Казахский национальный университет имени аль-Фараби

Факультет механико-математический

Кафедра механики

Образовательная программа «6B05403 – Механика» · бакалавриат

Дисциплина: Экспериментальная механика

Лекция № 9

Измерение температуры газа в потоке

Преподаватель: Туралина Динара Елеусизовна

к.ф.-м.н., ассистент-профессор

Алматы, 2026 год

Почему важно измерять температуру

Измерение температуры движущегося газа приобрело важное значение в связи с исследованиями:

Аэродинамический нагрев

Нагрев стенок летательных аппаратов при больших скоростях полёта.

Газовые турбины

Работа турбин и компрессоров, температура между ступенями.

Двигатели и машины

Авиационные двигатели и другие газодинамические машины.

Состояние неподвижного идеального газа определяется двумя независимыми величинами, одной из которых может быть температура. При заметной сжимаемости различают **статическую температуру T** и **температуру торможения T_o**.

Статическая температура

Статическая температура — температура, которую показывал бы термометр, движущийся вместе с газом, при отсутствии излучения.

$$a^2 = kRT \tag{1}$$

Косвенные методы

- по статическому давлению (пневмометрический насадок) и плотности (оптический метод) с уравнением состояния
- по измеренной скорости звука a

Ограничения

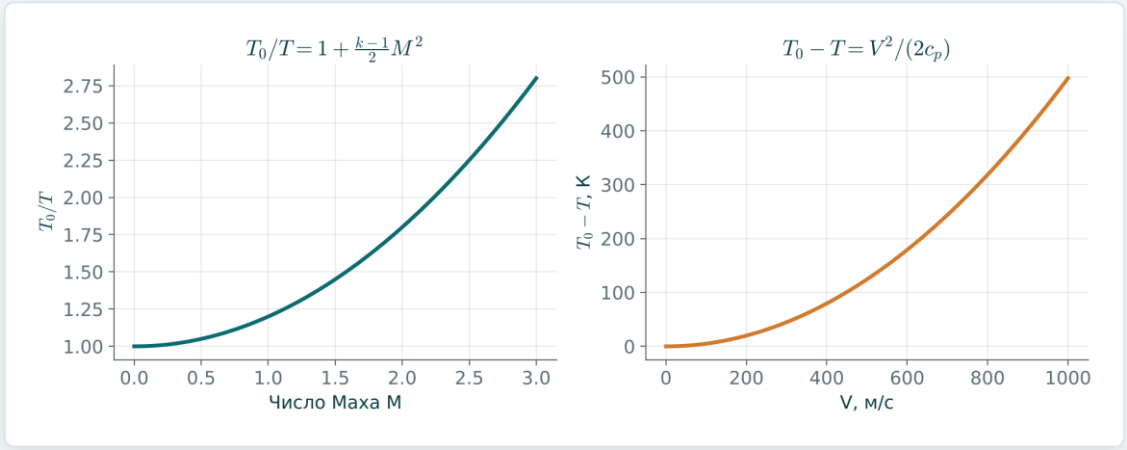
Электронные и оптические методы дают лишь средние значения температуры в некоторой области, поэтому не получили широкого применения.

Температура торможения

Температура торможения (полная температура) — температура газа при полном адиабатическом торможении, когда вся кинетическая энергия без потерь переходит в тепло:

$$c_p T_0 = c_p T + \frac{V^2}{2} \qquad (7.2)$$

Её показывал бы датчик в критической точке тела при отсутствии теплоотвода.



Для воздуха: k = 1,4, c_p ≈ 1005 Дж/(кг·К)

При V = 300 м/с разность $T_0 - T \approx 45$ К, при 1000 м/с — около 500 К.

Что показывает датчик в потоке

Проблема

Полностью исключить теплоотвод невозможно; насадок конечных размеров вносит возмущения и меняет местную температуру. Датчик показывает T_H, лежащую **между T и T_0**.

Коэффициент восстановления

Показание зонда характеризуют коэффициентом восстановления r (r → 1 для идеального зонда).

$$r = \frac{T_H - T}{T_0 - T}, \qquad P = \rho R T \tag{7.3}$$

Плотность газа, нужную для определения скорости неизотермических течений, находят из уравнения Клапейрона (7.1); температуру торможения измеряют зондами с **термопарой**.

