

Лекция 1

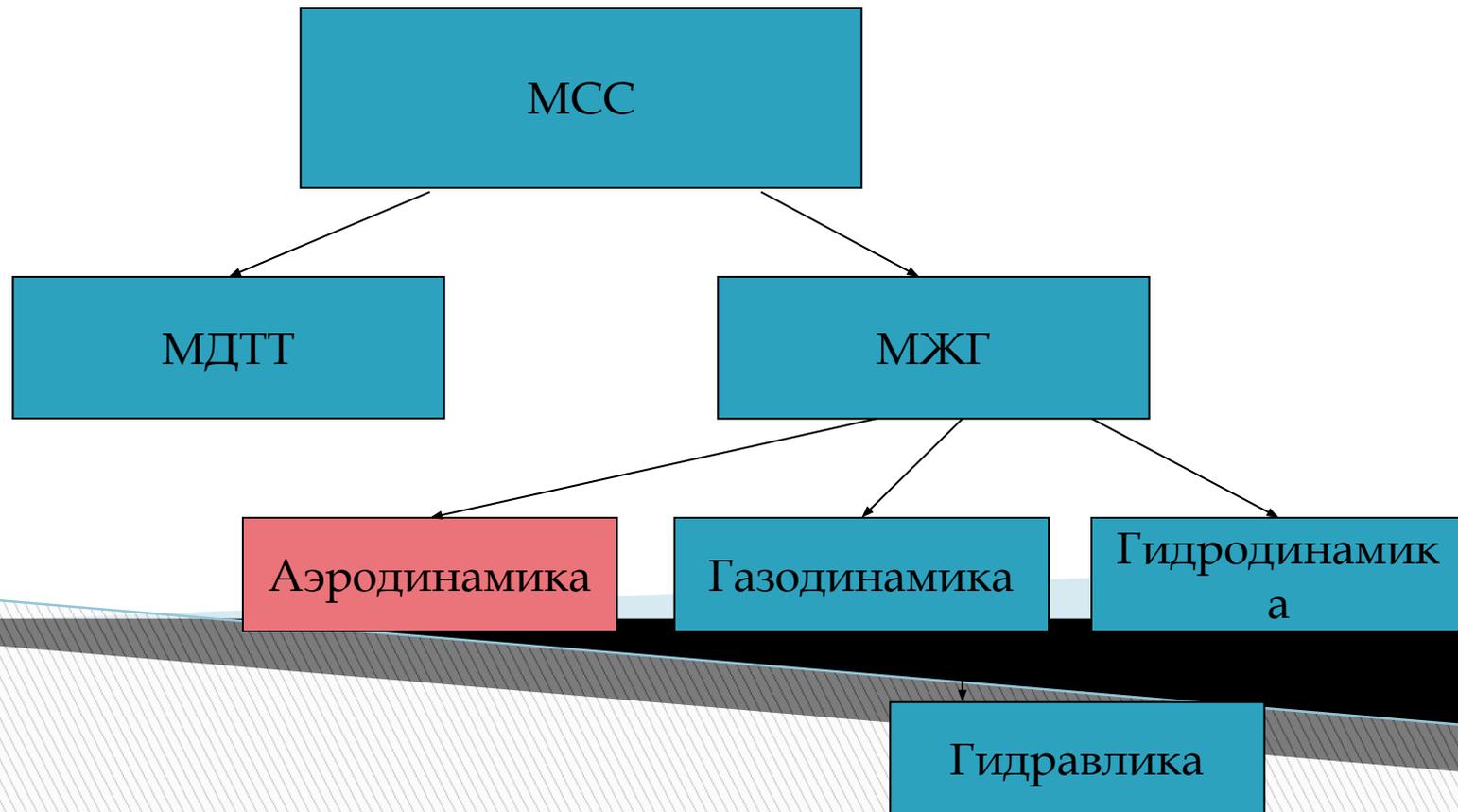
- 1. Предмет «Аэродинамика»**
- 2. Принцип обратимости**
- 3. Гипотеза сплошности**
- 4. Термодинамические параметры**
- 5. Модель идеального газа**
- 6. Модель совершенного газа**

Предмет аэродинамики

Аэродинамика летательного аппарата (ЛА) – наука об общих законах движения воздуха и особенностях его течения при обтекании ЛА и его частей, о силах и моментах, действующих на ЛА и его части, о *тепловом воздействии потока* на ЛА.

Наука аэродинамика опирается на законы физики, механики и термодинамики. Использует достижения математики практически во всех её разделах. Особенно широко применяется аппарат дифференциального и интегрального исчисления. В аэродинамике исследователи имеют дело с *физическими и математическими моделями*.

