

# Пограничный слой. Аэродинамический нагрев

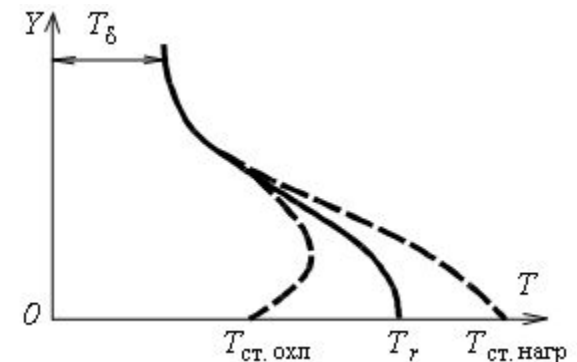
Лекции 16, 17

## 16.1. Пограничный слой на плоской пластинке в сжимаемом газе

- При малых скоростях движения кинетический нагрев газа при его торможении в пограничном слое практически отсутствует:  $M_\infty = 0,5$   $T_0 = 1,05T_\infty$  . Поэтому при отсутствии подвода (отвода) тепла через поверхность тела температура газа по толщине ПС может быть принята постоянной и равной температуре среды на внешней границе ПС или  $T_\infty$  (для плоской пластинки).
- Т.к по сечению ПС статическое давление постоянно, то можно считать плотность газа также постоянной ( $p = \rho RT$ )
- Таким образом, при малых скоростях движения, можно считать, что параметры течения  $p, \rho, T$  в пограничном слое постоянны.

- При больших скоростях движения кинетический разогрев газа значительно сильнее, и в пограничном слое происходит существенное повышение температуры.
- Для теплоизолированного пограничного слоя (тепло не отводится через поверхность тела, не излучается с его поверхности в пространство) температура газа у стенки несколько меньше температуры торможения  $T_0$ , так как часть тепловой энергии уносится самими молекулами при их хаотическом движении. Температура газа у теплоизолированной стенки равна **температуре восстановления**  $T_r$

$$T_r = T_\infty \left( 1 + \frac{k-1}{2} r M_\infty^2 \right)$$



- $r$  – коэффициент восстановления температуры, который характеризует долю кинетической энергии внешнего потока, переходящей в теплосодержание при торможении потока. Коэффициент  $r$  зависит от числа Прандтля и состояния пограничного слоя.
- $T_r = T_\infty (1 + 0,17M_\infty^2)$  - для ламинарного ПС
- $T_r = T_\infty (1 + 0,18M_\infty^2)$  - для турбулентного ПС
- Т.к. значительное повышение температуры наблюдается только в тонком слое вблизи стенки, вводится понятие о *тепловом* (температурном) *пограничном слое*, в пределах которого температура изменяется от температуры газа вблизи стенки до температуры на внешней границе слоя.

- Изменение температуры в ПС приводит к изменению плотности газа . При больших числах  $M$  из-за разогрева газа, плотность его у стенки много меньше, чем во внешнем потоке. При разогреве газа существенно изменяются коэффициенты вязкости  $\mu$  и  $\nu$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda$ . Величина  $\nu$  вблизи стенки значительно больше, чем на внешней границе ПС: при  $M_\infty = 5$  – в 18,5 раза, а при  $M_\infty = 8$  – в 71,8 раза).
- Повышение температуры в ПС приводит к изменению не только плотности, вязкости, теплопроводности, но и распределения скорости по сечению пограничного слоя, его толщины, коэффициентов сопротивления и теплоотдачи.

## 16.2. Определяющая температура

- При решении практических задач расчета ПС сжимаемой жидкости используют приближенные методы. Одним из них является *метод определяющей температуры*. Сущность метода:
  - Для расчета толщины ПС, коэффициента сопротивления трения при больших скоростях движения можно пользоваться формулами, полученными для несжимаемой среды, подставляя в них значения плотности и коэффициентов вязкости, соответствующие некоторой постоянной по сечению ПС температуре, называемой *определяющей*.
  - Ламинарный ПС 
$$T^* = \frac{T_{ст} + T_{\delta}}{2} + 0,22(T_r - T_{\delta})$$
  - Эту же формулу можно в первом приближении применить и для турбулентного пограничного слоя

## 17.1.Аэродинамический нагрев.

- При больших скоростях полета происходит сильное повышение температуры среды около поверхности тела, т. е. ЛА испытывает **аэродинамический нагрев**. В связи с этим возникает ряд задач, связанных с аэродинамической компоновкой ЛА, обеспечивающей снижение температуры поверхности, с методами теплозащиты и понижения нагрева, выбором новых конструкционных материалов, способных работать при высоких температурах

## 17.2. Тепловые потоки

- Составляющие удельных тепловых потоков ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), определяющих температуру поверхности ЛА:
- $q_k$  – конвективный поток тепла от разогретого ПС к поверхности;
- $q_r$  – поток излучения, отводящий тепло от поверхности;
- $q_s$  и  $q_z$  – тепловые потоки к поверхности ЛА вследствие солнечной и земной радиации;
- $q_c$  и  $q_{об}$  – потоки тепла от силовой установки и оборудования;
- $q_{охл}$  – отвод тепла от поверхности ЛА при искусственном охлаждении.



