Казахский национальный университет имени аль-Фараби

Факультет механико-математический

Кафедра механики

Образовательная программа «6B05403 – Механика» · бакалавриат

Дисциплина: Экспериментальная механика

Лекция № 1

Введение. Физические свойства газов. Сжимаемость. Вязкость

Преподаватель: Туралина Динара Елеусизовна

к.ф.-м.н., ассистент-профессор

Алматы, 2026 год

Предмет экспериментальной аэромеханики

Задачи аэромеханики встречаются во многих областях науки и техники. Главное направление — изучение **относительного движения жидкости (газа) и твёрдого тела**.

Внешнее обтекание

Тело полностью погружено в жидкость или газ:

- самолёты
- подводные лодки
- ракеты и т. п.

Внутренние течения

Жидкость или газ течёт внутри каналов:

- газопроводы и вентиляционные системы
- аэродинамические трубы
- компрессоры, турбины реактивных двигателей

Теоретическая аэромеханика достигла больших успехов, но не всегда может решить многообразные практические задачи техники — отсюда необходимость эксперимента.

Роль эксперимента в аэромеханике

Экспериментальные методы аэромеханики по существу являются **самостоятельной важной дисциплиной**.

Проверка теорий

Эксперимент подтверждает или опровергает уже созданные теоретические модели.

Источник новых теорий

Факты, обнаруженные опытным путём, становятся основой для более точных теорий.

Развитие методов

С развитием теории совершенствуются экспериментальные установки, методики и измерительная аппаратура.

Теория и эксперимент развиваются **совместно**: каждый шаг теории ставит новые задачи перед экспериментом, а эксперимент — перед теорией.

Области скоростей в аэромеханике

С момента появления летательных аппаратов аэромеханика изучала всё более высокие скорости. Условно выделяют пять областей, которые определили **типы установок и методику исследований**:



1. Малые дозвуковые 2. Большие дозвуковые 3. Околозвуковые 4. Сверхзвуковые 5. Гиперзвуковые (большие сверхзвуковые)

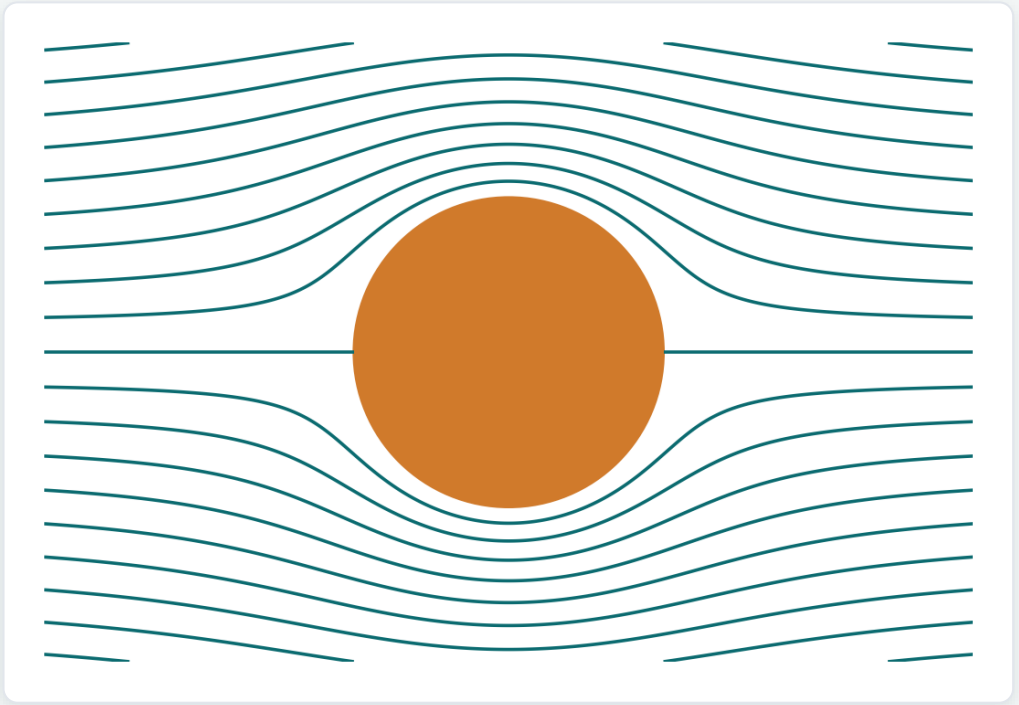
Границы областей по числу Маха условны и приведены ориентировочно (подробнее — лекция 5).

