

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»**

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ и ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ**

ПРЕЗЕНТАЦИЯ

дисциплины

**«МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ»**

**для магистрской программы по направлению
14.04.02 «Ядерные физика и технологии»**

1. АННОТАЦИЯ

Данная дисциплина относится к циклу лекций, обеспечивающих обучение студентов для магистрской программы по направлению 14.04.02 «Ядерные физика и технологии» — очная форма обучения. Излагаемые в настоящей дисциплине сведения необходимы для более глубокого понимания студентами зависимости экологических проблем от видов и состава материалов, применяемых в атомных энергетических реакторах. Настоящая дисциплина содержит учебный материал, необходимый для лучшего усвоения ряда специальных дисциплин, таких как «Специальные вопросы радиационного материаловедения», «Топливные материалы ЯЭУ», «Конструкционные материалы ЯЭУ» и «Специальные вопросы материаловедения ТЯР».

2. УЧЕБНАЯ ЗАДАЧА ДИСЦИПЛИНЫ

Целью учебной дисциплины является последовательное изложение основных принципов обеспечения экологической безопасности атомной энергетики, определяемой выбором и применением конструкционных и ядерно-топливных материалов в следующей последовательности:

- Основы экологии ядерных и термоядерных реакторов.
- Поведение материалов в аварийных ситуациях на атомных станциях.
- Условия и правила обращения с отработавшим ядерным топливом.

- Правила транспортировки и захоронения отработавшего ядерного топлива.
- Принципы создания малоактивируемых конструкционных материалов.

В результате изучения данной дисциплины студенты должны знать условия работы и причины деградации конструкционных и топливных материалов, работающих в активной зоне реакторов деления, а также конструкционных и функциональных материалов ТЯР с учетом обеспечения высокой экологичности и надежности конструкции реактора.

3. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ

Количество модулей – 3

Промежуточный:

Коллоквиум №1 – 6-7 недели

Коллоквиум №2 – 14-15 недели

Домашнее задание по оценке активации конструкционных материалов.

Лабораторные работы по данной дисциплине не предусмотрены.

Итоговый – **зачет**

4. СОДЕРЖАНИЕ КУРСА ЛЕКЦИЙ

Модуль №1: Экология и ядерная безопасность

Тема 1. Введение в экологию.

Понятие экологии, как о науке, изучающей взаимодействия растительных и животных организмов друг с другом и с окружающей средой. Роль экологии в нашей жизни. Проблемы экологии. Острота проблем в последние годы, связанные с ростом промышленности и доступности информация об окружающей нас среде. Физическая среда (биотоп), вместе с населяющими её видами, как экосистема. Совокупность живых существ, населяющих биотоп, (биоценоз). Социальная концепция «устойчивого развития» экосистемы, разработанная Всемирной комиссией по окружающей среде и развитию (т.н. Брутландская комиссия). Внешние факторы, влияющие на растительные и живые организмы. Разделение их на естественные и синтетические. Промышленные отходы разного рода. Мусор, как предмет жизнедеятельности человека. Инсектициды и пестициды. Нефтяные и газовые продукты. Экологические проблемы энергетики. Потребность в энергии, как одной из основных жизненных потребностей человека. Возобновляемые (энергия солнца, ветер, тепло земных недр, тепловая и механическая энергия океана) и истощаемые (древесина, уголь, нефть, газ) источники энергии. Три основных вида энергети-

ки: тепловая, гидроэнергетика и атомная. Сравнительные их особенности, влияющие на экосистему. Нетрадиционные виды энергетики: солнце, ветер, геотермальные воды, приливы и отливы и т.д. Сравнительные их особенности. Сравнение с традиционными видами энергетики. Атомная энергетика. Положение и роль атомной энергетики в современном мире. Сравнение с другими видами энергетики. Термоядерная энергетика, как энергетика будущего. Влияние атомной энергетики на экосистему. Запасы природного урана. Сравнение с запасами с быстро тающими запасами органического топлива. Особенности атомной энергетики. Атомные электростанции (АЭС), как крупное достижение в области энергетики. Повышенная опасность атомной энергетики для людей и для природы, связанная с крайне неблагоприятными последствиями аварий, разрушениями атомных реакторов и проблемами захоронения радиоактивных отходов. Проблемы захоронения отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Аварии на АЭС. Радиоактивные осадки от атомных взрывов и аварий на АЭС. Правовые аспекты и экологические последствия аварий и инцидентов на атомных станциях. Оценка потенциальной экологической безопасности ядерных технологий в будущем с учетом перспектив широкомасштабного развития атомной энергетики. Место атомной энергетики в реализации стратегии устойчивого развития.

