

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Моделирование тяжелых аварий
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

- лекции: 60 час.
- семинары: 0 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 90 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Программу составил: А.Д. Васильев, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем безопасного развития современных энергетических технологий 01.04.2024

Аннотация

В дисциплине излагаются различные аспекты моделирования аварийных процессов (теплофизических, термодинамических и физико-химических) при запроектных и тяжелых авариях на АЭС с водо-водяными реакторами (ВВЭР и PWR). Поскольку протекание аварий характеризуется весьма сложным взаимодействием большого числа процессов, изучение дисциплины начинается с теоретического описания каждого важного процесса в отдельности. Для этих процессов выписываются уравнения математической физики и намечаются подходы к их решению. Необходимо отметить, что при этом изучаются такие формы уравнений и алгоритмы их решения, которые используются в лучших отечественных и международных численных кодах на основе современного понимания физико-химического моделирования этих процессов.

В дисциплине рассматриваются различные фазы тяжелых аварий: потеря теплоносителя при авариях с течами и нарушением теплоотвода, фаза разрушения активной зоны и перемещения расплава на днище корпуса. Включены в рассмотрение также аварии бассейнов выдержки отработанного топлива, важность исследования которых была доказана аварией на АЭС «Фукусима», Япония, 2011 г. Для основных типов аварий разрабатываются упрощенные модели, которые помогают понять физику происходящих при тяжелой аварии процессов.

Завершается дисциплина подробным изучением тестов и интегральных экспериментов, проводимых у нас в стране и за рубежом и направленным на детальные исследования как отдельных процессов (тесты по исследованию отдельных явлений), так и всей совокупности процессов в их взаимосвязи (интегральные эксперименты). В изучение включены также тесты и интегральные эксперименты с новыми перспективными материалами с улучшенными характеристиками, которые предполагается применять в будущем в атомных реакторах нового поколения с целью повышения уровня безопасности атомной энергетики и роста ее конкурентоспособности в сравнении с другими перспективными технологиями производства энергии (ветровая, солнечная и т.д.).

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний по физике процессов, происходящих при тяжелых авариях на АЭС с ВВЭР;
- получение представления о последовательности протекания физико-химических процессов в ходе тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР;
- изучение методов численного и экспериментального моделирования тяжелых аварий на АЭС с ВВЭР;
- нацеливание студентов на реалистичное описание тяжелоаварийных процессов вместо консервативного описания;
- достижение понимания качественных отличий между новыми перспективными типами реакторов и существующими реакторами.

Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний по теплогидравлическим и высокотемпературным процессам;
- приобретение студентами знаний в области моделирования физико-химических процессов;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных исследований по проблеме тяжелых аварий на АЭС;
- приобретение студентами навыков качественного анализа процессов, протекающих при тяжелых авариях на АЭС;
- приобретение навыков количественных оценок, касающихся тяжелых аварий на АЭС.
- освоение основными понятиями из терминологии, применяемой при исследовании тяжелых аварий на АЭС;
- усвоение основных особенностей (дополнительные системы безопасности, новые перспективные материалы) новых типов реакторов.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
--------------------------------	-----------------------------------

ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- современные проблемы физики, химии, математики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- порядки теплофизических параметров веществ.
- специфические особенности физических и физико-химических процессов, протекающих при тяжелых авариях на АЭС;
- современные стратегии предотвращения неблагоприятных сценариев при тяжелых авариях на АЭС;
- последние достижения в создании численных кодов по моделированию тяжелых аварий на АЭС;
- характерные значения теплофизических параметров материалов, используемых на АЭС;
- современные подходы для реалистичного описания физико-химических процессов, происходящих при тяжелых авариях на АЭС;
- основные качественные отличия новых перспективных типов АЭС с точки зрения повышения их уровня безопасности.

уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- получать приблизительную оценку величины для выходного параметра задачи на основании данных о входных параметрах.
- осваивать новые предметные области и теоретические подходы применительно к проблеме безопасности атомной энергетики;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов по проблеме тяжелых аварий на АЭС;
- правильно выбирать путь решения задачи по теплогидравлической или тяжелоаварийной тематике.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- методами оценки характерных параметров процессов;
- методами проверки с помощью анализа размерностей;
- навыками по использованию безразмерных комплексов для анализа физических задач.
- навыками использования базовых уравнений для моделирования физических, физико-химических и других процессов, протекающих при тяжелых авариях на АЭС;
- методами численного моделирования теплогидравлических, тепловых и тяжелоаварийных задач;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач, относящихся к проблеме тяжелых аварий на АЭС.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа

1	Безопасность атомной энергетики. Терминология аварий на АЭС. Основные принципы обеспечения безопасности	4			8
2	Виды теплопередачи. Теплопроводность, конвекция, теплообмен излучением, теплообмен при кипении и конденсации	9			18
3	Численные коды, используемые для моделирования реакторных установок. Моделирование теплогидравлики и разрушения активной зоны в численных кодах	5			10
4	Аварии на АЭС с потерей теплоносителя. Моделирование окисления циркониевых оболочек в паровой атмосфере и атмосфере пар-кислород-азот	4			8
5	Аварии в бассейнах выдержки (БВ) отработанного топлива. Моделирование генерации водорода при аварии с потерей теплоносителя в бассейне выдержки (БВ) отработанного топлива	3			6
6	Взаимодействие расплава с бетоном. Рост температуры и давления под противоаварийной оболочкой при тяжелой аварии	3			6
7	Концепция ловушки. Пассивные системы безопасности вне реактора	2			4
8	Обзор проводимых экспериментальных исследований по тематике тяжелых аварий на АЭС. Тесты по исследованию отдельных явлений, протекающих при тяжелых авариях. Интегральные эксперименты по моделированию явлений, протекающих при тяжелых авариях. Интегральные эксперименты серии CORA	6			6
9	Экспериментальная установка PARAMETER. Эксперименты PARAMETER-SF1 - PARAMETER-SF4	6			6
10	Экспериментальная установка QUENCH. Эксперименты QUENCH-LOCA-0 - QUENCH-LOCA-1 по моделированию проектных аварий	4			4
11	Эксперименты QUENCH-06, QUENCH-09, QUENCH-10, QUENCH-16, QUENCH-18, QUENCH-19, QUENCH-20	12			12
12	Новые перспективные материалы ATF-топлива и оболочек для реакторов нового поколения	2			2
Итого часов		60			90
Подготовка к экзамену		30 час.			

Общая трудоёмкость	180 час., 4 зач.ед.
--------------------	---------------------

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Безопасность атомной энергетики. Терминология аварий на АЭС. Основные принципы обеспечения безопасности

1. Обоснование безопасности работы атомных станций при различных режимах работы
2. Проектные и запроектные аварии
3. Активные и пассивные системы безопасности
4. Концепция глубокоэшелонированной защиты
5. Барьеры безопасности: оболочка, первый контур, шахта, противоаварийная оболочка

2. Виды теплопередачи. Теплопроводность, конвекция, теплообмен излучением, теплообмен при кипении и конденсации

1. Решение стационарного и нестационарного уравнения теплопроводности в простейших случаях
2. Описание теплообмена при конвекции числом Нуссельта
3. Число Рэлея в случае тепловыделяющей жидкости
4. Аналитический расчет коэффициентов переизлучения в простейших случаях
5. Основные режимы кипения жидкости: пузырьковый, переходный, пленочный
6. Теплопередача при конденсации

3. Численные коды, используемые для моделирования реакторных установок. Моделирование теплогидравлики и разрушения активной зоны в численных кодах

1. Основные подходы, используемые в численных кодах, по моделированию проектных и запроектных режимов работы реакторных установок
2. Современные коды улучшенной оценки
Российский код СОКРАТ/В5
3. Система уравнений неразрывности, момента импульса и энергии для каждой из фаз
4. Окисление циркония и железа
5. Плавление
6. Образование эвтектик
7. Стеkanie расплавленных материалов
8. Деформационное поведение

