Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Максимов Алексей Борисович
Должность: директор департамента по образовательной политике
Дата подписания: 25.06.2026 12:15:50
Уникальный программный ключ:
8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

Транспортный факультет

УТВЕРЖДАЮ
И.о. декана
/М.Р. Рыбакова/
«26» февраля 2026 г

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ВОДОРОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК БУДУЩЕГО

Направление подготовки/ специальность
13.03.03 «Энергетическое машиностроение»

Профиль/ специализация
Поршневые двигатели и турбомашины

Квалификация
Бакалавр

Форма обучения
Очная

Москва, 2026

Разработчик(и):
к.т.н., доцент  /Д.В. Апелинский/

Согласовано:
Заведующий кафедрой «Энергоустановки для транспорта и малой энергетики», д.т.н.  /Г.Г. Надарейшвили/

Оглавление

1. Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине 3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы 5
3. Структура и содержание дисциплины 6
3.1. Виды учебной работы и трудоемкость 6
3.2. Тематический план изучения дисциплины 6
3.3. Содержание дисциплины 7
3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий 9
3.4.1. Семинарские/практические занятия 9
3.4.2. Лабораторные занятия 10
3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ) 10
4. Учебно-методическое и информационное обеспечение 10
4.1. Нормативные документы и ГОСТы 10
4.2 Основная литература 11
4.3 Дополнительная литература 12
4.4. Электронные образовательные ресурсы 13
4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение 13
4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы 14
5. Материально-техническое обеспечение 14
6. Методические рекомендации 15
6.1. Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения 15
6.2. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины 16
7. Фонд оценочных средств 17
7.1 Методы контроля и оценивания результатов обучения 17
7.2 Шкала и критерии оценивания результатов обучения 19
7.3 Оценочные средства 21

1. Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине

Целью освоения дисциплины является формирование у обучающихся системных теоретических знаний и практических навыков в области водородных технологий, включая методы производства, хранения, транспортировки и использования водорода в энергетических установках различного назначения, а также освоение методов оценки энергетической эффективности, экологической безопасности и экономической целесообразности применения водородных технологий в энергетическом машиностроении.

Задачами дисциплины являются:

- изучение физико-химических свойств водорода как энергоносителя, его преимуществ и недостатков по сравнению с традиционными углеводородными топливами;
- освоение современных методов производства водорода: паровая конверсия метана, электролиз воды (щелочной, PEM-электролиз), газификация биомассы и угля, термохимические циклы;
- изучение способов хранения водорода: сжатый газообразный водород, криогенный жидкий водород, металлогидридное хранение, химическое хранение (LOHC, аммиак, метанол);
- освоение методов транспортировки водорода: трубопроводный транспорт, транспортировка в сжатом и сжиженном виде, в химически связанном состоянии;
- изучение принципов работы и конструктивных особенностей энергетических установок на водороде: поршневые двигатели внутреннего сгорания, газотурбинные установки, топливные элементы;
- формирование навыков расчёта энергетической эффективности водородных энергоустановок, оценки экологических показателей (снижение выбросов CO_2, NOx);
- освоение методов оценки экономической эффективности водородных проектов, включая расчёт стоимости водорода (LCOH) и срока окупаемости;
- изучение требований безопасности при работе с водородом, включая взрывопожароопасность, детекторы утечек, совместимость материалов;
- формирование понимания роли водородных технологий в достижении углеродной нейтральности и обеспечении энергетической безопасности.

В результате освоения дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции и должны быть достигнуты следующие результаты обучения:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
ОПК-3. Способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач	**ИОПК-3.1.** Умеет применять соответствующий физико-математический аппарат при решении профессиональных задач.
	ИОПК-3.2. Умеет применять методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач.
УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	**ИУК-1.1.** Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие.
	ИУК-1.2. Осуществляет поиск, критически оценивает, обобщает, систематизирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи.

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
	ИУК-1.3. Рассматривает и предлагает рациональные варианты решения поставленной задачи, используя системный подход, критически оценивает их достоинства и недостатки.

Роль дисциплины в формировании компетенций:

Обзорная и формирующая. Дисциплина знакомит студентов с перспективными водородными технологиями, которые рассматриваются как одно из ключевых направлений развития энергетического машиностроения в контексте глобального энергетического перехода и достижения углеродной нейтральности. В четвёртом семестре, в рамках изучения дисциплины, студент осваивает физико-химические свойства водорода, методы его производства, хранения и транспортировки, принципы работы энергетических установок на водороде, а также методы оценки их эффективности и безопасности.

Дисциплина формирует компетенцию ОПК-3, развивая у студентов способность применять физико-математический аппарат (термодинамику, теплотехнику, гидрогазодинамику) для расчёта параметров водородных энергоустановок, а также использовать методы анализа и моделирования для оценки их эффективности. Кроме того, дисциплина формирует компетенцию УК-1, развивая навыки поиска, критического анализа и систематизации информации о современных и перспективных водородных технологиях, а также способность предлагать рациональные варианты их применения для решения профессиональных задач.

Знания и навыки, полученные в данной дисциплине, являются основой для последующего изучения дисциплин, связанных с альтернативной энергетикой, и используются при подготовке выпускной квалификационной работы.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина **«Водородные технологии для энергоустановок будущего»** относится к **факультативным дисциплинам** учебного плана (код дисциплины: ФТД.4) и изучается в **4-м семестре**.

Данная дисциплина является **обзорной и формирующей** в области перспективных водородных технологий для энергетического машиностроения. Она даёт студентам системное представление о водороде как универсальном энергоносителе, о способах его получения, хранения и использования в различных типах энергетических установок (двигателях внутреннего сгорания, газовых турбинах, топливных элементах), а также о требованиях безопасности при работе с водородом.

Изучение дисциплины базируется на знаниях, умениях и навыках, полученных при освоении следующих дисциплин и курсов:

- **Физика** (школьный курс, а также дисциплина «Физика» (Б1.1.26.3, 2-3 семестры) — знание основ термодинамики, электродинамики, молекулярной физики необходимо для понимания свойств водорода и принципов работы энергоустановок;
- **Химия** (школьный курс, а также дисциплина «Органическая химия» (Б1.1.10, 1 семестр) — знание химических реакций, стехиометрии, катализа необходимо для понимания процессов производства водорода (паровая конверсия, электролиз);
- **Термодинамика** (Б1.1.17, 3 семестр) — знание термодинамических циклов и законов необходимо для расчёта эффективности водородных энергоустановок;
- **Физическая культура и спорт** (Б1.1.6, 1 семестр) — формирует общие представления о здоровьесбережении, что дополняет раздел о безопасности при работе с водородом.

Основные положения дисциплины используются в дальнейшем при изучении следующих дисциплин и освоении элементов образовательной программы:

- **Экология и токсичность поршневых двигателей** (Б1.2.17, 7 семестр) — водородные технологии рассматриваются как экологически чистая альтернатива;

• **Альтернативные энергетические установки** (Б1.ЭД.2, 6 семестр) — водородные технологии являются одним из ключевых разделов данной дисциплины;

• **Комбинированные энергетические установки** (Б1.2.20, 8 семестр) — водород может использоваться в комбинированных циклах;

• **Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы** (Б3.1, 8 семестр) — тематика ВКР может быть связана с разработкой или анализом водородных энергоустановок.

Примечание. Дисциплина «Водородные технологии для энергоустановок будущего» (ФТД.4) является логическим продолжением и углублением тематики, начатой в дисциплине «Альтернативные топлива для двигателей и методы исследования их эксплуатационных характеристик» (Б1.ЭД.2, 6 семестр), где водород рассматривается как один из видов альтернативных топлив. Данный факультатив, изучаемый в 4-м семестре, позволяет студентам получить более глубокие и систематизированные знания о водородных технологиях на более раннем этапе обучения, что способствует формированию устойчивого интереса к данной тематике и осознанному выбору направления для последующей проектной и научно-исследовательской деятельности.

3. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **2 зачетные единицы (72 часа)**.

3.1. Виды учебной работы и трудоемкость

№ п/п	Вид учебной работы	Количество часов	Семестры
			4
1	Аудиторные занятия	36	36
	В том числе:		
1.1	Лекции	18	18
1.2	Семинарские/практические занятия	18	18
1.3	Лабораторные занятия	–	–
2	Самостоятельная работа	36	36
3	Промежуточная аттестация		
	Зачет/диф.зачет/экзамен	Зачет	Зачет
	Итого	**72**	**72**

3.2. Тематический план изучения дисциплины

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Самостоятельная работа
Семестр 4	**Водородные технологии**					

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Самостоятельная работа
1	Тема 1. Введение. Роль водорода в энергетике будущего	6	2	2	–	4
2	Тема 2. Физико-химические свойства водорода	8	4	2	2	4
3	Тема 3. Способы получения водорода	8	4	2	2	4
4	Тема 4. Хранение и транспортировка водорода	8	4	2	2	4
5	Тема 5. Безопасность при работе с водородом	6	2	2	–	4
6	Тема 6. Использование водорода в двигателях внутреннего сгорания	10	6	2	4	4
7	Тема 7. Водород как добавка к основному топливу. Метан-водородные смеси	8	4	2	2	4
8	Тема 8. Водород в газотурбинных установках	6	2	2	–	4
9	Тема 9. Топливные элементы: принцип работы, типы, применение	10	6	2	4	4
10	Подготовка к зачёту	2	–	–	–	2
	Итого за 1 семестр	**72**	**36**	**18**	**18**	**36**

3.3. Содержание дисциплины

Семестр 4. Водородные технологии

Тема 1. Введение. Роль водорода в энергетике будущего

Предпосылки перехода к водородной энергетике: истощение ископаемого топлива, экологические проблемы (парниковый эффект, загрязнение воздуха), энергетическая безопасность. Понятие «водородная экономика». Мировые тенденции и государственные программы развития водородной энергетики (Европа, Япония, Китай, Россия). Место водорода в структуре будущего топливно-энергетического баланса. Роль водородных технологий в декарбонизации транспорта и энергетики. Связь дисциплины со сквозным проектированием.

