

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ"**

---

**Кафедра аэродинамики, конструкции и прочности летательных аппаратов**

М.С. Кубланов

**ГИДРОГАЗОДИНАМИКА**

**ПОСОБИЕ**

**по изучению дисциплины и  
выполнению лабораторных работ**

*для студентов II курса  
направления 280700  
дневного обучения*

**Москва - 2013**

ББК 517.8

К 88

Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Г. Ципенко

Кубланов М.С.

К 88

Гидрогазодинамика: Пособие по изучению дисциплины и выполнению лабораторных работ. Направление 280700 – М.: МГТУ ГА, 2013. – 22 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины Б.3.27. "Гидрогазодинамика" по учебному плану подготовки бакалавров направления 280700 "Техносферная безопасность" для студентов II курса дневной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 29.08.2012 г. и методического совета 4.09.2012 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

	с.
1. УЧЕБНЫЙ ПЛАН ДИСЦИПЛИНЫ.....	3
2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ.....	4
3. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	6
4. ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	6
5. ЭЛЕКТРОННЫЙ АДРЕС КАФЕДРЫ ДЛЯ КОНСУЛЬТАЦИЙ.....	6
6. СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ.....	7
7. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ.....	7
8. ТЕРМИНОЛОГИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	11
9. ЛЕКЦИОННЫЕ ЗАНЯТИЯ.....	11
10. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ .....	12
11. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ.....	12
11.1. Лабораторная работа № 1.....	12
11.2. Лабораторная работа № 2.....	19

## 1. УЧЕБНЫЙ ПЛАН ДИСЦИПЛИНЫ

Курс <u>2</u> , Форма обучения <u>очная</u> .	
Общий объем учебных часов на дисциплину	<u>108</u> часов
Семестр	<u>4</u> сем.
Объем аудиторной нагрузки	<u>54</u> часа
Лекции	<u>18</u> часов
Практические занятия	<u>28</u> часов
Лабораторные работы	<u>8</u> часов
Экзамен	<u>4</u> сем.
Объем самостоятельной работы студента	<u>54</u> часа

## 2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ

### 2.1. Предмет дисциплины

Развитие современной техники невозможно без решения сложных задач гидродинамики, аэродинамики, газодинамики, динамики многофазных сред и процессов горения, волновых процессов, упругости, пластичности и прочности конструкций. Современная наукоемкая авиация – именно та область техники, в которой требуется решение таких задач. Это – теория полета, теория двигателей, расчет конструкций и систем на работоспособность и прочность, расчет тушения пожаров и движения ЛА по земле и воде.

Теория полета (аэродинамика и динамика полета) – наука фундаментальная и строгая, опирающаяся на математический аппарат. Но, как и о всякой науке, о ней можно говорить на кухне, опираясь лишь на интеллект соответствующего уровня. К сожалению, и сегодня появляются "ученые", пытающиеся на кухонном уровне объяснить основные законы природы, в том числе и аэродинамики и динамики полета. Но когда с помощью этих объяснений пытались решить серьезные задачи в авиации, это приводило к плачевным результатам: после отрыва от земли самолеты "вдруг" круто пикировали; при большой скорости на самолетах с первыми турбореактивными двигателями (ТРД) "вдруг" появлялась тряска и самолет рассыпался; преодоление звукового барьера долго не давалось; перегруженные самолеты не могли завершить взлет и т.п. Многие из таких и других катастроф случаются и сегодня. В технической эксплуатации непонимание основ функционирования систем воздушного судна приводит к их отказам из-за нерасчетных режимов работы (попадание воздуха или воды в топливные или гидравлические системы, разрушение соединений в процессе эксплуатационных нагрузок по причинам пластической деформации или ухудшения свойств рабочих жидкостей и т.п.). К сожалению, в большинстве случаев это происходит по причине человеческого фактора, именно из-за недопонимания происходящего явления.

Современное состояние образования в области авиации характерно высокой плотностью общеинженерных и специальных дисциплин. Изучение их в отрыве друг от друга уже невозможно. Особенно остро этот вопрос сегодня стоит при профессиональной подготовке эксплуатационников, которые обязаны обеспечивать безопасность полетов. Эксплуатационник обязан быть специалистом не только в области организации технического обслуживания и ремонта, но и в области конструкции и принципов действия отдельных систем и всего летательного аппарата (ЛА) в целом. А для этого требуется более высокий, более абстрактный подход, дающий единое фундаментальное математическое обоснование на первый взгляд разрозненных дисциплин. При таком подходе обеспечивается более глубокое усвоение учебного материала и требуется меньше времени на весь период обучения.

## 2.2. Цель и задачи дисциплины

### 2.2.1. Цель преподавания дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование у студентов понимания и знания методических основ механики сплошной среды, как математической базы прикладных дисциплин, изучающих механические процессы и системы в авиационной технике.

### 2.2.2. Задачи изучения дисциплины

#### 2.2.2.1. Иметь представление:

- о математической основе механики сплошной среды;
- об уравнениях механики сплошной среды;
- об особенностях уравнений гидрогазодинамики;
- об элементарной теории сопла Лавалья;
- о явлениях кавитации, гидравлического удара.

#### 2.2.2.2. Знать:

- гипотезы и термины механики сплошной среды;
- основные модели сплошной среды;
- интеграл Бернулли;
- природу взаимодействия тела и жидкости или газа;
- теорему Жуковского;
- основные критерии подобия в механике сплошной среды;
- физическую сущность явлений, процессов и эффектов, лежащих в основе устройства и функционирования объектов АТ.

#### 2.2.2.3. Уметь:

- различать вихревое и безвихревое движения сплошной среды;
- различать разрывы характеристик и сплошности среды;
- использовать методы теоретического и экспериментального исследования в физике.

#### 2.2.2.4. Владеть:

- приёмами оценивания параметров и изделий АТ на основе методов физического исследования;
- навыками использования знаний, полученных при изучении общенаучных дисциплин, для решения практических природоохранных задач.