4. Аварии на АЭС с потерей теплоносителя. Моделирование окисления циркониевых оболочек в паровой атмосфере и атмосфере пар-кислород-азот

1. Аварии типа “большая” и “малая течь”
2. Окисление оболочек, содержащих цирконий, в паровой среде
3. Окисление оболочек, содержащих цирконий, в смесях пар-азот и кислород-азот (воздух)

5. Аварии в бассейнах выдержки (БВ) отработанного топлива. Моделирование генерации водорода при аварии с потерей теплоносителя в бассейне выдержки (БВ) отработанного топлива

1. Феноменология аварий, теплогидравлическое описание
2. Осушение БВ
3. Аварии с течью в днище БВ

4. Окисление оболочек в атмосфере пар-кислород-азот
5. Основные уравнения для моделирования окисления
6. Способы решения уравнений
7. Выход водорода при реакции циркониевых и стальных конструкций со смесью, содержащей пар, кислород, азот

6. Взаимодействие расплава с бетоном. Рост температуры и давления под противоаварийной оболочкой при тяжелой аварии

1. Уравнение энергетического баланса для расплава
 2. Осевое и радиальное проплавление бетона
 3. Уравнение энергии атмосферы противоаварийной оболочки
 4. Динамика давления под оболочкой
7. Концепция ловушки. Пассивные системы безопасности вне реактора

1. Ловушка как пассивная система безопасности реактора
2. Жертвенные слои
3. Охлаждение водой
4. Спринклеры
5. Ледовые конденсаторы
6. Фильтры
7. Тепловые трубы
8. Ограничение давления под противоаварийной оболочкой
9. Водородная безопасность
10. Рекомбинаторы водорода

Семестр: 2 (Весенний)

8. Обзор проводимых экспериментальных исследований по тематике тяжелых аварий на АЭС. Тесты по исследованию отдельных явлений, протекающих при тяжелых авариях. Интегральные эксперименты по моделированию явлений, протекающих при тяжелых авариях. Интегральные эксперименты серии CORA

1. Основные направления экспериментальных исследований в области безопасности АЭС применительно к тяжелым авариям
2. Тесты по исследованию отдельных явлений (SET)
3. Интегральные эксперименты
4. Тесты и эксперименты с новыми перспективными материалами ATF

9. Экспериментальная установка PARAMETER. Эксперименты PARAMETER-SF1 - PARAMETER-SF4

1. Описание установки
2. Эксперименты PARAMETER-SF1 - PARAMETER-SF3 с окислением в паровой среде
3. Эксперимент PARAMETER-SF4 с окислением в воздушной среде

10. Экспериментальная установка QUENCH. Эксперименты QUENCH-LOCA-0 - QUENCH-LOCA-1 по моделированию проектных аварий

1. Описание установки
2. Эксперименты по проектным авариям
3. Эксперименты по тяжелым авариям

11. Эксперименты QUENCH-06, QUENCH-09, QUENCH-10, QUENCH-16, QUENCH-18, QUENCH-19, QUENCH-20

1. Эксперимент QUENCH-06 по моделированию температурной эскалации и залива после фазы предокисления
2. Эксперимент QUENCH-09 по моделированию резкой температурной эскалации и выхода водорода после фазы кислородного голодания
3. Эксперименты QUENCH-10 и QUENCH-16 по моделированию окисления в воздушной среде
4. Эксперимент QUENCH-18 по моделированию окисления в среде пар-кислород-азот
5. Эксперимент QUENCH-19 по моделированию окисления перспективных ATF-оболочек из сплава FeCrAl
6. Эксперимент QUENCH-20 по моделированию поведения BWR с поглощающими пластинами из В4С

12. Новые перспективные материалы ATF- топлива и оболочек для реакторов нового поколения

1. Обзор текущих исследований перспективных ATF-материалов для АЭС
2. Повышение уровня безопасности АЭС нового поколения

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое оборудование для занятий: компьютер и мультимедийное оборудование, доска.

