

«УТВЕРЖДЕНО»

Председатель экзаменационной комиссии
по проведению вступительных испытаний
в аспирантуру НИЦ «Курчатовский институт»
в форме вступительного экзамена
и собеседования по специальной дисциплине
по научной специальности

**2.4.9. Ядерные и энергетические установки,
топливный цикл, радиационная безопасность**

д-р техн. наук, профессор

_____ Е.А. Кулешова

« _____ » _____ 2026 г.

Программа

**вступительного испытания по специальной дисциплине в аспирантуру
НИЦ «Курчатовский институт» в форме вступительного экзамена
по научной специальности**

**2.4.9. Ядерные и энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность**

1. Общие положения.

1.1. Данная программа предназначена для подготовки к вступительным испытаниям в аспирантуру по специальной дисциплине. Программа вступительных испытаний в аспирантуру подготовлена в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования (уровень магистра или специалиста).

1.2. Дисциплина специализации включает в себя вопросы согласно научной специальности 2.4.9. Ядерные и энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Экзамен проводится с целью выявления у поступающего объёма научных знаний, научно-исследовательских компетенций, навыков системного и критического мышления, необходимых для обучения в аспирантуре. Поступающий должен показать профессиональное владение теорией и практикой в предметной области, продемонстрировать умение вести научную дискуссию.

1.3. Программой устанавливается:

форма, структура, процедура сдачи вступительного испытания; шкала оценивания; максимальное и минимальное количество баллов для успешного прохождения вступительного испытания; критерии оценки ответов.

1.4. Вступительное испытание проводится на русском языке.

1.5. Организация и проведение вступительного испытания осуществляется в соответствии с Правилами приема, утвержденными приказом НИЦ «Курчатовский институт».

1.6. По результатам вступительного испытания, поступающий имеет право подать на апелляцию о нарушении, по мнению поступающего, установленного порядка проведения вступительного испытания и (или) о несогласии с полученной оценкой результатов вступительного испытания в порядке, установленном Правилами приема, действующими на текущий год поступления.

2. Форма, процедура проведения и шкала оценивания вступительного испытания.

2.1. Вступительное испытание проводится в форме экзамена на основе билетов. Каждый экзаменационный билет содержит по 2 вопроса. Экзамен проходит в устной форме. Подготовка к ответу составляет 1 академический час (60 минут) без перерыва с момента раздачи билетов. Ответ на билет оценивается от 0 до 10 баллов в зависимости от полноты и правильности ответов.

Билет включает в себя два вопроса: один по общефизическим дисциплинам и один вопрос по дисциплине специализации.

В случае проведения экзамена в дистанционном формате вступительное испытание проводится в режиме видеоконференцсвязи.

2.2. Экзамен по специальной дисциплине оценивается по 10-балльной шкале. Минимальное количество баллов, подтверждающее успешное прохождение вступительного испытания по специальной дисциплине, устанавливается равным 4 баллам.

Шкала оценивания

Оценка, баллы	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
9-10	Поступающий уверенно владеет материалом, приводит точные формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, сопровождает их строгими и полными доказательствами, уверенно отвечает на дополнительные вопросы программы вступительного испытания.
6-8	Поступающий владеет материалом, приводит точные формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, сопровождает их доказательствами, в которых допускает отдельные неточности. Отвечает на большинство дополнительных вопросов по программе вступительного испытания.
4-5	Поступающий знаком с основным материалом программы, приводит формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, но допускает некоторые неточности, сопровождает их доказательствами, в которых допускает погрешности либо описывает основную схему доказательств без указания деталей. Отвечает на дополнительные вопросы по программе вступительного испытания, допуская отдельные неточности.
0-3	Поступающий не владеет основным материалом программы, не знаком с основными понятиями, не способен приводить формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, не умеет доказывать теоремы и другие утверждения, не знает даже схемы доказательств. Не отвечает на большинство дополнительных вопросов по программе вступительного испытания.

3. Вопросы к экзамену**3.1. Вопросы по общефизическим дисциплинам**

1. Свободные колебания системы без трения. Математический маятник. Физический маятник. Сложение гармонических колебаний одного направления. Биения. Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс.

2. Различные формы записи уравнения состояния идеального газа. Уравнение адиабаты идеального газа. Работа, совершаемая идеальным газом при политропическом и адиабатическом процессе. Физический смысл энтропии идеального газа.

3. Число ударов молекул газа о стенку. Газокинетический вывод выражения для давления газа на стенку. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.

4. Распределение Максвелла. Наиболее вероятная скорость молекул, средняя арифметическая и средняя квадратичная скорости молекул. Распределение Больцмана. Распределение молекул по координатам. Барометрическая формула.

5. КПД тепловой машины. КПД цикла Карно. Теорема Карно.

