

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

по науке и инновациям

\_\_\_\_\_ Комаров И.И.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ  
ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ В  
АСПИРАНТУРУ**

Группа научных специальностей - 2.4. Энергетика и электротехника

Научная специальность - 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

*Профиль: Теплофизические свойства рабочих веществ, теплотехнические процессы интенсификации производства и потребления энергии в системах и циклах малоотходных технологических установок*

Москва, 2026

## Программа специальной дисциплины по кафедре ТОТ

### 1. Техническая термодинамика

Термодинамика и ее метод. Параметры состояния. Понятие о термодинамическом процессе. Идеальный газ. Законы идеального газа. Смеси идеальных газов. Первый закон термодинамики. Теплота. Опыт Джоуля. Эквивалентность теплоты и работы. Закон сохранения и превращения энергии. Внутренняя энергия и внешняя работа. Энтальпия. Обобщенные силы и обобщенные координаты. Уравнение первого закона термодинамики. Второй закон термодинамики. Циклы. Понятие термического КПД. Источники теплоты. Обратимые и необратимые процессы. Формулировка второго закона термодинамики. Цикл Карно. Теорема Карно. Термодинамическая шкала температур. Энтропия. Изменение энтропии в необратимых процессах. Объединенное уравнение первого и второго законов термодинамики. Энтропия и термодинамическая вероятность.

Дифференциальные уравнения термодинамики. Основные математические методы термодинамики. Уравнение Максвелла. Частные производные внутренней энергии и энтальпии. Теплоемкости. Равновесие термодинамических систем и фазовые переходы. Гомогенные и гетерогенные термодинамические системы. Термодинамическое равновесие. Условия фазового равновесия. Фазовые переходы. Уравнение Клапейрона - Клаузиуса. Фазовые переходы при искривленных поверхностях раздела.

Термодинамические свойства веществ. Термические и калорические свойства жидкостей. Критическая точка. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Термические и калорические свойства реальных газов и влажного воздуха. Уравнение состояния реальных газов. Термодинамические свойства веществ на линии фазовых переходов и в критической точке. Термодинамические свойства вещества в метастабильном состоянии.

Основные термодинамические процессы. Изохорный процесс. Изобарный процесс. Изотермический процесс. Политропные процессы. Дросселирование, эффект Джоуля — Томпсона. Адиабатическое расширение реального газа в вакуум (процесс Джоуля). Процесс смешения. Процессы сжатия в компрессоре. Процессы истечения газов и жидкостей. Параметры торможения. Сопло, диффузор. Полное и статическое давление. Уравнение Бернулли. Число Маха. Показатель адиабаты. Термодинамические циклы. Термический КПД. Эксергия. Циклы Карно, Отто, Дизеля, Брайтона, Ренкина. Регенерация теплоты в цикле. Холодильные циклы. Обратные тепловые циклы и процессы. Холодильные установки. Цикл воздушной холодильной установки. Цикл пароконденсационной холодильной установки. Цикл

пароэжекторной холодильной установки. Понятие о цикле абсорбционной холодильной установки. Цикл термоэлектрической холодильной установки. Принцип работы теплового насоса. Методы сжижения газов.

## 2. Теория теплообмена

Теплопроводность. Уравнение сохранения энергии, закон Фурье, краевые условия задач теплопроводности. Механизм теплопроводности веществ в твердом (кристаллическом и аморфном), жидком и газообразном состояниях. Теплопроводность через плоскую стенку. Число Био. Коэффициент теплопередачи. Теплопроводность через цилиндрическую стенку, критический диаметр изоляции. Нестационарное температурное поле в плоской пластине, регулярный режим охлаждения (нагрева) тел. Метод перемножения решений.