Тема 2. Физико-химические свойства водорода

Водород как химический элемент. Молекулярный и атомарный водород. Основные физико-химические свойства: плотность (газа и жидкости), температура кипения и плавления, критические параметры, теплота сгорания (высшая и низшая), теплоёмкость, теплопроводность, вязкость. Горение водорода: стехиометрическое соотношение, скорость распространения пламени, температура пламени, концентрационные пределы воспламенения, энергия зажигания. Диффузионная

способность. Проникновение через материалы. Взаимодействие с конструкционными материалами (водородная хрупкость, наводороживание). Сравнение свойств водорода с традиционными топливами (бензин, дизельное топливо, метан, пропан-бутан).

Тема 3. Способы получения водорода

Классификация методов получения водорода по цветовой маркировке: серый, голубой, зелёный, бирюзовый, розовый водород. Промышленные методы: паровая конверсия метана (SMR) – наиболее распространённый метод, принцип, стадии, катализаторы, преимущества и недостатки. Газификация угля и биомассы. Частичное окисление углеводородов. Электролиз воды: принцип, типы электролизёров (щелочные, с протонообменной мембраной (PEM), твердооксидные (SOEC)), эффективность, перспективы. Термохимические циклы. Фотолиз (биологический и искусственный). Пиролиз метана. Сравнение методов по энергоэффективности, себестоимости, экологичности. Получение водорода как побочного продукта промышленных процессов.

Тема 4. Хранение и транспортировка водорода

Проблемы хранения водорода, обусловленные его низкой плотностью. Способы хранения: сжатый газообразный водород (CGH2) – баллоны высокого давления (типы баллонов: металлические, композитные), параметры, достоинства и недостатки. Криогенное хранение жидкого водорода (LH2) – криогенные резервуары, требования к теплоизоляции, испарение (boil-off), преимущества и недостатки. Металлогидридное хранение: принцип обратимого поглощения водорода металлами и сплавами, материалы, ёмкость, кинетика, преимущества и недостатки. Химическое хранение: жидкие органические носители водорода (LOHC), аммиак, метанол. Сравнение методов по массовой и объёмной плотности хранения, безопасности, стоимости. Транспортировка водорода: трубопроводный транспорт, транспортировка в сжатом и сжиженном виде, в химически связанном состоянии.

Тема 5. Безопасность при работе с водородом

Особенности водорода как опасного вещества: широкие концентрационные пределы взрываемости, низкая энергия зажигания, высокая скорость распространения пламени, способность к детонации, невидимое пламя, высокая проникающая способность, водородная хрупкость материалов. Меры безопасности при производстве, хранении, транспортировке и использовании водорода. Требования к оборудованию и материалам. Детекторы утечек водорода. Вентиляция. Правила эксплуатации водородных систем. Опыт промышленной безопасности. Нормативные документы, регламентирующие обращение с водородом.

Тема 6. Использование водорода в двигателях внутреннего сгорания

Особенности рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием при работе на чистом водороде. Преимущества: широкие пределы воспламенения, высокая скорость сгорания, высокий КПД, практически нулевые выбросы CO, CH, твёрдых частиц. Недостатки и проблемы: раннее воспламенение (обратные вспышки во впускном коллекторе), высокая температура сгорания и образование NOx, низкая мощность из-за малой объёмной энергоёмкости водородовоздушной смеси, водородная хрупкость, проблемы хранения на борту. Способы организации рабочего процесса: внешнее смесеобразование (во впускном коллекторе) и непосредственный впрыск водорода в цилиндр. Сравнение этих способов. Регулирование мощности: качественное (изменение состава смеси) и количественное (дросселирование). Конструктивные изменения двигателя для работы на водороде (система зажигания, система впрыска, материалы, система смазки).

Тема 7. Водород как добавка к основному топливу. Метан-водородные смеси

Обоснование эффективности добавки водорода к углеводородным топливам. Влияние добавки водорода на рабочий процесс двигателя: расширение пределов воспламенения, увеличение скорости сгорания, повышение полноты сгорания, снижение выбросов CO и CH, возможность работы на бедных смесях, повышение КПД, снижение детонации. Оптимальные дозы добавки (3-10% по массе). Метан-водородные смеси (Hydromethane, HCNG): свойства, преимущества, опыт применения. Влияние содержания водорода на параметры двигателя и выбросы. Использование водорода в качестве активатора сгорания для низкосортных топлив.

Тема 8. Водород в газотурбинных установках

Перспективы использования водорода в газотурбинных двигателях и установках. Особенности сжигания водорода в камерах сгорания ГТУ: высокая скорость сгорания, высокие температуры,

образование NOx. Конструктивные решения для обеспечения устойчивого и низкоэмиссионного сгорания водорода: микро-смешение (micromix), диффузионное сгорание с впрыском воды/пара, каталитическое сгорание. Опыт создания газовых турбин, работающих на водороде. Проекты по переводу ГТУ на водородное топливо. Водород в авиационных газотурбинных двигателях.

Тема 9. Топливные элементы: принцип работы, типы, применение

Топливный элемент (ТЭ) как электрохимический генератор. Отличие от гальванического элемента и аккумулятора. Принцип работы ТЭ с протонообменной мембраной (PEMFC): анод, катод, электролит, мембрана, катализатор. Электрохимические реакции. Выходное напряжение, вольт-амперная характеристика. КПД топливного элемента. Типы топливных элементов: по рабочей температуре (низкотемпературные, высокотемпературные), по типу электролита:

- Щелочные (AFC)
- С протонообменной мембраной (PEMFC)
- С прямым окислением метанола (DMFC)
- Фосфорнокислые (PAFC)
- С расплавленным карбонатом (MCFC)
- Твердооксидные (SOFC)
- Сравнение типов по характеристикам, преимуществам, недостаткам, областям применения.

Применение топливных элементов на транспорте (автомобили, автобусы, поезда, суда). Водородные автомобили: устройство, запас хода, заправка, безопасность. Стационарные энергоустановки на топливных элементах для малой энергетики и резервного питания. Перспективы развития.

3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий

3.4.1. Семинарские/практические занятия

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
1	Тема 2	Расчёт энергетических характеристик водорода (теплота сгорания, стехиометрическое соотношение)	2
2	Тема 3	Сравнительный анализ себестоимости и энергоэффективности различных методов получения водорода	2
3	Тема 4	Расчёт параметров хранения водорода (давление, объём баллона, масса металлогидрида)	2
4	Тема 4	Сравнение массовой и объёмной плотности хранения водорода различными способами	2
5	Тема 6	Расчёт параметров рабочего процесса ДВС при работе на водороде (мощность, КПД, выбросы NOx)	2
6	Тема 6	Анализ конструктивных решений для организации рабочего процесса водородного ДВС	2
7	Тема 7	Расчёт оптимальной добавки водорода к бензину и метану для различных режимов	2
8	Тема 9	Расчёт электрических характеристик топливного элемента (напряжение, мощность, КПД)	2

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
9	Тема 9	Сравнительный анализ типов топливных элементов для различных применений	2
	Итого		**18**

3.4.2. Лабораторные занятия

Лабораторные занятия по дисциплине не предусмотрены.

3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ)

Курсовой проект (курсовая работа) по дисциплине не предусмотрены. Результаты освоения дисциплины используются при рассмотрении возможности применения водородных технологий в рамках сквозного проекта, а также при моделировании рабочих процессов двигателей, использующих водород в качестве топлива или добавки.

4. Учебно-методическое и информационное обеспечение

4.1. Нормативные документы и ГОСТы

При изучении дисциплины «Водородные технологии для энергоустановок будущего» и выполнении учебных, расчётно-графических и проектных работ необходимо руководствоваться следующими нормативными документами и межгосударственными стандартами, регламентирующими требования безопасности, технические условия на водородное топливо, методы производства, хранения и транспортировки водорода, а также правила оформления технической документации.

Стандарты на водородное топливо и технические условия

ГОСТ Р ИСО 14687-2024 «Водородное топливо. Технические условия» определяет минимальные качественные характеристики водородного топлива, предназначенного для использования в транспортных средствах и стационарных энергетических установках, включая требования к чистоте водорода, содержанию примесей (вода, кислород, азот, углеводороды, сера, аммиак и др.), а также методы контроля качества . Данный стандарт введён взамен ГОСТ Р ИСО 14687-1-2012 и ГОСТ 55466-2013.

ГОСТ Р 54110-2010 «Водородные генераторы на основе технологий переработки топлива. Часть 1. Безопасность» распространяется на автономные водородные генераторы или генераторные системы с производительностью водорода менее 400 м³/ч, преобразующие подаваемое топливо (природный газ, биогаз, метанол, этанол, дизельное топливо, бензин и др.) в водородсодержащий газ, пригодный для энергетических установок на топливных элементах или систем компрессии, хранения и транспортирования водорода .

