

## Теоретические основы гидродинамики и теплопереноса Кондратенко П.С.

Курс посвящен основным принципам гидродинамики и конвективного теплообмена. Специальное внимание уделено вопросам теплоотдачи жидкости с внутренними источниками тепла, заключенной в замкнутый объем, применительно к проблеме тяжелых аварий на АЭС.

№	Тема	Содержание
1	Общая система уравнений движения неидеальной жидкости. Гидродинамика идеальной жидкости.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Предмет гидродинамики. Законы сохранения массы, импульса и энергии. Вывод общей системы уравнений движения неидеальной жидкости (непрерывности, Навье-Стокса и теплопереноса). Граничные условия.</li> <li>2. Идеальная жидкость. Система уравнений движения и граничные условия. Гидростатика. Изэнтропические течения. Завихренность. Теорема Томсона.</li> <li>3. Потенциальное течение. Несжимаемая жидкость. Уравнение Бернулли. Потенциальное обтекание несжимаемой жидкостью. Парадокс Даламбера.</li> <li>4. Условия применимости приближения несжимаемой жидкости. Гравитационные волны. Звук.</li> </ol>
2	Вязкая жидкость	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Уравнение Навье-Стокса. Задачи о простейших типах течения вязкой жидкости. Пуазейлевы течения. Колебательное движение вязкой жидкости.</li> <li>2. Законы подобия. Числа Рейнольдса, Фруда и Струхала.</li> <li>3. Течения при малых числах Рейнольдса. Формула Стокса.</li> <li>4. Ламинарные течения при больших числах Рейнольдса. Ламинарный след. Затопленная струя. Ламинарный пограничный слой. Сила сопротивления.</li> </ol>
3	Турбулентность	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Задача об устойчивости стационарного движения. Неустойчивости Рэлея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца. Переход к турбулентности.</li> <li>2. Развитая турбулентность. Модель Колмогорова-Обухова.</li> <li>3. Турбулентная струя. Турбулентный след. Логарифмический профиль скоростей при турбулентном течении вдоль неограниченной плоской поверхности.</li> <li>4. Турбулентный пограничный слой. Турбулентное течение в трубах. Коэффициент сопротивления. Кризис сопротивления при турбулентном обтекании твердых тел.</li> </ol>
4	Поверхностные явления	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Формула Лапласа. Механическое равновесие соприкасающихся тел.</li> <li>2. Капиллярные волны. Рассасывание периодически модулированного профиля поверхности жидкости.</li> </ol>
5	Теплоперенос в жидкостях без внутренних источников тепла	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Уравнение переноса тепла. Теплопроводность в несжимаемой жидкости. Конвекция.</li> <li>2. Закон подобия для теплопередачи. Теплопередача в пограничном слое. Турбулентные пульсации температуры.</li> <li>3. Теплообмен при ламинарном течении в трубах и каналах.</li> <li>4. Теплообмен при турбулентном течении в трубах и каналах.</li> </ol>
6	Свободная конвекция в жидкости без внутренних источников тепла	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Тепловое расширение. Свободная конвекция. Законы подобия. Ламинарный свободноконвективный пограничный слой на вертикальной стенке.</li> <li>2. Турбулентный свободноконвективный пограничный слой. Свободноконвективные струи.</li> <li>3. Конвективная неустойчивость горизонтального плоскопараллельного слоя жидкости, подогреваемого снизу. Конвекция Рэлея-Бенара.</li> <li>4. Турбулентная конвекция Рэлея-Бенара. Мягкая и жесткая турбулентность.</li> <li>5. Теплообмен, сопровождаемый фазовыми превращениями. Радиационный теплообмен.</li> </ol>
7	Теплоотдача энерговыводящей жидкости (ЭВЖ)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Методы и современное состояние исследований теплоотдачи ЭВЖ. Метод аналитических оценок.</li> <li>2. Режимы теплоотдачи ЭВЖ. Теплоотдача в асимптотическом режиме.</li> <li>3. Предельные угловые характеристики теплоотдачи ЭВЖ.</li> <li>4. Теплоотдача ЭВЖ в квазидвумерной геометрии.</li> <li>5. Особенности теплоотдачи остывающей жидкости без внутренних источников тепла в квазистационарном режиме.</li> </ol>

### Вопросы по курсу

1. Уравнения движения идеальной жидкости. Граничные условия.
2. Уравнение Бернулли. Различные версии.
3. Уравнения движения потенциального течения идеальной несжимаемой жидкости.
4. Условия применимости приближения несжимаемой жидкости.