## 2.3. Перечень базовых (формирующих) дисциплин

Требования к входным знаниям студента, необходимым для изучения дисциплины:

- по дисциплине высшая математика – знать и уметь применять методы линейной алгебры и математического анализа; иметь представление о дифференциальных уравнениях в обыкновенных и частных производных, об алгебре тензоров, о теории функций комплексного переменного;
- по дисциплине физика – знать фундаментальные физические законы и их место;
- по дисциплине механика – знать основные понятия и модели.

## 2.4. Перечень формируемых дисциплин

Дисциплины, для которых данная дисциплина является предшествующей:  
– прикладная аэродинамика.

## 3. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

№ п/п	А в т о р	Н а и м е н о в а н и е, и з д а т е л ь с т в о, г о д и з д а н и я
1. Основная литература:		
1	Кубланов М.С.	Гидрогазодинамика: учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2013. Шифр библиотеки МГТУ ГА 517.8 К88
2. Учебно-методическая литература:		
2	Кубланов М.С.	Гидрогазодинамика: пособие по изучению дисциплины и выполнению лабораторных работ. – М.: МГТУ ГА, 2013
3. Дополнительная литература		
3	Гарбузов В.М., Ермаков А.Л., Кубланов М.С., Ципенко В.Г.	Аэромеханика: учебник для вузов ГА. – М.: Транспорт, 1999.
4	Кубланов М.С.	Аэродинамика и динамика полета: учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2000

## 4. ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

База электронной информотеки МГТУ ГА – электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) – содержит всю информацию, необходимую для изучения дисциплины:

- рабочую программу дисциплины;
- пособие по изучению дисциплины;
- учебное пособие;
- слайды для лекционного материала;
- контрольные вопросы по дисциплине (для подготовки к экзамену).

## 5. ЭЛЕКТРОННЫЙ АДРЕС КАФЕДРЫ ДЛЯ КОНСУЛЬТАЦИЙ

akpla@yandex.ru Письма помечать: "для Кубланова" или "для Ефимовой".

## 6. СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

**Раздел 1.** Введение. Кинематика сплошной среды.

**Раздел 2.** Динамика сплошной среды.

**Раздел 3.** Основы теории жидкости и газа

**Раздел 4.** Задачи гидромеханики.

**Раздел 5.** Задачи аэромеханики.

## 7. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**Раздел 1.** Введение. Кинематика сплошной среды

Структура механики сплошной среды. Понятие механики сплошной среды. Гипотезы механики сплошной среды. Переменные Эйлера и Лагранжа. Деформация и скорость деформации.

Основные термины механики сплошной среды. Уравнение неразрывности.

Безвихревое и вихревое движение. Физический смысл вихря. Потенциал скорости. Свойства потенциального движения сплошной среды. Примеры потенциального и вихревого движения. Формула Био и Савара.

*Методические указания к изучению раздела*

Литература: [1, введение, раздел 1].

Центральные вопросы: Структура механики. Гипотезы механики сплошной среды. Основные термины механики сплошной среды. Уравнение неразрывности. Безвихревое и вихревое движение. Силы и моменты в механике сплошной среды. Нормальное и касательное напряжение. Тензор внутренних напряжений. Уравнения движения сплошной среды. Модели сплошной среды.

Контрольные вопросы:

- 1.1. Структура механики сплошной среды.
- 1.2. Что такое механика сплошной среды?
- 1.3. Гипотезы механики сплошной среды.
- 1.4. Переменные Эйлера и Лагранжа.
- 1.5. Деформация и скорость деформации.
- 1.6. Что такое поле вектора скорости?
- 1.7. Что такое траектория частицы?
- 1.8. Что такое линия тока?
- 1.9. Какой физический смысл уравнения неразрывности?

**Раздел 2.** Динамика сплошной среды

Силы и моменты в механике сплошной среды. Нормальное и касательное напряжение. Тензор внутренних напряжений.

Уравнения движения сплошной среды. Уравнение количества движения конечного объема сплошной среды. Основное дифференциальное уравнение движения сплошной среды. Уравнение момента количества движения конечного объема сплошной среды.

Модели сплошной среды. Идеальная жидкость. Давление. Упругая среда и теория упругости. Вязкая жидкость, закон Навье-Стокса. Тензор скоростей деформации. Изотропные и анизотропные среды. Коэффициенты вязкости для изотропной среды. Баротропные жидкости: несжимаемая, изотермическая, поллитропическая, совершенный газ.

*Методические указания к изучению раздела*

Литература: [1, раздел 2].

Центральные вопросы: Силы и моменты в механике сплошной среды. Нормальное и касательное напряжение. Тензор внутренних напряжений. Уравнения движения сплошной среды. Модели сплошной среды.

Контрольные вопросы:

- 2.1. Общая классификация сил и моментов в механике сплошной среды.
- 2.2. Что такое нормальное и касательное напряжение?
- 2.3. Почему внутренние поверхностные силы (напряжения) описываются тензором?
- 2.4. Что такое давление и как оно связано с тензором внутренних напряжений?
- 2.5. Каков физический смысл уравнений движения сплошной среды?
- 2.6. Каков смысл различия уравнений движения сплошной среды в интегральной и в дифференциальной форме?
- 2.7. Для чего необходимо задавать модель (вид) сплошной среды?
- 2.8. Основная характеристика упругой среды.
- 2.9. Основная характеристика идеальной среды.
- 2.10. Основная характеристика вязкой среды.
- 2.11. Что такое уравнение баротропии?
- 2.12. Что такое несжимаемая среда?
- 2.13. Что такое совершенный газ?

### **Раздел 3. Основы теории жидкости и газа**

Уравнения Навье-Стокса. Уравнения движения вязкой несжимаемой изотропной среды. Уравнения Эйлера – движения идеальной среды. Интеграл Бернулли. Трубка Пито-Прандтля. Технические приложения.

Постановка задач в теории жидкости и газа. Начальные и граничные условия. Особенности постановки и решения задач: движения потенциальные, плоские, вихревые, установившиеся, плоскопараллельные, осесимметричные, одномерные, автомодельные. Упрощение уравнений движения: принцип малых возмущений, линеаризация.

