Казахский национальный университет имени аль-Фараби

Факультет механико-математический

Кафедра механики

Образовательная программа «6B05403 – Механика» · бакалавриат

Дисциплина: Экспериментальная механика

Лекция № 6

Давление. Способы измерения давления. Статическое и полное давление. Приёмники давления

Преподаватель: Туралина Динара Елеусизовна

к.ф.-м.н., ассистент-профессор

Алматы, 2026 год

Абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление

Абсолютное давление P — полное давление, под которым находится жидкость, газ или пар:

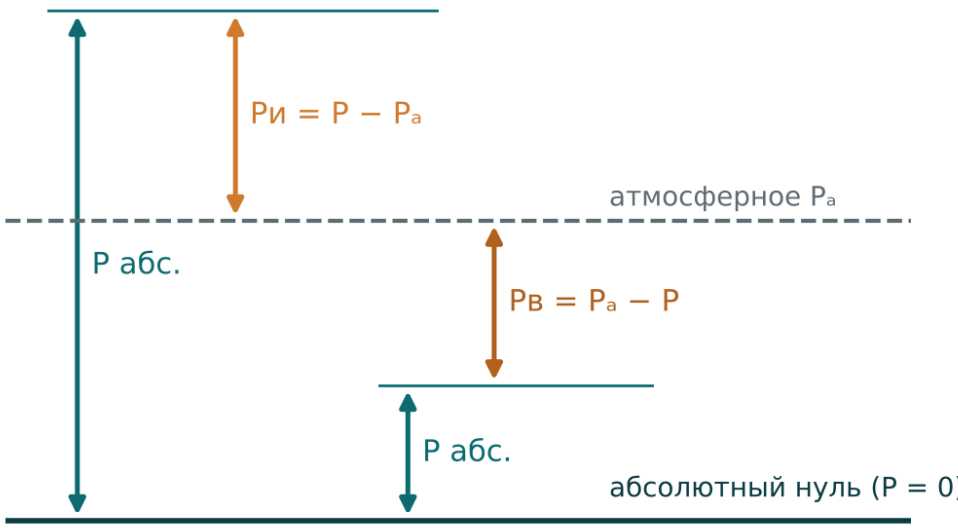
$$P = P_и + P_a \quad (1)$$

Избыточное давление — разность абсолютного давления (большего атмосферного) и атмосферного:

$$P_и = P - P_a \quad (2)$$

Вакуумметрическое давление (разрежение) — разность атмосферного и абсолютного (меньшего атмосферного):

$$P_в = P_a - P \quad (3)$$



Шкалы давления

Приборы для измерения давления

Прибор	Что измеряет
Барометр	Атмосферное (барометрическое) давление
Манометр абсолютного давления	Абсолютное давление
Манометр избыточного давления / вакуумметр	Избыточное / вакуумметрическое давление
Мановакуумметр	Вакуумметрическое и избыточное давление
Напоромер / тягомер	Малое избыточное давление / малое разрежение газа
Тягонапоромер	Малые давления и разрежения газа (например, в топке котла)
Микроманометр	Очень малые давления и незначительные разности давлений
Дифференциальный манометр	Разность давлений

Единицы давления

В системе СИ давление измеряется в **паскалях**: 1 Па = 1 Н/м² — давление силы 1 Н на площадь 1 м².

Паскаль

1 Па = 1 Н/м²

1 кПа = 10^3 Па

1 МПа = 10^6 Па

кгс/м² (МКГСС)

1 кгс/м² ≈ 9,81 Па

≈ 1 мм вод. ст.

Техническая атмосфера

1 ат = 1 кгс/см²

= 98 066,5 Па

Миллиметр ртутного столба

1 мм рт. ст. ≈ 133,3 Па

760 мм рт. ст. ≈ 101 325 Па

Давление в аэродинамическом эксперименте

Важнейшие параметры аэродинамического эксперимента: **давление, температура, скорость и направление потока**. Давление совершенного газа на стенку — результат столкновения молекул газа со стенкой. Измеряя давление на поверхности тела, можно найти действующие силы, местную скорость и скорость набегающего потока.

Статическое давление

Давление, которое действовало бы на стенку тела, **движущегося вместе с потоком**.