Конвективный теплообмен в однокомпонентной среде. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в сплошной среде. Эмпирические законы переноса (Ньютона, Фурье, Фика). Приведение уравнений к безразмерному виду, критерии подобия. Физический смысл чисел подобия конвективного тепло- и массообмена. Тройная аналогия. Теплообмен при внешнем обтекании тела. Система уравнений теплового пограничного слоя. Анализ теплообмена при ламинарном течении в пограничном слое методами размерностей. Автомодельное решение Польшаузена. Соотношения для расчета теплообмена при различных числах Прандтля. Условные толщины пограничного слоя. Интегральные уравнения импульса и энергии. Переход ламинарного течения в турбулентное, влияние на турбулентный переход параметров набегающего потока, массовых сил, характеристик обтекаемой поверхности. Теоретические и экспериментальные аспекты перехода ламинарного течения в турбулентное. Осредненные уравнения движения и энергии для турбулентного течения. Кажущиеся напряжения турбулентного трения, турбулентный тепловой поток. Структура пристенной турбулентной области. Аналогия Рейнольдса для теплообмена при турбулентном течении в пограничном слое, ее модернизированный вариант (двухслойная схема), расчетные соотношения для теплоотдачи. Конвективный теплообмен при высоких скоростях течения. Адиабатическая температура стенки, коэффициент восстановления, методы расчета теплоотдачи. Теплообмен на проницаемой поверхности. Теплообмен при поперечном обтекании одиночного цилиндра и пучков труб.

Теплообмен при течении жидкости в каналах. Математическое описание, среднемассовая скорость и температура. Стабилизированный теплообмен при граничных условиях 2-го рода. Профили скорости, температуры, теплового потока при ламинарном и турбулентном течении, интеграл Лайона. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном термическом участке круглой трубы. Начальный

гидродинамический участок. Стабилизированный теплообмен при ламинарном течении. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении, результаты исследований для неметаллических жидкостей и жидких металлов, расчетные формулы. Влияние переменности свойств жидкости на теплообмен при течении капельных жидкостей и газов в трубах. Теплообмен при свободной конвекции. Механизм и математическое описание, приближение Буссинеска. Развитие пограничного слоя на вертикальной плоской поверхности, расчет коэффициента теплоотдачи. Свободная конвекция на поверхности горизонтального цилиндра и сферы. Свободная конвекция в замкнутых объемах; теплопередача через прослойку. Теплообмен при фазовых превращениях. Математическое описание и модели двухфазных сред. Универсальные условия совместности на межфазных границах. Специальные условия совместности для процессов тепло- и массообмена. Неравновесность на межфазных границах, квазиравновесное приближение.

Пленочная и капельная конденсация. Теплообмен при пленочной конденсации на вертикальной поверхности: решение Нуссельта, анализ основных допущений. Конденсация на поверхности горизонтального цилиндра. Конденсация движущегося пара. Качественные закономерности капельной конденсации. Кипение жидкостей. Условия зарождения парового зародыша в объеме перегретой жидкости и на твердой поверхности нагрева. Основные закономерности роста и отрыва паровых пузырьков. «Кривая кипения». Теплообмен при пузырьковом кипении в большом объеме, теплообмен при пленочном кипении. Кризисы кипения в большом объеме. Режимы течения двухфазных потоков в трубах. Характер изменения среднетемпературы жидкости, температуры стенки, расходного массового паросодержания по длине обогреваемого канала. Кипение жидкости, недогретой до температуры насыщения. Кризис теплоотдачи при кипении в трубах. Совместные процессы тепло- и массопереноса. Общая характеристика процессов переноса массы и энергии. Состав смеси, диффузионные потоки, коэффициент диффузии. Перенос энергии и импульса в смеси.

Законы теплового излучения (Планка, Вина, Стефана — Больцмана, Кирхгофа, Ламберта). Излучение реальных тел. Радиационные свойства реальных материалов. Теплообмен излучением в диатермичной среде. Геометрия излучения (локальные и средние угловые коэффициенты). Зональный метод расчета теплообмена в системе тел, разделенных прозрачной средой. Теплообмен излучением в поглощающих и излучающих средах. Излучение и поглощение в газах. Основной закон переноса энергии излучения в излучающе-поглощающей среде. Собственное излучение газа. Методы расчета теплообмена.

### **3. Основы расчета теплообменных аппаратов и средств тепловой защиты**

Современные теплообменные системы: парогенераторы тепловых электрических станций, ядерные энергетические реакторы, камеры сгорания ракетных двигателей, бланкет термоядерного реактора. Теплообменные аппараты: рекуперативные, регенеративные, смесительные.

Уравнения теплового баланса и теплопередачи. Средний температурный напор. Расчет поверхности теплообмена, конечной температуры теплоносителей. Основы гидравлического расчета теплообменников. Определение мощности, затрачиваемой на прокачку теплоносителей. Особенности выбора средств и методов тепловой защиты. Способ тепловой защиты от конвективного и совместного (конвективно-лучистого) нагрева. Проникающее охлаждение. Эффект вдува. Теплообмен между пористой матрицей и фильтрующимся охладителем.