Малые дозвуковые скорости

Исследования **Н. Е. Жуковского, Л. Прандтля** и других учёных заложили основу экспериментальной аэродинамики.

- Промышленная аэродинамика, наземный транспорт, взлётно-посадочные режимы самолётов
- Небольшие трубы малых скоростей есть почти в каждом университете
- Крупные трубы НИИ позволяют испытывать самолёты в натуру; мощность — до десятков и сотен тысяч кВт

Методы малых скоростей — измерение сил, давлений, скоростей и визуализация — применяются и в других диапазонах.



Линии тока при обтекании цилиндра

Большие дозвуковые и околозвуковые скорости

Большие дозвуковые

Активно развиваются с середины 1930-х годов.

- резко растёт потребная мощность установок
- нужно изучать одновременно **вязкость и сжимаемость** воздуха
- строятся трубы **переменной плотности**
- автоматические и дистанционные методы измерения и управления

Околозвуковые

Выделены особо, так как:

- при обтекании тел возникают **новые аэромеханические явления**
- для их изучения потребовались новые устройства в аэродинамических трубах
- разработана методика учёта погрешностей, наиболее резко влияющих на результаты опытов

Методы измерения в целом те же, что и при малых скоростях, но существенно расширился диапазон измеряемых параметров и усложнилась аппаратура.

Сверхзвуковые и гиперзвуковые скорости

Сверхзвуковые

- дальнейшее усложнение установок
- мощность — десятки и сотни тысяч киловатт
- автоматические методы измерений и обработки результатов

Гиперзвуковые

- исследуются сравнительно недавно
- высокие температуры газа
- физико-химические процессы в газе (диссоциация, ионизация)
- установки, основанные на новых принципах

Каждая новая область скоростей вносит свою специфику в методику измерений и требует новых типов экспериментальных установок.

Сжимаемость газа

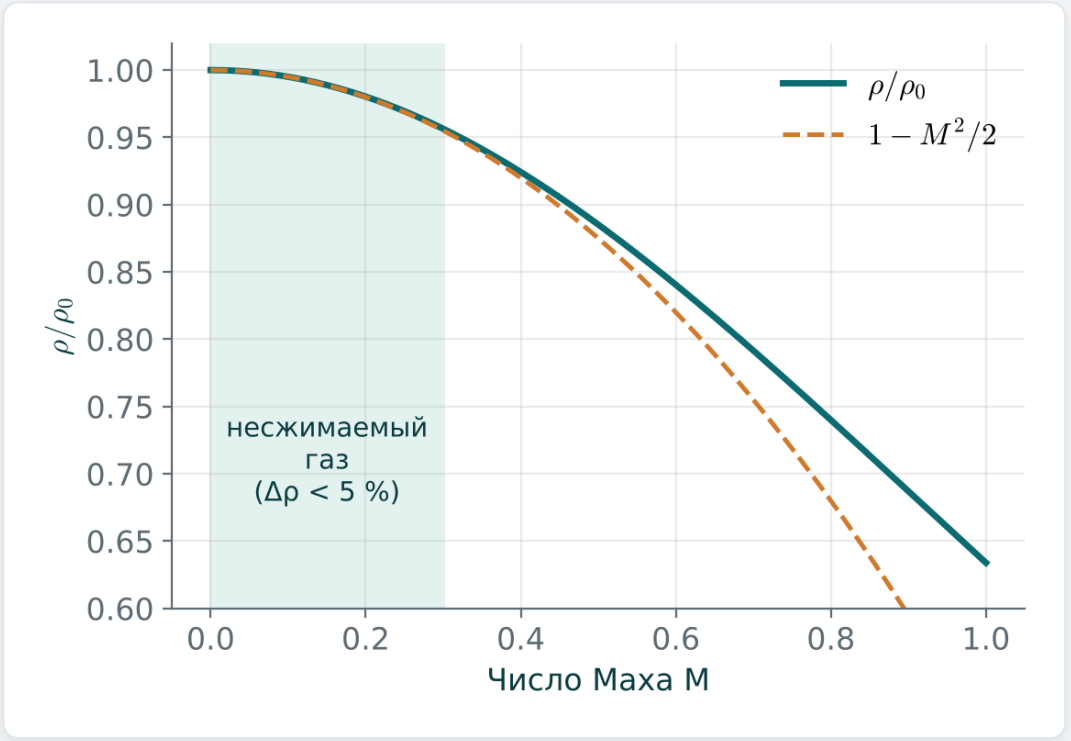
Сжимаемость — свойство газа изменять плотность при изменении давления. Её мерой служит число Маха:

$$a = \sqrt{kRT}, \qquad M = \frac{V}{a} \tag{1}$$

При изоэнтропическом торможении плотность связана с M:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{-\frac{1}{k-1}} \tag{2}$$

При M < 0,3 плотность меняется менее чем на 5 % — газ можно считать несжимаемым.