Место дисциплины «Аэродинамика» самолёта в механике



Принцип обратимости

Принцип обратимости лежит в основе аэродинамических исследований. Согласно этому принципу воздействие воздушного потока на неподвижное тело равносильно воздействию неподвижного потока на движущееся в ней тело. Таким образом, можно изучать силовое взаимодействие воздушной среды на ЛА путём придания воздуху скорости ЛА, а аппарат при этом оставлять неподвижным.

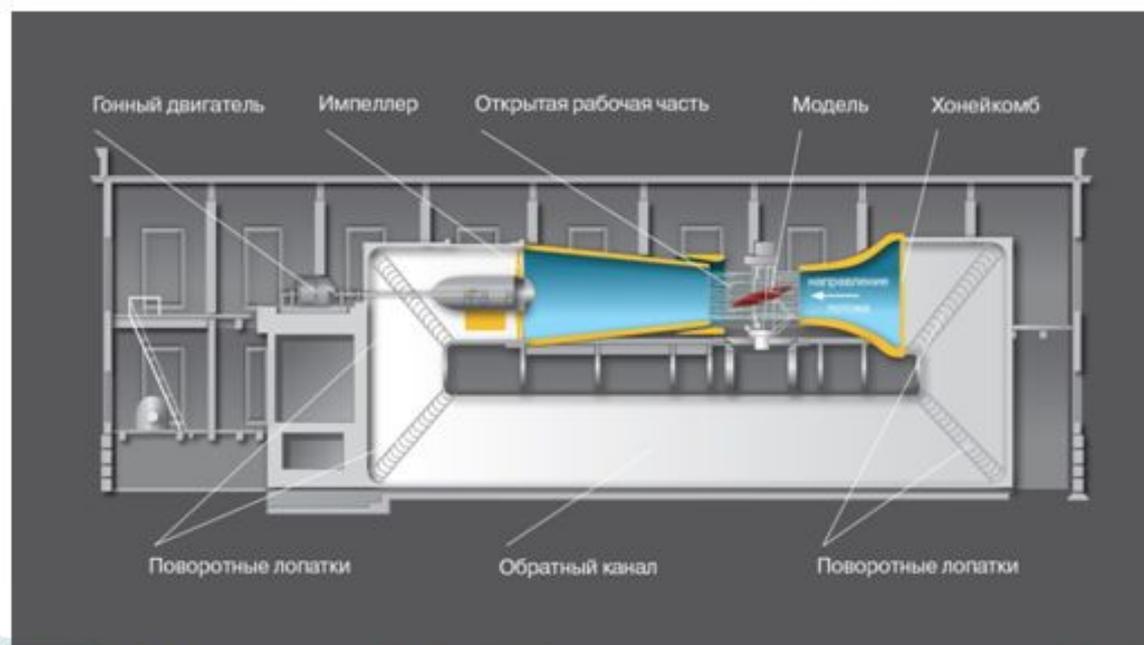
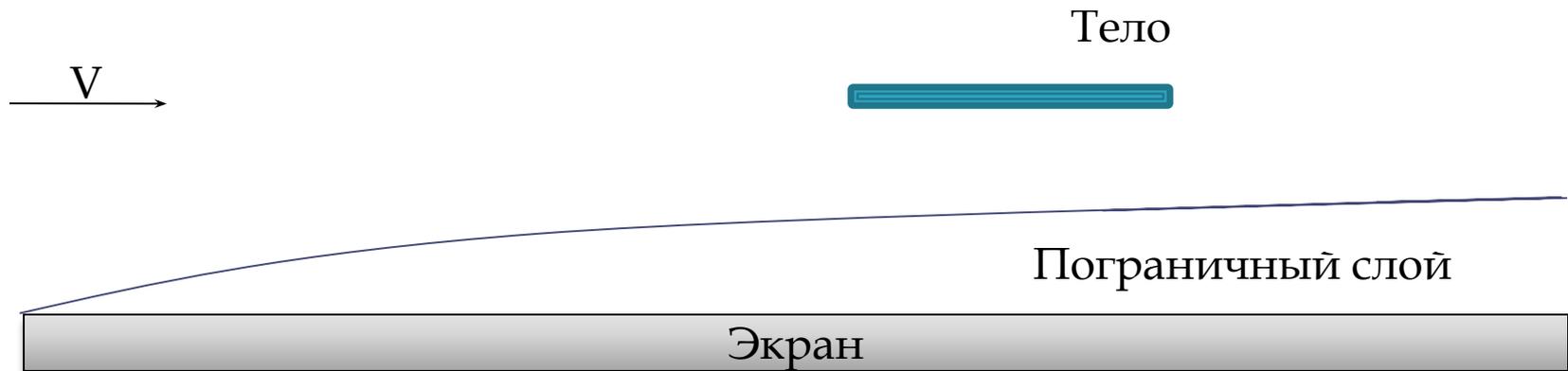


Рисунок 1.1 – Аэродинамическая труба

Всегда ли можно применять принцип обратимости?

