



ВНИИИМ
РОСАТОМ

Акционерное общество
«Высокотехнологический научно-исследовательский институт
неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара»
(АО «ВНИИИМ»)

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «ВНИИИМ»

Л.А. Карпюк

2022 г.



ПРОГРАММА

ВСТУПИТЕЛЬНОГО ЭКЗАМЕНА ПО НАУЧНОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность (технические науки)**

Москва 2022

В основу программы положены такие вузовские дисциплины: «Ядерная физика и технологии» и «Энергомашиностроение».

Научные знания, охватываемые данными дисциплинами, необходимы для анализа нейтронной физики и теплофизики ядерных реакторов, проектирования ядерных энергетических установок, обеспечения их безопасной эксплуатации и организации обращения с ядерным топливом на всех этапах жизненного цикла атомной энергетики.

I. Общие сведения о ядерных реакторах, твэлах и ТВС

1. Ядерная энергетика в энергетическом балансе. Перспективы развития ядерной энергетики.
2. Требования к энергетическим технологиям.
3. Топливный цикл ядерной энергетики.
4. Технологии и предприятия ядерного топливного цикла.
5. Экологическая и радиационная безопасность.
6. Экономические аспекты использования ядерной энергии. Составляющие издержек производства электроэнергии на АЭС.
7. Тяжелые аварии. Экономические и социальные последствия тяжелых аварий.
8. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами на АЭС.
9. Способы переработки и захоронения отходов.
10. Обеспечение и повышение безопасности при продлении эксплуатации.
11. Вывод из эксплуатации.
12. Дезактивация оборудования.
13. Реабилитация территорий, загрязненных радионуклидами.
14. Проблема нераспространения ядерных материалов. МАГАТЭ и системы международных гарантий. Технические проблемы нераспространения ядерных материалов.
15. Основные виды ядерных энергетических установок коммерческого назначения.
 - 15.1. Особенности конструкций и основные параметры современных корпусных водо-водяных реакторов.

15.2. Особенности конструкций и основные параметры современных канальных реакторов.

15.3. Принципы конструкций реакторов-бридеров на быстрых нейтронах.

15.4. Контроль, управление и защита ядерных энергетических установок.

15.5. Системы контроля нейтронно-физических и теплотехнических параметров.

15.6. Системы безопасности и управления. Методы контроля ядерной безопасности.

11. Исследовательские реакторы. Физические и конструктивные особенности. Экспериментальные устройства исследовательских реакторов.

12. Основы ядерной и нейтронной физики.

12.1. Строение вещества.

12.2. Строение и характеристики атомов.

12.3. Строение ядер и свойства ядерных сил.

12.4. Энергия связи и устойчивость ядер атомов.

12.5. Закономерность и характеристики радиоактивного распада.

12.6. Основные типы нейтронных реакций в ядерном реакторе.

12.7. Особенности реакции деления и ее практическое значение.

12.8. Основные характеристики нейтронных полей.

12.9. Эффективные сечения нейтронных реакций.

12.10. Критичность реактора. Условия осуществления критичности реактора.

12.11. Эффективный коэффициент размножения и реактивность реактора.

12.12. Нейтронный цикл в тепловом ядерном реакторе. Формула 4-х сомножителей для бесконечной и конечной среды.

13. Тепловыделение в ядерном реакторе.

13.1. Распределение энерговыделения в реакторе.

13.2. Распределение температуры в канале с теплоносителем.

13.3. Тепловыделение в конструкциях.

13. Реакторные материалы. Условия работы и критерии выбора.

13.1. Конструкционные материалы активной зоны.

13.2. Материалы органов управления реактивностью.

13.3. Материалы замедлителей и отражателей.

13.4. Материалы защиты.

14. Теплоносители ядерных реакторов. Требования, особенности применения.

14.1. Легкая и тяжелая вода.

14.2. Жидкие металлы (натрий, свинец-висмут, свинец).

14.3. Газы (углекислый газ, гелий).

II. Конструкционные материалы и ядерное топливо

1. Конструкционные материалы.

1.1. Конструкционные материалы, применяемые в ТВС, твэлах и пэлах реакторов ВВЭР и РБМК (сплавы циркония, ХНМ-1). Требования к конструкционным материалам. Основные физические и механические свойства.