Понятие о методах решения задач теории жидкости и газа. Теоретические и экспериментальные методы решения задач механики сплошной среды. Критерии подобия: числа Маха, Рейнольдса, Струхала, Фруда, Эйлера, Ньютона. Аэродинамические трубы. Методы численного решения задач в механике жидкости и газа.



Взаимодействие жидкостей и газов с обтекаемыми телами. Теорема Жуковского для цилиндра с циркуляцией скорости. Профиль Жуковского. Постулат Чаплыгина-Жуковского.

*Методические указания к изучению раздела*

Литература: [1, раздел 3].

Центральные вопросы: Уравнения Навье-Стокса. Уравнения Эйлера. Интеграл Бернулли. Теорема Жуковского. Постановка задач в теории жидкости и газа. Понятие о методах решения задач теории жидкости и газа.

Контрольные вопросы:

- 3.1. С помощью каких моделей выводятся уравнения Навье-Стокса?
- 3.2. С помощью каких предположений можно получить решение уравнений Навье-Стокса в виде интеграла Бернулли?
- 3.3. Что такое полное давление?
- 3.4. Что такое скоростной напор?
- 3.5. Что такое статическое давление?
- 3.6. Физический смысл действия трубки Пито-Прандтля.
- 3.7. Почему постановка задач в теории жидкости и газа требует задания начальных и граничных условий?
- 3.8. Особенности потенциального движения.
- 3.9. Упрощенные виды движения.
- 3.10. Что такое критерии подобия?
- 3.11. Предположения теоремы Жуковского.
- 3.12. Формула Жуковского.
- 3.13. Какая математическая теория применяется при построении профиля крыла?
- 3.14. За счет каких физических явлений в реальных условиях можно создать подъемную силу?
- 3.15. В чем заключается прикладной характер парадокса Эйлера-Даламбера?

#### **Раздел 4. Задачи гидромеханики**

Гидростатика. Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля. Закон Архимеда. Кавитация. Установившееся движение вязкой жидкости между плоскостями. Течение Куэтта, течение Пуазейля. Гидродинамическое обоснование теории смазки подшипников. Движение несжимаемой вязкой жидкости в цилиндрических трубах. Параболическое распределение скорости и закон Гагена-Пуазейля. Глиссирование.

*Методические указания к изучению раздела*

Литература: [1, раздел 4].

Центральные вопросы: Основное уравнение гидростатики. Кавитация. Гидродинамическое обоснование теории смазки подшипников. Движение несжимаемой вязкой жидкости в цилиндрических трубах. Глиссирование.

Контрольные вопросы:

- 4.1. Предположения закона Паскаля в узкой и широкой трактовке.
- 4.2. Какие параметры связаны основным уравнением гидростатики?
- 4.3. Предположения закона Архимеда.
- 4.4. Физическая суть явления кавитации.
- 4.5. Для какой цели используется число кавитации?
- 4.6. Постановка задачи течения Куэтта.
- 4.7. Постановка задачи течения Пуазейля.
- 4.8. Какова физическая природа явления смазки?
- 4.9. Предположения постановки задачи движения жидкости в цилиндрических трубах для получения параболического распределения скорости и закона Гагена-Пуазейля.
- 4.10. Физическая природа глиссирования.

**Раздел 5. Задачи аэромеханики**

О ламинарных и турбулентных течениях. Критическое значение числа Рейнольдса. Пограничный слой. Отрыв пограничного слоя. Понятие о вихревой теории. Условия появления вихрей. Образование концевой вихря на профиле. Образование вихревой пелены на крыле конечного размаха. Динамика сжимаемого газа. Скорость звука. Сопло Лавалья. Разрывы непрерывности среды. Физика образования ударных волн.

*Методические указания к изучению раздела*

Литература: [1, раздел 5].

Центральные вопросы: Понятие ламинарных и турбулентных течений. Критическое значение числа Рейнольдса. Основная идея пограничного слоя. Понятие о вихревой теории. Динамика сжимаемого газа.

Контрольные вопросы:

- 5.1. Понятие ламинарного течения.
- 5.2. Понятие турбулентного течения.
- 5.3. Что определяет критическое число Рейнольдса?
- 5.4. Основные предположения теории пограничного слоя.
- 5.5. Какова физико-математическая природа вязкого трения на поверхности обтекаемого тела?
- 5.6. Какова физическая причина отрыва пограничного слоя?
- 5.7. Каковы предположения теоремы Томсона о постоянстве циркуляции?
- 5.8. При каких условиях в сплошной среде могут появляться и исчезать вихри?
- 5.9. Какова физическая природа образования концевой вихря на профиле?
- 5.10. Какова физическая природа образования вихревой пелены на крыле конечного размаха?
- 5.11. Какое свойство газа характеризует скорость звука?
- 5.12. Основная идея сопла Лавалья.
- 5.13. Что терпит разрыв на поверхностях разрыва?
- 5.14. Возможно ли появление поверхностей разрыва в несжимаемой среде?

## 5.15. Физика образования ударных волн.

## 8. ТЕРМИНОЛОГИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Механика сплошной среды  
 Гипотеза сплошности  
 Траектория частицы  
 Линия тока  
 Поток скорости  
 Ротор скорости (вихрь)  
 Циркуляция скорости  
 Внутренние поверхностные силы (силы внутренних напряжений)  
 Идеальная среда  
 Упругая среда  
 Вязкая среда  
 Баротропная среда  
 Несжимаемая среда  
 Совершенный газ  
 Изотропная среда  
 Интеграл Бернулли  
 Полное давление  
 Скоростной напор  
 Статическое давление  
 Теорема Жуковского  
 Ламинарное течение  
 Турбулентное течение  
 Пограничный слой  
 Скорость звука  
 Число Маха  
 Сопло Лавалья  
 Разрыв непрерывности параметров среды.

## 9. ЛЕКЦИОННЫЕ ЗАНЯТИЯ

**Раздел 1.** Введение. Кинематика сплошной среды (10 часов)

Лекция 1. Введение. Основные гипотезы [1, введение, § 1.1].