Необходимое программное обеспечение: офисный пакет OpenOffice для презентаций.

Обеспечение самостоятельной работы – доступ в Интернет, базы данных по научным журналам.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев А.Д., Стрижов В.Ф. Физические модели тяжелых аварий на АЭС. Москва, Наука, 264 с. 1992.
2. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев А.Д. Интегральная теплофизическая модель динамики тяжелой аварии на АЭС с противоаварийной оболочкой // Доклады АН СССР, 1990. т. 313, N 5, с. 1114 1117.
3. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев А.Д. и др. Исследования удержания топлива при тяжелых авариях на АЭС // Доклады АН СССР, 1991, т. 316, N 1, с. 104 107.

Дополнительная литература

1. Васильев А.Д., Кобелев Г.В. Результаты разработки численного модуля для расчета теплообмена излучением между структурами АЗ и ВКУ реактора при тяжелой аварии на АЭС (модуль МРАД) / Препринт ИБРАЭ 2003-09, ИБРАЭ РАН, Москва, 2003, 56 с.
2. A.E. Kisselev, V.F. Strizhov, A.D. Vasiliev, Application of thermal hydraulic and severe accident code SOCRAT/V2 to bottom water reflood experiment PARAMETER-SF4. Nuclear Engineering and Design, 246, 2012, pp. 175– 184.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».

<http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.

<http://lib.mipt.ru/> – электронная библиотека Физтеха.

<http://elibrary.ru/> - научная электронная библиотека.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как OpenOffice Mathcad, Scilab и др.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: А.Д. Васильев, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Моделирование тяжелых аварий» обучающийся должен:

знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- современные проблемы физики, химии, математики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- порядки теплофизических параметров веществ.
- специфические особенности физических и физико-химических процессов, протекающих при тяжелых авариях на АЭС;
- современные стратегии предотвращения неблагоприятных сценариев при тяжелых авариях на АЭС;
- последние достижения в создании численных кодов по моделированию тяжелых аварий на АЭС;
- характерные значения теплофизических параметров материалов, используемых на АЭС;
- современные подходы для реалистичного описания физико-химических процессов, происходящих при тяжелых авариях на АЭС;
- основные качественные отличия новых перспективных типов АЭС с точки зрения повышения их уровня безопасности.

уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- получать приблизительную оценку величины для выходного параметра задачи на основании данных о входных параметрах.
- осваивать новые предметные области и теоретические подходы применительно к проблеме безопасности атомной энергетики;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов по проблеме тяжелых аварий на АЭС;
- правильно выбирать путь решения задачи по теплогидравлической или тяжелоаварийной тематике.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- методами оценки характерных параметров процессов;
- методами проверки с помощью анализа размерностей;
- навыками по использованию безразмерных комплексов для анализа физических задач.
- навыками использования базовых уравнений для моделирования физических, физико-химических и других процессов, протекающих при тяжелых авариях на АЭС;
- методами численного моделирования теплогидравлических, тепловых и тяжелоаварийных задач;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач, относящихся к проблеме тяжелых аварий на АЭС.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия или в конце занятия по пройденной теме.

Примеры типовых контрольных задач:

9-й семестр.

Задача 1

Необходимо решить 1-мерную стационарную задачу теплопроводности в тепловыделяющем элементе (ТВЭЛ) ВВЭР-1000. Если сможете, попытайтесь решить задачу с учетом трех слоев (урановая кольцевая таблетка, газовый зазор, циркониевая оболочка). Если нет, то хотя бы задачу только с одним слоем UO_2 . В условиях аварии примем температуру внешней границы стержня равной $T_{out} = 400K$ (температура кипения теплоносителя). Для определения объемной мощности энерговыделения исходим из того, что всего в активной зоне АЗ находятся 163 ТВС, в каждой из которых 311 ТВЭЛ. Высота обогреваемой длины ТВЭЛ равна приблизительно $L=3.5$ м. Тепловая мощность реактора при нормальной эксплуатации равна $Q=3000$ МВт.