### **4. Источники и системы теплоснабжения предприятий**

Методы определения потребности промышленных потребителей в паре и горячей воде. Тепловые сети. Методы определения расчетного расхода воды и пара. Тепловой и прочностной расчеты элементов тепловых сетей. Промышленные котельные. Тепловые схемы и их расчет. Методы распределения нагрузки между котлами. Энергетические, экономические и экологические характеристики котельных. Теплоэлектроцентрали промышленных предприятий. Методика определения энергетических показателей теплоэлектроцентралей. Утилизационные котельные, теплонасосные установки и ТЭЦ, использующие вторичные энергетические ресурсы предприятий для генерации тепловой и электрической энергии. Когенерационные и тригенерационные установки. Теплонасосные и холодильные установки, области применения, показатели эффективности.

### **5. Котельные установки и парогенераторы**

Источники теплоты промышленных котельных установок. Материальные и тепловые балансы котельных установок при работе на газовом, жидком и твердом топливах. Пароперегреватели котлов. Методы регулирования температуры пара. Экономайзеры и их включение в питательные магистрали. Конструктивные схемы воздушных подогревателей. Конструкции котлов с естественной циркуляцией, прямоточных и с многократной принудительной циркуляцией. Водогрейные и пароводогрейные котлы. Котлы высоко- и низконапорные, прямого действия и с не водяными теплоносителями. Котлы, использующие теплоту технологического продукта.

#### **4. Теплообменное оборудование предприятий**

Рекуперативные теплообменники непрерывного и периодического действия, регенеративные теплообменники с неподвижной и подвижной насадками, газожидкостные и жидкостно-жидкостные смесительные теплообменники. Испарительные, опреснительные, выпарные и кристаллизационные установки. Тепловые схемы и принцип работы. Физико-химические и термодинамические основы процессов выпаривания и кристаллизации. Основы теплового расчета. Перегонные и ректификационные установки. Физико-химические и термодинамические основы процессов перегонки и ректификации. Процессы термовлажностной обработки воздуха. Теплообменники с влаговыпадением. Сушильные установки. Понятие и процессы сушки. Формы связи влаги с материалом. Основы кинетики и динамики сушки. Теплообменники-утилизаторы для использования теплоты вентиляционных выбросов, отработанного сушильного агента, низкопотенциальных вторичных энергоресурсов.

#### **5. Тепловые двигатели и нагнетатели**

Место нагнетателей и тепловых двигателей в системах теплоэнергоснабжения промышленных предприятий. Классификация и область применения нагнетателей объемного действия и поршневых детандеров. Схемы поршневых компрессоров. Принцип работы поршневого детандера. Холодопроизводительность, КПД и отводимая мощность поршневого детандера. Теоретическая характеристика нагнетателя. Общая классификация потерь в нагнетателях. Способы изменения характеристики вентилятора. Особенности работы насосов в сети. Центробежные и осевые компрессоры. Основные способы изменения характеристики компрессора. Типы паровых турбин. Работа и мощность турбинной ступени. Типы потерь в проточной части турбины. Принципиальные схемы паротурбинных установок. Схемы газотурбинных установок. Особенности работы высокотемпературных ступеней газовой турбины. Работа газовой турбины в составе энергетических и приводных установок. Особенности работы турбодетандеров. Газопоршневые двигатели. Энергетические установки на основе органического цикла Ренкина. Принцип действия и область применения двигателей Стирлинга.

#### **6. Технологические энергоносители предприятий**

Системы производства и распределения энергоносителей на промышленных предприятиях. Характеристика энергоносителей. Методика определения потребности в энергоносителях. Система воздухообеспечения. Прямоточные, оборотные и бессточные системы технического водоснабжения. Расчет системы газоснабжения. Газовый баланс предприятия. Проблемы очистки, аккумулирование, использование

избыточного давления. Проблемы защиты окружающей среды. Системы холодоснабжения

## 7. Технология энергетических топлив

Особенности подготовки и использования твердого топлива. Особенности подготовки и использования жидкого топлива. Особенности подготовки и использования газового топлива. Классификация твердого топлива. Классификация твердого топлива по содержанию углерода. Выражение массы твердого топлива, обозначения, пересчет. Классификация жидкого топлива. Определение влагосодержания топлива. Взаимосвязь коэффициента избытка воздуха и полноты сгорания топлива. Хранение жидкого топлива. Хранение твердого топлива. Определение теплоты сгорания твердого топлива. Уравнения для определения теплоты сгорания твердого топлива. Уравнения для определения теплоты сгорания газообразного топлива. Уравнения для определения теплоты сгорания жидкого топлива.

