

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе




Драгунов В.К.

«» 2022 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

специальной дисциплины 2.4.9. Ядерные энергетические установки,
топливный цикл, радиационная безопасность

Москва 2022

Программа составлена на основе паспорта специальности научных работников и программы - минимум кандидатского экзамена по специальности «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» в действующей редакции и в соответствии с Положением о подготовке научных и научно- педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2021г. № 2122.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения дисциплины является изучение ядерных энергетических установок, топливного цикла и радиационной безопасности.

Задачами дисциплины являются:

- изучение теоретических и математических моделей, описывающих процессы в ядерных энергетических установках;
- изучение новых методов расчета современных ядерных энергетических установок;
- изучение фундаментальных законов в области ядерных реакторов, топливного цикла и радиационной безопасности;
- изучение перспектив развития ядерной отрасли, использовать ее современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах;
- изучение принципов выполнения экспериментальных или теоретических исследований для решения научных и производственных задач с использованием современной техники и методов расчета и исследования;
- изучение принципов расчета, концептуальных и проектных проработок современных ядерных энергетических установок.

МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ

Специальная дисциплина в структуре программы аспирантуры входит в Блок 2 «Образовательный компонент». Общая трудоемкость составляет 7 зачетных единиц (з.е.).

Формула специальности

Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность – раздел технической науки, объединяющий исследования закономерностей, сопутствующих жизненному циклу объектов ядерной техники, включая расчетное и экспериментальное обоснование методов проектирования, конструирование, производство, сооружение, монтаж, эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт, управление сроком службы, обращение с радиоактивными отходами, методы и способы дезактивации. Объектами ядерной техники являются ядерные и термоядерные реакторы, изотопные источники и установки, использующие изотопные источники,

комплексы ядерного топливного цикла, включая их оборудование, компоненты, системы нормальной эксплуатации и системы безопасности. В рамках специальности исследуются закономерности нейтронно-физических, тепловых и гидравлических процессов, взаимодействия реакторных излучений с материалами, изменения свойств материалов, особенностей обоснования прочности, диагностики, контроля и управления комплексом процессов, протекающих в объектах ядерной техники, принципов и методов обоснования их безопасности. Исследования имеют целью совершенствование действующих и создание новых объектов ядерной техники, их оборудования, компонентов и систем, обеспечения надежности, безопасности, экологической приемлемости, выявления конкурентоспособности ядерных технологий, технической поддержки нераспространения ядерных материалов.

Области исследований

1. Моделирование нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, создание программных комплексов, обеспечивающих достоверное расчетное обоснование объектов ядерной техники и их безопасное функционирование. Компьютерное моделирование аварийных ситуаций на энергоблоке АЭС. Проблемы математического моделирования и оптимизации тепловых схем АЭС.
2. Исследования характеристик материалов, конструкций, оборудования и систем с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники. Применение методов анализа неопределённостей при расчёте аварийных режимов на АЭС.
3. Разработка методов расчета технологических процессов в объектах ядерной техники с целью оптимизации их характеристик, повышения надежности оборудования и систем. Теоретические и математические модели, описывающие процессы в ядерных энергетических установках.
4. Фундаментальные законы в области ядерных реакторов, топливного цикла и радиационной безопасности, их использование в развитии ядерной отрасли.
5. Разработка требований к проектным, конструкторским, технологическим решениям, влияющим на ядерную и радиационную безопасность, обеспечивающим повышение эффективности, управление сроком службы объектов ядерной техники.
6. Разработка методов обоснования безопасности и экологической приемлемости технологий и объектов ядерной техники.

Отрасль науки

- технические науки.

Введение

Настоящая программа составлена на основе дисциплин направлений «Ядерная физика и технологии», «Энергомашиностроение», связанных с особенностями анализа нейтронно-ядерных процессов и теплофизики реакторов,

синтезом ядерных энергетических установок и основами их безопасной эксплуатации.

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. Радиационная безопасность.

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

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. Действие ионизирующего излучения на теплоноситель (вода). Действие ионизирующего излучения на оксидные пленки конструкционных сплавов. Действие ионизирующего излучения на конструкционные сплавы – углеродистые стали; аустенитные хромоникелевые стали; сплавы на основе циркония, алюминия.

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. Двухфазные среды в ядерных энергетических установках. Параметры, характеризующие поток пароводяной смеси. Режимы течения пароводяной смеси в парогенерирующих трубах. Двухфазные среды пузырьковой структуры. Основные соотношения в потоках двухфазных сред. Расходные и истинные параметры, характеризующие поток пароводяной смеси в трубах. Гидравлические сопротивления при вынужденном движении неомогенной пароводяной смеси в трубах. Определение относительного коэффициента гидравлического сопротивления пароводяной смеси. Влияние массового паросодержания на потери давления на трение при движении пароводяной смеси.