Задача 2

Оцените температурный перепад между периферией топливной таблетки и окружающей водой (теплоносителем) при хранении тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000 в бассейне выдержки (БВ) отработанного топлива при ламинарном течении теплоносителя для ТВС 3-дневной выдержки. В ТВС находится $N=311$ ТВЭЛов. Высота обогреваемой длины ТВЭЛ равна приблизительно $L=3.5$ м. Мощность одной ТВС 3-х суточной выдержки составляет около 94 кВт.

Задача 3

Рассматривается реактор ВВЭР-1000. Расплав диоксида урана, циркония и стали после проплавления днища корпуса реактора попадает в бетонную шахту с радиусом $R=3$ м. Оцените высоту слоя расплава и объемное энерговыделение в нем через два часа после аварии, если в нем находится 80 т UO_2 , 20 т Zr и 100 т стали.

Задача 4

Рассматривается реактор ВВЭР-440. В активной зоне реактора находится 80 т UO_2 , и 20 т Zr. Оцените время после момента аварии (теперь нет подачи воды в зону насосами, хотя изначально вода еще осталась, но испаряется), когда зона расплавится. Пусть топливная кампания (время после запуска реактора) составляет 2 года. Подсказка: остаточное энерговыделение идет на выпаривание воды, нагрев конструкций и их плавление.

Задача 5

Расчет излучательных потоков между коаксиальными сферами. Найдите излучательный тепловой поток ($Вт/м^2$) на поверхности S_1 (внешняя поверхность сферы малого радиуса r) и излучательный тепловой поток ($Вт/м^2$) на поверхности S_2 (внутренняя поверхность сферы большого радиуса R). Температура $T_1 > T_2$, ϵ_1 – коэффициент серости поверхности S_1 , ϵ_2 – коэффициент серости поверхности S_2 .

Задача 6

Расчет излучательных потоков между коаксиальными цилиндрами. Найдите излучательный тепловой поток ($Вт/м^2$) на поверхности S_1 (внешняя поверхность цилиндра малого радиуса r) и излучательный тепловой поток ($Вт/м^2$) на поверхности S_2 (внутренняя поверхность цилиндра большого радиуса R). Температура $T_1 > T_2$. Высота цилиндров $L \gg R$, $L \gg r$. ϵ_1 – коэффициент серости поверхности S_1 , ϵ_2 – коэффициент серости поверхности S_2 .

Задача 7

Расчет излучательных потоков между параллельными пластинами. Найти излучательный тепловой поток ($Вт/м^2$) от пластины S_1 к пластине S_2 . Температура $T_1 > T_2$, Характерные размеры пластин значительно больше расстояния между ними. ϵ_1 – коэффициент серости пластины S_1 , ϵ_2 – коэффициент серости пластины S_2 .

Задача 8

Оцените остаточное энерговыделение в активной зоне реактора ВВЭР-1000 через 10000 секунд после аварии.

Задача 9

Оцените остаточное энерговыделение в активной зоне реактора ВВЭР-440 через 10000 секунд после аварии.

Задача 10

Оцените остаточное энерговыделение в активной зоне реактора ВВЭР-1000 через 1 год после аварии.

10-й семестр.

Задача 1

Необходимо решить задачу о движении фазовых границ $ZrO_2/-Zr(O)$ и $-Zr(O)/-Zr$ (желательно с построением графиков зависимости координат фазовых границ от времени) для температуры $T=1100K$ (низкие температуры). Необходимо решать уравнение диффузии для концентрации кислорода в трех слоях ZrO_2 , $-Zr(O)$ и $-Zr$ соответствующими граничными условиями с учетом скачка концентрации кислорода на межфазных границах.

Задача 2

Необходимо решить задачу о движении фазовых границ $ZrO_2/-Zr(O)$ и $-Zr(O)/-Zr$ (желательно с построением графиков зависимости координат фазовых границ от времени) для температуры $T=1400K$ (умеренные температуры). Необходимо решать уравнение диффузии для концентрации кислорода в трех слоях ZrO_2 , $-Zr(O)$ и $-Zr$ соответствующими граничными условиями с учетом скачка концентрации кислорода на межфазных границах.

