

Гидродинамика многофазных течений

Аветисян А.Р.

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

№	Тема	Содержание
1	Модели и математическое описание двухфазных систем	1. Двухфазные системы как области сплошной среды с границами сильных разрывов. Модели раздельного течения, многоскоростного континуума. 2. Общая форма уравнений сохранения. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в интегральной и дифференциальной форме. Эмпирические законы молекулярного переноса импульса и энергии. Уравнение сохранения массы компонента в смеси. 3. Универсальные условия совместности на межфазных границах: общая формулировка, запись для потоков массы, импульса, энергии, массы компонента в смеси. Универсальные условия совместности в системе наблюдателя. 4. 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	1. Поверхностные явления, поверхностное натяжение, теплота образования и энтропия поверхности раздела. 2. Смачиваемость. Формула Лапласа. Основное уравнение гидростатического равновесия; форма поверхности жидкости в сосудах, высота капиллярного поднятия. 3. Равновесные осесимметричные поверхности раздела. Результаты анализа устойчивости, максимальные участки устойчивости равновесных поверхностей. 4. Предельные (предотрывные) размеры капель и пузырей в гидростатических условиях.
4	Волны на межфазной поверхности. Гидродинамика жидких пленок	1. 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. 2. 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	1. Модельные задачи о движении сферы в идеальной и вязкой жидкости. Формулы Стокса и Рыбчинского-Адамара. 2. Результаты экспериментальных наблюдений и расчет скорости всплытия газовых пузырьков в спокойной жидкости. Модель движения жидкости со свободной поверхностью как метод анализа движения крупных пузырей. 3. Особенности движения капель в газовых потоках. Дробление пузырей и капель.
6	Неустановившееся движение капель и пузырьков	1. Уравнение Рэлея в классической и "энергетической" интерпретациях. 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.

7	Элементы теории конвективного теплообмена	1. Основные определения. Коэффициент теплоотдачи как гидродинамическая характеристика Толщина эквивалентной пленки. 2. Основные допущения теории пограничного слоя. Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины. 3. Осредненные уравнения турбулентного течения и теплообмена. Кажущиеся напряжения турбулентного трения и турбулентный тепловой поток. Структура пристеночной турбулентной области. 4. Аналогия Рейнольдса, ее современный вариант как основа для инженерных расчетов теплообмена при турбулентном течении. 5. Свободная конвекция: механизм процесса, математическое описание, основные расчетные соотношения, 6. Теплообмен при однофазном течении в трубах. Теплообмен при ламинарном течении на входном участке. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении.
8	Парожидкостные потоки в каналах	1. Количественные характеристики, определения. Структура двухфазных течений в горизонтальных и вертикальных каналах. Методы определения границ режимов течения. 2. 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. 3. Парожидкостные потоки в условиях теплообмена. Теплообмен при конденсации неподвижного пара (задача Нуссельта, современные подходы). Конденсация в трубах. 4. 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. 5. Кризис пузырькового кипения в объеме и в каналах. 6. 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.
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.

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

Вопросы по курсу

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.
15. Уравнение Рэлея в классической и "энергетической" интерпретации. Кавитационное схлопывание газовой полости в жидкости.
16. Ускоренное движение сферы в идеальной жидкости. Присоединенная масса.
17. Рост паровых пузырьков в объеме равномерно перегретой жидкости (предельные инерционная и тепловая энергетическая схемы, анализ экспериментальных наблюдений).
18. Условия роста паровых пузырьков на стенке (при кипении).
19. 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.
20. Основные определения. Коэффициент теплоотдачи как гидродинамическая характеристика Толщина эквивалентной пленки.
21. Основные допущения теории пограничного слоя. Теплообмен при ламинарном обтекании плоской пластины.
22. Осредненные уравнения турбулентного течения и теплообмена. Кажущиеся напряжения турбулентного трения и турбулентный тепловой поток. Структура пристеночной турбулентной области.
23. Аналогия Рейнольдса, ее современный вариант как основа для инженерных расчетов теплообмена при турбулентном течении.
24. Свободная конвекция: механизм процесса, математическое описание, основные расчетные соотношения.
25. Теплообмен при однофазном течении в трубах. Теплообмен при ламинарном течении на входном участке. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении.
26. Количественные характеристики, определения. Структура двухфазных течений в горизонтальных и вертикальных каналах. Методы определения границ режимов течения.
27. 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.
28. Парожидкостные потоки в условиях теплообмена. Теплообмен при конденсации неподвижного пара (задача Нуссельта, современные подходы). Конденсация в трубах.
29. 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.
30. Кризис пузырькового кипения в объеме и в каналах.
31. 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.
32. Динамика жидкостных включений в галитах в поле градиента температуры.

Литература

1. Amir Faghri, Yuwen Zhang. Transport Phenomena in Multiphase Systems. Elsevier. 2006
2. Фундаментальные проблемы моделирования турбулентных и двухфазных течений. В 2 т. (под ред. Акад. РАН А.А. Саркисова, Г.А. Филиппова. 2010.
3. Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. "Основы механики двухфазных потоков", 2000.
4. Р.Н. Нигматулин. "Динамика многофазных сред", 1987.
5. М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов. Газодинамика двухфазных сред, 1981.