1.2. Конструкционные материалы, применяемые в ТВС и твэлах быстрых реакторов БН, БРЕСТ, СВБР (аустенитные и ферритно-мартенситные стали). Требования к конструкционным материалам. Основные физические и механические свойства.

1.3. Конструкционные материалы, применяемые в ТВС и твэлах исследовательских реакторов МИР, СМ, ПИК (сплавы алюминия и аустенитные стали). Требования к конструкционным материалам. Основные физические и механические свойства.

1.4. Влияние нейтронного облучения на физико-механические свойства конструкционных материалов.

1.4.1. Радиационное охрупчивание (низкотемпературное и высокотемпературное). Причины охрупчивания и способы повышения радиационной стойкости.

1.4.2. Радиационное распухание. Причины и способы повышения радиационной стойкости.

1.4.3. Радиационный рост. Причины и способы повышения радиационной стойкости.

1.4.4. Радиационно-стимулированная ползучесть. Причины и способы повышения радиационной стойкости.

5. Коррозионная стойкость.

5.1. Особенности и закономерности коррозии циркониевых сплавов в воде высоких параметров и водяном паре. Равномерная коррозия, язвенная коррозия, щелевая коррозия.

5.2. Поглощение водорода, замедленное гидридное растрескивание.

5.3. Водно-химические режимы теплоносителя первого контура для твэлов с оболочками из сплавов циркония.

5.4. Паро-циркониевая реакция.

5.5. Коррозионная стойкость аустенитных и ферритно-мартенситных сталей в жидкометаллических теплоносителях.

5.6. Требования к качеству жидкометаллических теплоносителей.

5.7. Коррозионная стойкость в воде низких параметров (вода бассейнов выдержки).

5.8. Коррозионно-эрозионная стойкость алюминиевых сплавов в воде высоких параметров.

6. Металлургия конструкционных материалов. Технологические схемы изготовления проката (пруток, оболочки, лист). Контролируемые параметры. Методы и средства контроля.

7. Ядерное топливо.

7.1. Делящиеся материалы.

7.1.1. Уран. Ядерные, физические и механические свойства. Влияние облучения на физические и механические свойства, набухание, радиационный рост, анизотропия свойств урана под облучением. Пути повышения радиационной стойкости урана. Совместимость урана с конструкционными материалами. Коррозионная стойкость в воде, паре и жидкометаллических теплоносителях.

7.1.2. Сплавы урана. Применение сплавов урана в качестве ядерного топлива. UO_2 , UZr , $UZrNb$, Fissium. Основные физические и механические свойства. Поведение под облучением. Совместимость с конструкционными материалами. Коррозионная стойкость в воде, паре и жидкометаллических теплоносителях.

7.1.3. Карбиды урана. Применение в качестве ядерного топлива. Основные физические и механические свойства. Поведение под облучением. Совместимость с конструкционными материалами. Коррозионная стойкость в воде, паре и жидкометаллических теплоносителях.

7.1.4. Нитриды урана. Применение в качестве ядерного топлива. Основные физические и механические свойства. Поведение под облучением. Совместимость с конструкционными материалами. Коррозионная стойкость в воде, паре и жидкометаллических теплоносителях.

7.1.5. Силициды урана. Применение в качестве ядерного топлива. Основные физические и механические свойства. Поведение под облучением. Совместимость с конструкционными материалами. Коррозионная стойкость в воде.

7.1.6. Интерметаллиды урана. Применение в качестве ядерного топлива. Основные физические и механические свойства. Поведение под облучением. Совместимость с конструкционными материалами. Коррозионная стойкость в воде, паре.

7.1.7. Соединения урана с кислородом. Применение в качестве ядерного топлива. Основные физические и механические свойства компактных оксидов урана. Влияние нейтронного облучения и температуры на структуру и физико-механические свойства. Закономерности набухания, газовыделения, радиационно-стимулированная ползучесть. Совместимость с конструкционными материалами. Коррозионная стойкость в воде, паре и жидкометаллических теплоносителях.

7.2. Плутоний. Ядерные, физические и механические свойства.