Задача 3

Необходимо решить задачу о движении фазовых границ $ZrO_2/-Zr(O)$ и $-Zr(O)/-Zr$ (желательно с построением графиков зависимости координат фазовых границ от времени) для температуры $T=1900K$ (высокие температуры). Необходимо решать уравнение диффузии для концентрации кислорода в трех слоях ZrO_2 , $-Zr(O)$ и $-Zr$ соответствующими граничными условиями с учетом скачка концентрации кислорода на межфазных границах.

Задача 4

Оценить интегральный выход водорода и скорость его производства в единицу времени при окислении циркониевых оболочек в активной зоне реактора ВВЭР-1000 при температуре $T=1100K$ (низкие температуры) в течение одного часа. Для ответа понадобится решение задачи о движении фазовых границ $ZrO_2/-Zr(O)$ и $-Zr(O)/-Zr$ в оболочке твэла при окислении в паровой среде.

Задача 5

Оценить интегральный выход водорода и скорость его производства в единицу времени при окислении циркониевых оболочек в активной зоне реактора ВВЭР-1000 при температуре $T=1400K$ (умеренные температуры) в течение одного часа. Для ответа понадобится решение задачи о движении фазовых границ $ZrO_2/-Zr(O)$ и $-Zr(O)/-Zr$ в оболочке твэла при окислении в паровой среде.

Задача 6

Оценить интегральный выход водорода и скорость его производства в единицу времени при окислении циркониевых оболочек в активной зоне реактора ВВЭР-1000 при температуре $T=1900K$ (высокие температуры) в течение одного часа. Для ответа понадобится решение задачи о движении фазовых границ $ZrO_2/-Zr(O)$ и $-Zr(O)/-Zr$ в оболочке твэла при окислении в паровой среде.

Задача 7

Рассматривается авария с прекращением подачи воды в бассейн выдержки отработанного топлива на АЭС с ВВЭР. В БВ находятся тепловыделяющие сборки (ТВС) с различными временами выдержки. Кроме того, на дне БВ имеется течь с характерным диаметром D . ТВС находятся в самом низу БВ и их высота $H=4$ м.

Оценить, за какое время БВ полностью потеряет воду. Начальные данные:

Площадь поверхности воды в БВ: $S=60$ м²

Начальный уровень воды в БВ: $L_0=20$ м

Начальная температура воды в БВ: $T_0=33C$

Суммарная мощность тепловыделения всех ТВС в БВ: $Q=3.7$ МВт

Давление: $p=1$ атм

Диаметр течи: $D=10$ см

Задача 8

Рассматривается авария с прекращением подачи воды в бассейн выдержки отработанного топлива на АЭС с ВВЭР. В БВ находятся тепловыделяющие сборки (ТВС) с различными временами выдержки. Кроме того, на дне БВ имеется течь с характерным диаметром D . ТВС находятся в самом низу БВ и их высота $H=4$ м.

Оценить, за какое время БВ полностью потеряет воду. Начальные данные:

Площадь поверхности воды в БВ: $S=60$ м²

Начальный уровень воды в БВ: $L_0=20$ м

Начальная температура воды в БВ: $T_0=33$ °C

Суммарная мощность тепловыделения всех ТВС в БВ: $Q=3.7$ МВт

Давление: $p=1$ атм

Диаметр течи: $D=1$ см

Задача 9

Рассматривается авария с прекращением подачи воды в бассейн выдержки отработанного топлива на АЭС с ВВЭР. В БВ находятся тепловыделяющие сборки (ТВС) с различными временами выдержки. Кроме того, на дне БВ имеется течь с характерным диаметром D . ТВС находятся в самом низу БВ и их высота $H=4$ м.

Оценить, за какое время БВ полностью потеряет воду. Начальные данные:

Площадь поверхности воды в БВ: $S=60$ м²

Начальный уровень воды в БВ: $L_0=20$ м

Начальная температура воды в БВ: $T_0=33$ °C

Суммарная мощность тепловыделения всех ТВС в БВ: $Q=16$ МВт

Давление: $p=1$ атм

Диаметр течи: $D=1$ см.