Лекция 2. Переменные Эйлера и Лагранжа [1, § 1.2].

Лекция 3. Деформация и скорость деформации. [1, § 1.3].

Лекция 4. Термины механики сплошной среды. Уравнение неразрывности [1, §§ 1.4 – 1.5].

Лекция 5. Безвихревое и вихревое движение [1, § 1.6].

**Раздел 2.** Динамика сплошной среды (6 часов)

Лекция 6. Силы и моменты в механике сплошной среды [1, § 2.1].

Лекция 7. Уравнения движения сплошной среды [1, § 2.2].

Лекция 8 – 9. Виды сплошной среды [1, § 2.3].

## 10. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

### **Раздел 3. Основы теории жидкости и газа (14 часов)**

Практическое занятие 1. Уравнения Навье-Стокса [1, § 3.1].

Практическое занятие 2. Уравнения движения вязкой несжимаемой изотропной среды [1, § 3.2]. Уравнения движения идеальной среды [1, § 3.3].

Практическое занятие 3. Интеграл уравнений движения [1, § 3.4].

Практическое занятие 4. Взаимодействие жидкостей и газов с обтекаемыми телами [1, § 3.5].

Практическое занятие 5. Постановка задач в теории жидкости и газа [2, § 3.6].

Практическое занятие 6. Понятие о методах решения задач теории жидкости и газа [2, § 3.7].

### **Раздел 4. Задачи гидромеханики (6 часов)**

Практическое занятие 7. Гидростатика, кавитация, плоские движения [1, §§ 4.1 – 4.2]

Практическое занятие 8. Установившееся движение вязкой жидкости между плоскостями [1, § 4.3].

Практическое занятие 9. Специальные задачи гидродинамики [1, §§ 4.4 – 4.5].

### **Раздел 5. Задачи аэромеханики (10 часов)**

Практическое занятие 10. О ламинарных и турбулентных течениях [1, § 5.1].

Практическое занятие 11. Пограничный слой [1, § 5.2].

Практическое занятие 12. Понятие о вихревой теории [1, § 5.3].

Практическое занятие 13. Динамика сжимаемого газа. [1, § 5.4].

Практическое занятие 14. Динамика сжимаемого газа. [1, § 5.4].

## 11. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ

### 11.1. Лабораторная работа № 1

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Лабораторная работа № 1 (проводится после практического занятия 3, раздел 3 «Основы теории жидкости и газа», тема 3.4 «Интеграл уравнений движения») выполняется на аэродинамической трубе УТ-1 лаборатории аэродинамики кафедры АКПЛА МГТУ ГА. Возможно также использование специального программного обеспечения лабораторного практикума на ПЭВМ. Объем лабораторной работы 4 часа.

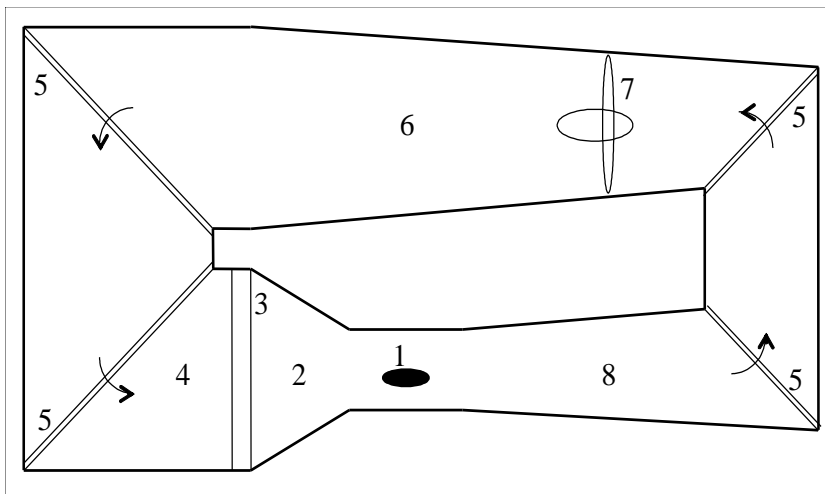
#### **Цель работы**

Изучение методов практического измерения величины скорости воздушного потока в аэродинамической трубе и оценка точности измерения.

### Теоретические основы

Один из основных принципов экспериментальной аэродинамики подсказан природой: например, воздушного змея можно запускать не только при ветре, но и в штиль, если обеспечить его движение относительно воздуха. Суть **принципа обращаемости движения** состоит в предположении, что взаимодействие движущегося тела с покоящейся средой в точности такое же, как при обтекании средой покоящегося тела с той же относительной скоростью. Этот принцип можно рассматривать как проявление принципа относительности. Он позволил создать целое научное направление: экспериментальные исследования в аэродинамических трубах.

*Аэродинамическая труба* представляет собой устройство, создающее воздушный (газовый) поток для исследования его взаимодействия с моделями тел. На рис. 1 показана схема **замкнутой** аэродинамической трубы **постоянного** действия с **закрытой** рабочей частью. Цифрами на схеме обозначены:



- 1 – рабочая часть с моделью;
- 2 – конфузтор (сопло);
- 3 – спрямляющая решетка (хонейкомб);
- 4 – форкамера;
- 5 – направляющие решетки;
- 6 – обратный канал;
- 7 – вентилятор;
- 8 – диффузор.

Рис. 1.

**Незамкнутые** (открытые) аэродинамические

трубы отличаются отсутствием направляющих решеток (5) и обратного канала (6). **Открытые** рабочие части не имеют стенок и связаны с атмосферой. В аэродинамических трубах **прерывного** действия поток создается не вентилятором, а с помощью разности давлений между воздушными (газовыми) баллонами и атмосферой.

Модель исследуемого тела помещается в рабочую часть с помощью державок, крепящих ее к *аэродинамическим весам*. В зависимости от конструкции весы позволяют замерять от одной до всех шести координат векторов силы и момента, т.е. бывают от *однокомпонентных* до *шестикомпонентных*. В рабочей части размещается и другая аппаратура, позволяющая замерять скорость, давление и температуру потока.