Стандарты на хранение и транспортировку водорода

ГОСТ Р 54114-2010 «Передвижные устройства и системы для хранения водорода на основе гидридов металлов» устанавливает требования к проектированию, конструкции, материалам и методам испытания систем для хранения газообразного водорода в металлогидридных соединениях с внутренним объёмом не более 150 л и рабочим давлением, не превышающим 25 МПа .

ГОСТ Р 54113-2010 «Соединительные устройства для многократной заправки сжатым водородом наземных транспортных средств» устанавливает требования к разработке, изготовлению и эксплуатации соединительных устройств для заправки транспортных средств, работающих на сжатом водороде, включая заправочные приёмники, защитные крышки и заправочные вентили для рабочих давлений 25 МПа и 35 МПа .

Стандарты безопасности при работе с водородом

ГОСТ Р 12.3.047-98 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» устанавливает требования пожарной безопасности при проектировании и эксплуатации технологических процессов, в которых обращаются горючие газы, включая водород. Водород отнесён к категории веществ

повышенной пожарной опасности с пороговым количеством 50 тонн для отнесения технологического процесса к категории повышенной опасности .

ГОСТ Р 54111.2-2010 «Дорожные транспортные средства на топливных элементах. Требования безопасности. Часть 2. Защита от опасностей, связанных с использованием водорода, в транспортных средствах, работающих на сжатом водороде» устанавливает основные требования к транспортным средствам на топливных элементах в отношении опасности для людей и окружающей среды, связанной с использованием сжатого водорода, включая требования к безотказной работе и работе при единичных отказах .

Стандарты на методы анализа и испытаний

ГОСТ 24956-81 «Титан и сплавы титановые. Метод определения водорода» устанавливает метод вакуум-нагрева для определения массовой доли водорода в титане и титановых сплавах (от 0,0006 до 0,05 %), основанный на экстракции водорода из анализируемого образца при нагреве в вакууме .

Стандарты на электротехническое оборудование и общие технические требования

ГОСТ Р 54127-2-2011 «Сети электрические распределительные низковольтные. Электробезопасность. Аппаратура для испытания, измерения или контроля средств защиты. Часть 2. Сопротивление изоляции» устанавливает требования к аппаратуре для измерения сопротивления изоляции электрооборудования водородных энергоустановок .

ГОСТ Р 54127-3-2011 «Сети электрические распределительные низковольтные. Электробезопасность. Аппаратура для испытания, измерения или контроля средств защиты. Часть 3. Полное сопротивление контура» устанавливает требования к аппаратуре для измерения полного сопротивления контура в электрооборудовании водородных энергетических систем .

ГОСТ Р 54124-2010 «Безопасность машин и оборудования. Оценка риска» устанавливает общие принципы оценки риска и его снижения для машин и оборудования, включая водородные генераторы и системы хранения водорода .

Стандарты на эксплуатационную документацию

ГОСТ Р 54121-2010 «Безопасность машин и оборудования. Требования к эксплуатационной документации» устанавливает правила выполнения руководства по эксплуатации машин и оборудования, включая водородные энергетические установки .

ГОСТ 2.105-95 «Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам» устанавливает общие требования к выполнению текстовых конструкторских документов, включая пояснительные записки, технические условия, паспорта и инструкции по эксплуатации водородных энергоустановок.

Примечание. При выполнении курсовых проектов и индивидуальных заданий по дисциплине следует руководствоваться действующими версиями указанных стандартов. Актуальность стандартов можно проверить на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) по адресу: https://www.gost.ru, а также в Электронном фонде правовых и нормативно-технических документов по адресу: https://docs.cntd.ru.

4.2 Основная литература

Для освоения дисциплины рекомендуется использовать следующую основную литературу, которая охватывает физико-химические свойства водорода, методы его производства, хранения, транспортировки и использования в энергетических установках, а также вопросы безопасности и экономической эффективности водородных технологий.

1. **Радченко, Р. В. Общая энергетика: водород в энергетике : учебное пособие для вузов / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа ; под научной редакцией С. Е. Щеклеина. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 230 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-07557-1. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: https://urait.ru/bcode/538896.**

В данном пособии рассмотрен теоретический материал о способах получения, хранения водорода и основные направления научно-поисковых работ в области водородной энергетики.

Проведено сравнение различных методов производства водорода и показаны перспективы развития водородной энергетики в России и за рубежом. Рекомендуется для изучения всех тем дисциплины.

2. **Лотоцкий, Б. П. Водородные и металлогидридные энерготехнологии : учебное пособие / Б. П. Лотоцкий, М. В. Тарасов. — Черноголовка : ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 2024. — 250 с. — ISBN 978-5-91845-114-4.**

В пособии обоснована необходимость перехода к «безуглеродной» энергетике и внедрения водородных энерготехнологий как её ключевого элемента. Рассмотрены основные вопросы, относящиеся к материалам и системам водородной энергетики, включая технологии производства, хранения, транспортировки и использования водорода. Представлен принцип работы и области использования металлогидридов как перспективных материалов для водородных энерготехнологий. Приведён обзор тенденций и стратегий развития водородной энергетики в мире и Российской Федерации.

3. **Чемезов, А. В. Научно-технический прогресс в энергетике. Водородная энергетика : учебное пособие / А. В. Чемезов, Е. Ю. Чемезова, А. А. Сыромятников, И. Н. Шушпанов. — Иркутск : Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2021. — 125 с. — ISBN 978-5-8038-1631-7.**

Пособие соответствует требованиям ФГОС ВО по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника». Рассмотрен теоретический материал о способах получения, хранения, транспорта водорода и основные направления научно-поисковых работ в области водородной энергетики. Проведено сравнение различных методов производства водорода и показаны перспективы развития водородной энергетики в России и за рубежом. Предназначено для студентов, обучающихся на энергетических специальностях.

4.3 Дополнительная литература

Для углублённого изучения отдельных разделов дисциплины, расширения кругозора и выполнения самостоятельной работы рекомендуется использовать следующую дополнительную литературу, содержащую сведения о специальных вопросах водородных технологий, включая топливные элементы, системы хранения водорода, экономические аспекты и экологическую безопасность.

1. **Куликов, А. В. Топливные элементы и водородная энергетика : учебное пособие / А. В. Куликов, С. А. Куликов. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — 180 с. — ISBN 978-5-7038-5325-4.**

Пособие содержит подробное описание принципов работы топливных элементов различных типов (PEMFC, SOFC, PAFC, AFC, MCFC), их устройства, характеристик и областей применения, а также вопросы интеграции топливных элементов в энергетические системы и транспортные средства.

2. **Белов, А. В. Безопасность водородных энергетических установок : учебное пособие / А. В. Белов, В. А. Голубев. — Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2021. — 156 с. — ISBN 978-5-7422-7123-8.**

Пособие посвящено вопросам обеспечения безопасности при проектировании, изготовлении и эксплуатации водородных энергетических установок. Рассмотрены физико-химические свойства водорода как опасного вещества, методы обнаружения утечек, требования к материалам и оборудованию, системы вентиляции и взрывозащиты, а также нормативно-правовое регулирование в области промышленной безопасности водородных систем.

3. **Ермолаев, А. И. Экономика водородной энергетики : учебное пособие / А. И. Ермолаев. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2022. — 200 с. — ISBN 978-5-383-01567-4.**

Пособие содержит методы оценки экономической эффективности водородных проектов, расчёт приведённой стоимости водорода (LCOH — Levelized Cost of Hydrogen), анализ капитальных и эксплуатационных затрат для различных методов производства (электролиз, паровая конверсия, газификация), сроков окупаемости, а также обзор государственных программ поддержки водородной энергетики в России и за рубежом.

4. **Королёв, П. В. Материалы для водородной энергетики : учебное пособие / П. В. Королёв, И. А. Степанов. — Москва : МИСиС, 2021. — 140 с. — ISBN 978-5-87623-982-3.**

Пособие посвящено материалам, используемым в водородной энергетике: металлогидриды для хранения водорода, мембранные материалы для электролизёров и топливных элементов, конструкционные материалы для работы в водородной среде (водородная коррозия, водородное охрупчивание, совместимость материалов).

5. **Сидоров, Е. П. Экологические аспекты водородной энергетики : учебное пособие / Е. П. Сидоров. — Москва : ИНФРА-М, 2023. — 168 с. — ISBN 978-5-16-017823-1.**

Пособие содержит анализ экологических преимуществ водородной энергетики по сравнению с традиционной углеводородной энергетикой, включая оценку снижения выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ, методы оценки жизненного цикла водородных технологий (LCA), а также экологические проблемы производства водорода (водопотребление, выбросы при паровой конверсии, утилизация отработанных компонентов).

Периодические издания и интернет-ресурсы

Для ознакомления с актуальными научными исследованиями и новостями в области водородных технологий рекомендуется использовать следующие периодические издания и интернет-ресурсы:

- «Известия вузов. Машиностроение» — рецензируемый научный журнал открытого доступа, публикующий статьи по актуальным проблемам машиностроения, включая водородные энергетические установки. Адрес: https://izvuzmash.ru.
- «Альтернативная энергетика и экология» — научно-технический журнал, освещающий вопросы развития альтернативной энергетики, включая водородные технологии.
- Международный журнал «International Journal of Hydrogen Energy» (на английском языке) — ведущее научное издание в области водородной энергетики (доступ через научные базы данных).
- Официальный сайт ПАО «Газпром» (раздел «Водородная энергетика») — https://www.gazprom.ru.
- Официальный сайт Госкорпорации «Росатом» (раздел «Водородная энергетика») — https://www.rosatom.ru.