Полное давление

Давление **изоэнтропически заторможенного** газа (давление торможения).

Измерение статического давления

Прибор, движущийся с потоком, практически неосуществим, поэтому используют **неподвижный насадок или дренажное отверстие**:

- отверстие сверлят нормально к стенке там, где линии тока не искривлены и параллельны набегающему потоку
- лучшие условия — стенка с прямолинейными образующими
- в аэродинамической трубе — отверстия на стенке в начале рабочей части

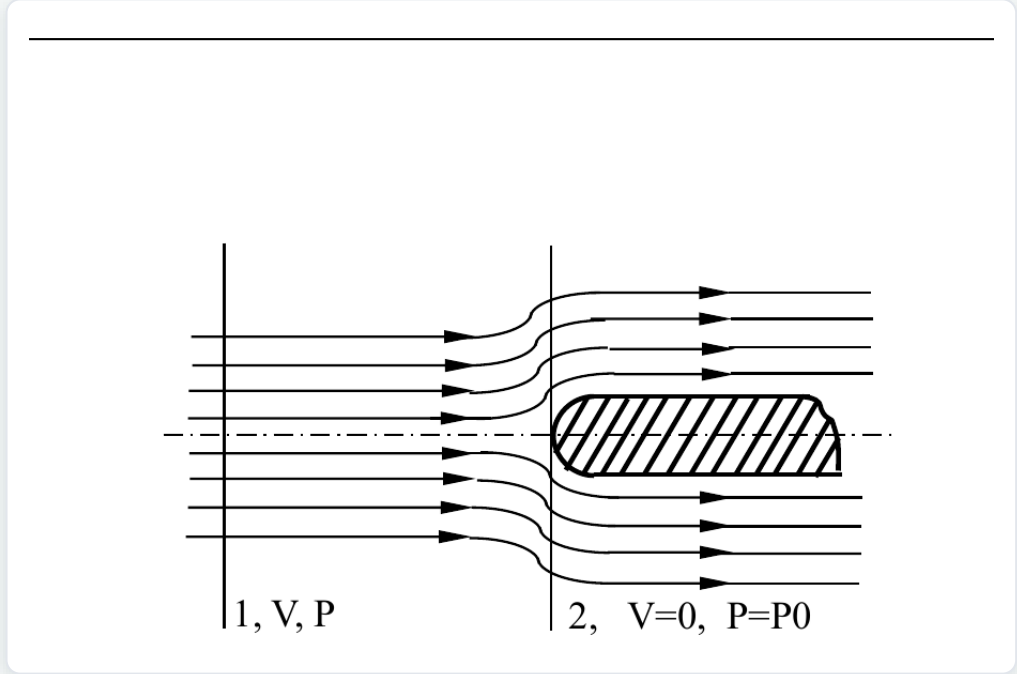


Рис. 4.1. Обтекание тела потенциальным потоком

В критической точке тела поток полностью тормозится — там давление равно полному.

Приёмники статического давления

Первая группа

Насадки небольшой протяжённости вдоль потока. Отверстия расположены там, где давление близко к статическому, но велик градиент давления (на цилиндре — под определённым углом к потоку).

Сильно зависят от Re и M, чувствительны к ошибкам положения отверстий.

Вторая группа

Насадки с участком поверхности, образующие которого параллельны потоку (диск, осесимметричное тело). Отверстия — там, где начальные возмущения уже затухли.

Наиболее распространены.

Характеристика приёмника определяется тарировкой (P — истинное статическое давление, P_H — показание манометра):

$$\xi = \frac{P_H - P}{\rho V^2/2} \qquad \text{или} \qquad \xi' = \frac{P_H - P}{P} \tag{4}$$