Аэродинамическая труба УТ-1 лаборатории аэродинамики кафедры АКПЛА МГТУ ГА – с открытой рабочей частью, без диффузора (8), вентилятор (7) в ней расположен на входе в форкамеру (4). Основные ее характеристики:

– скорость потока в рабочей части      2 м/с – 60 м/с

– рабочая часть	открытая
– длина рабочей части	1000 мм
– выходное сечение	600 мм × 400 мм
– длина модели	до 400 мм
– мидель модели	до 1800 мм <sup>2</sup>
– мощность привода вентилятора	45 кВт

Как известно [1, § 3.4], вдоль произвольной **линии тока** в установившемся потоке **идеальной несжимаемой** среды при **отсутствии внешних массовых сил** соблюдается *интеграл Бернулли* в виде

$$\text{const} \equiv p_0 = p + \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

где  $p_0$  – *полное давление*;  $p$  – *статическое давление* (или просто *давление*, которое передается во всех направлениях неизменным);  $\frac{\rho V^2}{2} = q$  – *скоростной напор* (*динамическое давление*). Из этого уравнения видно, что статическое давление может равняться полному только в такой точке на линии тока, в которой скорость движения частиц обращается в ноль. Такие точки носят название *критических* точек или точек *торможения*. В свободном потоке в критических точках линии тока могут только разветвляться как, например, в той точке на поверхности обтекаемого тела, которая обращена строго навстречу набегающему потоку. Разветвленные части такой линии тока после этого обтекают поверхность тела с разных сторон.

Таким образом, для определения скорости движения частиц среды в определенной точке пространства необходимо измерить разность полного и статического давлений, определить плотность среды и провести необходимые вычисления по формуле

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_0 - p)} = \sqrt{\frac{2}{\rho}q}. \quad (2)$$

Для выявления значений полного и статического давлений в определенной точке течения необходимо в эту точку поместить какой-то измеритель. В качестве такого измерителя используется *трубка Пито-Прандтля* (рис. 2), нашедшая широкое применение в авиации под названием *приемника воздушного давления* (ПВД).

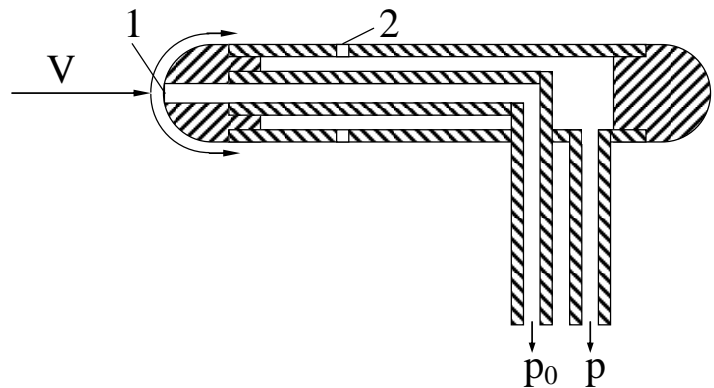


Рис. 2.

Этот тонкий прибор располагают так, чтобы его "носик" (точка 1 на рис. 2) смотрел навстречу потоку. Тогда в этом месте создаются все условия для образования критической точки. Действительно, в этом месте поток должен затормозиться.

мозиться, линия тока должна разделиться и обеспечить обтекание прибора по бокам. Течение газа внутри центральной трубки и его движение по трубке невозможны, так как она соединяется с измерительным прибором давления. Поэтому газ здесь находится в покое под тем же давлением, которое создано потоком в критической точке 1, т.е. под полным давлением  $p_0$ . Это давление, распространяясь во всех направлениях неизменным, подводится к измерительному прибору давления. К нему же подводится давление таким же образом покоящегося газа, который заполнил периферийную часть ПВД через боковые отверстия 2. Последние расположены своим срезом параллельно линиям тока, обтекающим трубку, не искажают их и поэтому заполняются газом под статическим давлением  $p$  ("не ощущают" скоростного напора и "снимают" лишь статическое давление).

Однако, как бы мал ни был ПВД, он неизбежно вносит некоторые искажения в набегающий поток среды. Поэтому в формулу (2) вносят поправочный коэффициент насадка  $\xi$

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_0 - p)}\xi = \sqrt{\frac{2}{\rho}q}. \quad (3)$$

На летательных аппаратах во время полета он может оказаться под разными углами (атаки) к потоку, внося уже значительные искажения, которые пилот должен учитывать по специальным таблицам. В лабораторной работе проводится исследование влияния угла атаки  $\alpha$  ПВД на результаты измерения скорости потока. Для этого вычисляются относительные погрешности для скоростного напора и скорости по формулам

$$\Delta q = \frac{|q_{\alpha=0} - q|}{q_{\alpha=0}} 100\%; \quad \Delta V = \frac{|V_{\alpha=0} - V|}{V_{\alpha=0}} 100\%. \quad (4)$$

Плотность воздуха  $\rho$  для формулы (2) непосредственно измерить невозможно, но ее можно вычислить, используя предположение (весьма близкое к истине) о том, что воздух – совершенный газ с постоянной теплоемкостью, который подчиняется уравнению состояния (баротропии) Клапейрона-Менделеева

$$\rho = \frac{p_{\infty}\mu}{RT_{\infty}} = \frac{p_{\infty}}{BT_{\infty}}, \quad (5)$$

где  $B = \frac{R}{\mu} = 287,05 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$  – удельная газовая постоянная для воздуха,  $p_{\infty}$  и  $T_{\infty}$

– давление и абсолютная температура покоящегося воздуха, используемого аэродинамической трубой. Интеграл Бернулли (1) предполагает воздух несжимаемой средой, что для скоростей в УТ-1 вполне допустимо. Поэтому измерить температуру и давление в помещении лаборатории (при неработающей аэродинамической трубе) можно в любой точке обычными бытовыми приборами. Следует только учесть, что расчеты необходимо вести в СИ и что 760 мм. рт. ст. =  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а  $0^{\circ}\text{C} = 273,15^{\circ}\text{K}$ .