4.4. Электронные образовательные ресурсы

Водородные технологии для энергоустановок будущего

https://online.mospolytech.ru/course/view.php?id=1044

4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение

Для освоения дисциплины и выполнения учебных, научно-исследовательских и проектных работ в рамках образовательной программы рекомендуется использование следующего лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения.

Microsoft Windows – лицензионная операционная система, используемая для обеспечения работы всех учебных компьютеров и персональных устройств в аудиториях университета. Доступна на всех компьютерах университета в рамках лицензионного соглашения. Студенты могут использовать свободно распространяемые альтернативы (Linux, Astra Linux) для выполнения учебных задач.

Microsoft Office – лицензионный пакет офисных приложений, включающий текстовый редактор Word, табличный процессор Excel, программу для создания презентаций PowerPoint. Используется для оформления расчётно-пояснительных записок, отчётов, презентаций и другой учебной документации. Доступен на компьютерах университета. Свободными аналогами являются LibreOffice и OpenOffice.

КОМПАС-3D – российская система трёхмерного моделирования, широко используемая в отечественном машиностроении. Позволяет выполнять параметрическое моделирование, создавать чертежи в соответствии с ЕСКД, проводить прочностные расчёты в среде APM FEM. Учебная версия доступна для свободного скачивания на сайте разработчика (https://kompas.ru).

4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

Для успешного освоения образовательной программы и выполнения научно-исследовательских, проектных и выпускных квалификационных работ студентам рекомендуется использовать следующие современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы.

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU – крупнейшая российская электронная библиотека научных публикаций, интегрированная с Российским индексом научного цитирования (РИНЦ). Содержит полнотекстовые статьи из научных журналов по энергетическому машиностроению, двигателестроению и смежным отраслям. Позволяет отслеживать публикационную активность и находить актуальные исследования. Доступ открыт с любого компьютера через сеть Интернет по адресу: https://elibrary.ru.

КиберЛенинка – научная электронная библиотека открытого доступа. Содержит полнотекстовые научные статьи, в том числе по техническим наукам, энергетическому машиностроению и двигателестроению. Все материалы доступны бесплатно. Адрес ресурса: https://cyberleninka.ru.

Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов (docs.cntd.ru**)** – бесплатная база нормативных документов, включающая ГОСТы, технические условия, строительные нормы и правила. Удобна для оперативного поиска актуальных стандартов, необходимых при проектировании и расчётах деталей и узлов двигателей. Адрес: https://docs.cntd.ru.

Росстандарт (ФГУП «Стандартинформ») – официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. Содержит информацию о действующих стандартах, технических регламентах и нормативных документах. Адрес: https://www.gost.ru.

Научная библиотека Московского политехнического университета – электронный каталог библиотеки университета, содержащий информацию о фондах учебной и научной литературы. Доступен с любого устройства, имеющего подключение к интернету. Адрес: https://lib.mospolytech.ru.

«Известия вузов. Машиностроение» – рецензируемый научный журнал открытого доступа, публикующий статьи по актуальным проблемам машиностроения, включая двигателестроение. Входит в перечень ВАК. Содержит исследования по рабочему процессу ДВС, динамике, прочности и другим направлениям. Адрес: https://izvuzmash.ru.

Объединение сетевых электронных библиотек (СЭБ) – некоммерческое партнёрство, объединяющее научную и учебную литературу вузов — участников проекта. Обеспечивает доступ к учебно-методическим материалам по техническим специальностям. Доступ осуществляется через портал ЭБС «Лань»: https://e.lanbook.com (авторизация по IP-адресам университета или через личный кабинет).

5. Материально-техническое обеспечение

Для успешного освоения дисциплины используется общий аудиторный фонд университета и специализированные аудитории, закреплённые за кафедрой, имеющие следующее материально-техническое обеспечение:

Наименование специальных помещений	Оснащённость специальных помещений
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-222 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, экран для проектора, переносной ноутбук, проектор. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-223 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.

Наименование специальных помещений	Оснащённость специальных помещений
Компьютерный класс № Нд-224 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Компьютеры и мебель для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-229 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Н-406 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, экран для проектора, переносной ноутбук, проектор. Возможность доступа в интернет.

6. Методические рекомендации

6.1. Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения

Эффективность освоения дисциплины определяется качеством организации учебного процесса, выбором адекватных форм и методов обучения. Преподавателю необходимо учитывать специфику дисциплины, уровень подготовленности обучающихся и современные образовательные технологии.

Возможно проведение занятий и аттестаций в дистанционном формате с применением системы дистанционного обучения университета (СДО-LMS). Порядок проведения работ в дистанционном формате устанавливается отдельными распоряжениями проректора по учебной работе и/или центром учебно-методической работы.

Перед началом преподавания преподавателю необходимо:

- изучить рабочую программу, цели и задачи дисциплины;
- чётко представлять, какие знания, умения и навыки должен приобрести студент;
- ознакомиться с видами учебной работы и содержанием разделов дисциплины.

В ходе лекционного занятия преподаватель должен:

- назвать тему, учебные вопросы, ознакомить студентов с перечнем основной и дополнительной литературы;
- во вступительной части обосновать место и роль темы, раскрыть её практическое значение, увязать с предыдущим материалом;
- в основной части раскрывать содержание учебных вопросов, акцентировать внимание на ключевых категориях, явлениях и процессах, аргументированно обосновывать собственную позицию, приводить примеры, задавать риторические вопросы;
- руководить конспектированием, подчёркивая необходимость фиксации основных положений;
- в заключительной части сформулировать выводы, объявить план следующего занятия, дать рекомендации по подготовке.

При проведении практических (семинарских) занятий рекомендуется:

- обеспечивать активное участие всех студентов, использовать индивидуальные выступления, групповые дискуссии, решение практических задач, разбор кейсов;
- контролировать степень усвоения материала, поощрять самостоятельный поиск информации.

При проведении лабораторных занятий (при наличии) рекомендуется:

- ознакомить студентов с правилами техники безопасности;
- обеспечить понимание цели и задач каждой работы;
- организовать защиту работ с оценкой понимания сущности изучаемых процессов.

При организации самостоятельной работы студентов следует:

- чётко формулировать задания, указывать сроки выполнения;

- обеспечивать необходимыми учебно-методическими материалами;
- осуществлять регулярный контроль выполнения.

При проведении текущего контроля и промежуточной аттестации рекомендуется:

- использовать разнообразные формы контроля в соответствии с фондом оценочных средств;
- обеспечить объективность оценивания, руководствуясь установленными критериями;
- своевременно доводить результаты до студентов с указанием ошибок и рекомендаций.

В целях повышения эффективности образовательного процесса рекомендуется использовать:

- мультимедийные презентации для визуализации материала;
- интерактивные методы обучения (деловые игры, дискуссии, разбор кейсов);
- дистанционные образовательные технологии;
- материалы, размещённые в системе дистанционного обучения Московского Политеха (СДО-LMS).

6.2. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Освоение дисциплины осуществляется при контактной работе с преподавателем и в процессе самостоятельной работы. Эффективное освоение предполагает регулярное посещение всех видов аудиторных занятий, выполнение плана самостоятельной работы в полном объёме и прохождение аттестации в соответствии с календарным учебным графиком.

Студенту рекомендуется ознакомиться со списком основной и дополнительной литературы и взять в библиотеке необходимые издания. Доступ к информационным ресурсам организован в читальных залах библиотеки со стационарных ПЭВМ, либо с личного устройства через беспроводной доступ.

Изучение дисциплины должно сопровождаться интенсивной самостоятельной работой с рекомендованными источниками и материалами лекций. Начинать самостоятельные занятия следует с первого дня изучения дисциплины и проводить их регулярно.

Каждый студент должен самостоятельно планировать свою работу, исходя из возможностей и приоритетов. Для плодотворной работы важно организовать постоянное рабочее место, чередовать труд и отдых (перерывы каждые 1–2 часа).

Особое место уделяется консультированию как форме обучения и контроля. Консультирование предполагает взаимодействие между преподавателем и студентами, направленное на разрешение проблем.

Для успешного освоения дисциплины рекомендуется:

- систематически посещать лекции, вести конспект;
- готовиться к практическим занятиям заранее, изучая теорию и выполняя задания;
- при наличии лабораторных работ — выполнять их в соответствии с методическими указаниями, оформлять отчёты и готовиться к защите;
- своевременно выполнять задания для самостоятельной работы;
- активно участвовать в обсуждениях, задавать вопросы;
- использовать СДО-LMS для доступа к материалам и выполнения тестов;
- регулярно проверять свои знания с помощью вопросов для самопроверки.

При подготовке к текущему контролю и промежуточной аттестации рекомендуется:

- повторить теоретический материал по соответствующим разделам;
- выполнить практические задания, аналогичные разобранным на занятиях;
- ознакомиться с критериями оценивания;
- систематизировать материал, составить краткий план ответов;
- при необходимости посетить консультацию преподавателя.

Соблюдение данных рекомендаций позволит качественно освоить учебный материал и успешно пройти все формы контроля.

7. Фонд оценочных средств

7.1 Методы контроля и оценивания результатов обучения

Сформированность компетенций при изучении дисциплины определяется посредством оценки соответствия ответов и выполнения заданий заявленным индикаторам в рамках мероприятий текущего контроля и промежуточной аттестации в форме зачета.