Закон Бернулли — основа пневмометрии

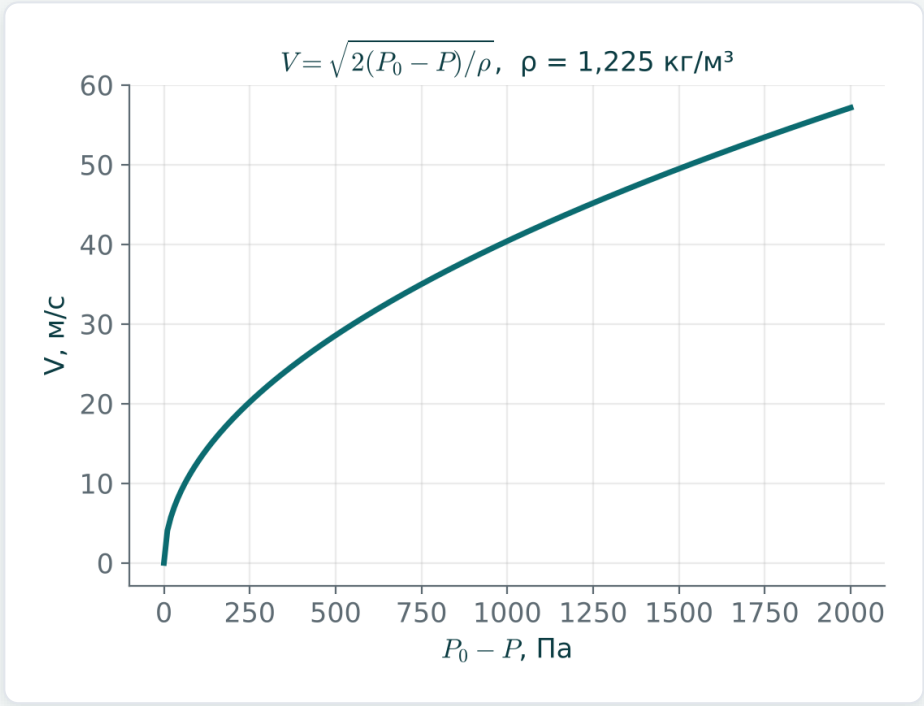
Работа приёмников давления основана на законе Бернулли. Для стационарного течения идеальной несжимаемой жидкости вдоль трубки тока:

$$\frac{\rho V^2}{2} + P = \text{const} \tag{4.1}$$

Из условия в критической точке (V = 0, P = P_0):

$$P_0 = P + \frac{\rho V^2}{2} \tag{4.2}$$

$$V = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho}} \tag{4.3}$$



Скорость воздуха по перепаду $P_0 - P$

$\rho V^2/2$ — динамический напор, P_0 — полное, P — статическое давление.

Трубка Прандтля

Статическое давление во внутренних точках потока в трубах малых скоростей измеряют **цилиндрическим насадком Прандтля** — осесимметричным телом со скруглённой головкой.

- состоит из головной части и державки
- на расстоянии (3–8)D от головки возмущения затухают
- державка крепит насадок и выводит давление к манометру
- державка подтормаживает поток и повышает давление вблизи отверстий