Для замера разности давлений газа обычно используется манометр, например, жидкостный, который показывает эту величину в единицах удельного веса применяющейся жидкости  $\gamma$ , умноженных на разность столбов жидкости  $h + \Delta h$

$$p_0 - p = (h + \Delta h) \gamma \quad (6)$$

(рис. 3 слева, где показана схема обычного U-образного жидкостного манометра). Удельный вес жидкости в манометре зависит от ее температуры согласно закону температурного расширения

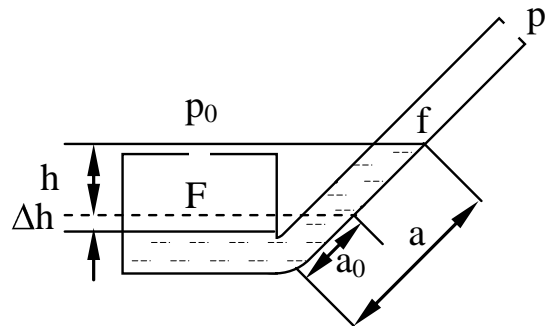
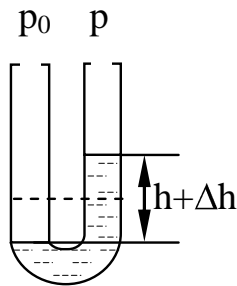


Рис. 3.

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + \beta(t - t_0)}, \quad (7)$$

где  $\gamma_0 = 7793 \text{ Н/м}^3$  – удельный вес спирта в приборе при температуре  $t_0 = 15^\circ\text{C}$ ;  $\beta = 0,0011 \text{ 1/град}$  – коэффициент объемного расширения спирта.

В целях повышения точности считывания показаний манометра по положению мениска жидкости в измерительной трубке применяют чашечные микроманометры (рис. 3 справа). Здесь приняты следующие обозначения:

$h$  – высота столба жидкости в измерительной трубке от начального положения;

$\Delta h$  – понижение уровня жидкости в бачке от начального положения;

$a$  – показание мениска по шкале измерения подведенного давления;

$a_0$  – показание мениска по шкале измерения при нулевом перепаде давления.

Тогда  $h$  можно определить по показаниям мениска по шкале измерения

$$h = (a - a_0) \sin \varphi, \quad (8)$$

где  $\varphi$  – угол наклона измерительной трубки. А  $\Delta h$  можно рассчитать из условия равенства объемов жидкости в трубке и в бачке

$$\Delta h = (a - a_0) \frac{f}{F}, \quad (9)$$

где  $f$  – площадь поперечного сечения внутренности измерительной трубки;

$F$  – площадь поверхности жидкости в бачке.

Отсюда

$$q = p_0 - p = \left[ (a - a_0) \sin \varphi + (a - a_0) \frac{f}{F} \right] \gamma \mu = (a - a_0) \left[ \sin \varphi + \frac{f}{F} \right] \gamma \mu \equiv (a - a_0) \gamma \mu \xi_K, \quad (10)$$



где  $K = \sin \varphi + \frac{f}{F}$  – коэффициент микроманометра, значения которого для каждого угла наклона измерительной трубки (он может изменяться) указаны в техническом паспорте прибора;

$\xi$  – коэффициент насадка;

$\mu$  – коэффициент поля трубы, учитывающий неравномерности поля скорости в аэродинамической трубе и, таким образом, вносящий поправку на несовпадение места установки измерителя и расположения испытуемой модели. Этот коэффициент является паспортной характеристикой каждой аэродинамической трубы.

### Порядок выполнения работы

1. После изучения теоретических основ подготовить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

– титульный лист следующего содержания:

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ  
Кафедра аэродинамики, конструкции  
и прочности летательных аппаратов

Отчет защищен  
Преподаватель

\_\_\_\_\_

(должность, ФИО)

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

ОТЧЕТ  
о лабораторной работе  
Измерение скорости воздушного потока  
по дисциплине  
«Аэромеханика»

Работу выполнил студент

\_\_\_\_\_

(ФИО)

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

\_\_\_\_\_

(шифр)

- тезисы теоретического материала (основные определения и понятия; рисунки схем ПВД и микроманометра);
- рабочие формулы, по которым проводятся расчеты;
- расчетные или измеренные, не изменяющиеся в процессе эксперимента, газодинамические параметры воздушного потока;
- таблицу с экспериментальными и расчетными данными (количество строк в таблице зависит от количества реализуемых углов атаки и уточняется у преподавателя):

Таблица

Результаты измерения скорости воздушного потока

$\alpha$	$a$	$a - a_0$	$q$	$V$	$\Delta q$	$\Delta V$
°						
1						
2						
...						

- графики;
  - выводы.
2. Ознакомиться со схемой и конструкцией ПВД.
  3. Ознакомиться со схемой и конструкцией микроманометра.
  4. Установить микроманометр с помощью микрометрических винтов в горизонтальное положение, выставив при помощи винта на крышке бачка манометра уровень жидкости в трубе на нулевую отметку.
  5. Записать нулевое показание микроманометра.
  6. Замерить барометрическое давление и температуру воздуха в лаборатории.
  7. Произвести измерения, снимая показания микроманометра при различных углах атаки ПВД.
  8. Вычислить плотность воздуха.
  9. Вычислить удельный вес рабочей жидкости в микроманометре.
  10. Вычислить константы в рабочих формулах.
  11. Провести вычисления и заполнить таблицу.
  12. Построить графики зависимостей  $q = f(a)$ ,  $V = f(a)$ ,  $\Delta q = f(a)$ ,  $\Delta V = f(a)$ .
  13. Определить диапазоны углов атаки, обеспечивающие относительную погрешность для  $q$  и  $V$  не более 2% и 5% соответственно.
  14. Провести анализ результатов и сделать выводы о точности метода измерения скорости.