6. Диффузия газов. Вязкость газов. Газо-кинетический вывод выражений для коэффициента диффузии. Газокинетический вывод выражения для коэффициента вязкости, коэффициента теплопроводности.

7. Линии напряженности электрического поля и эквипотенциальные поверхности. Потенциальная энергия. Потенциал. Связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля.

8. Электрический диполь в однородном и неоднородном поле (вращательный момент, энергия, сила). Дипольный электрический момент системы зарядов. Поле электрического диполя.

9. Электростатическое поле вне и внутри объемно заряженного шара. Электростатическое поле одной и двух заряженных плоскостей.

10. Емкость. Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора. Энергия заряженного конденсатора. Энергия электрического поля. Плотность энергии электрического поля.

11. Сила и плотность электрического тока. Закон Ома и закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах. Мощность тока. Удельная тепловая мощность тока.

12. Магнитное поле равномерно движущегося заряда. Сила Лоренца. Сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле.

13. Закон Био-Савара-Лапласа. Теорема о циркуляции. Поле в центре и на оси кругового тока. Поле бесконечного прямого тока. Контур с током в однородном и неоднородном магнитном поле (вращательный момент, энергия, сила).

14. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца.

Индуктивность соленоида. Токи замыкания и размыкания. Энергия магнитного поля.

15. Распространение волн в пространстве. Волновое уравнение. Уравнение плоской волны. Уравнение стоячей волны.

16. Принцип Гюйгенса. Принцип Ферма. Законы отражения и преломления света на границе двух фаз.

17. Явление интерференции. Сложение двух электромагнитных волн. Интенсивность суммарной волны.

18. Графическое сложение амплитуд. Зоны Френеля.

19. Дифракция Френеля на круглом отверстии и на диске. Дифракция Френеля на щели. Дифракция Фраунгофера на щели.

20. Дифракционная решетка. Положение и угловая ширина главных дифракционных максимумов дифракционной решетки. Дисперсия и разрешающая способность дифракционной решетки.

21. Дифракция рентгеновских лучей. Формула Брэгга-Вульфа.

22. Фотоэффект. Уравнение А. Эйнштейна для фотоэффекта.

23. Постулаты Бора. Опыт Франка и Герца.

24. Гипотеза де-Бройля. Экспериментальные основания квантовой механики.

25. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Оценка размеров и минимальной энергии водородоподобного атома.

26. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Оценка минимальной энергии одномерного гармонического осциллятора.

27. Частица в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме. Результаты квантовой механики для одномерного гармонического осциллятора.

28. Результаты квантово-механического расчета энергетического спектра для водородоподобного атома.

29. Принцип Паули. Заполнение электронных оболочек атома. Электронные конфигурации.

30. Энергетические зоны в твердых телах. Металлы, диэлектрики и

полупроводники. Собственные и примесные полупроводники. Электронная и дырочная проводимость.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики, в 3-х томах. М.: Наука, 1982.
2. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высшая школа, 1991.
3. Иродов И.Е. Волновые процессы. М., СПб: Физматлит, 2002.
4. Бронштейн И.Н. Справочник по математике: Для инженеров и 4 учащихся втузов./И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев, 13-е изд., испр. -М.: Наука, 1986.-544 с.
5. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике (12-е изд.). М.: Наука, 1977.

3.2. Вопросы по научной специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность

1. Технологии и предприятия ядерного топливного цикла. Экологическая и радиационная безопасность.

2. Эффективный коэффициент размножения нейтронов. Условия критичности. Закономерности формирования пространственно-энергетического распределения нейтронов.

3. Эффекты реактивности. Выгорание и воспроизводство ядерного топлива. Топливные циклы. Перегрузки топлива.

4. Закономерности ослабления ионизирующих излучений в веществе. Действие ионизирующего излучения на малоуглеродистые стали; аустенитные хромоникелевые стали; сплавы на основе циркония.

5. Особенности контура отвода тепла. Теплогидравлический расчет активных зон, охлаждаемых водным теплоносителем. Кризис теплообмена. Запасы до кризиса. Максимальные температуры оболочки и топлива.

6. Термогидравлика основных проектных аварий. Двухфазные среды в ядерных энергетических установках. Параметры, характеризующие поток пароводяной смеси.

7. Хрупкая прочность. Вибропрочность. Расчет на прочность при сейсмических воздействиях. Испытания натурального оборудования и модельных образцов.

8. Системы контроля нейтронно-физических и теплотехнических параметров ядерных энергетических установок. Защиты по уровню мощности и разгону. Управляющие системы нормальной эксплуатации и безопасности.

9. Основные принципы и критерии обеспечения безопасности. Принципы защиты в глубину. Фундаментальные функции безопасности. Принцип единичного отказа. Критерии и условия обеспечения безопасной эксплуатации.