Дисциплина «Водородные технологии для энергоустановок будущего» является обзорной и формирующей для компетенций ОПК-3 (в части применения физико-математического аппарата и методов анализа при решении профессиональных задач) и УК-1 (в части поиска, критического анализа и систематизации информации, применения системного подхода). Дисциплина знакомит студентов с перспективными водородными технологиями, которые рассматриваются как одно из ключевых направлений развития энергетического машиностроения в контексте глобального энергетического перехода и достижения углеродной нейтральности.

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность следующих компетенций и индикаторов.

По компетенции ОПК-3 (способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач) проверяются следующие индикаторы достижения компетенции:

- **ИОПК-3.1.** Умеет применять соответствующий физико-математический аппарат при решении профессиональных задач. Данный индикатор формируется через выполнение расчётных заданий, связанных с определением энергетических характеристик водорода (теплота сгорания, стехиометрическое соотношение, плотность), расчётом параметров электролиза и паровой конверсии, определением эффективности водородных энергоустановок.
- **ИОПК-3.2.** Умеет применять методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач. Данный индикатор формируется через анализ термодинамических циклов водородных энергоустановок, моделирование процессов смесеобразования и сгорания водорода в двигателях внутреннего сгорания, анализ характеристик топливных элементов.

По компетенции УК-1 (способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач) проверяются следующие индикаторы достижения компетенции:

- **ИУК-1.1.** Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие. Данный индикатор формируется через анализ физико-химических свойств водорода как энергоносителя, выделение ключевых параметров, влияющих на его применение в энергоустановках (плотность, теплота сгорания, скорость распространения пламени, энергия зажигания).
- **ИУК-1.2.** Осуществляет поиск, критически оценивает, обобщает, систематизирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи. Данный индикатор формируется через выполнение обзорных заданий по современным методам производства, хранения и транспортировки водорода, сравнительный анализ различных технологий, систематизацию информации о перспективных водородных проектах в России и мире.
- **ИУК-1.3.** Рассматривает и предлагает рациональные варианты решения поставленной задачи, используя системный подход, критически оценивает их достоинства и недостатки. Данный индикатор формируется через обоснование выбора оптимального метода производства водорода для заданных условий, выбор способа хранения и транспортировки, оценку экономической и экологической эффективности различных водородных технологий.

В процессе изучения дисциплины используются следующие методы контроля.

Текущее (рубежное) тестирование по модулям

Проводится после завершения изучения каждого из двух модулей. Тест состоит из 20 заданий различного типа (выбор правильного ответа, установление соответствия, краткий ответ,

решение расчётной задачи), направленных на проверку знаний физико-химических свойств водорода, методов его производства, хранения и транспортировки, принципов работы водородных энергоустановок, требований безопасности, а также способности выполнять расчёты энергетической эффективности. Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов за тест составляет 20. Оценка «зачтено» выставляется при выполнении верно более 75 процентов заданий (набрано более 15 баллов). Данный метод контроля позволяет оценить сформированность индикаторов ИОПК-3.1, ИОПК-3.2, ИУК-1.1, ИУК-1.2 и ИУК-1.3 в части теоретических основ водородных технологий.

Устный опрос (собеседование)

Проводится в ходе практических занятий для проверки понимания студентом физико-химических свойств водорода, способности аргументированно обосновывать выбор методов производства, хранения и транспортировки водорода, анализировать преимущества и недостатки различных типов водородных энергоустановок, оценивать экологические и экономические аспекты применения водородных технологий. При оценивании учитывается не только содержание ответа, но и качество устной речи, аргументированность суждений, умение вести профессиональную дискуссию и использовать профессиональную терминологию. Устный опрос может быть как индивидуальным, так и фронтальным. Данный метод позволяет оценить сформированность индикаторов ИОПК-3.2, ИУК-1.1, ИУК-1.2 и ИУК-1.3.

Практические занятия

Практические занятия являются основной формой практического обучения. В ходе выполнения практических заданий (расчёт теплоты сгорания водорода и стехиометрического соотношения, расчёт параметров электролизёра, расчёт энергетической эффективности паровой конверсии метана, сравнительный анализ способов хранения водорода, расчёт экономической эффективности водородной энергоустановки, оценка экологических преимуществ) оценивается способность студента применять теоретические знания для решения конкретных профессиональных задач. При выполнении практических заданий оценивается способность студента использовать физико-математический аппарат, правильно выполнять расчёты, анализировать полученные результаты, а также соблюдать установленные сроки выполнения заданий. Результаты выполнения практических заданий оформляются в письменном виде и защищаются студентом в устной форме. Данный метод позволяет оценить сформированность индикаторов ИОПК-3.1, ИОПК-3.2, ИУК-1.1, ИУК-1.2 и ИУК-1.3.

Лабораторные занятия

Лабораторные занятия по дисциплине не предусмотрены учебным планом.

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта является одним из ключевых методов контроля, позволяющим оценить способность студента применять полученные теоретические знания и практические навыки для решения комплексной профессиональной задачи. В четвёртом семестре индивидуальное задание представляет собой анализ возможности применения водородных технологий для заданного типа энергетической установки (поршневой двигатель, газотурбинная установка, топливный элемент). Задание выполняется студентом самостоятельно в течение семестра. В процессе выполнения задания студент должен продемонстрировать умение анализировать физико-химические свойства водорода, обосновывать выбор метода производства, способа хранения и транспортировки, рассчитывать энергетическую эффективность, оценивать экологические и экономические показатели. Результаты оформляются в виде пояснительной записки объёмом 10-15 страниц и представляются на защите в устной форме с использованием презентации. При оценке учитываются полнота выполнения задания, правильность расчётов, обоснованность выводов, качество оформления отчёта, навыки устной презентации результатов и способность отвечать на вопросы. Данный метод позволяет оценить сформированность всех индикаторов компетенций ОПК-3 и УК-1.

Зачет

Промежуточная аттестация проводится в форме зачета по завершении изучения дисциплины. Зачет проводится в форме устного собеседования по вопросам, охватывающим весь ма-

териал дисциплины, с обязательным выполнением практического задания (расчёт энергетической эффективности водородной энергоустановки, выбор оптимального метода производства водорода для заданных условий, оценка экономической эффективности). Зачет позволяет комплексно оценить целостность сформированных знаний и умений, а также способность студента применять их для решения профессиональных задач, связанных с разработкой и анализом водородных энергоустановок. На зачете проверяются все индикаторы компетенций ОПК-3 и УК-1.

7.2 Шкала и критерии оценивания результатов обучения

Оценивание результатов обучения по дисциплине осуществляется в форме «зачтено» или «не зачтено» как для мероприятий текущего контроля, так и для промежуточной аттестации в форме зачета.

Критерии оценки текущего (рубежного) тестирования по модулям

Текущее (рубежное) тестирование проводится после завершения изучения каждого модуля. Тест состоит из 20 заданий различного типа (выбор правильного ответа, установление соответствия, краткий ответ, решение расчётной задачи). Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов за тест составляет 20.

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если выполнено верно более 75 процентов заданий теста, то есть набрано более 15 баллов. Студент, получивший «зачтено», демонстрирует достаточное знание теоретического материала модуля, владеет основными понятиями в области водородных технологий, знает физико-химические свойства водорода, методы его производства, хранения и транспортировки, принципы работы водородных энергоустановок, требования безопасности. Это свидетельствует о сформированности на пороговом уровне индикаторов ИОПК-3.1, ИОПК-3.2, ИУК-1.1, ИУК-1.2 и ИУК-1.3 в части теоретических основ водородных технологий.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, если выполнено верно менее 75 процентов заданий теста, то есть набрано 15 баллов и менее. Студент, получивший «не зачтено», не владеет основным материалом модуля, допускает грубые ошибки в понимании свойств водорода и принципов работы водородных энергоустановок, не знает основных методов производства и хранения водорода. Студент обязан ликвидировать задолженность по модулю до прохождения следующего рубежного контроля.

Критерии оценки устного опроса (собеседования)

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который продемонстрировал достаточный уровень знаний материала. Студент свободно ориентируется в физико-химических свойствах водорода, понимает преимущества и недостатки различных методов производства, хранения и транспортировки водорода, знает принципы работы водородных энергоустановок различных типов, ориентируется в требованиях безопасности. Студент способен логично и аргументированно излагать свои мысли, отвечать на уточняющие вопросы, использует профессиональную терминологию. Допускаются отдельные неточности, не искажающие сути ответа.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который не знает значительной части материала, допускает грубые ошибки в изложении, не может объяснить основные физико-химические свойства водорода, не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией, а также не может связно и понятно выразить свои мысли в устной форме.

Критерии оценки практических занятий

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который выполнил практическое задание правильно и в установленные сроки. Студент продемонстрировал умение применять физико-математический аппарат для расчёта параметров водородных энергоустановок, правильно выполнил расчёты теплоты сгорания, стехиометрического соотношения, параметров электролиза, энергетической эффективности, экономической эффективности. При защите выполненного задания студент показывает понимание методики расчёта, уверенно отвечает на контрольные вопросы, правильно интерпретирует полученные результаты, делает обоснованные выводы. Отчёт оформлен в соответствии с требованиями.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который не выполнил практическое задание, выполнил его не в полном объёме или выполнил с грубыми ошибками в расчётах. При защите студент не понимает методики расчёта, не может объяснить полученные результаты, допускает грубые ошибки в интерпретации результатов. Отсутствует отчёт или он оформлен с грубыми нарушениями требований. Студент обязан выполнить практическое задание повторно в установленные преподавателем сроки.