### Контрольные вопросы

1. Что называется аэродинамической трубой?
2. Объясните устройство и назначение элементов аэродинамической трубы.
3. В чем суть принципа обращаемости движения?
4. Вдоль какого объекта выполняется интеграл Бернулли?

5. Какие свойства газа лежат в основе применимости используемого в работе интеграла Бернулли?
6. Что такое полное давление?
7. Что такое статическое давление?
8. Что такое скоростной напор или динамическое давление?
9. Что такое критическая точка?
10. Объясните устройство ПВД.
11. Каковы требования к размерам ПВД и его позиционированию?
12. Как можно определить плотность воздуха?
13. Какие предположения лежат в основе уравнения состояния Клапейрона-Менделеева?
14. Каковы принцип и устройство жидкостного манометра?
15. Каковы особенности микроманометра?

## 11.2. Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВИДОВ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБАХ

Лабораторная работа № 2 (проводится после практического занятия 10, раздел 5 «Задачи аэромеханики», тема 5.1 «О ламинарных и турбулентных течениях») выполняется в лаборатории гидравлики кафедры АКПЛА МГТУ ГА. Возможно также использование специального программного обеспечения лабораторного практикума на ПЭВМ. Объем лабораторной работы 4 часа

### **Цель работы**

Изучение ламинарного и турбулентного видов течения жидкости и условий их взаимного перехода.

### **Теоретические основы**

Из наблюдений известно, что далеко не всегда движение среды имеет вид упорядоченных линий тока, сливающихся в трубки тока такого же упорядоченного движения. Очень часто эта упорядоченность нарушается и все перемешивается. Спокойные упорядоченные *слоистые* движения среды без нерегулярного перемешивания поперек направления основного движения называются *ламинарными*. Беспорядочные, *нерегулярные*, неустановившиеся движения, при которых частицы среды кроме скорости основного (среднего) направленного движения имеют еще и беспорядочно накладываемые на нее существенные возмущения (пульсации), называются *турбулентными*.

Уже из самого определения этих видов движения среды становится ясно, что причина такой двойственности кроется в некотором уровне энергии, с которой частицы взаимодействуют друг с другом. Из основных параметров движения вязкой среды в трубах или вокруг твердого тела: плотности  $\rho$ , скорости  $V$ , характерного размера  $l$ , кинематического коэффициента вязкости  $\mu$  можно составить только одну безразмерную комбинацию – число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho V l}{\mu} = \frac{V l}{\nu}. \quad (11)$$

Это число характеризует уровень взаимодействия частиц: чем больше плотность, скорость, характерный размер и чем меньше вязкость, тем больше хаоса вносят эти взаимодействия в общее среднее движение. При большом значении числа Рейнольдса этот хаос становится определяющим, частицы, наподобие отдельных атомов, движутся беспорядочно, "не обращая внимания на соседей", практически не "успокаивают" трением соседние частицы, а только соударяются с ними. (Это можно сравнить с образным представлением разреженной массы людей, каждый из которых движется в своем направлении и лишь изредка сталкивается с соседом – это образ турбулентного движения. Но если толпа людей очень плотная, отдельному человеку трудно куда-либо из нее пробиться, и толпа движется почти только "сплошняком", как единое целое – это образ ламинарного движения.) Бесконечное значение числа Рейнольдса соответствует идеальной жидкости (жидкости без внутреннего трения).

Для каждого вида движения среды существует свое определенное значение критического числа Рейнольдса  $Re_{кр}$ , ниже которого движение ламинарное, а выше – турбулентное.  $Re_{кр}$  характеризует границу потери устойчивости ламинарного движения. Однако  $Re_{кр}$  весьма неустойчиво, так как подвержено влиянию таких факторов, как шероховатость, вибрации, возмущения скорости. Поэтому в реальных условиях переход (при увеличении скорости) от ламинарного режима к турбулентному происходит в некотором диапазоне значений  $Re_{кр}$ . Кроме того, переход от ламинарного режима к турбулентному происходит, как правило, при несколько большем значении числа Рейнольдса, чем обратный переход. Скорость, при которой ламинарный режим переходит в турбулентный, называется верхней критической скоростью  $V_{кр\ верхн}$ , ей соответствует верхнее критическое число Рейнольдса  $Re_{кр\ верхн}$ . Скорость, при которой турбулентный режим переходит в ламинарный, называется нижней критической скоростью  $V_{кр\ нижн}$ , ей соответствует нижнее критическое число Рейнольдса  $Re_{кр\ нижн}$ .

Лабораторная работа на установке, подобная той, которая использовалась в XIX веке английским физиком Осборном Рейнольдсом, позволяет наблюдать ламинарный и турбулентный режимы течения воды в стеклянных трубах (1 на рис. 4) разного диаметра. Для этого вода подкрашивается с помощью краски, подаваемой по трубам 3, закрываемым кранами 4. Скорость течения воды по трубам из бака 2 регулируется расходом с помощью кранов 5.

Эксперимент необходимо провести таким образом, чтобы медленным увеличением скорости потока в разных трубах добиться изменения характера течения с ламинарного на турбулентный, о чем можно судить по размыванию струй краски. Тем самым зафиксировать  $V_{кр\ верхн}$  и  $Re_{кр\ верхн}$ . При уменьшении скорости потока аналогичным образом добиться перехода турбулентного режима течения в ламинарный и определить  $V_{кр\ нижн}$  и  $Re_{кр\ нижн}$ .