Задача 10

Рассматривается авария с прекращением подачи воды в бассейн выдержки отработанного топлива на АЭС с ВВЭР. В БВ находятся тепловыделяющие сборки (ТВС) с различными временами выдержки. Кроме того, на дне БВ имеется течь с характерным диаметром D . ТВС находятся в самом низу БВ и их высота $H=4$ м.

Оценить, за какое время БВ полностью потеряет воду. Начальные данные:

Площадь поверхности воды в БВ: $S=60$ м²

Начальный уровень воды в БВ: $L_0=20$ м

Начальная температура воды в БВ: $T_0=33$ °C

Суммарная мощность тепловыделения всех ТВС в БВ: $Q=0.5$ МВт

Давление: $p=1$ атм

Диаметр течи: $D=0.5$ см.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов:

9-й семестр.

1. Основные принципы обеспечения безопасности АЭС
2. Основные механизмы теплоотдачи в различных температурных диапазонах
3. Решение уравнения теплопроводности в топливной таблетке
4. Решение конвективного теплообмена в расплаве корнума в шахте реактора
5. Теплообмен излучением между пластинами, коаксиальными цилиндрами или сферами

6. Толщина пограничного слоя в тепловыделяющей жидкости
7. Распределение тепловых потоков в расплаве в нижней камере смешения реактора
8. Характерный вид кривой кипения воды
9. Образование корки расплава в НКС
10. Численные коды, используемые для моделирования реакторных установок
11. Система уравнений теплогидравлики в численных кодах
12. Аналитическая модель окисления оболочек в паровой среде
13. Классификация аварий на АЭС с потерей теплоносителя
14. Процессы при нагреве и разрушении активной зоны
15. Процессы при взаимодействии расплава кориума с корпусом реактора
16. Скорость проплавления бетона при взаимодействии расплава с бетоном
17. Оценка роста температуры и давления противоаварийной оболочки при тяжелой аварии
18. Концепция ловушки кориума
19. Пассивные системы безопасности вне реактора
20. Особенности высокотемпературного окисления циркониевых оболочек в атмосфере, содержащей пар, кислород, азот

Пример билета для дифф.зачета в 9 семестре:

Билет 1.

1. Основные механизмы теплоотдачи в различных температурных диапазонах
2. Концепция ловушки кориума

10-й семестр.

1. Тесты по исследованию отдельных явлений и интегральные эксперименты
2. Интегральные эксперименты серии CORA
3. Интегральные эксперименты серии PARAMETER
4. Интегральные эксперименты серии QUENCH
5. Эксперимент QUENCH-LOCA-0 по моделированию проектных аварий
6. Сценарий эксперимента QUENCH-06
7. Характерные фазы в сценариях интегральных экспериментов
8. Интегральные эксперименты с подачей воздуха (QUENCH-10, QUENCH-16)
9. Интегральный эксперимент QUENCH-18 с подачей пара, кислорода и азота
10. Приоритет химических реакций циркония в атмосфере, содержащей пар, кислород, азот
11. Эксперимент QUENCH-19 с оболочкой из FeCrAl. Особенности окисления FeCrAl
12. Эксперимент QUENCH-20 с поглощающими пластинами из В4С. Особенности окисления В4С
13. Основные химические реакции с участием карбида бора В4С
14. Особенности перспективных реакторов нового поколения с повышенным уровнем безопасности
15. Перспективные материалы топлива и оболочек для реакторов нового поколения

Пример экзаменационного билета для экзамена в 10 семестре:

Билет 1.

1. Тесты по исследованию отдельных явлений и интегральные эксперименты
2. Эксперимент QUENCH-20 с поглощающими пластинами из В4С. Особенности окисления В4С

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Дифференцированный зачет в 9 семестре и экзамен в 10 семестре проводятся в письменной форме, по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении зачёта и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.