Критерии оценки индивидуального задания в рамках сквозного проекта

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который выполнил индивидуальное задание в полном объёме и в установленные сроки. Студент демонстрирует понимание физико-химических свойств водорода, обосновывает выбор методов производства, хранения и транспортировки для заданной энергетической установки, выполняет расчёты энергетической и экономической эффективности, оценивает экологические преимущества. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, содержит полную и систематизированную информацию, включая таблицы, графики и диаграммы. При защите студент логично и аргументированно излагает результаты, отвечает на вопросы, демонстрирует понимание роли водородных технологий в будущем энергетического машиностроения, а также использует средства информационно-коммуникационных технологий для презентации результатов. Сформированность индикаторов ИОПК-3.1, ИОПК-3.2, ИУК-1.1, ИУК-1.2 и ИУК-1.3 оценивается на пороговом или более высоком уровне.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который не выполнил индивидуальное задание, выполнил его не в полном объёме (отсутствуют расчёты или обоснования) или допустил грубые ошибки. Студент не демонстрирует понимания водородных технологий, не может обосновать выбор методов производства или хранения. При защите студент не отвечает на вопросы, не владеет профессиональной терминологией, не использует средства информационно-коммуникационных технологий для презентации результатов. Сформированность индикаторов не достигла порогового уровня. Студент обязан выполнить индивидуальное задание повторно в установленные преподавателем сроки.

Критерии оценки ответа на зачете

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который продемонстрировал достаточный уровень знаний и умений, необходимых для формирования компетенций по дисциплине. Студент свободно ориентируется в физико-химических свойствах водорода, знает методы его производства, хранения и транспортировки, понимает принципы работы водородных энергоустановок различных типов, ориентируется в требованиях безопасности и экономических аспектах применения водородных технологий. Студент способен логично и аргументированно строить устное высказывание, вести диалог с преподавателем по профессиональной тематике, использует профессиональную терминологию. Ответы на теоретические вопросы в целом правильные, но могут содержать незначительные неточности, не искажающие сути. При выполнении практического задания (расчёт энергетической эффективности водородной энергоустановки, выбор оптимального метода производства водорода для заданных условий, оценка экономической эффективности) студент демонстрирует понимание методики выполнения работы и способность применять полученные знания для решения конкретной профессиональной задачи. Сформированность индикаторов ИОПК-3.1, ИОПК-3.2, ИУК-1.1, ИУК-1.2 и ИУК-1.3 оценивается на пороговом или базовом уровне, что позволяет студенту использовать полученные знания и навыки при изучении последующих дисциплин и подготовке выпускной квалификационной работы.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который не продемонстрировал достаточного уровня знаний и умений. Допущены существенные ошибки, отсутствует понимание физико-химических свойств водорода и принципов работы водородных энергоустановок. Студент не может выполнить практическое задание или выполняет его с грубыми ошибками. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Уровень подготовки недостаточен для формирования требуемых компетенций.

Соответствие методов контроля проверяемым индикаторам компетенций

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность знаний и навыков, необходимых для освоения индикаторов компетенций ОПК-3 и УК-1. Дисциплина является обзорной и формирующей для указанных компетенций.

ИОПК-3.1 (умеет применять соответствующий физико-математический аппарат при решении профессиональных задач) формируется через выполнение практических заданий по расчёту теплоты сгорания водорода, стехиометрического соотношения, параметров электролиза, энергетической эффективности паровой конверсии метана, расчёту экономической эффективности водородных проектов. Проверяется методами: текущее тестирование, практические занятия, индивидуальное задание, зачет.

ИОПК-3.2 (умеет применять методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач) формируется через анализ термодинамических циклов водородных энергоустановок, сравнительный анализ различных методов производства, хранения и транспортировки водорода, моделирование процессов в топливных элементах. Проверяется методами: текущее тестирование, устный опрос, практические занятия, индивидуальное задание, зачет.

ИУК-1.1 (анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие) формируется через анализ физико-химических свойств водорода, выделение ключевых параметров, влияющих на его применение в энергоустановках. Проверяется методами: текущее тестирование, устный опрос, практические занятия, индивидуальное задание, зачет.

ИУК-1.2 (осуществляет поиск, критически оценивает, обобщает, систематизирует и ранжирует информацию) формируется через выполнение обзорных заданий по современным методам производства, хранения и транспортировки водорода, сравнительный анализ различных технологий, систематизацию информации о перспективных водородных проектах. Проверяется методами: текущее тестирование, устный опрос, практические занятия, индивидуальное задание, зачет.

ИУК-1.3 (рассматривает и предлагает рациональные варианты решения поставленной задачи) формируется через обоснование выбора оптимального метода производства водорода для заданных условий, выбор способа хранения и транспортировки, оценку экономической и экологической эффективности различных водородных технологий. Проверяется методами: текущее тестирование, устный опрос, практические занятия, индивидуальное задание, зачет.

Оценка сформированности знаний и навыков осуществляется комплексно с использованием всех методов контроля. Результаты текущего и рубежного тестирования, устных опросов, выполнения практических заданий, защиты индивидуального задания в рамках сквозного проекта, а также зачета учитываются при формировании итоговой оценки по дисциплине. Дисциплина «Водородные технологии для энергоустановок будущего» закладывает содержательную основу для последующего изучения альтернативных энергетических установок и экологических аспектов двигателестроения, обеспечивая студента знаниями и навыками, необходимыми для профессиональной деятельности в области энергетического машиностроения в условиях глобального энергетического перехода.

7.3 Оценочные средства

7.3.1 Текущий контроль

7.3.1.1 Модульная структура дисциплины

Дисциплина изучается в 4-м семестре. Семестр делится на два равных модуля (периода), каждый из которых включает определенные темы.

Модуль 1 (недели 1–9) — Основы водородных технологий. Получение и хранение водорода

Включает темы:

- Тема 1. Введение. Роль водорода в энергетике будущего
- Тема 2. Физико-химические свойства водорода
- Тема 3. Способы получения водорода
- Тема 4. Хранение и транспортировка водорода
- Тема 5. Безопасность при работе с водородом

Модуль 2 (недели 10–18) — Использование водорода в энергоустановках. Топливные элементы

Включает темы:

- Тема 6. Использование водорода в двигателях внутреннего сгорания
- Тема 7. Водород как добавка к основному топливу. Метан-водородные смеси
- Тема 8. Водород в газотурбинных установках
- Тема 9. Топливные элементы: принцип работы, типы, применение

7.3.1.2 Рубежный контроль по модулям (устный опрос/собеседование)

Модуль 1. Основы водородных технологий. Получение и хранение водорода

Перечень вопросов для собеседования:

1. Предпосылки перехода к водородной энергетике: экологические проблемы, истощение ископаемого топлива, энергетическая безопасность. Понятие «водородная экономика».
2. Мировые тенденции и государственные программы развития водородной энергетики. Роль водорода в структуре будущего топливно-энергетического баланса.
3. Водород как химический элемент. Молекулярный и атомарный водород. Физико-химические свойства водорода: плотность (газа и жидкости), температура кипения и плавления, критическая температура и давление.
4. Теплота сгорания водорода (высшая и низшая). Сравнение с традиционными топливами (бензин, дизельное топливо, метан).
5. Горение водорода: стехиометрическое соотношение, скорость распространения пламени, температура пламени, концентрационные пределы воспламенения, энергия зажигания.
6. Диффузионная способность водорода. Проникновение через материалы. Взаимодействие с конструкционными материалами (водородная хрупкость, наводороживание).
7. Сравнение свойств водорода с традиционными топливами (бензин, дизельное топливо, метан, пропан-бутан).
8. Классификация методов получения водорода по цветовой маркировке: серый, голубой, зелёный, бирюзовый, розовый водород.
9. Промышленные методы получения водорода: паровая конверсия метана (SMR) — принцип, стадии, катализаторы, преимущества и недостатки.
10. Газификация угля и биомассы. Частичное окисление углеводородов.
11. Электролиз воды: принцип, типы электролизёров (щелочные, с протонообменной мембраной (PEM), твердооксидные (SOEC)), эффективность, перспективы.
12. Термохимические циклы. Фотолиз (биологический и искусственный). Пиролиз метана.
13. Сравнение методов получения водорода по энергоэффективности, себестоимости, экологичности.
14. Проблемы хранения водорода, обусловленные его низкой плотностью. Способы хранения: сжатый газообразный водород (CGH2) — баллоны высокого давления (типы: металлические, композитные), параметры, достоинства и недостатки.
15. Криогенное хранение жидкого водорода (LH2): криогенные резервуары, требования к теплоизоляции, испарение (boil-off), преимущества и недостатки.
16. Металлогидридное хранение: принцип обратимого поглощения водорода металлами и сплавами, материалы, ёмкость, кинетика, преимущества и недостатки.
17. Химическое хранение: жидкие органические носители водорода (LOHC), аммиак, метанол.
18. Сравнение методов хранения по массовой и объёмной плотности, безопасности, стоимости.
19. Транспортировка водорода: трубопроводный транспорт, транспортировка в сжатом и сжиженном виде, в химически связанном состоянии.
20. Особенности водорода как опасного вещества: широкие концентрационные пределы взрываемости, низкая энергия зажигания, высокая скорость распространения пламени, способность к детонации, невидимое пламя, высокая проникающая способность, водородная хрупкость материалов.
21. Меры безопасности при производстве, хранении, транспортировке и использовании водорода. Требования к оборудованию и материалам. Детекторы утечек водорода. Нормативные документы.

