



ВНИИНМ  
РОСАТОМ

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

**УТВЕРЖДАЮ**

Генеральный директор  
АО «ВНИИНМ»



Л.А. Карпюк

04 2022 г.

## **ПРОГРАММА**

**КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО НАУЧНОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

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

**Москва  
2022**

## **Часть 1. ОСНОВНАЯ ПРОГРАММА**

Данная программа представляет собой описание содержательного минимума, необходимого для сдачи кандидатского экзамена по специальности 05.14.03. – ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации (технические науки).

Программа ориентирует аспирантов, обучающихся по данной специальности, а также соискателей на приобретение знаний в области ядерных энергетических установок, охватывающих следующие базовые разделы: «Ядерная физика и ядерные технологии», «Энергомашиностроение».

Содержание программы сформулировано на основе изучения следующих тем:

- 1 Общие вопросы применения ядерной энергии.
- 2 Основы проектирования и конструирования ядерных энергетических установок.
- 3 Ядерные энергетические установки.
- 4 Сооружение, монтаж и эксплуатация ядерных энергетических установок.
- 5 Управление сроком службы ядерных энергетических установок

Типовая программа-минимум разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по энергетике, электрификации и энергетическому машиностроению при участии МГТУ им. Н.Э. Баумана и МЭИ (ТУ).

### **1. Общие вопросы применения ядерной энергии**

Ядерная энергетика в энергетическом балансе. Требования к энергетическим технологиям. Перспективы развития ядерной энергетики.

Топливный цикл ядерной энергетики. Технологии и предприятия ядерного топливного цикла. Экологическая и радиационная безопасность.

Проблема нераспространения ядерных материалов. МАГАТЭ и системы международных гарантий. Технические проблемы нераспространения ядерных материалов.

Экономические аспекты использования ядерной энергии. Составляющие издержек производства электроэнергии на АЭС. Снятие АЭС с эксплуатации. Экономические последствия тяжелых аварий. Социальные аспекты развития ядерной энергетики.

### **2. Основы проектирования и конструирования ядерных энергетических установок**

Основы ядерной и нейтронной физики. Состав и характеристики ядер. Закон и характеристики радиоактивного распада. Ядерные реакции и их особенности.

Нейтронный цикл в ядерном реакторе. Эффективный коэффициент размножения нейтронов. Условия критичности. Закономерности формирования пространственно-энергетического распределения нейтронов и удельного выделения энергии.

Кинетика реактора. Роль запаздывающих нейтронов. Критическое и подкритическое состояние реактора. Динамические характеристики, обратные связи, устойчивость и способы регулирования реактора.

Источники и методы регистрации нейтронов, экспериментальные методы измерения сечений нейтронных реакций, размножающих свойств среды и нуклидного состава топлива.

Эффекты реактивности. Выгорание и воспроизводство ядерного топлива. Топливные циклы. Перегрузки топлива. Ядерная безопасность.

Источники ионизирующих излучений в ядерных энергетических установках. Система теплоносителя как источник излучений. Закономерности ослабления ионизирующих излучений в веществе. Радиационное повреждение реакторных материалов.

Тепловые и гидравлические процессы в ядерных энергетических установках. Особенности контура отвода тепла. Теплогидравлический расчет активных зон, охлаждаемых однофазным, двухфазным водным, жидкометаллическим, газовым теплоносителем. Кризис теплообмена. Запасы до кризиса. Максимальные температуры оболочки и топлива. Нестационарные процессы в переходных и аварийных режимах. Термогидравлика основных проектных аварий.

Циклы паротурбинных и газотурбинных установок. Энергетический баланс и к.п.д. ядерных энергетических установок.

Прочность оборудования и трубопроводов ядерных энергетических установок. Статическая прочность. Устойчивость. Циклическая прочность. Хрупкая прочность. Вибропрочность. Расчет на прочность при сейсмических воздействиях. Испытания натурального оборудования и модельных образцов.

