсации.

### *3. Ступень турбомашин*

Преобразование энергии в ступенях турбины и компрессора. Расчет турбинной и компрессорной ступеней. Особенности проектирования ступеней большой веерности. Ступени скорости, радиальные, радиально-осевые и диагональные ступени. Двухъярусные ступени. Коэффициент полезного действия (КПД) турбинной и компрессорной ступени. Основные виды потерь в ступени. Влияние основных геометрических и режимных параметров на КПД. Степень реактивности и коэффициент расхода ступени. Влияние влажности и охлаждения на основные характеристики ступени паровой и газовой турбины.

### *4. Решетки турбомашин*

Турбинные и компрессорные решетки, их классификация. Геометрические и аэродинамические характеристики решеток турбомашин. Методы плоского, осесимметричного и пространственного расчета решеток. Профильные и концевые потери в решетках, методы их расчета. Решетки паровых турбин для влажного пара. Процессы неравновесного влагообразования в решетках.

Основные особенности движения переохлажденного и влажного пара в решетках паровых турбин. Нестационарные течения в решетках турбомашин. Переменные, аэродинамические силы. Вынужденные и самовозбуждающиеся колебания рабочих лопаток турбины и компрессора. Флаттер и помпаж. Вращающийся отрыв в решетках турбомашин. Пульсации давления в потоках влажного пара, нестационарные скачки конденсации.

### *5. Многоступенчатые турбины*

Тепловой процесс в многоступенчатой турбине. Преимущества и недостатки многоступенчатых турбин. Выбор конструкции и ремонт многоступенчатых турбин. Предельная мощность однопоточной паровой и газовой турбины. Пути повышения предельной мощности турбины.

Выбор частоты вращения, числа валов и цилиндров паровой турбины. Технико-экономические основы выбора конструкции турбины. Осевые усилия в турбинах, их расчет и методы уравновешивания. Концевые уплотнения. Регулирующие клапаны, впускные и выхлопные патрубки турбин. Эрозия рабочих лопаток. Защита элементов

проточной части от эрозии. Сепарация влаги из проточной части паровой турбины. Выносные сепараторы-пароперегреватели турбин атомных электростанций (АЭС).

#### *6. Расчет и проектирование многоступенчатых компрессоров*

Многоступенчатый осевой компрессор. Влияние потерь в патрубках на КПД и напор компрессора. Неустойчивые режимы в работе компрессора. Универсальная характеристика. Моделирование компрессоров.

Многоступенчатые центробежные компрессоры. Выбор оптимальных геометрических размеров ступеней центробежного компрессора. Профилирование рабочих колес и лопаточных диффузоров.

#### *7. Переменный режим работы турбин*

Газодинамическое подобие. Переменный режим работы ступени. Обобщенные характеристики турбинных ступеней. Распределение давлений по ступеням при изменении режима работы турбины. Влияние изменения режима работы на КПД турбины. Особенности работы последних ступеней конденсационной турбины при изменении объемного пропуска пара. Система парораспределения. Изменение нагрузки паровой турбины методом скользящего давления. Методы расчета турбин при переменном режиме работы. Загрязнение проточной части.

Переменный режим работы газотурбинной установки (ГТУ). Способы изменения режима работы ГТУ. Согласование режимов работы турбомашин. Представление характеристик методами подобия. Зависимость показателей ГТУ от нагрузки и температуры наружного воздуха, ее цикла и схемы. Диаграмма режимов ГТУ. Режим пуска ГТУ, пусковые устройства.

#### *8. Турбины для комбинированной выработки тепла и электрической энергии*

Турбины с противодавлением, с промежуточным регулируемым отбором пара. Ступенчатый подогрев воды. Диаграммы режимов работы турбины. Использование для теплофикации тепла ГТУ и АЭС.

#### *9. Теплообмен в элементах турбомашин*

Основные уравнения теплопроводности и конвективного теплообмена. Теплообмен при фазовых превращениях. Теплообмен при проникающем охлаждении и газовых завесах. Распределение температуры в охлаждаемых турбинных лопатках, роторах и корпусах. Методы решения задач теплопроводности и теплообмена применительно к основным деталям турбин. Конструкции охлаждаемых лопаток газовых турбин.

#### *10. Динамика и прочность деталей паровых и газовых турбин*

Надежность турбин как основное требование их изготовления, монтажа и эксплуатации. Материалы, используемые в турбостроении. Условия работы металлов в паровых и газовых турбинах. Свойства сталей и сплавов, применяемых в турбостроении, и требования к ним. Процессы, сопровождающие работу металлов при высоких температурах, длительной эксплуатации и переменных нагрузках. Коррозионная усталость и коррозионное растрескивание под напряжением в элементах турбины под влиянием агрессивных примесей в паре. Коррозия лопаток ГТУ, защитные покрытия.