Задача исследования и задача оптимизации технологической схемы АЭС. Функциональные свойства АЭС и критерии оптимизации. Определение и состав тепловой схемы. Тепловые схемы принципиальные и полные. Виды и цели расчетов тепловых схем. Исследование АЭС на основе системного подхода. Иерархия задач исследования АЭС. Задача оптимизации АЭС и основные этапы ее решения.

Математические модели тепловых схем: определение и классификация. Принципы разработки на основе системного подхода и состав математических моделей тепловых схем. Математическая модель с фиксированной структурой тепловой схемы. Линейная математическая модель. Процедура теории графов для решения уравнений нелинейной математической модели.

Циклы паротурбинных и газотурбинных установок. Энергетический баланс и КПД 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 радиационной безопасности. Нормативно-регулирующие документы. Принципы защиты в глубину. Уровни глубоко эшелонированной защиты: Фундаментальные функции безопасности. Принцип единичного отказа. Критерии и условия обеспечения безопасной эксплуатации.

Нормативные документы и рекомендации, определяющие применение теплогидравлических кодов для компьютерного моделирования аварийных ситуаций на энергоблоке АЭС. Тенденции развития теплогидравлических кодов улучшенной оценки для компьютерного моделирования аварийных ситуаций на АЭС. Применение расчетных кодов улучшенной оценки для компьютерного моделирования теплогидравлическими кодами аварийных ситуаций на энергоблоке АЭС.

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, для расчетного обоснования прочности, моделирования тяжелых аварий и их последствий.

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.

Классификация процессов коррозии (применительно к узлам ПГ по условиям протекания и по характеру наблюдаемых повреждений конструкционных сплавов). Коррозия: химическая, электрохимическая, общая, локальная. Дентин-, фреттинг-коррозия, щелевая, ножевая, под напряжением. Водородное охрупчивание. Коррозионная усталость. Коррозионное растрескивание – транс- и интеркристаллитное. Эрозионно-коррозионный износ. Способы выражения скорости коррозии. Растворы, растворение, электролиты, растворы электролитов, концентрации веществ в растворе. Химическая активность растворенных веществ. Законы Генри, Рауля.

Ядерное топливо. Конструкционные материалы твэлов и ТВС. Основные требования, характеристики.

Тепловыделяющие элементы и ТВС ядерных реакторов. Основные требования. Типы конструктивных решений. Физико-химические процессы, протекающие в твэлах и ТВС в условиях эксплуатации.

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-440/1000/1200, PWR. Реакторы ВК, BWR.

Конструкции. Компоновка оборудования. Системы нормальной эксплуатации. Системы безопасности.

Реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Развитие реакторов. Реакторы БН-600, БН-800, БН-1200. Корпус реактора и внутрикорпусные устройства. Активная зона и зона воспроизводства. Технические средства обеспечения безопасности. Компоновка оборудования.

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

Реакторы, охлаждаемые газом. Развитие реакторов. Реакторы с гелиевым теплоносителем. Активные зоны из шаровых, стержневых твэлов и призматических блоков.

Ядерные реакторы нового поколения - с водой под давлением, бассейновые, канальные, с жидкометаллическим теплоносителем (натрием, свинцом-висмутом, свинцом), модульные, охлаждаемые газом с использованием газовой турбины, с циркулирующим топливом, с расплавно-солевым теплоносителем.

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

Теплообменное и сепарационное оборудование реакторных установок. Парогенераторы для АЭС с ВВЭР и PWR, теплообменные аппараты АЭС с БН, ВТГР, сепараторы пара. Основные характеристики.

Насосы ядерных энергетических установок. Главные циркуляционные насосы. Питательные насосы. Конструкция опор, уплотнений вала. Основные характеристики.

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

Трубопроводы, опоры и опорные конструкции оборудования и трубопроводов. Гидроамортизаторы.

Трубопроводная и регулирующая арматура.

Сооружение, монтаж и эксплуатация ядерных энергетических установок

Особенности проектирования и сооружения ядерных энергетических установок. Выбор площадок. Компоновка 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. Технологические основы их разработки. Полномасштабные и аналитические тренажеры.

Деактивация технологического оборудования, зданий и сооружений. Основные методы и организация деактивации.

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.

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 и хранение топлива. Удаление радиоактивных отходов высокой и средней активности. Деактивация оборудования. Реабилитация территорий, загрязненных радионуклидами.

