

**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: | Гидродинамика многофазных течений |
| 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: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составил: А.Р. Аветисян, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем безопасного развития современных энергетических технологий 24.02.2025

Аннотация

Курс посвящен гидродинамике многофазных течений с учетом гомогенных и гетерогенных фазовых переходов, тепломассообмена и эффектов турбулентности. Содержание курса отражает тепло и гидродинамические процессы, протекающие в элементах оборудования АЭС при нормальных и аварийных режимах работ, а также в задачах изоляции захоронения радиоактивных отходов (РАО) в соляных формациях (галитах).

В первой части курса основное внимание уделено моделям и математическому описанию двухфазных систем. Рассматриваются капиллярные и гравитационные волны, изучается устойчивость горизонтальной поверхности раздела двух фаз, выводятся формулы Стокса и Рыбчинского-Адамара. Вторая часть курса посвящена процессам неустановившегося движения капель и пузырьков в жидкости, элементам теории конвективного теплообмена и описанию парожидкостных потоков в каналах. Рассматривается динамика жидкостных включений в галитах в поле градиента температуры.

Курс предназначен для получения глубоких теоретических знаний в области гидродинамики многофазных течений. Включает задания для самостоятельной работы с целью повышения степени освоения материала. Курс предполагает выполнение практических задач в рамках индивидуальных заданий для осознания связей между теорией и практикой, а также взаимозависимости различных разделов дисциплины.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Освоение студентами фундаментальных знаний по гидродинамике и теплофизике многофазных течений, а также их приложений в области безопасности атомной энергетики.

Задачи дисциплины

- Освоение студентами базовых знаний в области механики многофазных течений;
- Обучение студентов методам решения практических задач в области механики многофазных течений;
- Оказание студентам консультаций и помощи в проведении собственных исследований;
- Обучение студентов навыкам программной реализации изучаемых методов;
- Приобретение студентами навыков качественного анализа и количественных оценок применительно к проблеме безопасности атомных станций.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|---|
| УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий | УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации |
| УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации | УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п. |
| УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия | УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия |
| 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-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности |

| | |
|---|---|
| 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-3.3 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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов |
| | 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-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| 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) |

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в гидродинамике многофазных течений;
- постановку проблем физического моделирования;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики, в том числе гидродинамики многофазных систем;
- физику гидродинамических неустойчивостей;
- специфические особенности гидродинамических и теплофизических процессов в задачах по проблеме безопасности атомной энергетики.

уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных процессов гидродинамики многофазных сред;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных и технологических задач;
- эффективно использовать специфические особенности гидродинамических и теплофизических процессов в задачах по проблеме безопасности атомной энергетики;
- работать на современном вычислительном оборудовании.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- математическим моделированием физических задач гидродинамики и теплофизики многофазных систем;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач, относящихся к проблеме безопасности атомной энергетики.
- навыками грамотной обработки результатов расчетов и сопоставления с экспериментальными данными.

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 | Модели и математическое описание двухфазных систем. | 10 | | | 3 |
| 2 | Элементы теории подобия. | 2 | | | 3 |
| 3 | Гидростатика газожидкостных систем. | 6 | | | 3 |
| 4 | Волны на межфазной поверхности. Гидродинамика жидких пленок. | 6 | | | 3 |
| 5 | Механика пузырьков и капель в установившемся течении. | 6 | | | 3 |
| 6 | Неустановившееся движение капель и пузырьков. | 8 | | | 8 |
| 7 | Элементы теории конвективного теплообмена. | 6 | | | 8 |
| 8 | Парожидкостные потоки в каналах. | 12 | | | 8 |
| 9 | Динамика жидкостных включений в галитах в поле градиента температуры | 4 | | | 6 |
| Итого часов | | 60 | | | 45 |
| Подготовка к экзамену | | 30 час. | | | |
| Общая трудоёмкость | | 135 час., 3 зач.ед. | | | |

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Модели и математическое описание двухфазных систем.

Двухфазные системы как области сплошной среды с границами сильных разрывов. Модели раздельного течения, многоскоростного континуума, гомогенная.

Общая форма уравнений сохранения. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в интегральной и дифференциальной формах. Эмпирические законы молекулярного переноса импульса и энергии. Уравнение сохранения массы компонента в смеси.

Универсальные условия совместности на межфазных границах: общая формулировка, запись для потоков массы, импульса, энергии, массы компонента в смеси. Универсальные условия совместности в системе наблюдателя.

Специальные условия совместности на межфазных границах в процессе тепло и массообмена. Неравновесные эффекты при обтекании газом плоской поверхности, при испарении и конденсации. Специальные условия совместности в квазигомогенном приближении.