Рабочие лопатки, их вибрационная прочность. Обеспечение вибрационной надежности лопаточного аппарата. Диски, их прочность и вибрации. Вибрации роторов и фундамента. Низкочастотные вибрации роторов. Методика численного анализа и расчета напряженного состояния деталей турбин. Гидродинамические силы в ступенях, уплотнениях и подшипниках. Маневренность турбин. Термические напряжения в деталях турбин, термоусталость.

#### *11. Регулирование турбин*

Принципиальные схемы регулирования паровых и газовых турбин.

Статические характеристики регулирования. Параллельная работа турбогенераторов. Математическое описание системы регулирования турбин.

Устойчивость системы регулирования турбин. Переходные процессы в системах регулирования турбин. Использование вычислительной техники для анализа переходных процессов в системе регулирования турбины и синтеза системы регулирования. Механизм управления паровой конденсационной турбиной. Особенности регулирования турбин для комбинированной выработки тепла и электрической энергии. Регулирование ГТУ. Регуляторы температуры газов и мощности. Регулирование энергетических блоков тепловых электрических станций и АЭС. Защитные устройства турбинных установок. Использование цифровых и микропроцессорных систем для управления турбинной установкой.

Автоматизация пуска турбинной установки. Системы автоматического управления.

#### **4. Методические рекомендации к подготовке и сдаче итогового государственного экзамена**

##### 4.1. Рекомендуемая литература:

1. Елисеев Ю.С. Теория и конструкция газотурбинных и комбинированных установок, М.: Машиностроение, 2000.
2. Бекнев В.С., Михальцев В. Е., Шабаров А. Б. Турбомашинные газотурбинных и комбинированных установок, М.: Машиностроение, 1993.
3. Щегляев А. В. Паровые турбины, М.: Энергоатомиздат, 1993.
4. Самойлович Г.С., Трояновский Б.М. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах. М.: Энергоатомиздат, 1982.
5. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / Ю.С. Елисеев, Э.А. Манушин, В.Е. Михальцев, и др. М.: Изд-во МГТУ, 2000.

##### Дополнительная литература:

1. Газотурбинные установки. Конструкции и расчет: Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1978.
2. Костюк А.Г., Шерстюк А.Н. Газотурбинные установки. М.: Высш. шк., 1979.
3. Кириллов И.И. Газовые турбины и газотурбинные установки. М.: Машгиз, 1956.
4. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. М.: Энергоатомиздат, 1985.

##### 4.2. Дополнительные рекомендации

При проведении государственного экзамена допускается использование вычислительной техники, печатных материалов по техническим регламентам, правовой базе.

**5. Оценочные средства, предназначенные для установления в ходе аттестационных испытаний соответствия/несоответствия уровня подготовки выпускников, завершивших освоение ОП ВО по направлению подготовки/специальности, требованиям соответствующего ФГОС ВО.**

#### **Требования и критерии оценивания ответов итогового государственного экзамена:**

1. В процессе устного ответа оценивается уровень педагогической и исследовательской компетентности аспиранта, что проявляется в квалифицированном представлении результатов обучения.

2. При определении оценки учитывается грамотность представленных ответов, стиль изложения и общее оформление, способность ответить на поставленный вопрос по существу.

3. Ответы оцениваются, исходя из следующих критериев:

**Оценка «5» (отлично)** ставится, если:

- полно раскрыто содержание материала экзаменационного билета;

- материал изложен грамотно, в определенной логической последовательности;
- продемонстрировано системное и глубокое знание программного материала;
- точно используется терминология;
- показано умение иллюстрировать теоретические положения конкретными примерами, применять их в новой ситуации;
- продемонстрировано усвоение ранее изученных сопутствующих вопросов, сформированность и устойчивость компетенций, умений и навыков;
- ответ прозвучал самостоятельно, без наводящих вопросов;
- продемонстрирована способность творчески применять знание теории к решению профессиональных задач;
- продемонстрировано знание современной учебной и научной литературы;
- допущены одна – две неточности при освещении второстепенных вопросов, которые исправляются по замечанию.

**Оценка «4» (хорошо)** ставится, если:

- вопросы экзаменационного материала излагаются систематизировано и последовательно;
- продемонстрировано умение анализировать материал, однако не все выводы носят аргументированный и доказательный характер;
- продемонстрировано усвоение основной литературы.
- ответ удовлетворяет в основном требованиям на оценку «5», но при этом имеет один из недостатков:

в изложении допущены небольшие пробелы, не исказившие содержание ответа; допущены один – два недочета при освещении основного содержания ответа, исправленные по замечанию экзаменатора;

допущены ошибка или более двух недочетов при освещении второстепенных вопросов, которые легко исправляются по замечанию экзаменатора.

**Оценка «3» (удовлетворительно)** ставится, если:

- неполно или непоследовательно раскрыто содержание материала, но показано общее понимание вопроса и продемонстрированы умения, достаточные для дальнейшего усвоения материала;
- усвоены основные категории по рассматриваемому и дополнительным вопросам;
- имелись затруднения или допущены ошибки в определении понятий, использовании терминологии, исправленные после нескольких наводящих вопросов;
- при неполном знании теоретического материала выявлена недостаточная сформированность компетенций, умений и навыков, аспирант не может применить теорию в новой ситуации;
- продемонстрировано усвоение основной литературы.