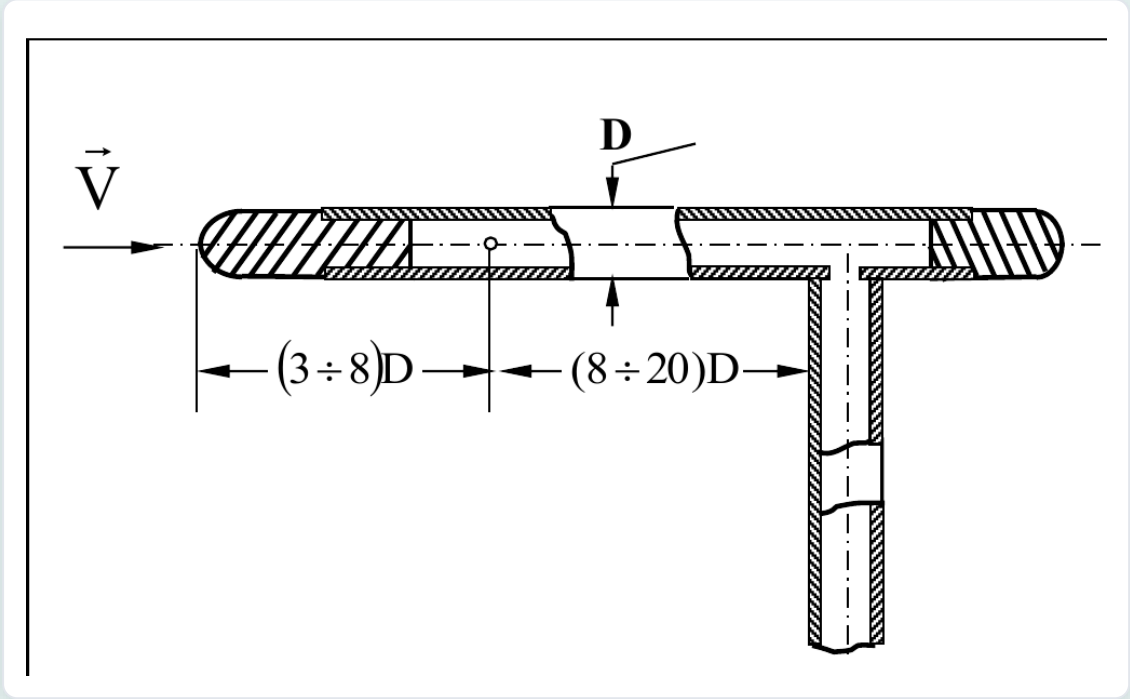


Рис. 4.2. Схема трубки Прандтля

Отверстия располагают там, где влияния головки и державки взаимно компенсируются.

Погрешности насадка Прандтля

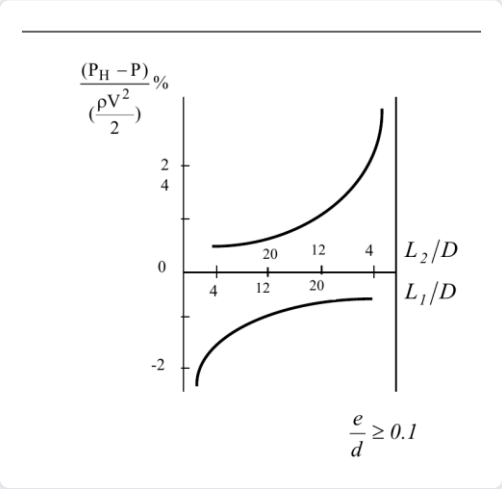


Рис. 4.3. Влияние головной части и державки

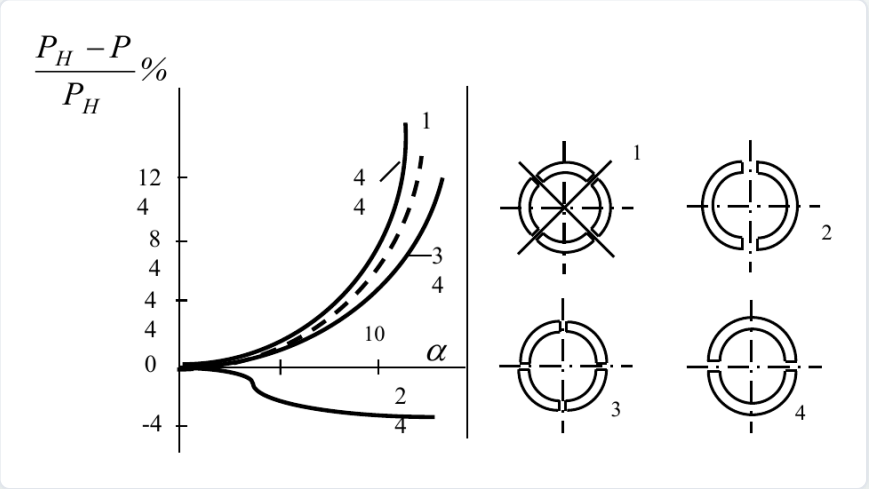


Рис. 4.4. Влияние угла скоса потока

• Вязкость в пограничном слое у стенки вносит погрешность, зависящую от числа Re.

• Каждый насадок имеет индивидуальные особенности изготовления — их учитывают **коэффициентом тарировки**, полученным в аэродинамической трубе.

• Насадок чувствителен к углу скоса α: линии тока искажаются у отверстий.

• Делают несколько отверстий (2–4) диаметром ≈ D/10 — давление внутри осредняется.

• Наименьшая погрешность — у двух отверстий в плоскости скоса.