Тема 2. Радиоактивные продукты деления ядерного топлива.

Виды радиоактивного излучения: альфа-частицы, бета-частицы, гамма-излучение, нейтронное воздействие. Влияние их на человеческий организм. Соматические (лучевая болезнь) и генетические (повреждение живых клеток) болезни. Источники попадания их в организм человека. Радиоактивные нуклиды, как источниками этих воздействий. Период полураспада. Продукты деления (ПД). Газообразные (ГПД) и летучие ПД. Дозы облучения: годовая эффективная доза, поглощенная доза, экспозиционная доза, эквивалентная доза, биологическая доза, системные и внесистемные единицы измерения доз. Добыча и переработка урановой руды. Ядерный топливный цикл. Конверсия урана в гексафторид. Получение двуокиси урана. Обогащение урана, степень обогащения. Диффузионный процесс и центрифугирование. Изготовление готового топлива. Альтернативные методы обогащения урана. Экологические опасности на разных этапах цикла. Металлическое топливо ($U-Me$), керамическое топливо (UO_2), MOX-топливо (UO_2+PuO_2). Альтернативные виды топлива: карбиды (UC , PuC и ThC), нитриды (UN и PuN) и силициды (U_3Si). Отличия топлива для тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах. топлива. Коэффициент воспроизводства.

Тема 3. Повреждения твэлов в процессе эксплуатации.

Виды твэлов в зависимости от типа реактора. Топливный сердечник. Объемное содержание топлива и конструкционных материалов оболочек твэлов. Роль зазора между сердечником и оболочкой твэла. Изменение структуры сердечника в процессе выгорания топлива: образование и миграции пузырьков, образование столбчатых кристаллов, растрескивание таблетки, образование пор, начало распухание топлива, исчезновение зазора, заполнения зазора ПД, начало распухания и растрескивания оболочки твэла. Заклинивания таблеток топлива. Плавление топлива в аварийной ситуации. Основные материалы оболочки твэлов: Zr-сплавы и коррозионно-стойкие стали, сравнительные свойства. Возникновение напряженного состояния в оболочке твэла в процессе эксплуатации. Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Влияние химически активных сред (Cs, I и др.) на КРН. Основные факторы разрушения оболочек твэлов. Хрупкое, межкристаллитное и транскристаллитное разрушение материалов оболочек. Изменение прочностных характеристик и радиационное охрупчивание оболочек. Основные закономерности распухания оболочек под действием нейтронного облучения. Воздействие нейтронного облучения на характеристики ползучести оболочек. Устойчивость формы и размеров твэлов. Аварийное разрушение твэла и повреждения из-за несовершенства технологии.

Тема 4. Аварии на атомных реакторах.

Официально установленная МАГАТЭ международная шкала тяжести ядерных аварий. Промышленные аварии, ядерные инциденты и события «вне шкалы». Категории ядерных аварий: выброс UF_6 , пожар и экзотермические реакции, утечка радиоактивного материала, загрязнение, нарушение энергоснабжения. История основных аварий на АЭС. Авария на ЧАЭС, как самая крупная в истории развития атомной энергетики. Аварии при хранении и переработке отработанного ядерного топлива (Кыштым, ПО Маяк). Аварии на атомных подводных лодках (К-431). Экологические последствия крупных аварий на АЭС. Запас экологической безопасности перспективных технологий АЭС. Анализ аварий в активной зоне АЭС. Основные физические и физико-химические процессы, возникающие при аварии. Развитие аварии с плавлением активной зоны. Основные причины, приводящие к тяжелым авариям активной зоны и ее расплавлению. Аварии при низком давлении и высоком. Взаимодействия расплава активной зоны с конструктивными элементами реактора и влияние этого взаимодействия на внешнюю защитную оболочку реактора. Тепловое взаимодействие типа парового взрыва. Поведения аэрозолей и продуктов деления в пределах защитной оболочки и выход радиоактивных веществ в окружающую среду. Меры борьбы с авариями. Предполагаемые аварии и опасности для окружающей среды и персонала на термоядерных реакторах (ТЯР).

Тема 5. Отработавшее ядерное топливо (ОЯТ).