**Оценка «2» (неудовлетворительно)** ставится, если:

- не раскрыто основное содержание учебного материала;
- обнаружено незнание или непонимание большей, или наиболее важной части учебного материала;
- допущены ошибки в определении понятий, при использовании терминологии, которые не исправлены после нескольких наводящих вопросов.
- не сформированы компетенции, умения и навыки.

## **6. Требования к выпускной квалификационной работе**

6.1. К защите научной квалификационной работы (НКР) допускается обучающийся, сдавший государственный экзамен. Защита НКР проводится на открытом заседании государственной экзаменационной комиссии (ГЭК).

Государственная итоговая аттестация проводится в виде устного представления НКР, с последующим устным ответами на вопросы членов ГЭК в соответствии с Положением университета о НКР. Доклад и/или ответы на вопросы членов ГЭК могут быть на иностранном языке.

6.2. В рамках проведения защиты научной квалификационной работы проверяется степень освоения выпускников следующих компетенций:

- способностью к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- способностью проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);
- владением методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности (ОПК-1);
- владением культурой научного исследования в том числе, с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий (ОПК-2);
- способностью к разработке новых методов исследований и их применению в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области профессиональной деятельности (ОПК-3);
- знанием основ протекания физико-химических, гидрогазодинамических, тепло- и массообменных процессов (ПК-1);
- владение методами теоретических и экспериментальных исследований в области турбиностроения (ПК-2);
- владение методологией научного исследования в том числе, с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий, используемых в турбиностроении (ПК-3);
- способность к разработке новых методов исследования и их применение в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области газодинамики и надежности турбомашин и комбинированных турбоустановок (ПК-4);
- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования при решении проблем совершенствования паротурбинных установок (ПК-5).

6.3 Перечень тем научно-квалификационной работы:

1. Подобие процессов в поршневых компрессорах тепловых насосов.
2. Показатели поршневого компрессора теплового насоса на частичных режимах.
3. Газодизель с паротурбинной установкой для компрессорных станций.
4. Экономия топлива за счет применения абсорбционных кондиционеров.

6.4. Задачи, которые обучающийся должен решить в процессе выполнения научной квалификационной работы:

- привести обоснования актуальности исследования, оценить его новизну;
- установить объект и предмет исследования;
- сформулировать проблемные вопросы или выдвинуть научную (рабочую) гипотезу;
- определить цель и задачи работы;
- охарактеризовать основные источники и научную литературу, установить степень изученности темы;
- обосновать выбор соответствующих методов исследования;
- выработать, описать и профессионально аргументировать свой вариант решения рассматриваемой проблемы;
- апробировать теоретические положения и авторские практические разработки;
- обработать и критически проанализировать полученные данные;
- получить теоретические и/или практически значимые результаты;



- сформулировать логически обоснованные выводы, предложения, рекомендации по внедрению полученных результатов в практику.

6.5. Этапы выполнения научной квалификационной работы, условия допуска обучающегося к процедуре защиты, требования к структуре, объёму, содержанию и оформлению, а также перечень обязательных и рекомендуемых документов, представляемых к защите указаны в «Регламенте подготовки и оформления научно-квалификационной работы (диссертации) по программам подготовки кадров высшей квалификации в Российском университете дружбы народов», утвержденных в установленном порядке приказом ректора РУДН № 40 от 20.01.2017 г.

6.6. Оценочные средства.

Выпускная квалификационная работа представляет собой защиту результатов научно-исследовательской работы, выполненной обучающимся, в виде научного доклада, демонстрирующую степень готовности выпускника к ведению профессиональной научно-педагогической деятельности.

В соответствии с Приказом №41 от 20.01.2017 г. результаты выпускной квалификационной работы определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Подготовленная научно-квалификационная работа должна соответствовать критериям, установленным для научно-квалификационной работы (диссертации) на соискание ученой степени кандидата наук, и оформлена в соответствии с требованиями, устанавливаемыми приказом ректора РУДН № 40 от 20.01.2017 г.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС по направлению Электро- и теплотехника и Положением о проведении государственной итоговой аттестации по образовательным программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре РУДН.

**Разработчики:**

Доцент департамента  
машиностроения и  
приборостроения  
должность, название кафедры



подпись

П.П. Ощепков

инициалы, фамилия

**Руководитель программы:**

Доцент департамента  
машиностроения и  
приборостроения  
должность, название кафедры



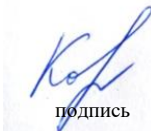
подпись

А.Р. Макаров

инициалы, фамилия

**Директор департамента:**

Машиностроения и  
приборостроения  
должность, название кафедры



подпись

А.В. Корнилова

инициалы, фамилия