Для определения кинематического коэффициента вязкости воды использовать формулу Пуазейля

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot (t^{\circ}C) + 0,000221 \cdot (t^{\circ}C)^2} \cdot 10^{-4} \frac{M^2}{с}. \quad (12)$$

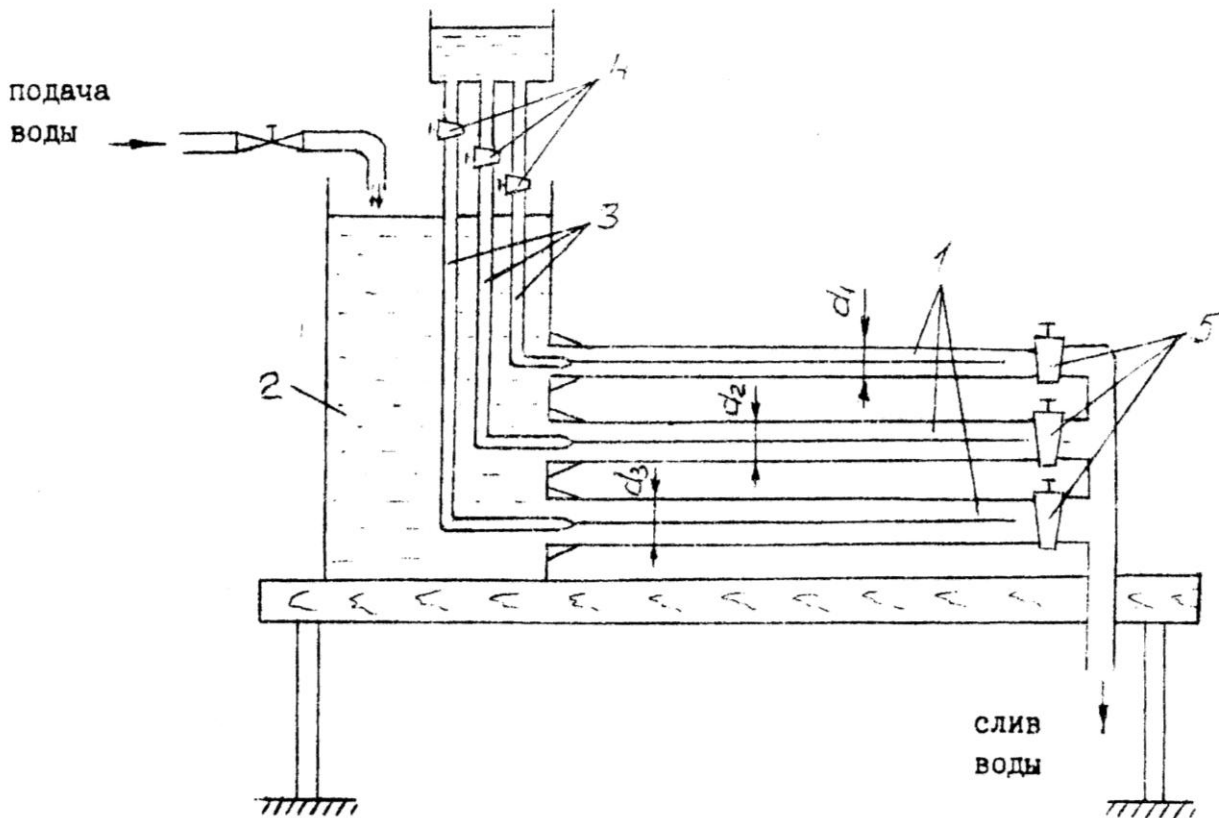


Рис. 4.

### Порядок выполнения работы

1. После изучения теоретических основ подготовить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- титульный лист, аналогичный описанному для лабораторной работы № 1 на стр. 17;
- тезисы теоретического материала (основные определения и понятия, рисунки);
- рабочие формулы, по которым проводятся расчеты;
- таблицу с экспериментальными и расчетными данными (количество строк в таблице уточняется у преподавателя):

Таблица

### Результаты эксперимента

Номер опыта	Объем воды, поступающей в мерный бак ( $W, \text{м}^3$ )	Время наполнения мерного бака ( $t, \text{с}$ )	Расход воды ( $Q, \text{м}^3/\text{с}$ )	Диаметр трубы ( $d, \text{м}$ )	Площадь поперечного сечения трубы ( $S, \text{м}^2$ )	Средняя скорость движения воды ( $V, \text{м}/\text{с}$ )	Температура воды ( $t^\circ\text{C}$ )	Кинематический коэффициент вязкости ( $\nu, \text{м}^2/\text{с}$ )	Число Рейнольдса $Re$	Режим движения
1										

– ВЫВОДЫ.

2. Ознакомиться со схемой и конструкцией экспериментальной установки.

3. Открыть кран 5 на одной из труб 1 и установить небольшую скорость движения воды.

4. Открыть кран 4 на трубке 3 так, чтобы подкрашенная жидкость вытекала тонкой струйкой.

5. Определить расход жидкости объемным способом с помощью секундомера.

6. Медленно открывая кран 5, установить новый бóльший расход жидкости и повторить измерения.

Таким образом проводятся 2 опыта при ламинарном режиме.

7. Увеличением скорости движения жидкости с помощью крана 5 добиться изменения характера движения – размывания струйки подкрашенной жидкости, т.е. перехода от ламинарного режима к турбулентному.

8. Определить расход жидкости, соответствующий критической скорости и критическому числу Рейнольдса для трубопроводов трех диаметров.

9. Провести 2 опыта для турбулентного режима при различных значениях скорости течения.

10. Уменьшением расхода с помощью крана 5 найти момент перехода от турбулентного режима к ламинарному.

11. Это же проделать для двух других стеклянных трубопроводов.

12. Записать параметры опытов ( $W$ ,  $t$ ,  $d$ ) в таблицу.

13. Вычислить кинематический коэффициент вязкости воды, принимая температуру равной  $18^{\circ}\text{C}$ .

14. Провести вычисления и заполнить таблицу.

15. Провести анализ результатов и сделать выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое ламинарное движение среды?

2. Что такое турбулентное движение среды?

3. Как определяется число Рейнольдса?

4. Что характеризует число Рейнольдса?

5. Какому значению числа Рейнольдса соответствует идеальная среда?

6. Каким значениям числа Рейнольдса соответствует ламинарное движение среды?

7. Каким значениям числа Рейнольдса соответствует турбулентное движение среды?

8. Что такое критическое число Рейнольдса?

9. Что такое верхнее критическое число Рейнольдса?

10. Что такое нижнее критическое число Рейнольдса?

11. Что такое верхняя критическая скорость?

12. Что такое нижняя критическая скорость?