Особенности снятия с эксплуатации судовых ядерных энергетических установок.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие основные этапы прошла в своем развитии ядерная энергетика?
2. Какое наиболее существенное воздействие на окружающую среду оказывает атомная электростанция?
3. Основные типы топливного цикла.
4. Что такое внешний топливный цикл атомной электростанции?
5. Дайте определение тепловой схемы электростанции.
6. Что такое основной технологический процесс на атомной электростанции?
7. Назовите основные особенности водо-водяного энергетического реактора.
8. Назовите основные особенности водо-водяных корпусных кипящих реакторов.
9. Сформулируйте основные особенности газоохлаждаемых реакторов
10. Назовите основные особенности быстрого реактора, охлаждаемого жидким натрием.
11. Принципы обеспечения радиационной безопасности

12. В чем заключается принцип естественной безопасности реакторной установки?

Вопросы, включенные в билеты для проведения экзамена:

1. Реакторы ВВЭР-440/1000/1200. Конструкции реакторов. Компоновка оборудования. Системы нормальной эксплуатации.
2. Принципы обеспечения радиационной безопасности.
3. Реактор БРЕСТ-ОД-300. Конструкция. Компоновка оборудования. Системы безопасности.
4. Радиационная безопасность при радиационной аварии.
5. Реактор РБМК-1000. Активная зона. Контур многократной принудительной циркуляции. Системы нормальной эксплуатации и системы безопасности.
6. Источники ионизирующих излучений в ЯЭУ. Система теплоносителя как источник излучения.
7. Реакторы АСТ, АТЭЦ. Конструкции реакторов. Компоновка оборудования. Системы нормальной эксплуатации. Системы безопасности.
8. Радиационная безопасность. Категории облучаемых лиц. Основные пределы доз облучения.
9. Ядерное топливо. Конструкционные материалы ТВЭЛ и ТВС. Основные требования и характеристики.
10. Основные типы топливного цикла.
11. Реакторы БН-600/800/1200. Конструкция. Компоновка оборудования. Системы безопасности.
12. Открытый топливный цикл.
13. Тепловые и гидравлические процессы в ЯЭУ. Нестационарные теплогидравлические процессы в переходных и аварийных режимах.
14. Замкнутый топливный цикл.
15. Физические принципы реакторов с естественной безопасностью.
16. Концепции и технологии использования выделенных из ОЯТ топливных материалов.
17. Тепловыделяющие элементы и ТВС ядерных реакторов. Основные требования. Типы конструктивных решений. Физико-химические процессы, протекающие в ТВЭЛ и ТВС в условиях эксплуатации.
18. Кинетика реактора. Роль запаздывающих нейтронов. Критическое и подкритическое состояние реактора. Динамические характеристики, обратные связи, устойчивость и способы регулирования.
19. Нейтронный цикл в ядерном реакторе. Эффективный коэффициент размножения нейтронов. Условия критичности.
20. Кризис теплообмена. Запасы до кризиса. Максимальные температуры оболочки и топлива.

ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена.

Требования и критерии оценивания ответов экзамена

В процессе экзамена оценивается уровень научно-исследовательской компетентности аспиранта, что проявляется в квалифицированном представлении результатов обучения.

При определении оценки учитывается грамотность представленных ответов, стиль изложения и общее оформление, способность ответить на поставленный вопрос по существу.

Критерии выставления оценки на экзамене:

Оценка «ОТЛИЧНО» выставляется аспиранту, который показал при ответе на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, что владеет материалом изученной дисциплины, свободно применяет свои знания для объяснения различных явлений и решения задач.

Оценка «ХОРОШО» выставляется аспиранту, в основном правильно ответившему на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, но допустившему при этом не принципиальные ошибки.

Оценка «УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который в ответах на вопросы экзаменационного билета допустил существенные и даже грубые ошибки, но затем исправил их сам

Оценка «НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который:

а) не ответил на вопросы экзаменационного билета

б) при ответе на дополнительные вопросы обнаружил незнание большого раздела экзаменационной программы.

Данные критерии указаны Инструктивном письмом И-23 от 14 мая 2012 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература:

1. Адамов Е.О., Толстоухов Д.А., Панов С.А., Веселов Ф.В., Хоршев А.А., Соляник А.И. Роль АЭС в электроэнергетике России с учетом ограничений выбросов углерода // Атомная энергия, 2021, т. 130, № 3, с. 123-131.

2. Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Калугин М.А., Кухаркин Н.Е., Семченков Ю.М., Сидоренко В.А., Субботин С.А., Теплов П.С., Фомиченко П.А., Асмолов В.Г. К стратегии развития ядерной энергетики России // Атомная энергия, 2019. т. 126. № 4, с. 183-187.

3. Адамов Е.О., Лопаткин А.В., Муравьев Е.В., Рачков В.И., Хомяков Ю.С. Национальная стратегия развития ядерной энергетики: два подхода к новой

технологической платформе ядерной энергетики // Известия РАН. Энергетика, 2019, № 1, с.3-14.

4. Проскураков К.Н. Ядерные энергетические установки: учебное пособие для вузов. М: Издательский дом МЭИ, 2019.

5. Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Моисеев А.В., Уманский А.А. БРЕСТ: реактор естественной безопасности на быстрых нейтронах со свинцовым охлаждением, подходы к замыканию ЯТЦ // Редкие земли, 2018, № 1, с. 120-127.

6. Безносков А.В., Бокова Т.А., Боков П.А. Оборудование контуров реакторных установок малой и средней мощности с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2018, № 1, с. 5-14.

7. Блинков В.Н., Мелихов В.И., Мелихов О.И. Современное состояние и тенденции развития математического моделирования теплофизических процессов на АЭС // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, 2018, №4, с.31-48.

8. Адамов Е.О., Рачков В.И. Новая технологическая платформа формирования национальной стратегии развития ядерной энергетики // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2017, № 2, с. 3-12.

9. Асмолов В.Г., Гусев И. Н., Казанский В. Р., Поваров В. П., Стацера Д.Б. Головной блок нового поколения – особенности проекта ВВЭР-1200 // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2017, № 3, с. 5-21

10. Безносков А.В., Боков П.А., Бокова Т.А. Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Нижний Новгород: НГТУ, 2016.

11. Солонин В.И., Марков П.В. Транспортные реакторные установки. Учебное пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015.

12. Гордон Б.Г. Безопасность ядерных объектов. Учебное пособие. М.: Национальный исследовательский ядерный университет. 2014.

13. Зорин В.М. Атомные электростанции. М.: Издательский дом «МЭИ», 2012.

14. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. М.: ИздАТ. 2012.

15. Зорин В.М. Атомные электростанции. Основной технологический процесс. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

Дополнительная литература:

1. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Ле Т.Т. Экспериментально-расчетные исследования гидродинамических процессов в горизонтальном парогенераторе. М.: Наука, 2021.

2. Юдов Ю.В., Румянцев С.Н., Чепилко С.С. Расчеты по коду КОРСАР/CFD процессов перемешивания в модели реактора ВВЭР-1000 стенда ОКБ «ГИДРОПРЕСС» при функционировании различного количества циркуляционных насосов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник, 2020, № 4, с. 26-41.

3. Юдов Ю.В., Данилов И.Г., Чепилко С.С., Кастерин Д.С. Объединение одномерной и трехмерной моделей теплогидравлики в расчетном коде КОРСАР/CFD // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2019, вып. 1, с. 57–68.

4. Юдов Ю.В., Петкевич И.Г., В.Г. Артемов В.Г., Кастерин Д.С., Румянцев С.Н. Трехмерное моделирование напорной камеры реактора ВВЭР–1000 в режимах с несимметричной работой петель с помощью расчетного кода КОРСАР/CFD // Теплоэнергетика, 2019, № 11, с. 91–101.

5. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» / Арутюнян Р. В. , Большов Л. А. , Боровой А. А. , Велихов Е. П.; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М.: 2018.

6. Моисеенко Е.В., Мосунова Н.А. Методика оценки неопределенностей результатов расчета для задач обоснования безопасности объектов использования атомной энергии // Вопросы радиационной безопасности, 2018, т. 90, № 2, с. 24-34.

7. Асмолов В.Г., Блинков В.Н., Черников О.Г. Основы обеспечения безопасности АЭС. Учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2014.

Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение: *(программное обеспечение, на которое кафедра или МЭИ имеет лицензию, а также свободно распространяемое программное обеспечение)*

Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

Университетская информационная система «РОССИЯ»
<https://uisrussia.msu.ru>

Справочно-правовая система «Консультант+» <http://www.consultant-urist.ru>

Справочно-правовая система «Гарант» <http://www.garant.ru>

База данных Web of Science <https://apps.webofknowledge.com/>

База данных Scopus <https://www.scopus.com>

Портал открытых данных Российской Федерации <https://data.gov.ru>

База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ
<https://rosmintrud.ru/opendata>

База данных Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
<https://elibrary.ru/>

База данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ <http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>

Базы данных Министерства экономического развития РФ
<http://www.economy.gov.ru>

База открытых данных Росфинмониторинга <http://www.fedsfm.ru/opendata>

Электронная база данных «Издательство Лань» <https://e.lanbook.com>

Федеральная государственная информационная система «Национальная электронная библиотека» <https://нэб.рф>

Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование»
<https://openedu.ru>

Электронная база данных "Polpred.com Обзор СМИ"
<https://www.polpred.com>

Официальный сайт Федерального агентства по техническому
регулированию и метрологии <http://protect.gost.ru/>

Электронная библиотека МЭИ <https://ntb.mpei.ru/e-library/index.php>.

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

докт. физ-мат. наук, профессор  Мелихов О.И.

Заведующий кафедрой АЭС
канд. техн. наук, доцент  Аникеев А.В.

Директор ИТАЭ
докт. техн. наук, доцент,
член-кор. РАН  Дедов А.В.