$$q_k = \alpha (T_r - T_{ст})$$

коэффициент теплоотдачи

$$q_r = \varepsilon \sigma T_{ст}^4$$

степень черноты тела

постоянная Стефана–Больцмана

- **Степень черноты тела  $\varepsilon$**  – отношение излучательной способности данной поверхности к излучательной способности абсолютно черного тела;  $\varepsilon$  зависит от материала стенки, от обработки поверхности и ее температуры ( $\varepsilon < 1$ ).
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$  – **постоянная Стефана–Больцмана** – коэффициент излучения абсолютно черного тела

удельный поток  
солнечной радиации

$$q_s = \beta_s G_s \cos \varphi$$

угол падения лучей Солнца на поверхность

## 17.3. Уравнение теплового баланса для установившегося движения

- При установившемся течении температура каждого элемента поверхности с течением времени не изменяется, т. е. количество получаемого твердой стенкой тепла равно отводимому, и поверхность тела приобретает наибольшую *равновесную температуру*, которая определяется из условия баланса тепловых потоков

- Уравнение теплового баланса для установившегося движения

$$q_k - q_r + q_s + q_3 + q_c + q_{об} - q_{охл} = 0$$

- Простейший вид (без учета  $q_s, q_3, q_c, q_{об}$  и при отсутствии охлаждения :

- $q_k = q_r$ , или  $\alpha(T_r - T_{ст}) = \varepsilon\sigma T_{ст}^4$

## 17.4. Уравнение теплового баланса для неустановившегося движения

- При неустановившемся движении (набор высоты или скорости, снижение летательного аппарата в плотных слоях атмосферы) тепловой поток от ПС к телу в разные моменты времени будет различным.

Тепловой поток, идущий на нагрев обшивки

$$C_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} \delta_{\text{ст}} \frac{dT_{\text{ст}}}{dt} = q_{\text{к}} - q_{\text{р}} + q_{\text{с}} + q_{\text{з}} + q_{\text{с}} + q_{\text{об}} - q_{\text{охл}}$$

$$C_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} \delta_{\text{ст}} \frac{dT_{\text{ст}}}{dt} = \alpha (T_{\text{р}} - T_{\text{ст}}) - \varepsilon \sigma T_{\text{ст}}^4$$

- Уравнение решается численными методами, например, методом конечных разностей. Необходимыми исходными данными являются траектория полета, начальная температура обшивки, материал и толщина обшивки. Уравнение теплового баланса в конечно-разностной форме

$$\Delta T_{\text{ст} i} = \frac{\Delta t_i}{C_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} \delta_{\text{ст}}} \left[ \alpha_i (T_{\text{р} i} - T_{\text{ст} i}) - \varepsilon \sigma T_{\text{ст} i}^4 \right]$$

$$T_{\text{ст}}^{\text{кон}} = T_{\text{ст}}^{\text{нач}} + \sum_{i=1}^n \Delta T_{\text{ст} i}$$

## 17.5. Методы снижения температуры поверхности

- Уравнение теплового баланса, позволяет наметить некоторые пути снижения температуры поверхности:
  - уменьшение коэффициента теплоотдачи (при ламинарном ПС теплоотдача меньше, чем при турбулентном ПС);
  - увеличение степени черноты поверхности обшивки ЛА (увеличится тепловой поток излучения с поверхности);
  - охлаждение стенки отводом тепла внутрь конструкции;
  - применение теплозащитных покрытий и обмазок (в качестве ТЗП применяют вещества, обладающие высокой теплоемкостью и малой теплопроводностью).
- ТЗП поглощает значительное количество тепла и замедляет теплопередачу от ПС к обшивке. При высоких температурах происходит испарение (сублимация) ТЗП, на которое расходуется значительное количество тепла, подводимого к стенке

## 17.6. Теплозащитные покрытия

- По составу и свойствам теплозащитные покрытия (ТЗП) делятся на **жёсткие** (асбопластики, стеклопластики и углепластики);  
**полужёсткие** (полимерные материалы на основе фенольно-каучуковых связующих веществ с наполнителями и без них);  
**эластичные** (материалы типа резин с наполнителями и без них).
- Жёсткие ТЗП применяются для защиты наружных поверхностей головных частей (боеголовок), космических объектов и сопловых блоков двигателей на твёрдом топливе.  
Полужёсткие ТЗП используются для защиты внутренних поверхностей корпусов этих двигателей от газодинамического теплового потока при его скорости более 50 м/с, а эластичные — при скорости потока менее 50 м/с.

- В качестве ТЗП могут быть использованы абляционные материалы.
- **Абляция** - унос вещества с поверхности твёрдого тела при испарении, расплавлении, сублимации (возгонке) под воздействием различного рода излучений и высокотемпературных газовых потоков.
- При абляции создаётся изолирующая газовая завеса, предохраняющая поверхность тела от непосредственного соприкосновения с разогретым газом (широко используется для тепловой защиты КА, головных частей, корпусов и сопел двигателей ракет).
- В качестве абляционных ТЗП применяются различные смолы (фенольные, эпоксидные) с тугоплавкими наполнителями (асбест, кварц, графит), пористые тугоплавкие металлы с легкоплавкими наполнителями, графит и другие материалы.