Топливное хозяйство электростанции. Способы доставки топлива, приемно - разгрузочные и размораживающие устройства. Транспортные механизмы топливоподачи и дробильные установки. Системы пылеприготовления. Системы золошлакоудаления. Схемы газоздушных трактов и оценка их эффективности. Основы разработки элементов газоздушных трактов. Предотвращение золовых отложений в газоходах. Характеристики тягодутьевых машин. Воздуходувки для котлов под наддувом. Методы регулирования производительности тягодутьевых машин.

Опыт применения ИКЖТ. ВУТ. Свойства ВУТ. ВУС. Свойства гетерогенных систем. Реологические свойства ВУС. Механизм образования суспензии. Понятие о дисперсных системах. Диспергирование и конденсация. Механическое диспергирование и механосинтез. Схемы подготовки ВУТ. Классическая система приготовления ВУТ. Схема подготовки ВУТ методом кавитации. Схема подготовки ВУТ в гидроударной установке мокрою помола. Сравнение эксплуатационных параметров схем получения ВУТ. Специальные методы изготовления ВУТ. Применение химических реагентов для ВУС. Горение ВУТ. Критерии воспламенения топлив. Способы зажигания ВУТ. Стадии процесса горения ВУТ. Газификация ВУТ. Технические особенности перевода энергетических объектов на сжигание ИКЖТ. Перевод на ВУТ котла КВ-ТС-20. Перевод на ВУТ котла ДКВР 6.5/13. Экологические преимущества использования ВУТ.

## 8. Защита окружающей среды от вредных выбросов

Воздействие предприятий на окружающую среду. Нормирование вредных выбросов в атмосферу. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосфере. Предельно допустимые и временно согласованные выбросы. ГОСТ Р 50831-95: нормативы удельных выбросов из котлов.

Снижение выбросов частиц золы в атмосферу. Снижение выбросов оксидов азота и соединений серы в атмосферу. Сокращение выбросов водяного пара и парниковых газов в атмосферу. Снижение вредного воздействия золошлаков на окружающую среду.

Основные направления сокращения водопотребления и сброса сточных вод. Образование шламов и пути их утилизации. Причины создания бессточных и малосточных систем технического водоснабжения. Технологические схемы с высокими экологическими показателями.

### Основная литература

1. Тепломассообмен. Том 1: учебник / А.П. Солодов, Д.В. Сиденков, В.И. Величко: под общей ред. А.П. Солодова М.: Издательство МЭИ, 2021. – 484 с.
2. Тепломассообмен. Том 2: учебник / А.П. Солодов, Д.В. Сиденков: под общей ред. А.П. Солодова М.: Издательство МЭИ, 2023. – 608 с.
3. Техническая термодинамика: учебник / А. А. Александров, В. С. Охотин, К. А. Орлов М.: Издательство МЭИ, 2024. – 476 с.
4. Природоохранные технологии на ТЭС: учебник /И. С. Никитина, В.Б.Тупов, В.Б. Прохоров: под общ. ред. Рогалева Н.Д. и Прохорова В.Б. М.: Издательство МЭИ, 2021. – 452 с.
5. Тепловые электрические станции. учебник/ Н. Д. Рогалев, А. А. Дудолин, Е. Н. Олейникова: под ред. Рогалева Н.Д. М.: Издательство МЭИ, 2022. – 768 с.
6. Техническая термодинамика : учебник для вузов по направлению 140100 "Теплоэнергетика" / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин . - 5-е изд., перераб. и доп. - М. : Изд. дом МЭИ, 2008 . - 496 с. - ISBN 978-5-383-00263-6 .
7. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок : учебное пособие для вузов по направлению "Теплоэнергетика" / А. А. Александров . - 2-е изд., стереот . - М. : Изд. дом МЭИ, 2006 . - 158 с. - ISBN 5903072-60-7 .
8. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях : учебное пособие для вузов по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / В. В. Ягов . - М. : Изд. дом МЭИ, 2014 . - 542 с. - ISBN 978-5-383-00854-6.
9. Тепломассообмен : учебник для вузов по направлению "Теплоэнергетика" / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев . - М. : Изд. дом МЭИ, 2011 . - 562 с. - ISBN 9785-383-00563-7.