Экранированный датчик для высоких скоростей

- спай термопары — в камере торможения
- воздух входит через сопло в скруглённой головке и диффузор
- вентиляционные отверстия компенсируют потери теплопроводностью и излучением
- наружный диаметр 4,7 мм

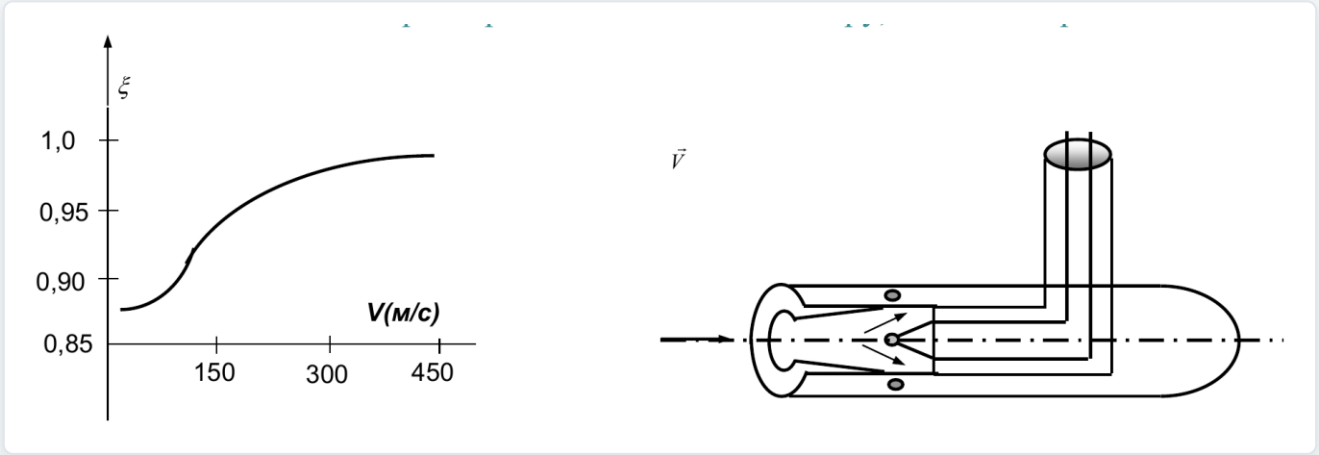


Рис. 7.1. Схема датчика температуры торможения и его характеристика

Резкое изменение r около 90 м/с объясняется переходом от ламинарного к турбулентному течению на входе в диффузор (Re ≈ 2000–3000).

Зонд температуры торможения

Схема зонда и зависимость коэффициента восстановления от скорости потока показаны на рисунке.

- коэффициент r растёт со скоростью и приближается к 0,98
- датчики между ступенями турбокомпрессоров и газовых турбин должны быть малыми и по диаметру, и вдоль потока

Чувствительный элемент всех рассмотренных датчиков — термопара; её изготовление и тарировка определяют точность измерения.