5. Парадокс Даламбера. В чем суть его разрешения?
6. Скорость звука.
7. Уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости с постоянной вязкостью.
8. Граничное условие на твердой поверхности для вязкой жидкости.
9. Законы подобия в гидродинамике. Число Рейнольдса.
10. Качественные характеристики установившегося стационарного течения вязкой несжимаемой жидкости в трубе при малых числах Рейнольдса.
11. Формула Стокса. Качественный вывод (без численного коэффициента).
12. Толщина ламинарного следа и возмущение скорости в нем.
13. Качественная оценка толщины затопленной ламинарной струи.
14. Система уравнений гидродинамики для ламинарного пограничного слоя в приближении Прандтля.
15. Толщина ламинарного пограничного слоя.
16. Качественный вывод для характеристик ламинарного пограничного слоя.
17. Условие механического равновесия на границе раздела двух жидкостей с учетом поверхностного натяжения.
18. Неустойчивости Рэлея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца.
19. Развитая турбулентность. Основные положения, легшие в основу модели Колмогорова-Обухова.
20. Закон Колмогорова-Обухова для скорости турбулентных пульсаций.
21. Внутренний масштаб турбулентности в модели Колмогорова-Обухова.
22. Турбулентный след. Его толщина.
23. Затопленная турбулентная струя. Ее толщина.
24. Логарифмический профиль скоростей.
25. Гидродинамический турбулентный пограничный слой.
26. Установившееся турбулентное течение в трубах.
27. Качественная картина поведения коэффициента сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса при течении в трубах.
28. Турбулентное обтекание твердого тела. Кризис сопротивления.
29. Уравнение теплопроводности в твердых телах.
30. Уравнение переноса тепла в несжимаемой жидкости. Конвекция.
31. Теплопередача между твердым телом и жидкостью. Законы подобия. Числа Нуссельта и Прандтля.
32. Тепловое расширение жидкости. Уравнения движения гидродинамики и теплопереноса в условиях свободной конвекции.
33. Законы подобия для свободной конвекции. Число Рэлея.
34. Показатель степени в формуле зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея для ламинарного свободно-конвективного пограничного слоя на вертикальной стенке.
35. Показатель степени в формуле зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея для турбулентного свободно-конвективного пограничного слоя на вертикальной стенке.
36. Конвективная неустойчивость горизонтального плоскопараллельного слоя жидкости. Конвекция Рэлея-Бенара.
37. Показатель степени в формуле зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея для конвекции Рэлея-Бенара в режиме мягкой турбулентности.
38. Показатель степени в формуле зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея для конвекции Рэлея-Бенара в режиме жесткой турбулентности.
39. Законы подобия для свободной конвекции тепловыделяющей жидкости, находящейся в замкнутом объеме. Модифицированное число Рэлея.
40. Структура конвекции тепловыделяющей жидкости, находящейся в замкнутом объеме.
41. Предельные угловые закономерности теплоотдачи и температурная стратификация при свободной конвекции жидкости с внутренними источниками тепла.
42. Эффект фокусировки в теплоотдаче многокомпонентной жидкости с внутренними источниками тепла

## Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.:Физматлит. 2006. – 732 с.
2. Л.А. Большов, П.С. Кондратенко, В.Ф. Стрижов, Свободная конвекция тепловыделяющей жидкости, Успехи Физических Наук, 2001, 171, №10, сс. 1051-1070.
3. Свободная конвекция и теплоотдача жидкости с внутренними источниками тепла. Труды ИБРАЭ РАН. Под общ. ред. чл.-кор. РАН Л.А. Большова. М.: Наука. 2008. – 224 с.
4. Себиси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы. М.: Мир. 1987. – 590с.
5. Mc Comb W.D. The Physics of Fluid Turbulence. Oxford.: Clarendon. 1990.

## Учебные пособия

1. П.С. Кондратенко, Теоретические основы гидродинамики и конвективного теплообмена, Учебное пособие для студентов кафедры МФТИ - ИБРАЭ РАН, М. ИБРАЭ РАН, 2003.
2. П.С. Кондратенко, Теоретические основы гидродинамики и конвективного теплообмена, Электронный конспект лекций. 2011 г.