Реакции, протекающие при облучении ядерного топлива. Актиноиды и их распад. Делящиеся нуклиды (вторичное ядерное топливо). Нуклиды, непригодные для использования в качестве вторичного топлива. Трансмутация. Продукты деления в ОЯТ. Деление на запаздывающих нейтронах. Спонтанное деление. Выгорания ядерного топлива. Характеристики изотопов урана и трансурановых элементов. Определение отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Изотопный состав ОЯТ. Суммарное количество радионуклидов, их активность и периоды полураспада. Остаточное энерговыделение. Источники остаточного энерговыделения. Изменение остаточного энерговыделения в зависимости от времени выдержки ОЯТ. ОЯТ тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах, различие в составе и активности. Обоснование необходимости выгрузки ОЯТ из активной зоны. Накопление продуктов деления. Виды продуктов деления в ОЯТ. Твердые и газообразные продукты деления. Радиоактивные благородные газы (РБГ). Радиоактивные тритий и углерод. Летучие изотопы йода и цезия. Накопления радиоактивных ГПД и легколетучих ПД в топливе и зазоре с оболочкой твэла. Долгоживущие изотопы трития и углерода. Методы обращения с ОЯТ.

Тема. 6. Физико-химические процессы в ОЯТ.

Анализ состояния внутритвэльной среды в отработавшем топливе в зависимости от вида, состава и выгорания топлива. Особенности взаимодействия ПД с оболочками твэлов реакторов на быстрых нейтронах. Радиационные повреждения конструкционных материалов оболочек твэлов, коррозия их под действием химически активных ПД внутри твэлов и коррозия снаружи за счет контакта с теплоносителем. Расчет глубины проникновения. Методы оценок объемного и граничного проникновения. Реакции переноса вещества внутри твэлов. Вклад различных механизмов в утечку продуктов деления. Изменение состава ПД в отработавшем топливе во времени. Образование твердых растворов ПД с топливом. Образование металлических включений в оксидном топливе. Механизмы выхода ГПД из оболочек твэлов. Расчет скорости диффузии выхода ГПД из оболочек твэлов. Влияние состояния и структуры внутренней и внешней поверхности оболочки твэла на скорость выхода ГПД. Окисление топлива и влияние количества кислорода в оксидном топливе на диффузию ГПД и летучих ПД. Специфика диффузии трития, диффузионные барьеры, скорость диффузии трития в коррозионно-стойких сталях и циркониевых сплавах. Опасность выхода ГПД и летучих ПД вне корпуса реактора, влияние на окружающую среду и здоровье человека.

Тема 7. Выгрузка и выдержка ОЯТ на АЭС.

Опасность продуктов деления в отработанном ядерном топливе для человека. Стадии утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Выемка или выгрузка ОЯТ из активной зоны. Транспортировка к временному хранилищу отработанного ядерного топлива (ХОЯТ). Необходимость выдержка ОЯТ во временных ХОЯТ при АЭС. Мокрое хранение ОЯТ, достоинства и недостатки. Устройство мокрых хранилищ для ОЯТ на АЭС. Сухое хранение ОЯТ, достоинства и недостатки. Виды и устройство хранилищ для «сухого» хранения ОЯТ. Ядерные процессы, происходящие в процессе временного хранения. Изменение активности и остаточного энерговыделения в процессе временного хранения ОЯТ. Режимы и сроки хранения ОЯТ на АЭС. Поведение газообразных и летучих продуктов деления в процессе временного мокрого и сухого хранения. Специфика поведения трития в ОЯТ в процессе временного хранения, меры предосторожности. Накопление в отработавших твэлах радиоактивного йода в процессе временного хранения, меры предосторожности. Специфика временного хранения ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах. Проблемы хранения и обращение с ОЯТ реакторов РБМК. Специфика хранения ОЯТ реакторов ВВЭР-1000. Анализ деградации ОЯТ в процессе выдержки.

Тема. 8. Транспортировка отработавшего ядерного топлива.

Требования безопасности при перевозках. Международные критерии МАГАТЭ по определению интенсивности излучений, рассеивания тепловыделения, условий, исключающих возникновения критических масс, в процессе перевозки ОЯТ. Правила МАГАТЭ, устанавливающие параметры, размеры и технические требования к радиационно-защитным транспортным упаковочным комплектам (ТУК), а также терминология в этой области. Промышленные ТУК, ТУК тип А и тип В, отличия и требования к механической прочности и герметичности. Конструкции транспортных контейнеров и транспортных упаковочных комплексов (ТУК). Требования к конструктивным элементам и материалам контейнеров. Биологическая защита ТУК. Устройства, обеспечивающие крепление и дистанционирование топливных сборок. Основные способы транспортировки ОЯТ. Мокрое и сухое транспортирование ОЯТ, преимущества и недостатки. Влияние глубины выгорания ядерного топлива на мощность дозы на поверхности транспортного контейнера. Требования по маркировке степени опасности и уровню излучения на поверхности ТУК: I, II и III категории. Требования предъявляются к температурному режиму ТУК. Виды теплоносителей в ТУК. Отличия конструкций ТУК для ОТВС реакторов: РБМК, ВВЭР и БН. Вертикальное и горизонтальное транспортирование ТУК. Металлобетонные контейнеры (МБК). Проблемы, связанные с перевозкой МОХ топлива. Транспортировке остеклованных высокоактивных отходов. Виды перевозок ТУК: железнодорожный транспорт, автомобильный, морской - специфика, отличия. Последствия аварийной разгерметизации твэлов при