2. Элементы теории подобия.

Подобие и аналогия.

Теоремы теории подобия.

Физический смысл критериев и чисел подобия для процессов гидродинамики, тепло- и массообмена в одно- и двухфазных потоках.

3. Гидростатика газожидкостных систем.

Поверхностные явления, поверхностное натяжение, теплота образования и энтропия поверхности раздела.

Смачиваемость.

Формула Лапласа.

Основное уравнение гидростатического равновесия; форма поверхности жидкости в сосудах, высота капиллярного поднятия.

Равновесные осесимметричные поверхности раздела.

Результаты анализа устойчивости, максимальные участки устойчивости равновесных поверхностей.

Предельные (предотрывные) размеры капель и пузырей в гидростатических условиях.

4. Волны на межфазной поверхности. Гидродинамика жидких пленок.

Прогрессивные и стоячие волны на поверхности жидкости. Устойчивость горизонтальной поверхности раздела двух фаз. Дисперсионное уравнение. Капиллярные и гравитационные волны на поверхности жидкости. Неустойчивости Тейлора и Гельмгольца. Волны конечной амплитуды. Солитоны.

Ламинарные гравитационные пленки жидкости.

Математическое описание; начальный участок, характеристики стабилизированного течения. Устойчивость жидких пленок. Волновые пленки. Турбулентные жидкие пленки. Движение жидкой пленки под действием потока газа.

5. Механика пузырьков и капель в установившемся течении.

Модельные задачи о движении сферы в идеальной и вязкой жидкости.

Формулы Стокса и Рыбчинского-Адамара.

Результаты экспериментальных наблюдений и расчет скорости всплытия газовых пузырьков в спокойной жидкости.

Модель движения жидкости со свободной поверхностью как метод анализа движения крупных пузырей.

Особенности движения капель в газовых потоках. Дробление пузырей и капель.

Семестр: 2 (Весенний)

6. Неустановившееся движение капель и пузырьков.

Уравнение Рэлея в классической и "энергетической" интерпретации. Кавитационное схлопывание газовой полости в жидкости.

Ускоренное движение сферы в идеальной жидкости. Присоединенная масса.

Рост паровых пузырьков в объеме равномерно перегретой жидкости (предельные инерционная и тепловая энергетические схемы, анализ экспериментальных наблюдений).

Условия роста паровых пузырьков на стенке (при кипении).

Условия отрыва паровых пузырьков от стенки: строгая постановка задачи, критический анализ существующих подходов; приближенные кинематические схемы отрыва для случаев кипения в свободном объеме и при вынужденном течении жидкости.

7. Элементы теории конвективного теплообмена.

Основные определения. Коэффициент теплоотдачи как гидродинамическая характеристика. Толщина эквивалентной пленки.

Основные допущения теории пограничного слоя. Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины.

Осредненные уравнения турбулентного течения и теплообмена. Кажущиеся напряжения турбулентного трения и турбулентный тепловой поток. Структура пристеночной турбулентной области.

Аналогия Рейнольдса, ее современный вариант как основа для инженерных расчетов теплообмена при турбулентном течении.

Свободная конвекция: механизм процесса, математическое описание, основные расчетные соотношения.

Теплообмен при однофазном течении в трубах. Теплообмен при ламинарном течении на входном участке. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении.

8. Парожидкостные потоки в каналах.

Количественные характеристики, определения. Структура двухфазных течений в горизонтальных и вертикальных каналах. Методы определения границ режимов течения.

Одномерные уравнения импульса и энергии для двухфазных потоков. Гомогенная модель для расчета трения. Расчет истинного объемного паросодержания в квазигомогенных потоках. Модели дисперсно-кольцевых режимов течения; методы расчета трения на границе пленки.

Парожидкостные потоки в условиях теплообмена. Теплообмен при конденсации неподвижного пара (задача Нуссельта, современные подходы). Конденсация в трубах.

Теплообмен при кипении жидкостей. Условия зарождения паровой фазы в объеме метастабильной жидкости и на твердой стенке. Кривая кипения. Методы расчета теплообмена при пузырьковом, пленочном и переходном кипении. Теплообмен при кипении жидкости в каналах.

Кризис пузырькового кипения в объеме и в каналах.

9. Динамика жидкостных включений в галитах в поле градиента температуры

Жидкие включения в галитах. Фазовые переходы на границах жидкость-галит. Статистическое описание поведения ансамбля жидких включений в галитах в поле градиента температуры.

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

Доска, компьютер и мультимедийное оборудование.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Механика двухфазных систем [Текст] : учеб. пособие для вузов / Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов. — М. : МЭИ, 2000. — 374 с.