Оксид плутония. Основные физические и механические свойства. Поведение под облучением. Совместимость с конструкционными материалами. Коррозионная стойкость в воде, паре и жидкометаллических теплоносителях. MOX топливо. REMIX-топливо. Смешанное нитридное топливо. Свойства. Применение.

8. Металлургия урана. Технологические схемы получения слитков и порошка металлического урана.

9. Технологические схемы получения соединений урана (сплавы, карбиды нитриды, силициды, интерметаллиды) и порошков из них.

10. Технологические схемы получения порошка оксида урана из гексафторида. Сравнение технологических характеристик порошков оксида урана, полученных разными методами. Достоинства и недостатки различных схем изготовления порошка оксида урана.

11. Основные этапы технологии производства таблеток. Технологический контроль свойств топливных таблеток. Основные контролируемые технологические свойства топливных таблеток. Методы контроля характеристик топливных таблеток.

12. Особенности изготовления топлива из регенерированного урана

13. Особенности изготовления смешанного топлива.

14. Технологические схемы окислительного и экстракционного методов переработки брака и отходов производства порошков оксида урана и топливных таблеток.

15. Применение выгорающих поглотителей в атомной энергетике. Назначение выгорающих поглотителей. Бор. Гадолиний. Эрбий. Ядерно-физические свойства. Эрбий, как выгорающий поглотитель для топлива РБМК, перспективы использования в топливе ВВЭР. Гадолиний, как выгорающий поглотитель для топлива ВВЭР, достоинства и недостатки.

16. Обращение с отработанным ядерным топливом. Хранение и переработка, утилизация.

III. Тепловыделяющие элементы. Контроль качества и методы испытания топлива и твэлов

1. Тепловыделяющие элементы (твэлы). Назначения и основные функции. Общие требования к твэлам. Основные типы твэлов. Основные составные части твэлов.

2. Твэлы контейнерного типа. Конструктивные особенности и области применения. Физико-химические процессы, протекающие в твэлах контейнерного типа под облучением.

3. Дисперсионные твэлы. Конструктивные особенности и области применения.

5. Эксплуатационные факторы, влияющие на работоспособность и ресурсные характеристики твэлов.

6. Модели нагружения твэлов и оболочек.

7. Расчеты твэлов.

7.1. Тепловой расчёт твэла. Уравнение теплопроводности. Типы граничных условий уравнения теплопроводности. Методы решения уравнения теплопровод-

ности. Аналитическое (одномерное) решение уравнения теплопроводности для составного цилиндра.

7.2. Расчёт твэла на прочность. Уравнения равновесия. Деформации. Связь между напряжениями и деформациями. Модели материала. Пластичность. Ползучесть. Эффект термического деформирования. Эффект радиационного формоизменения. Основные понятия метода конечных элементов.

8. Основы работоспособности твэлов ВВЭР в допустимых проектных условиях эксплуатации.

8.1. Понятие о проектных критериях.

8.2. Прочностные критерии.

8.2.1. Коррозионное растрескивание под напряжением в присутствии агрессивных продуктов деления.

8.2.2. Предельные эквивалентные напряжения в оболочке.

8.2.3. Потеря окружной устойчивости оболочки от перепада давления.

8.2.4. Усталостная и длительная прочность оболочки.

8.2.5. Предельная остаточная пластическая деформация оболочки.

8.3. Деформационные критерии.

8.4. Теплофизические критерии.

8.4.1. Предельная температура топлива.

8.4.5. Предельное давление газов под оболочкой твэла.

8.5. Коррозионные критерии.

8.6. Фреттинг-износ оболочки.

8.7. Эксплуатационные критерии.

8.8. Критерии безопасности при авариях.

9. Контроль и обеспечение качества при производстве ядерного топлива.

9.1. Роль контроля и стандартов качества.

9.2. Организация метрологического обеспечения качества.

9.3. Обеспечение качества ядерного топлива при проектировании.

9.4. Технологический контроль твэлов. Контролируемые параметры и методы контроля.

9.5. Технологический контроль ТВС. Контролируемые параметры и методы контроля.