Контроль, управление и защита ядерных энергетических установок. Системы контроля нейтронно-физических и теплотехнических параметров. Безопасность и проблема управления. Защиты по уровню мощности и разгону. Управляющие системы нормальной эксплуатации и безопасности. Взаимодействие «человек-машина».

Основные принципы и критерии обеспечения безопасности. Нормативно-регулирующие документы. Принципы защиты в глубину. Уровни глубоко эшелонированной защиты. Фундаментальные функции безопасности. Принцип единичного отказа. Критерии и условия обеспечения безопасной эксплуатации.

Физические принципы реакторов с естественной безопасностью.

Анализ аварий. Проектные и запроектные аварии. Анализ надежности систем безопасности. Модели систем безопасности. Управление аварией. Вероятностный анализ. Сценарии аварий на АЭС с реакторами ВВЭР, БН, РБМК.

Программные комплексы для нейтронно-физических расчетов, проектных и эксплуатационных расчетов динамики и безопасности, радиационной защиты, расчетного обоснования прочности, моделирования тяжелых аварий и их последствий.

## **2. Ядерные энергетические установки**

Атомные станции. Типы атомных станций. Основные компоненты и системы энергоблоков АЭС. Судовые и космические ядерные энергетические установки. Передвижные и блочно-транспортабельные ядерные энергетические установки. Радионуклидные генераторы. Термоядерные реакторы. Гибридные системы синтеза-деления. Классификация ядерных реакторов.

Теплоносители ядерных реакторов. Требования, особенности применения. Водно-химические режимы первого (второго) контура. Технологии жидкометаллических, органических, газовых теплоносителей.

Материалы в реакторостроении. Условия работы и критерии выбора. Теплоустойчивые стали, коррозионно-стойкие стали, циркониевые сплавы, нержавеющие стали, никелевые сплавы, сплавы на основе титана, высокотемпературные сплавы, графит, керамические материалы. Материалы органов управления реактивностью. Материалы замедлителей и отражателей. Материалы защиты.

Органы регулирования ядерных реакторов. Назначение, состав, конструкции и функциональное использование. Особенности органов регулирования реакторов различных типов. Использование жидких, газообразных и сыпучих поглотителей.

Корпусные легководные реакторы с водой под давлением и кипящие. Развитие реакторов. Реакторы ВВЭР-1000, АСТ-500, АТЭЦ, PWR. Реакторы ВК, BWR. Конструкции. Компонировка оборудования. Системы нормальной эксплуатации. Системы безопасности.

Реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Развитие реакторов. Реакторы БН-600, БН-800. Корпус реактора и внутрикорпусные устройства. Активная зона и зона воспроизводства. Технические средства обеспечения безопасности. Компонировка оборудования.

Канальные водографитовые и тяжеловодные реакторы. Развитие канальных реакторов. Первая в мире, Сибирская, Белоярская АЭС, Билибинская АТЭЦ. Реакторы РБМК-1000, РБМК-1500. Металлоконструкции. Активная зона. Контур многократной принудительной циркуляции. Системы нормальной эксплуатации и системы безопасности. Канальные тяжеловодные реакторы.

Реакторы, охлаждаемые газом.

Ядерные реакторы нового поколения:

- с водой под давлением;
- с жидкометаллическим теплоносителем (натрием, свинцом-висмутом, свинцом).

Исследовательские реакторы. Физические и конструктивные особенности. Экспериментальные устройства исследовательских реакторов. Стационарные и учебно-исследовательские реакторы.

Системы перегрузки топлива. Способы перегрузки. Хранилища отработавшего ядерного топлива. Транспортно-технологическое оборудование. Перегрузочные устройства.

#### **4. Сооружение, монтаж и эксплуатация ядерных энергетических установок**

Особенности проектирования и сооружения ядерных энергетических установок. Выбор площадок. Компонировка зданий и сооружений.

Выполнение строительно-монтажных работ. Поставка оборудования. Особенности организации монтажа. Управление качеством. Монтаж реакторов ВВЭР, БН, РБМК. Основные технологические процессы.