- Исключение составляет движение тел вблизи экранирующей поверхности



Нарушение принципа обратимости

Нарушение принципа обратимости наблюдается при экспериментальном исследовании аэродинамики тела вблизи экрана.

Пограничный слой, возникающий на поверхности экрана, в действительности при движении тела вблизи поверхности не реализуется.

Для сохранения принципа обратимости необходимо ликвидировать пограничный слой на поверхности экрана одним из методов:

- ✓ *вдув-отсос пограничного слоя;*
- ✓ *применение подвижной поверхности.*

Гипотеза сплошности (континуума)

Таблица 1.1 – Параметры молекулярного строения атмосферы

Параметры молекулярного строения атмосферы	Размерность	Высота полёта H , км	
		0	40
Число молекул в 1 мм^3	шт.	$2,5 \cdot 10^{16}$	$8,3 \cdot 10^{13}$
Средняя длина свободного пробега молекул	мм	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Частота соударений	с^{-1}	$6,9 \cdot 10^9$	$2,1 \cdot 10^7$

Вводится понятие *жидкой частицы*. Среда представляется как совокупность плотно упакованных *абстрактных жидких частиц*, свободное пространство между которыми отсутствует.

Критерий сплошности (континуума)

Следствие из гипотезы сплошности:

все параметры среды можно считать непрерывными функциями координат и времени.

Непрерывные функции – дифференцируемые функции !!!

Пределы применимости гипотезы сплошности определяются значением числа Кнудсена:

$$Kn = \frac{l}{L} \quad (1.1)$$

где l – средняя длина свободного пробега молекул, м;
 L – характерный линейный размер течения, м.

При $Kn < 0,01$ – среда сплошная.

Для ЛА $L \sim m$.

Условие по числу Кнудсена выполняется во всём диапазоне высот полёта.

Термодинамические параметры

Материальный объект, размеры которого значительно превышают размеры образующей его частиц, называют макроскопической системой.

Все макроскопические признаки, характеризующие систему и её отношение к окружающим телам, называют макроскопическими параметрами.

Эти параметры определяются либо только положением не входящих в рассматриваемую систему тел, либо ещё и движением и распределением в пространстве содержащихся в системе частиц. Первые параметры называются внешними, а вторые – внутренними параметрами.

Термодинамические параметры

Состояние жидкой среды характеризуют следующие параметры:

1. Температура - T ;
2. Плотность - ρ ;
3. Давление - p ;
4. Удельная внутренняя энергия - e ;
5. Удельная внутренняя энтальпия - i ;
6. Удельная внутренняя энтропия - s ;

...

Термин «удельная» относится к 1 кг вещества и параметр обозначается малой буквой.

Температура

Температура – мера интенсивности теплового движения молекул.

Термодинамическая температура отсчитывается по термодинамической шкале температур от абсолютного нуля в кельвинах (К).

Однако существуют ещё шкалы Цельсия, Ранкина и Фаренгейта. Связь этих температур определяется следующими формулами:

$$1\text{ K} = \frac{9}{5} R; \quad t_c = \frac{5}{9}(t_F - 32); \quad T = t_c + 273,15 \quad (1.2)$$

Температура при нормальных условиях равна $T_c = 288,15\text{ K}$, т.е.

Нормальные условия соответствуют стандартным значениям $t_c = 15^\circ\text{C}$ параметров на среднем уровне мирового океана (летний период, Средиземное море).