Модуль 2. Использование водорода в энергоустановках. Топливные элементы

Перечень вопросов для собеседования:

1. Особенности рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием при работе на чистом водороде. Преимущества: широкие пределы воспламенения, высокая скорость сгорания, высокий КПД, практически нулевые выбросы CO, CH, твёрдых частиц.
2. Недостатки и проблемы водородного ДВС: раннее воспламенение (обратные вспышки во впускном коллекторе), высокая температура сгорания и образование NOx, низкая мощность из-за малой объёмной энергоёмкости водородо-воздушной смеси, водородная хрупкость, проблемы хранения на борту.
3. Способы организации рабочего процесса: внешнее смесеобразование (во впускном коллекторе) и непосредственный впрыск водорода в цилиндр. Сравнение этих способов.
4. Регулирование мощности водородного ДВС: качественное (изменение состава смеси) и количественное (дросселирование). Конструктивные изменения двигателя для работы на водороде (система зажигания, система впрыска, материалы, система смазки).
5. Обоснование эффективности добавки водорода к углеводородным топливам. Влияние добавки водорода на рабочий процесс двигателя.
6. Оптимальные дозы добавки водорода (3-10% по массе). Влияние добавки на расширение пределов воспламенения, увеличение скорости сгорания, повышение полноты сгорания, снижение выбросов CO и CH, повышение КПД, снижение детонации.
7. Метан-водородные смеси (Hydromethane, HCNG): свойства, преимущества, опыт применения. Влияние содержания водорода на параметры двигателя и выбросы.
8. Использование водорода в качестве активатора сгорания для низкосортных топлив.
9. Перспективы использования водорода в газотурбинных двигателях и установках. Особенности сжигания водорода в камерах сгорания ГТУ.
10. Конструктивные решения для обеспечения устойчивого и низкоэмиссионного сгорания водорода: микро-смешение (micromix), диффузионное сгорание с впрыском воды/пара, каталитическое сгорание.
11. Опыт создания газовых турбин, работающих на водороде. Проекты по переводу ГТУ на водородное топливо. Водород в авиационных газотурбинных двигателях.
12. Топливный элемент (ТЭ) как электрохимический генератор. Отличие от гальванического элемента и аккумулятора. Принцип работы ТЭ с протонообменной мембраной (PEMFC): анод, катод, электролит, мембрана, катализатор. Электрохимические реакции.
13. Выходное напряжение, вольт-амперная характеристика топливного элемента. КПД топливного элемента.
14. Классификация топливных элементов по рабочей температуре (низкотемпературные, высокотемпературные) и по типу электролита.
15. Щелочные топливные элементы (AFC): принцип работы, характеристики, преимущества, недостатки, области применения.
16. Топливные элементы с протонообменной мембраной (PEMFC): принцип работы, характеристики, преимущества, недостатки, области применения.
17. Топливные элементы с прямым окислением метанола (DMFC): принцип работы, характеристики, области применения.
18. Фосфорнокислые топливные элементы (PAFC): принцип работы, характеристики, области применения.
19. Топливные элементы с расплавленным карбонатом (MCFC): принцип работы, характеристики, области применения.
20. Твердооксидные топливные элементы (SOFC): принцип работы, характеристики, области применения.
21. Сравнение типов топливных элементов по характеристикам, преимуществам, недостаткам, областям применения.
22. Применение топливных элементов на транспорте: автомобили, автобусы, поезда, суда. Водородные автомобили: устройство, запас хода, заправка, безопасность.
23. Стационарные энергоустановки на топливных элементах для малой энергетики и резервного питания. Перспективы развития топливных элементов.

7.3.1.3 Рубежный контроль по модулям (тестирование)

Тестирование проводится после завершения изучения каждого модуля. Тест состоит из 20 заданий различного типа (выбор правильного ответа, установление соответствия, краткий ответ, расчётная задача). Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов за тест — 20. Оценка «зачтено» выставляется при выполнении верно более 75% заданий (более 15 баллов).

Пример тестовых заданий (один вариант)

1. **Какой цвет водорода соответствует электролизу воды с использованием возобновляемых источников энергии?**
2. A) Серый водород
3. B) Голубой водород
4. C) Зелёный водород
5. D) Бирюзовый водород

Правильный ответ: C

2. **Какое свойство водорода является причиной водородной хрупкости металлов?**
3. A) Низкая плотность
4. B) Высокая проникающая способность
5. C) Широкие пределы воспламенения
6. D) Высокая теплота сгорания

Правильный ответ: B

3. **Какой способ хранения водорода обеспечивает наибольшую массовую плотность?**
4. A) Сжатый газ (700 бар)
5. B) Жидкий водород (20 К)
6. C) Металлогидриды
7. D) Жидкие органические носители (LOHC)

Правильный ответ: B

4. **Какой способ организации рабочего процесса водородного ДВС позволяет полностью исключить обратные вспышки во впускной коллектор?**
5. A) Внешнее смесеобразование (впускной коллектор)
6. B) Непосредственный впрыск в цилиндр
7. C) Карбюрация
8. D) Центральный впрыск

Правильный ответ: B

5. **Какой тип топливных элементов имеет рабочую температуру 600-1000°C и может работать непосредственно на природном газе?**
6. A) PEMFC (протонообменная мембрана)
7. B) SOFC (твердооксидный)
8. C) AFC (щелочной)
9. D) DMFC (прямое окисление метанола)

Правильный ответ: B

7.3.1.4 Оценочные средства для индивидуального задания в рамках сквозного проекта

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта является одним из ключевых методов контроля, позволяющим оценить способность студента применять полученные теоретические знания и практические навыки для решения комплексной профессиональной задачи. Задание выполняется студентом самостоятельно в течение семестра и представляет собой разработку раздела сквозного проекта, связанного с обоснованием возможности и целесообразности применения водородных технологий в проектируемой энергетической установке.

Содержание индивидуального задания:

Индивидуальное задание включает в себя выполнение следующих этапов:

1. **Анализ физико-химических свойств водорода.** Студент проводит сравнительный анализ свойств водорода и традиционных топлив (бензин, дизельное топливо, метан). Оценивает преимущества и недостатки водорода как моторного топлива.

2. **Обоснование выбора метода получения водорода.** Для заданных условий эксплуатации (масштаб производства, доступность сырья, экологические требования) студент обосновывает выбор метода получения водорода (паровая конверсия метана, электролиз, газификация биомассы и др.). Проводит сравнительный анализ по себестоимости, энергоэффективности, экологичности.
3. **Выбор способа хранения водорода.** Для заданного типа транспортного средства или стационарной установки студент обосновывает выбор способа хранения водорода (сжатый газ, криогенная жидкость, металлогидриды, химические носители). Выполняет расчёт параметров хранения (объём баллонов, масса, давление, тепловая изоляция).
4. **Расчёт параметров водородного двигателя (или добавки водорода).** Для заданных параметров двигателя (мощность, частота вращения, тип) студент выполняет расчёт параметров рабочего процесса при работе на чистом водороде или определяет оптимальную добавку водорода к основному топливу. Оценивает изменение мощности, КПД, выбросов.
5. **Анализ безопасности и экологической эффективности.** Студент анализирует потенциальные опасности при работе с водородом, предлагает меры обеспечения безопасности. Оценивает экологическую эффективность применения водородных технологий (снижение выбросов CO_2, токсичных компонентов).
6. **Сравнительная оценка с традиционными топливами.** Студент проводит сравнительный анализ применения водородных технологий и традиционных топлив по техническим, экономическим и экологическим критериям. Формулирует выводы о целесообразности применения водородных технологий в проектируемой установке.

Требования к оформлению:

Индивидуальное задание выполняется в форме пояснительной записки объемом 10-15 страниц, включающей:

- титульный лист с указанием темы задания, ФИО студента, группы, руководителя;
- содержание;
- введение с обоснованием актуальности водородных технологий;
- основную часть, содержащую анализ свойств водорода, обоснование выбора метода получения и способа хранения, расчёты параметров водородного двигателя (или добавки водорода), анализ безопасности и экологической эффективности, сравнительную оценку;
- графические материалы (схемы, графики, диаграммы);
- заключение с выводами по результатам выполненной работы;
- список использованных источников.

Примерные темы индивидуальных заданий:

1. Обоснование применения водородного двигателя для легкового автомобиля с расчётом параметров системы хранения.
2. Сравнительный анализ методов получения водорода для заправочной станции с оценкой экономической эффективности.
3. Разработка системы хранения водорода на основе металлогидридов для городского автобуса.
4. Расчёт эффективности добавки водорода к бензину для двигателя с искровым зажиганием.
5. Анализ возможности применения водорода в качестве добавки к дизельному топливу для снижения токсичности.
6. Проектирование энергоустановки на топливных элементах для резервного электроснабжения.
7. Сравнительный анализ водородного ДВС и установки на топливных элементах для городского автомобиля.
8. Оценка безопасности эксплуатации автомобиля с водородным двигателем и разработка рекомендаций.

7.3.1.5 Оценочные средства для практических занятий

Типовые задания для практических занятий

Модуль 1. Основы водородных технологий. Получение и хранение водорода

Задание 1. Расчёт энергетических характеристик водорода

Для водорода рассчитать: теплоту сгорания (высшую и низшую), стехиометрическое соотношение с воздухом, плотность при нормальных условиях. Сравнить с бензином (C_8H_{18}) и метаном (CH_4).