Организация и контроль эксплуатации. Установление и корректировка пределов и условий безопасной эксплуатации. Регламентация эксплуатации. Техническое обслуживание и ремонт. Регламентация действий при авариях и в аварийных ситуациях. Показатели работы АЭС. Система ведомственного контроля за

эксплуатацией. Федеральный надзор за безопасностью.

Методы эксплуатационной и оперативной диагностики за состоянием металла и оборудования, трубопроводов АЭС. Периодичность эксплуатационного контроля. Системы оперативной диагностики.

Тренажеры для персонала АЭС.

Дезактивация технологического оборудования, зданий и сооружений. Основные методы и организация дезактивации.

Обращение с радиоактивными отходами на АЭС. Переработка радиоактивных вод. Отверждение жидких радиоактивных отходов. Переработка твердых радиоактивных отходов. Обращение с газообразными радиоактивными отходами. Системы газоочистки при запроектных авариях.

## **5. Управление сроком службы ядерных энергетических установок**

Жизненный цикл ядерной энергетической установки и принципы управления сроком службы. Продление срока службы. Вывод из эксплуатации.

Обеспечение и повышение безопасности при продлении эксплуатации. Повреждающие факторы. Технологическая последовательность операций.

Радиоактивные материалы при снятии с эксплуатации ядерных энергетических установок. Транспортировка, хранение и переработка топлива. Удаление радиоактивных отходов высокой и средней активности. Дезактивация оборудования. Реабилитация территорий, загрязненных радионуклидами.

Особенности снятия с эксплуатации судовых ядерных энергетических установок.

## **Часть 2. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА**

Дополнительная программа-минимум по специальности 05.14.03 сформирована с учётом специфики научной деятельности института, связанной с разработкой ядерного топлива для реакторов различного назначения.

### **I. 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.

5.9. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей в воде высоких параметров. Коррозия под напряжением.

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. UMo, 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. МОХ 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. Транспортировка, хранение и переработка отработанного ядерного топлива. Использование переработанного ядерного топлива для изготовления топлива для реакторов различного назначения. Особенности производства.

## **II. Тепловыделяющие элементы. Разработка и обоснование работоспособности. Технологии изготовления и контроль качества. 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.

4. Конструкции ТВС энергетических реакторов (ВВР, РБМК, БН). Принципы дистанционирования ТВЭЛОВ.

5. ТВС и ТВЭЛЫ ВТГР.

6. Конструкции ТВС исследовательских реакторов.

7. Конструкция ТВС реакторов плавучих атомных станций.

8. Эксплуатационные факторы, влияющие на работоспособность и ресурсные характеристики ТВЭЛОВ.

9. Модели нагружения ТВЭЛОВ и оболочек.

10. Расчеты ТВЭЛОВ.

10.1. Тепловой расчёт ТВЭЛА. Уравнение теплопроводности. Типы граничных условий уравнения теплопроводности. Методы решения уравнения теплопроводности. Аналитическое (одномерное) решение уравнения теплопроводности для составного цилиндра.

10.2. 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.

10.3. Компьютерные коды для расчёта ТВЭЛОВ на прочность.

10.4. Методы вероятностных расчетов ТВЭЛОВ.

11. Основы работоспособности ТВЭЛОВ ВВЭР в допустимых проектных условиях эксплуатации.

11.1. Понятие о проектных критериях.

11.2. Прочностные критерии.

Коррозионное растрескивание под напряжением в присутствии агрессивных продуктов деления.

Предельные эквивалентные напряжения в оболочке.

Потеря окружной устойчивости оболочки от перепада давления.

Усталостная и длительная прочность оболочки.

Предельная остаточная пластическая деформация оболочки.

11.2. Деформационные критерии.

11.3. Теплофизические критерии.

Предельная температура топлива.

Предельное давление газов под оболочкой ТВЭЛА.

11.4. Коррозионные критерии.

11.5. Фреттинг-износ оболочки.

11.6. Эксплуатационные критерии.