10. Задачник по тепломассообмену : учебное пособие для вузов по направлению 140100 "Теплоэнергетика" / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко . - 3-е изд., стер . - М. : Изд. дом МЭИ, 2010 . - 196 с. - ISBN 978-5-38300468-5 .
11. Механика двухфазных систем : учебное пособие для вузов по направлению "Техническая физика" / Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов . - 2-е изд., перераб. и доп . - М. : Изд. дом МЭИ, 2007 . - 384 с. - ISBN 978-5-383-00036
12. Кн.2: Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / А. А. Александров, и др. ; Общ. ред. А. В. Клименко, В. М. Зорин . - 2007 . - 564 с. - ISBN 978-5-383-00017-5 .
8. Кн.4 : Промышленная теплоэнергетика и теплотехника / Б. Г. Борисов, и др. ; Общ. ред. А. В. Клименко, В. М. Зорин . - 2007 . - 632 с. - ISBN 978-5-383-000199 .
9. Введение в механику жидкости : учебное пособие для вузов по направлениям "Техническая физика", "Теплоэнергетика" / Е. П. Валуева, В. Г. Свиридов . - 2-е изд., перераб . - М. : Изд. дом МЭИ, 2007 . - 212 с. - ISBN 978-5383-00109-7 .
10. Механика несжимаемых и сжимаемых жидкостей : учебник для вузов по направлению "Энергетическое машиностроение" и "Теплоэнергетика и теплотехника" / А. Е. Зарянкин . - М. : Изд. дом МЭИ, 2014 . - 590 с. - ISBN 9785-383-00903-1 .
11. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках : учебное пособие для вузов по специальности "Атомные электрические станции и установки" / П. Л. Кириллов, Г. П. Богословская . - 2-е изд., перераб . - М. : Энергоатомиздат, 2008 . - 256 с. - ISBN 978-5-86656-210-7 .

#### **Дополнительная литература**

1. Сложные термодинамические системы / В. В. Сычев . - 5-е изд., доп . - М. : Изд. дом МЭИ, 2009 . - 296 с. - ISBN 978-5-383-00418-0 .
2. Системные методы расчета краевых задач тепломассопереноса: прямые и обратные задачи нестационарной теплопроводности и термоупругих напряжений. Гидродинамика и теплообмен в каналах сложного профиля / П. В. Цой . - 3-е изд., перераб. и доп . - М. : Изд-во МЭИ, 2005 . - 568 с. - ISBN 5-7046-1296-2 .
3. Тепловые процессы в наноструктурах : учебное пособие для вузов по курсам "Тепловые процессы в наноструктурах", "Проблемы и перспективы наноэнергетики", "Физико-химия наночастиц и наноматериалов", по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / А. С. Дмитриев, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . - М. : Изд. дом МЭИ, 2012 . - 303 с. - ISBN 978-5-383-00708-2 .
4. С.Седлов, Ю.А.Кузма-Кичта // Гидродинамика и теплообмен при кипении водных растворов. Издательский дом МЭИ, 2007. 164 с. ISBN: 978-5-383-00111-0.
5. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена: монография / под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. - Казань: Центр инновационных технологий, 2009. - 560 с. ISBN 978-5-93962-383-4.
6. Теплообмен в ядерных энергетических установках : учебное пособие для вузов по специальностям "Теплофизика" и "Атомные электрические станции и установки"

направления "Техническая физика" / Б. С. Петухов, Л. Г. Генин, С. А. Ковалев, и др. .  
- 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МЭИ, 2003 . - 548 с. - ISBN 5-7046-0843-4.

## ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ

Доцент кафедры  
Теоретических основ теплотехники  
к.т.н.

И.А. Бураков

Заведующий кафедрой  
Теоретических основ теплотехники  
к.т.н., доцент

Ю.В. Шацких

И.о. директора ИТАЭ  
к.т.н., доцент

А.А. Дудолин