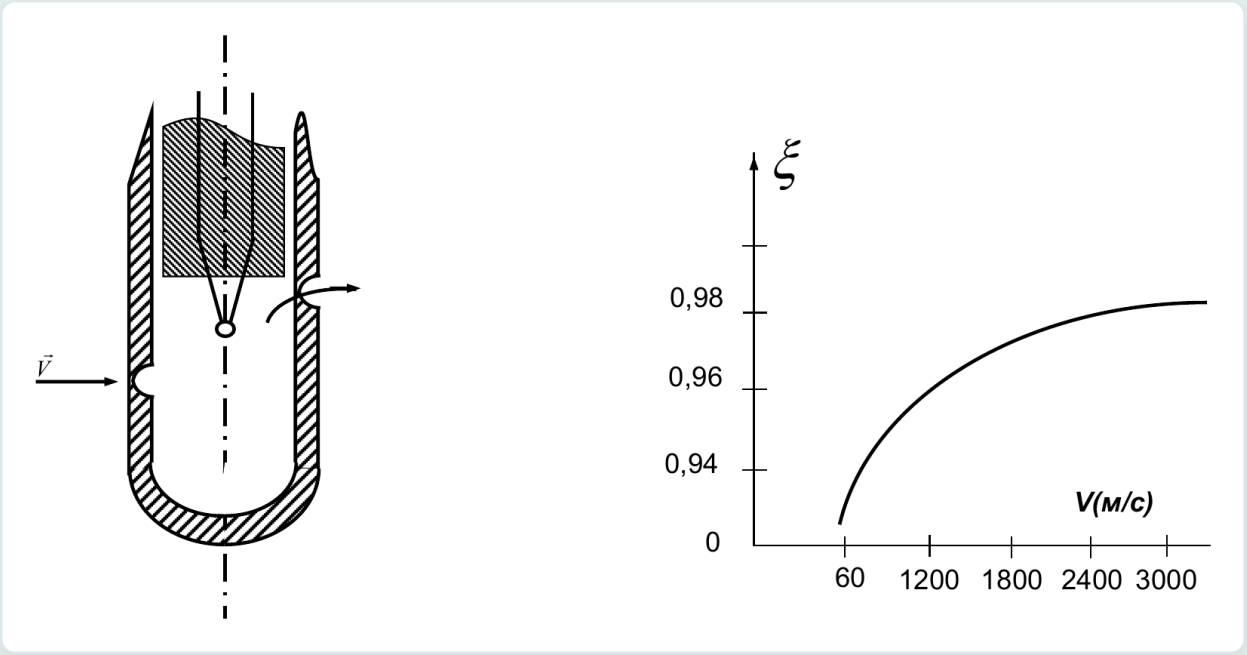


Рисунок 7.2. Схема зонда и зависимость r(V)

Термопара

В основе измерения температуры термопарой лежит **термоэлектрическое явление**.

В цепи из двух разных проводников A и B, спаи которых имеют температуры t и t_0, возникает разность потенциалов — **термо-ЭДС**.

$$E = f(t) - f(t_0) \approx S\,(t - t_0)$$

Подключив цепь к потенциометру, измеряют термо-ЭДС и по тарировочной зависимости находят t.

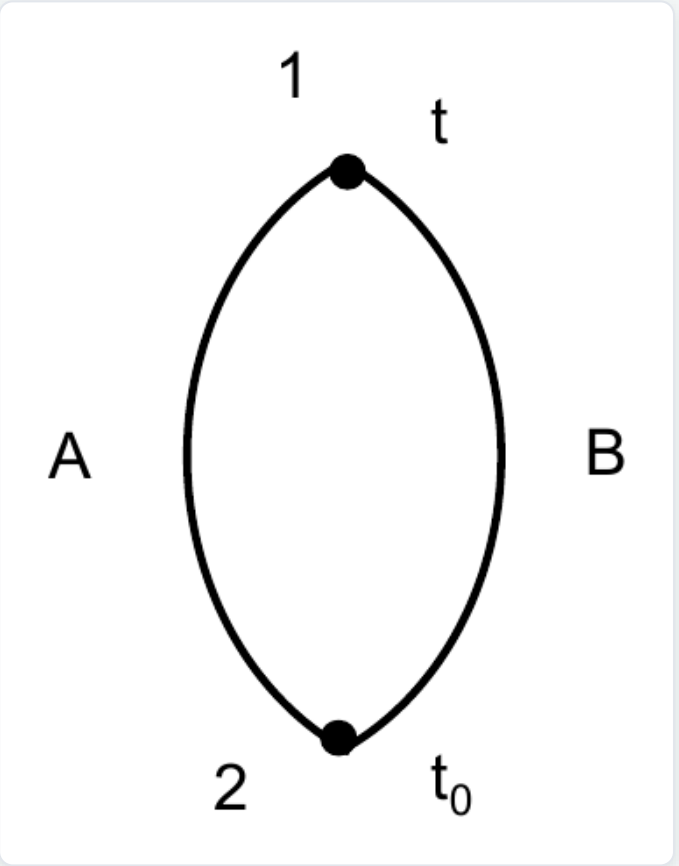


Схема термопары: 1 — горячий спай, 2 — холодный спай

Материалы для термопар

Требования

• не изменять физические свойства со временем, не окисляться, не поддаваться другим вредным воздействиям

• минимальный температурный коэффициент электрического сопротивления

• высокая электропроводность

Применяемые материалы

Некоторые чистые металлы и сплавы:

• медь

• константан

• нихром

• платина

Заключение и вопросы для самоконтроля

Выводы

1. В движущемся газе различают статическую температуру T и температуру торможения T_0.
2. $c_pT_0 = c_pT + V^2/2$: разность растёт как квадрат скорости.
3. Датчик в потоке показывает T_H между T и T_0.
4. Качество зонда оценивают коэффициентом восстановления $r = (T_H - T)/(T_0 - T)$.
5. Чувствительный элемент зондов — термопара.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения статической температуры и температуры торможения.
2. Как можно определить статическую температуру?
3. Почему датчик не показывает точно T_0?
4. Что такое коэффициент восстановления?
5. Опишите устройство экранированного датчика.
6. На каком явлении основана термопара? Какие требования к её материалам?