- 11.7. Критерии безопасности при авариях.
12. Порядок разработки и утверждения технического проекта твэла и постановки на производство.
13. Изготовление твэлов и ТВС.
  - 13.1. Понятие о разовом, мелкосерийном, крупносерийном и массовом производстве твэлов.
  - 13.2. Технологические схемы изготовления твэлов контейнерного типа.
  - 13.3. Технология сборки ТВС энергетических реакторов.
  - 13.4. Технологические схемы изготовления дисперсионных твэлов.
    - 13.4.1 Совместное выдавливание.
    - 13.4.2. Вакуумная пропитка.
    - 13.4.3. Гидростатическое прессование.
  - 13.5. Технологическая схема изготовления твэлов ВТГР.
    - 13.5.1 Технологическая схема изготовления сферических микротвэлов из топливных материалов процессом золь-гель с последующим покрытием их поверхности слоями пироуглерода и карбида кремния.
    - 13.5.2. Технологическая схема изготовления твэлов из микротвэлов и порошка углерода в компактные дисперсионные твэлы.
    - 13.5.3. Особенности технологии получения микротвэлов методом золь-гель процесса из карбида урана, карбида плутония и карбида тория.
  - 14.5. Методы герметизации твэлов.
    - 14.5.1. Оборудование и технологическая схема контактно стыковой сварки.
    - 14.5.2. Оборудование и технологическая схема аргонно-дуговой сварки.
    - 14.5.3. Оборудование и технологическая схема электронно-лучевой сварки.
    - 14.5.4. Методы контроля качества сварки.
  - 15.6. Автоматическая система управления технологическим процессом изготовления твэлов.
16. Контроль и обеспечение качества при производстве ядерного топлива
  - 16.1. Роль контроля и стандартов качества.
  - 16.2. Организация метрологического обеспечения качества.
  - 16.3. Обеспечение качества ядерного топлива при проектировании.
  - 16.4. Технологический контроль твэлов. Контролируемые параметры и методы контроля.
  - 16.5. Технологический контроль ТВС. Контролируемые параметры и методы контроля.
17. Методы дореакторных исследований твэлов и ТВС.
18. Контроль состояния твэлов при работе в реакторе.
19. Контроль облученных твэлов и ТВС.
20. 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.

## **ЛИТЕРАТУРА К ОСНОВНОЙ ПРОГРАММЕ**

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

2. Столлер С., Ричардс Р. Переработка ядерного горючего. М. Атомиздат, 1964.
3. Крамеров А.Я., Шевелев Я.В. Инженерные расчеты ядерных реакторов - Москва: Атомиздат, 1964.
4. Герасимов В. В., Касперович А. И., Мартынова О. И. Водный режим атомных электростанций. – М. : Атомиздат, 1976.
5. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкометаллические теплоносители. - Изд. 3-е. М.: Атомиздат, 1976.
6. Конструкционные материалы ядерных реакторов. В 2-х ч. Ч. II. Структура, свойства, назначение. Учебное пособие для вузов. Под общей редакцией Н.М. Бескоровайного. – М.: Атомиздат, 1977.
7. Громов, Б.В. Химическая технология облученного ядерного топлива: учебник для вузов / Б. В. Громов, В. И. Савельева, В. Б. Шевченко. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
8. Бабаев Н.С., Демин В.Ф., Ильин Л.А. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда. Энергоатомиздат, 1984
9. Климов А. Н. Ядерная физика и ядерные реакторы. – Москва: Энергоатомиздат, 1985.
10. Усынин Г.Б., Кусмарцев Е.В. Реакторы на быстрых нейтронах. Учебное пособие для Вузов. Под редакцией Ф.М. Митенкова. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. 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.
12. Титов В.Ф., Рассохин Н.Г. Федоров В.Г. Парогенераторы атомных электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
13. Новиков В.М., Смирнов И.С., Алексеев П.Н. Ядерные реакторы повышенной безопасности (анализ концептуальных разработок). – М.: Энергоатомиздат, 1993.
14. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. Учебник для вузов. –М.: Изд-во «Атомная техника», 1994.
15. Бескоровайный Н.М., Калинин Б.А., Платонов П.А., Чернов И.И. Конструкционные материалы ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1995.
16. Шевелев Я.В., Клименко А.В. Эффективная экономика ядерного топливно-энергетического комплекса. М.: Изд-во РГТУ, 1996.
17. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1999.
18. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Тепло-массо обмен в ядерных энергетических установках.- Москва: Энергоатомиздат, 2000.
19. Власов Н.М., Федик И.И. Твэлы ядерных ракетных двигателей. Учебное пособие. – М.: ЦНИИАтоминформ, 2001.
20. Хлопкин Н.С. Морская атомная энергетика: учебное пособие. – М.: МИФИ, 2007.
21. Давиденко Н.Н., Куценко К.В., Тихомиров Г.В., Лаврухин А.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами в атомной энергетике: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2007.
22. Острейковский В.А., Швыряев Ю.В. Безопасность атомных станций.