транспортировке. Специфика транспортировки поврежденных твэлов. Аварии при транспортировке ОЯТ.

Тема. 9. Проблемы переработки и захоронения ОЯТ.

Накапливание ОЯТ во временных хранилищах. Проблемы АЭС, связанные с ограниченностью объемов бассейнов для временного хранения ОЯТ. Экологические проблемы, связанные с накоплением оружейного плутония. Необходимость переработки и захоронения ОЯТ. Экономические аспекты, связанные с переработкой ОЯТ. Экологические проблемы, связанные с существующими технологиями переработки ОЯТ. Технология переработки ОЯТ на заводе комбината «МАЯК». Проблемы переработки ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 и РБМК. Технология переработки оружейного плутония. Общие принципы длительного хранения ОЯТ. Экологические проблемы, связанные с длительным хранением ОЯТ в слаборазвитых странах. Примеры рационального и безопасного захоронения ОЯТ в развитых странах. Многоцелевые контейнеры (МК) для длительного хранения и захоронения ОЯТ. Требования к материалам МК. Материалы, используемые для поглощения нейтронного излучения в МК. Методы повышения коррозионной стойкости материалов МК. Взаимодействие долгоживущих изотопов с материалами МК при длительном хранении. Типы наземных и подземных хранилищ ОЯТ. Захоронение радиоактивных отходов в зависимости от состояния и уровня активности. Новые планируемые методы захоронения ОЯТ. Захоронения и экология.

Модуль №3: Конструкционные материалы с низкой наведенной активностью

Тема 10. Малоактивируемые конструкционные материалы.

Наведенная активность. Методика расчета наведенной активности и её расчет на примере хромоникелевых и хромистых сталей. Роль энергетического спектра и потоков излучения. Ядерные характеристики материалов. Значения макросечений упругого Σ_s и неупругого Σ_a взаимодействия нейтронов деления с атомами сплавов, используемых традиционно как для изготовления ТУК. Параметрам эффективности замедления материала χ и коэффициенту эффективности замедления Θ . Роль конструкционных материалов в обеспечении радиационной и ядерной безопасности. Повышение эффективности защиты от излучения. Требования к конструкционным материалам элементов контейнеров. Понятие «малоактивируемые материалы». Перспективные химические элементы для создания малоактивируемых материалов. Перспективные конструкционные малоактивируемые материалы для атомных и термоядерных реакторов. Материалы с низкой наведенной активностью. Ферритно-мартенситные стали. Ванадиевые сплавы. Карбид кремния. Углеграфитовые материалы и композиции. Ленточные аморфные ма-

териалы. Основные выводы и практические рекомендации по выбору элементов и созданию малоактивированных материалов.

УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА (обязательная)

1. В.И.Польский, Б.А.Калин, В.Л.Якушин, И.И.Чернов Материаловедческие проблемы экологии в области ядерной энергетики. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
2. Введение в экологию. Под ред. Ю.А. Казанского. – М.: ИздАТ, 1992.
3. Основы экологии и охраны окружающей среды. Учебник для вузов. / Под общей ред. А.И. Ксенофонтова. – М.: МИФИ, 2008.
4. Чернов И.И., А.Г. Иолтуховский А.Г. Отработавшее ядерное топливо. Часть 1. Состав и свойства. – М.: МИФИ, 2001.
5. Чернов И.И., Калин Б.А., Годин Ю.Г. и др. Отработавшее ядерное топливо. Часть 2. Транспортировка и хранение. – М.: МИФИ, 2004.

УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА (вспомогательная)

1. Безопасность ядерного топливного цикла. Агентство по ядерной энергии. Организация экономического сотрудничества и развития. Нормативные документы. – М.: Информ-Атом, 1993.
2. Платов Ю.М. Малоактивируемые конструкционные материалы для реакторов термоядерного синтеза. Учебно-методическое пособие. – М.: Интерконтакт Наука, 1999.