Плотность

Плотность – предел отношения массы вещества Δm к заключающему его малому объёму ΔW при стягивании этого объёма в точку

$$\rho = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta m}{\Delta W} \right), \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (1.3)$$

Плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_c = 1,225 \text{ кг/м}^3$

Плотность воды при нормальных условиях $\rho_{\text{сН}_2\text{О}} = 1000 \text{ кг/м}^3$

Величина, обратная плотности, называется удельным объёмом

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.4)$$

Давление

Давление – предел отношения силы давления ΔP , действующей на поверхность площадью ΔS , при стягивании этой площади в точку

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S}, \frac{H}{M^2} \quad (1.5)$$

Размерность давления - $[p] = \frac{H}{M^2} = 1 \text{ Па}$

Давление при нормальных условиях: $p_c = 101,3 \text{ кПа}$

Кроме единицы давления в системе СИ широко используются размерности давления в технике

$$\begin{aligned} 1 \text{ ат} &= 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \approx 9,80665 \cdot 10^4 \text{ Па} \approx 10^5 \text{ Па}; \\ 1 \text{ мм рт. ст.} &\approx 133,322 \text{ Па}; \\ 1 \text{ мм вод. ст.} &\approx 9,80665 \text{ Па} \approx 10 \text{ Па}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Термодинамические параметры

Энтальпия $i = e + pv$ (1.7)

Энтропия $ds = \frac{\delta q}{T}$ (1.8)

δq – количество теплоты, сообщённое одному килограмму воздуха в равновесном процессе. Следует заметить, с математической точки зрения величина δq не является полным дифференциалом от величины q

$q = const \Rightarrow \delta q = 0$ - процесс *адиабатический* (без подвода и отвода тепла)

$\delta q = 0 \Rightarrow ds = 0 \Rightarrow s = const$ - процесс *изоэнтропический*

Уравнения состояния

В соответствии со вторым постулатом термодинамики внутренние параметры воздуха являются функциями одного внешнего параметра

$v = \frac{1}{\rho}$ и температуры T

$$p = p(\rho, T), \quad e = e(\rho, T), \quad i = i(\rho, T), \quad s = s(\rho, T) \quad (1.9)$$

Эти зависимости получили название уравнений состояния. Вид этих зависимостей находят методами статистической физики или используя модели газа. Наука, занимающаяся определением уравнений состояния, называется реология. Одной из моделей газа является идеальный газ, в котором отсутствует вязкость.

$\mu = \nu = 0$ - идеальный газ

Модель совершенного газа

Ещё более упрощённая модель газа это модель совершенного газа.

Совершенный газ это идеальный газ, у которого пренебрегают собственным объёмом молекул, считают, что на расстоянии они не взаимодействуют, и полагают, что удельные теплоёмкости при постоянном давлении c_p и при постоянном объёме c_v являются постоянными величинами.

$$c_p = \text{const}, \quad c_v = \text{const} - \text{совершенный газ}$$

Модель совершенного газа

Уравнение Клапейрона-Менделеева $p = \rho RT$ (2.0)

или $p = \frac{RT}{V\mu}$ (2.1)

$$e = c_v T$$

$$i = c_p T$$
 (2.2)

$$s = c_v \ln \frac{p}{\rho^\kappa} + const$$
 (2.3)

Для воздуха

$$c_p - c_v = R \quad c_p = 1000 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \quad c_v = 713 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \quad (2.4)$$

$$R = 287 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \quad - \text{удельная газовая постоянная}$$

$R = 8,3144598(48) \text{ Дж}/(\text{Моль} \cdot \text{К})$ – универсальная газовая постоянная

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad - \text{показатель адиабаты. Для воздуха } \kappa = 1,4$$

$$\frac{p}{\rho^\kappa} = const \quad - \text{изоэнтропа, процесс изоэнтропический}$$

Модель совершенного газа

Ещё более упрощённая модель газа это модель совершенного газа.

Совершенный газ это идеальный газ, у которого пренебрегают собственным объёмом молекул, считают, что на расстоянии они не взаимодействуют, и полагают, что удельные теплоёмкости при постоянном давлении c_p и при постоянном объёме c_v являются постоянными величинами.

$$c_p = \text{const}, \quad c_v = \text{const} - \text{совершенный газ}$$

Модель совершенного газа

Уравнение Клапейрона-Менделеева $p = \rho RT$ (2.2)

или $p = \frac{RT}{V\mu}$

$$e = c_v T \quad (2.3)$$

$$i = c_p T \quad (2.4)$$

$$s = c_v \ln \frac{p}{\rho^\kappa} + const \quad (2.5)$$

Для воздуха

$$c_p - c_v = R \quad c_p = 1000 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \quad c_v = 713 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \quad (2.6)$$

$R = 287 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – удельная газовая постоянная

$R = 8,3144598(48) \text{ Дж}/(\text{Моль} \cdot \text{К})$ – универсальная газовая постоянная

$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель адиабаты. Для воздуха $\kappa = 1,4$

$\frac{p}{\rho^\kappa} = const$ – изоэнтропа, процесс изоэнтропический