10. Методы дореакторных исследований твэлов и ТВС.
 11. Контроль состояния твэлов при работе в реакторе.
 12. Контроль облученных твэлов и ТВС.
 13. Методы реакторных и послереакторных исследований твэлов и ТВС.
- Испытания материалов и твэлов в исследовательских реакторах (инструментальные, регистрируемые параметры, погрешности). Реакторы МИР, СМ-2, БОР-60 - экспериментальные возможности.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Майоров А.А., Браверман И.Б. Технология получения порошков двуокиси урана. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Синев Н. М. Экономика ядерной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов – М.: Энергоатомиздат, 1996.
4. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д., Линдт К.А., Мухачев А.П., Пипипенко Н.Н. Цирконий и его сплавы: технологии производства, области применения: Обзор. Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998.
5. Кириллов П.Л., Богословская, Г.П. Тепло-массо обмен в ядерных энергетических установках. – Москва: Энергоатомиздат, 2000.
6. Жиганов А.Н., Гузеев В.В., Андреев Г.Г. Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива. – Томск: СТТ, 2002 – 328 с.
7. Лебедев В.М. Ядерный топливный цикл. Технологии, безопасность, экономика. М., Энергоатомиздат. 2005 г.
8. Бойко В.И. и др. Ядерный топливный цикл и режим нераспространения. Учебное пособие. Томск. Издательство томского политехнического университета. 2009 г.
9. Физическое материаловедение: Учебник для вузов: В 7 т. /под общей ред. Б.А. Калина. – Изд. 2-е, перераб. – М: НИЯУ МИФИ, 2012. (Т. 6: Конструкционные материалы ядерной техники. – 2012. – 734 с.: ил.; Т. 7: Ядерные топливные материалы. – 2012. – 640 с.: ил.)

10. Апсэ В.А., Шмелев А.Н., Куликов Е.Г., Куликов Г.Г. Ядерные технологии. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2013.

11. Апсэ В.А., Ксенофонтов А.И., Савандер В.И., Тихомиров Г.В., Шмелев А.Н. Физико-технические основы современной ядерной энергетики. Перспективы и экологические аспекты. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2014.

12. Сборник лекций по физике ядерных реакторов – <http://lib.wwer.ru/fizika-yadernyh-eaktorov/>

13. Солонин В.И., Сотников А.С. Материаловедческие аспекты основ проектирования и конструирования тепловыделяющих элементов энергетических ядерных реакторов учебное пособие. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Галкин Н.П., Майоров А.А., Верятин У.Д. и др. Химия и технология фтористых соединений урана, Госатомиздат, Москва, 1961г. – 349 с.

2. Федорченко И.М., Андриевский Р.А. Основы порошковой металлургии. – Киев: Академиздат АН УССР, 1963. – 420 с.

3. Займовский А.С., Калашников В.В., Головнин, И.С. тепловыделяющие элементы атомных реакторов. – М.: Атомиздат, 1966.

4. Судариков Б.Н., Раков Э. Г. Процессы и аппараты урановых производств – М.: Машиностроение, 1969 – 383 с.

5. Громов Б.В. Введение в химическую технологию урана: учебник для вузов. – М.: Атомиздат, 1978. – 336 с.

6. Артес А., Агапов Ю., Круглова Е. и др. Контроль качества продукции в машиностроении. 2-е изд. Под ред. А.Э.Артеса, М.: Издательство стандартов, 1980 – 272 с.

7. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. – М.: Металлургия, 1980 – 496 с.

8. Громов, Б.В. Химическая технология облученного ядерного топлива: учебник для вузов / Б. В. Громов, В. И. Савельева, В. Б. Шевченко. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.

9. Климов А.Н. Ядерная физика и ядерные реакторы. – Москва: Энергоатомиздат, 1985.

10. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1994.

11. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. Учебник для вузов. – М.: Изд-во «Атомная техника», 1994.

12. Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю., Кухаркин Н.Е., Семченков Ю.М., Сидоренко В.А., Субботин С.А., Цибульский В.Ф., Штромбах Я.И. «О стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г.» М.: Атомная Энергия, 2011, Т.111, №4.

Программу разработали:

Главный эксперт,

д-р техн. наук, снс

А.В. Ватулин

Главный эксперт,

канд. техн. наук

А.В. Лысиков

Программа вступительного экзамена по научной специальности 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки) одобрена и рекомендована к утверждению Научно-техническим советом АО «ВНИИНМ» протокол № 6 от 08.04.2022 года.