Вероятностный анализ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

23. Сваровский А.Я. Обращение с отработавшим ядерным топливом АЭС в России. Учебное пособие. - Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2010.

24. Бушуев А.В., Кожин А.Ф., Петрова Е.В., Алеева Т.Б., Зубарев В.Н. Методы и приборы измерений ядерных материалов. Лабораторный практикум. М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

25. 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.

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

27. 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.

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

## ЛИТЕРАТУРА К ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ

1. Бэгли К. Плутоний и его сплавы. - М.: Издательство Главного управления по использованию атомной энергии при СМ СССР, 1958.

2. Герасимов В.В. Коррозия урана и его сплавов. - М.: Атомиздат, 1965.

3. Займовский А.С., Калашников В.В, Головин И.С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов. М. Атомиздат 1966г.

4. Конобеевский С. Т. Действие облучения на материалы. Введение в радиационное материаловедение - М.: Атомиздат, 1967.

5. Вотинов С.Н. и др. Радиационная физика твердого тела и реакторное материаловедение. Сборник статей. - М.: Атомиздат 1970

6. Дуглас Д. Материаловедение циркония. - М.: Атомиздат, 1975

7. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1975.

8. Лихачев Ю.Н., Пупко В.Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1975.

9. Дашковский А.И., Бычков Ю.Ф., Скоров Д.М., Чепкунов В.В., Под ред. Д.М. Скорова. Реакторное материаловедение. - М.: Атомиздат, 1976.

10. 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.

11. Майоров А.А., Браверман И.Б. Технология получения порошков двуокиси урана. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

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

13. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головин И.С. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реак-

торов. В 2 кн. – М.: Энергоатомиздат, 1995.

14. Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов – М.: Энергоатомиздат, 1996.

15. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д., Линдт К.А., Мухачев А.П., Пилипенко Н.Н. Цирконий и его сплавы: технологии производства, области применения: Обзор. Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998.

16. Власов Н.М., Федик И.И. Твэлы ядерных ракетных двигателей. Учебное пособие. – М. : ЦНИИАтоминформ, 2001.

17. Физическое материаловедение: Учебник для вузов. В 6 т. Под общей ред. Б.А. Калина. – М.: МИФИ, 2008. Том 6. Часть 1. Конструкционные материалы ядерной техники. Часть 2. Ядерные топливные материалы.

18. Жиганов А.Н., Гузеев В.В., Андреев Г.Г. Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива. – Томск: СТТ, 2002.

19. Плутоний. Фундаментальные проблемы. Перевод с английского под редакцией Б.А.Надыкто и Л.А.Тимофеевой. РЯЦ ВНИЭФ, Саров, 2003.

20. В. А. Волкович, А. Л. Смирнов. Металлургия урана и технология его соединений. Часть 3. Курс лекций. - Екатеринбург, Издательство Уральского университета, 2014

21. 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.

### **Программу разработали:**

Научный руководитель института  
ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, канд. техн. наук, снс

В.В. Новиков

Главный эксперт,  
д-р техн. наук, снс

А.В. Ватулин

Главный эксперт,  
канд. техн. наук

А.В. Лысиков

---

Программа кандидатского экзамена по 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.