Amir Faghri, Yuwen Zhang. 10. 2006

Фундаментальные проблемы моделирования турбулентных и двухфазных течений [Текст] : в 2 т. Т. 1 : Теория и эксперимент/под ред. А. А. Саркисова, Г. А. Филиппова, -М., Наука, 2010

Дополнительная литература

1. Динамика многофазных сред [Текст] : в 2 ч./Р. И. Нигматулин, Ч. 1, -М., Наука, 1987

2. Динамика многофазных сред [Текст] : в 2 ч./Р. И. Нигматулин, Ч. 2, -М., Наука, 1987

Газодинамика двухфазных сред [Текст]/М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов, -М., Энергия, 1981

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)

Программа для моделирования эволюции газо-жидкостных включений в соляных породах с учетом коалесценции и мгновенного равновероятностного бинарного распада в стационарном периоде термомиграции. Автор. Корчагина О.О. СВИДЕТЕЛЬСТВО о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663965 от 05 ноября 2020г.

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.

ПРИЛОЖЕНИЕ

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.Р. Аветисян, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|---|
| УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий | УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации |
| УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации | УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п. |
| УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия | УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия |
| 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-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности |
| 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-3.3 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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов |
| | 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-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| 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) |

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Гидродинамика многофазных течений» обучающийся должен:

знать:

- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в гидродинамике многофазных течений;
- постановку проблем физического моделирования;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики, в том числе гидродинамики многофазных систем;
- физику гидродинамических неустойчивостей;
- специфические особенности гидродинамических и теплофизических процессов в задачах по проблеме безопасности атомной энергетики.

уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных процессов гидродинамики многофазных сред;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных и технологических задач;
- эффективно использовать специфические особенности гидродинамических и теплофизических процессов в задачах по проблеме безопасности атомной энергетики;
- работать на современном вычислительном оборудовании.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- математическим моделированием физических задач гидродинамики и теплофизики многофазных систем;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач, относящихся к проблеме безопасности атомной энергетики.
- навыками грамотной обработки результатов расчетов и сопоставления с экспериментальными данными.

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

Темы курсовых заданий

1. Обтекание твердой сферы идеальным и вязким потоками (парадокс Даламбера, задача Стокса).
2. Динамика газовых пузырьков в спокойной жидкости. Кавитационное схлопывание пузырьков.
3. Модели течения жидких пленок с учетом тепло- и массообмена.
4. Обтекание сферического пузырька вязким потоком. Сила Саффмана.

Темы для самостоятельной работы

1. Явление спонтанной конденсации (нуклеации) в трансзвуковых соплах Лаваля.
2. Теплообмен при различных режимах кипения.
3. Динамика жидкостных включений в галитах в поле градиента температуры

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

9 семестр

1. Общая форма уравнений сохранения. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в интегральной и дифференциальной формах. Эмпирические законы молекулярного переноса импульса и энергии. Уравнение сохранения массы компонента в смеси.
2. Универсальные условия совместности на межфазных границах: общая формулировка, запись для потоков массы, импульса, энергии, массы компонента в смеси. Универсальные условия совместности в системе наблюдателя.
3. Специальные условия совместности на межфазных границах в процессе тепло и массообмена.
4. Специальные условия совместности в квазигомогенном приближении.
5. Подобие и аналогия. Теоремы теории подобия. Физический смысл критериев и чисел подобия для процессов гидродинамики, тепло-и массообмена в одно и двухфазных потоках.

6. Поверхностные явления, поверхностное натяжение, теплота образования и энтропия поверхности раздела. Смачиваемость. Формула Лапласа.
7. Основное уравнение гидростатического равновесия; форма поверхности жидкости в сосудах, высота капиллярного поднятия. Равновесные осесимметричные поверхности раздела.
8. Результаты анализа устойчивости, максимальные участки устойчивости равновесных поверхностей. Предельные (предотрывные) размеры капель и пузырей в гидростатических условиях.
9. Прогрессивные и стоячие волны на поверхности жидкости. Устойчивость горизонтальной поверхности раздела двух фаз. Дисперсионное уравнение.
10. Капиллярные и гравитационные волны на поверхности жидкости. Неустойчивости Тейлора и Гельмгольца. Волны конечной амплитуды. Солитоны.
11. Ламинарные гравитационные пленки жидкости: математическое описание; начальный участок, характеристики стабилизированного течения.
12. Устойчивость жидких пленок, Волновые пленки. Турбулентные жидкие пленки. Движение жидкой пленки под действием потока газа.
13. Модельные задачи о движении сферы в идеальной и вязкой жидкости. Формулы Стокса и Рыбчинского-Адамара.
14. Модель движения жидкости со свободной поверхностью как метод анализа движения крупных пузырей. Особенности движения капель в газовых потоках. Дробление пузырей и капель.