Измерение полного давления. Трубка Пито

Торможение газа вдоль линии тока через критическую точку происходит так быстро, что теплообмен и трение практически отсутствуют — процесс **изоэнтропический**.

Для измерения полного давления применяют **трубку Пито** — цилиндрическую трубку с отверстием, обращённым против потока.

- форма головки и отношение диаметров почти не влияют на показания
- трубка с тупым концом нечувствительна к скосу потока в пределах ±10°

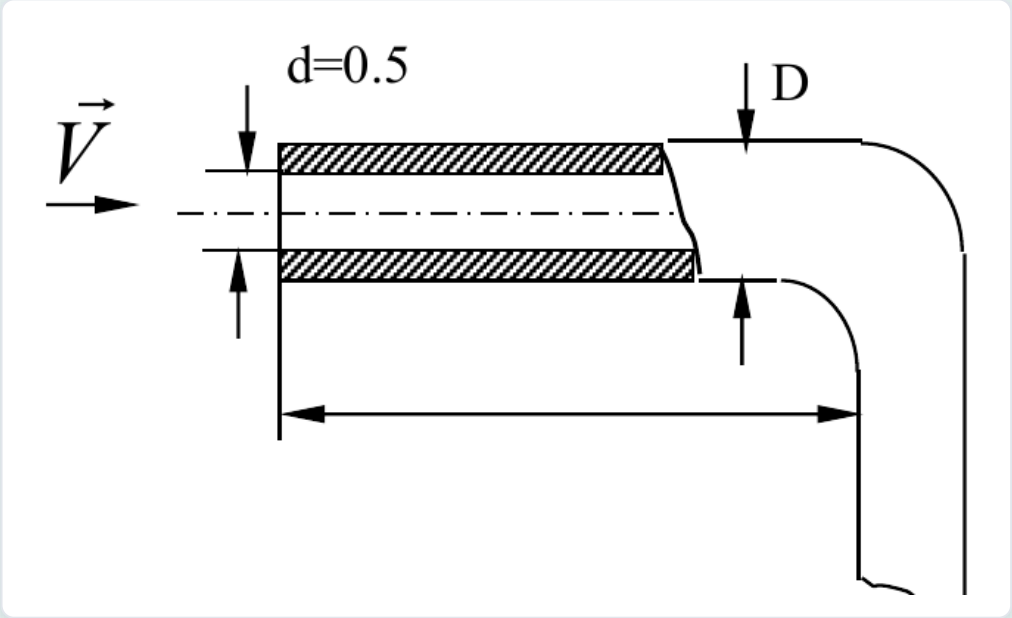


Рис. 4.5. Схема трубки Пито

Особенности измерения полного давления

Сверхзвуковой поток

Перед насадком возникает прямой скачок уплотнения; насадок измеряет полное давление за скачком. При M ≤ 1,25 потери в скачке не превышают 1 %.

Влияние вязкости

Пренебрежимо мало в обычных опытах; существенно лишь при скоростях много меньше 1 м/с (при атмосферном давлении) и в пограничном слое.

Градиентные течения

В пограничном слое эффективная точка замера смещена относительно оси насадка — поправка Дэвиса.

$$\frac{P_0 - P}{\rho V^2/2} = 1 + \frac{5{,}6}{Re} \qquad (5)$$

$$\frac{\delta}{D} = 0{,}131 + 0{,}082\,\frac{d}{D} \qquad (6)$$

Re = Vr/ν, r — радиус приёмного отверстия; δ — смещение эффективного центра, d и D — внутренний и наружный диаметры насадка.

Заключение и вопросы для самоконтроля

Выводы

1. Различают абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление.
2. Единица давления в СИ — паскаль (Н/м²).
3. Статическое давление измеряют дренажными отверстиями и насадком Прандтля.
4. Полное давление измеряют трубкой Пито.
5. По закону Бернулли $V = \sqrt{2(P_0 - P)/\rho}$.

Контрольные вопросы

1. Как связаны абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давления?
2. Какие приборы измеряют давление и его разность?
3. Дайте определения статического и полного давления.
4. Где располагают отверстия на насадке Прандтля и почему?
5. Как угол скоса влияет на показания насадков?
6. Что измеряет трубка Пито в сверхзвуковом потоке?