Задание 2. Сравнительный анализ себестоимости и энергоэффективности различных методов получения водорода

По заданным данным (стоимость электроэнергии, природного газа, капитальные затраты) рассчитать себестоимость производства водорода методом паровой конверсии метана и электролизом. Определить энергоэффективность методов.

Задание 3. Расчёт параметров хранения сжатого водорода

Для хранения 5 кг водорода при давлении 700 бар и температуре 20°C определить объём баллонов. Рассчитать массу баллонов (композитных) и оценить массовую плотность хранения. Определить запас хода автомобиля (расход 0,8 кг водорода на 100 км).

Задание 4. Сравнение массовой и объёмной плотности хранения водорода различными способами

По заданным данным рассчитать массовую и объёмную плотность хранения для сжатого водорода (350 бар, 700 бар), жидкого водорода, металлогидрида (MgH_2) и LOHC (метилциклогексан). Построить диаграмму сравнения.

Модуль 2. Использование водорода в энергоустановках. Топливные элементы

Задание 5. Расчёт параметров рабочего процесса ДВС при работе на водороде

Для двигателя с рабочим объёмом 2,0 л, степенью сжатия 12, частотой вращения 3000 об/мин рассчитать мощность, КПД и выбросы NOx при работе на водороде. Сравнить с бензином.

Задание 6. Анализ конструктивных решений для организации рабочего процесса водородного ДВС

Сравнить схемы внешнего смесеобразования и непосредственного впрыска водорода. Оценить влияние на мощность, КПД, образование NOx, обратные вспышки.

Задание 7. Расчёт оптимальной добавки водорода к бензину и метану

Для двигателя, работающего на бензине, определить оптимальную добавку водорода (в % по массе) для режима частичных нагрузок. Оценить влияние на расширение пределов воспламенения и снижение выбросов CO и CH.

Задание 8. Расчёт электрических характеристик топливного элемента

Для топливного элемента с протонообменной мембраной (PEMFC) площадью активной поверхности 100 $см^2$, плотностью тока 0,5 $А/см^2$, напряжением ячейки 0,7 В определить мощность ячейки. Для стека из 300 ячеек рассчитать общую мощность.

Задание 9. Сравнительный анализ типов топливных элементов для различных применений

По заданным условиям эксплуатации (автомобиль, автобус, стационарная энергоустановка, портативное устройство) выбрать оптимальный тип топливного элемента. Обосновать выбор.

7.3.1.6 Оценочные средства для курсовой работы (проекта)

Курсовой проект (курсовая работа) по дисциплине не предусмотрены учебным планом. Результаты освоения дисциплины используются при выполнении выпускной квалификационной работы для обоснования выбора типа силовой установки и оценки перспектив применения водородных технологий.

7.3.2 Промежуточная аттестация (зачет)

7.3.2.1 Условия допуска к зачету

Студент допускается к сдаче зачета при выполнении следующих условий:

- Успешное прохождение всех двух рубежных контролей (устных опросов по модулям) с оценкой не ниже «удовлетворительно».
- Выполнение и защита всех практических занятий, предусмотренных учебным планом (не менее 80% заданий выполнены и защищены).
- Выполнение и защита индивидуального задания в рамках сквозного проекта (обоснование применения водородных технологий) с оценкой не ниже «удовлетворительно».
- Отсутствие академической задолженности по дисциплине.

7.3.2.2 Структура билета на зачете

Зачет проводится в форме устного собеседования по вопросам, охватывающим весь материал дисциплины. В процессе собеседования студенту может быть предложено выполнить практическое задание (расчёт параметров хранения, расчёт характеристик водородного ДВС, расчёт электрических характеристик топливного элемента).

Структура собеседования:

- **Теоретический вопрос 1:** из области физико-химических свойств водорода, способов получения и хранения.
- **Теоретический вопрос 2:** из области использования водорода в двигателях внутреннего сгорания, газотурбинных установках, топливных элементах.
- **Практическое задание:** расчёт параметров хранения, расчёт характеристик водородного ДВС, расчёт электрических характеристик топливного элемента.

7.3.2.3 Перечень вопросов для подготовки к зачету

Модуль 1. Основы водородных технологий. Получение и хранение водорода

1. Предпосылки перехода к водородной энергетике. Понятие «водородная экономика».
2. Мировые тенденции развития водородной энергетики. Государственные программы.
3. Физико-химические свойства водорода: плотность, температура кипения, теплота сгорания.
4. Горение водорода: стехиометрическое соотношение, скорость пламени, пределы воспламенения, энергия зажигания.
5. Диффузионная способность водорода. Водородная хрупкость. Взаимодействие с конструкционными материалами.
6. Сравнение свойств водорода с традиционными топливами (бензин, дизельное топливо, метан).
7. Классификация методов получения водорода по цветовой маркировке. Серый, голубой, зелёный водород.
8. Паровая конверсия метана (SMR): принцип, стадии, катализаторы, преимущества и недостатки.
9. Газификация угля и биомассы. Частичное окисление углеводородов.
10. Электролиз воды: типы электролизёров, эффективность, перспективы.
11. Сравнение методов получения водорода по энергоэффективности, себестоимости, экологичности.
12. Способы хранения водорода: сжатый газообразный водород (CGH2) — параметры, типы баллонов, достоинства и недостатки.
13. Криогенное хранение жидкого водорода (LH2): требования к теплоизоляции, испарение (boil-off), преимущества и недостатки.
14. Металлогидридное хранение: принцип, материалы, ёмкость, преимущества и недостатки.
15. Химическое хранение: жидкие органические носители водорода (LOHC), аммиак, метанол.
16. Сравнение методов хранения по массовой и объёмной плотности, безопасности, стоимости.
17. Транспортировка водорода: трубопроводный транспорт, транспортировка в сжатом и сжиженном виде.
18. Особенности водорода как опасного вещества. Концентрационные пределы взрываемости, энергия зажигания.
19. Меры безопасности при работе с водородом. Детекторы утечек. Требования к оборудованию и материалам.
20. Нормативные документы, регламентирующие обращение с водородом.

Модуль 2. Использование водорода в энергоустановках. Топливные элементы

21. Особенности рабочего процесса водородного ДВС с искровым зажиганием. Преимущества и недостатки.
22. Способы организации рабочего процесса водородного ДВС: внешнее смесеобразование и непосредственный впрыск. Сравнение.
23. Проблемы водородного ДВС: обратные вспышки, образование NOx, низкая мощность. Конструктивные решения.
24. Регулирование мощности водородного ДВС: качественное и количественное.
25. Обоснование эффективности добавки водорода к углеводородным топливам. Влияние на рабочий процесс.

26. Оптимальные дозы добавки водорода. Метан-водородные смеси (HCNG): свойства, преимущества.
27. Использование водорода в газотурбинных установках. Особенности сжигания водорода в камерах сгорания ГТУ.
28. Конструктивные решения для сжигания водорода в ГТУ: микро-смешение, впрыск воды/пара, каталитическое сгорание.
29. Принцип работы топливного элемента (на примере PEMFC). Электрохимические реакции. Вольт-амперная характеристика. КПД.
30. Классификация топливных элементов по рабочей температуре и типу электролита.
31. Щелочные топливные элементы (AFC): принцип, характеристики, области применения.
32. Топливные элементы с протонообменной мембраной (PEMFC): принцип, характеристики, области применения.
33. Топливные элементы с прямым окислением метанола (DMFC): принцип, характеристики, области применения.
34. Фосфорнокислые топливные элементы (PAFC): принцип, характеристики, области применения.
35. Топливные элементы с расплавленным карбонатом (MCFC): принцип, характеристики, области применения.
36. Твердооксидные топливные элементы (SOFC): принцип, характеристики, области применения.
37. Сравнительный анализ типов топливных элементов. Применение на транспорте и в стационарной энергетике.
38. Водородные автомобили: устройство, запас хода, заправка, безопасность. Перспективы развития.

7.3.2.4 Примеры практических заданий для зачета

Пример 1. Расчёт параметров хранения сжатого водорода

Задание: Для автомобиля с запасом хода 500 км и расходом водорода 0,8 кг/100 км определить необходимую массу водорода. Рассчитать объём баллонов при давлении 700 бар и температуре 20°C. Определить объёмную и массовую плотность хранения. Уравнение состояния водорода считать как для идеального газа (R = 4124 Дж/(кг·К)).

Пример 2. Расчёт добавки водорода к бензину

Задание: Для двигателя, работающего на бензине с расходом 10 кг/ч, определить массовый расход водорода при добавке 5% по массе. Рассчитать стехиометрическое соотношение для смеси бензина (C_8H_{18}) и водорода. Оценить изменение мощности при работе на смеси.

Пример 3. Расчёт характеристик топливного элемента

Задание: Для топливного элемента с протонообменной мембраной (PEMFC) с активной площадью 150 см², плотностью тока 0,6 А/см², напряжением ячейки 0,65 В определить мощность ячейки. Для стека из 350 ячеек рассчитать общую мощность. Определить расход водорода при 100% нагрузке.

Пример 4. Сравнительный анализ методов получения водорода

Задание: Провести сравнительный анализ паровой конверсии метана и электролиза воды для производства 100 кг водорода в сутки. Рассчитать: потребление природного газа (для SMR), потребление электроэнергии (для электролиза). Сделать вывод о целесообразности применения каждого метода для заданных условий.

Пример 5. Анализ безопасности водородного двигателя

Задание: Для водородного двигателя с внешним смесеобразованием описать возможные сценарии возникновения обратных вспышек. Предложить конструктивные решения для их предотвращения. Оценить эффективность непосредственного впрыска водорода.