10 семестр

1. Уравнение Рэлея в классической и "энергетической" интерпретации. Кавитационное схлопывание газовой полости в жидкости.
2. Ускоренное движение сферы в идеальной жидкости. Присоединенная масса.
3. Рост паровых пузырьков в объеме равномерно перегретой жидкости (предельные инерционная и тепловая энергетические схемы, анализ экспериментальных наблюдений).
4. Условия роста паровых пузырьков на стенке (при кипении).
5. Условия отрыва паровых пузырьков от стенки: строгая постановка задачи, критический анализ существующих подходов; приближенные кинематические схемы отрыва для случаев кипения в свободном объеме и при вынужденном течении жидкости.
6. Основные определения. Коэффициент теплоотдачи как гидродинамическая характеристика. Толщина эквивалентной пленки.
7. Основные допущения теории пограничного слоя. Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины.
8. Осредненные уравнения турбулентного течения и теплообмена. Кажущиеся напряжения турбулентного трения и турбулентный тепловой поток. Структура пристеночной турбулентной области.
9. Аналогия Рейнольдса, ее современный вариант как основа для инженерных расчетов теплообмена при турбулентном течении.
10. Свободная конвекция: механизм процесса, математическое описание, основные расчетные соотношения,
11. Теплообмен при однофазном течении в трубах. Теплообмен при ламинарном течении на входном участке. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении.
12. Количественные характеристики, определения. Структура двухфазных течений в горизонтальных и вертикальных каналах. Методы определения границ режимов течения.
13. Одномерные уравнения импульса и энергии для двухфазных потоков. Гомогенная модель для расчета трения. Расчет истинного объемного паросодержания в квазигомогенных потоках. Модели дисперсно-кольцевых режимов течения; методы расчета трения на границе пленки.
14. Парожидкостные потоки в условиях теплообмена. Теплообмен при конденсации неподвижного пара (задача Нуссельта, современные подходы). Конденсация в трубах.
15. Теплообмен при кипении жидкостей. Условия зарождения паровой фазы в объеме метастабильной жидкости и на твердой стенке. Кривая кипения. Методы расчета теплообмена при пузырьковом, пленочном и переходном кипении. Теплообмен при кипении жидкости в каналах.
16. Кризис пузырькового кипения в объеме и в каналах.

17. Спонтанная конденсация (нуклеация). Гетерогенная конденсация, конденсация на примесях (бинарная конденсация). Методы моделирования эволюции спектра капель. Метод моментов. Метод фракций. Метод дельта аппроксимации. Влияние турбулентности на процессы конденсации.

18. Динамика жидкостных включений в галитах в поле градиента температуры

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Уравнение Рэлея в классической и "энергетической" интерпретации. Кавитационное схлопывание газовой полости в жидкости
2. Свободная конвекция: механизм процесса, математическое описание, основные расчетные соотношения.

Билет 2.

1. Ускоренное движение сферы в идеальной жидкости. Присоединенная масса.
2. Теплообмен при однофазном течении в трубах. Теплообмен при ламинарном течении на входном участке. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении.

Критерии оценивания

Студент получает:

оценку отлично(10), если получены ответы на три вопроса, нет замечаний.

оценку отлично(9), если получены ответы на три вопроса, есть отдельные замечания.

оценку отлично(8), если получены ответы на три вопроса, есть существенные замечания и (или) ошибки в вычислениях.

оценку хорошо(7), если получены ответы на два вопроса, нет замечаний

оценку хорошо(6), если получены ответы на два вопроса, есть отдельные замечания

оценку хорошо(5), если получены ответы на два вопроса, есть существенные замечания и (или) ошибки в вычислениях.

оценку удовлетворительно(4), если получен ответ на один вопрос, нет замечаний

оценку удовлетворительно(3), если получен ответ на один вопрос, есть замечания

оценку неудовлетворительно(2), если правильные ответы на вопросы отсутствуют, но студент понимает и может объяснить смысл вопросов.

оценку неудовлетворительно(1), если правильные ответы на вопросы отсутствуют, студент не может объяснить смысл заданных вопросов.

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

9 семестр

Дифференцированный зачет проводится в устной форме. Студенту предлагается ответить на вопросы преподавателя. Время на подготовку не более 30 минут. Пользоваться дополнительной литературой во время подготовки не разрешается.

10 семестр

Экзамен проводится в письменной форме, с последующей устной беседой. Время на написание письменной части не должно превышать 1 часа, время обсуждения - полчаса. Пользоваться дополнительной литературой не разрешается.