Изменение плотности воздуха (k = 1,4)

Вязкость газа

Вязкость — свойство газа сопротивляться сдвигу слоёв. Касательное напряжение (закон Ньютона):

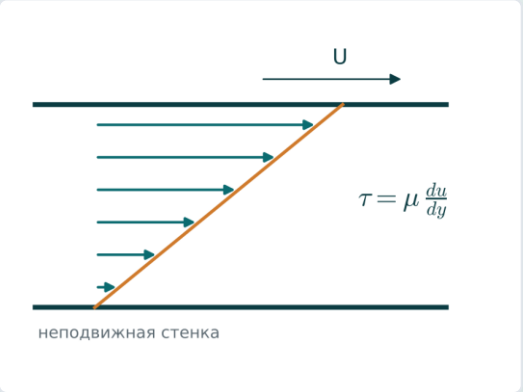
$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \qquad \nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{3}$$

μ — динамическая вязкость, Па·с; ν — кинематическая вязкость, м²/с. Для воздуха при 15 °C: μ ≈ 1,79·10⁻⁵ Па·с, ν ≈ 1,46·10⁻⁵ м²/с.

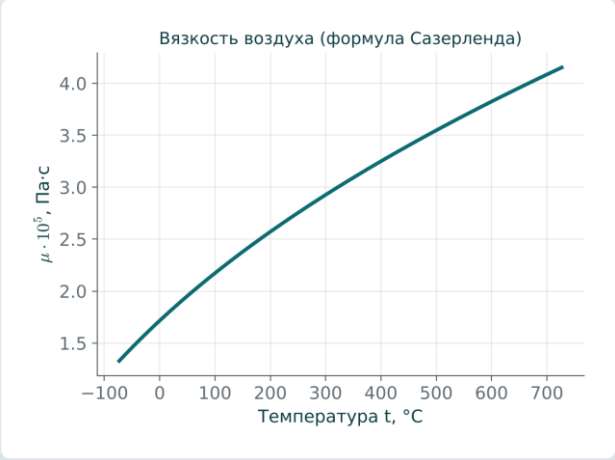
Зависимость от температуры (формула Сазерленда):

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \tag{4}$$

У газов вязкость растёт с температурой, у жидкостей — убывает.



Сдвиговое течение между пластинами



Что измеряют в аэродинамическом эксперименте

Курс «Экспериментальная механика» рассматривает основные установки и методы измерений:

Установки

Аэродинамические трубы: устройство, типы, классификация (лекции 3–5).

Давление

Статическое и полное давление, приёмники давления (лекция 6).

Скорость и направление

Комбинированные и угломерные насадки, тарировка (лекции 7–8).

Температура

Статическая температура и температура торможения, термопары (лекция 9).

Визуализация

Дым, нити, масляные плёнки, сублимация (лекция 10).

Подобие

Перенос результатов с модели на натуру, критерии подобия (лекция 2).

Заключение и вопросы для самоконтроля

Выводы

1. Экспериментальная аэромеханика изучает обтекание тел и течения в каналах.
2. Эксперимент проверяет теории и служит источником новых теорий.
3. Выделяют пять областей скоростей: от малых дозвуковых до гиперзвуковых.
4. Сжимаемость характеризуется числом Маха; при $M < 0{,}3$ газ считают несжимаемым.
5. Вязкость описывается законом Ньютона $\tau = \mu\, du/dy$; у газов μ растёт с T.

Контрольные вопросы

1. Какие две основные группы задач решает аэромеханика?
2. Почему эксперимент — самостоятельная дисциплина?
3. Назовите пять областей скоростей и их особенности.
4. Чем аэродинамика больших дозвуковых скоростей отличается от малых?
5. Что такое число Маха и как оно связано со сжимаемостью?
6. Как вязкость газа зависит от температуры?