10. Физические принципы «естественной безопасности» в отношении атомных реакторов. Способы повышения степени «естественной безопасности» для различных типов атомных реакторов.

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

12. Классификация ядерных реакторов. Судовые и космические ядерные энергетические установки. Передвижные и блочно-транспортабельные ядерные энергетические установки. Термоядерные реакторы. Гибридные системы синтеза – деления.

13. Условия работы и критерии выбора материалов в реакторостроении. Теплостойкие стали, коррозионно-стойкие стали, циркониевые сплавы, нержавеющие стали.

14. Коррозия: химическая, электрохимическая, общая, локальная. Классификация процессов коррозии: фреттинг-коррозия, щелевая, ножевая, под напряжением. Водородное охрупчивание. Коррозионная усталость. Коррозионное растрескивание – транс- и интеркристаллитное. Эрозионно-коррозионный износ.

15. Ядерное топливо. Конструкционные материалы твэлов и ТВС. Основные требования, характеристики. Тепловыделяющие элементы и ТВС ядерных реакторов. Основные требования.

16. Корпусные легководные реакторы с водой под давлением и кипящие. Развитие реакторов линейки ВВЭР.

17. Реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Развитие реакторов. Реакторы БН-600, БН-800. Развитие линейки быстрых реакторов.

18. Канальные водографитовые и тяжеловодные реакторы. Развитие канальных реакторов.

19. Установление и корректировка пределов и условий безопасной эксплуатации АЭС. Регламентация эксплуатации. Регламентация действий при авариях и в аварийных ситуациях. Показатели работы АЭС.

20. Дезактивация технологического оборудования, зданий и сооружений. Обращение с радиоактивными отходами на АЭС. Переработка радиоактивных вод. Отверждение жидких радиоактивных отходов.

21. Переработка твердых радиоактивных отходов. Обращение с

газообразными радиоактивными отходами. Системы газоочистки при запроектных авариях.

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

23. Уравнение диффузии нейтронов. Основные предположения диффузионного приближения. Фундаментальные решения уравнения диффузии. Метод функций Грина.

24. Условие критичности одного реактора. Эффективный коэффициент размножения. Гетерогенный реактор. Особенности формирования пространственно-энергетического распределения. Баланс нейтронов.

25. Резонансный захват в гомогенных и гетерогенных средах. Эффективный резонансный интеграл. Соотношение эквивалентности.

26. Реактивность. Запас реактивности. Способы компенсации запаса реактивности. Отравление и зашлаковывание реактора. Нестационарное отравление. Йодная яма. Ксеноновая неустойчивость.

27. Особенности конструкций и основные параметры современных корпусных водо-водяных реакторов.

28. Ядерная авария. Ядерная безопасность. Радиационное воздействие АЭС на окружающую среду. Крупные аварии на АЭС.

29. Циклы паротурбинных и газотурбинных установок. Энергетический баланс и КПД ядерных энергетических установок.

30. Анализ аварий. Сценарии аварий на АЭС с реакторами ВВЭР, БН, РБМК.

Литература

1. Маргулова Т.Х. Атомные энергетические станции.// Москва, Высшая школа, 1984 г., С. 141-167.

2. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. Москва, Энергоатомиздат, 1990 г., С. 30-61.

3. Зорин В.М. Атомные электростанции. Учебное пособие. М.: Издательский

дом МЭИ, 2012. 672 с.

4. Синев Н.М. Экономика ядерной энергетики: основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС: Уч. пособие для ВУЗов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭАИ, 1987г. – 480с.

5. Ковалевич О.М. Основы обеспечения безопасности атомных станций. Учебное пособие по курсу «Основы обеспечения безопасности атомных станций». - М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 136с. Ковалевич О.М. Риск в техногенной сфере. М.:Изд-во МЭИ, 2006 – 152 с.

6. Ковалевич О.М. Вероятностный анализ безопасности атомных электростанций. Учебное пособие по курсу «Основы обеспечения безопасности атомных станций». М.: Изд-во МЭИ, 2002 .- 47с.

7. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. М., Энергоатомиздат, 1989г

8. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов:2-е изд., перераб.- М.: ИздАТ, 2008. – 256 с.

9. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 374 с.

10. Байбаков В.Д., Воробьев Ю.Б., Кузнецов В.Д., Коды для расчета ядерных реакторов, Учебное пособие, МЭИ, 2003 г. - 161с.

11. Савандер В.И. Физическая теория ядерных реакторов: учебное пособие для вузов. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2013.

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

13. 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.

14. Кузьмин А.М., Шмелев А.Н., Апсэ В.А. Моделирование физических процессов в энергетических ядерных реакторах на быстрых нейтронах: учебное

пособие для вузов. – Москва: МЭИ, 2015.

15. Бушуев А.В., Алеева Т.Б. Методы и приборы измерений ядерных материалов: учебное пособие для вузов. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2011.