

# **Нагрев при входе в атмосферу**

## **Введение**

Явление нагрева тел при входе в атмосферу на высоких скоростях является одной из важнейших проблем в космонавтике, ее актуальность стала повышаться с началом пилотируемых космических полетов, а от ее решения зависит жизнь и здоровье членов экипажа космического корабля, поэтому изучение этого явления и способов противодействия нагреву играет ключевую роль в освоении космоса.

### **1. Суть явления**

Впервые о явлении и его значимости для космонавтики высказался Теодор Фон Карман в 1953 году, точно подметив что даже в разреженном воздухе тело, двигающиеся на большой скорости будет испытывать существенный нагрев.

Не смотря на общие черты с нагревом самолетов двигающихся на сверхзвуковых скоростях, где большую часть тепловой энергии генерирует трение о воздух, в случае разреженного воздуха и скоростей достигающих 25M, основной вклад в нагрев вносит образование перед движущимся телом

фронта сверхвысокого давления в результате высокой скорости встречного потока, что следует из основного уравнения МКТ

$$p = \frac{1}{3} m_0 n V^2$$

Где

$m_0$  -масса молекулы газа

$n$  – концентрация молекул в газе

$V$  – скорость молекул газа

Образующегося давления, хватает для разрыва химических связей молекул и превращения газа в высокотемпературную плазму, нагреваемую вследствие высокого давления по закону Менделеева-Клапейрона.

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

Где

$p$  – давление газа

$V$  – объем газа

$m$  – масса газа в объеме  $V$

$M$  – молярная масса газа

$R$  – универсальная газовая постоянная

$T$  – абсолютная температура газа

Можно записать в форме

$$p\rho = \frac{RT}{M}$$

Где

$\rho$  – плотность газа

Отсюда следует что температура газа прямо пропорциональна давлению газа, следовательно в фронте высокого давления перед аппаратом будет образовываться и высокая температура.

Избежать нагрева полностью невозможно в силу необходимости сброса орбитальной скорости для посадки, что невозможно сделать при помощи торможения двигательной установкой из-за огромной необходимой массы топлива.

Во время торможения, вокруг спускаемого аппарата образуется так называемый плазменный мешок, состоящий из ударной волны, в котором молекулы движутся быстро и происходит превращение газа в плазму, температура которой достигает 20.000К и пограничного слоя в котором идет перенос тепловой энергии. Именно пограничный слой контактирует с поверхностью тепловой защиты. Температура теплового слоя определяется по следующей формуле

$$T_0 = T_n + \frac{V^2}{2C_p}$$

Где

$T_n$ - температура набегающего потока

$V^2$ - скорость набегающего потока

$C_p$ - удельная теплоемкость газа при постоянном давлении

Так как ни один из металлов или сплавов не в состоянии выдержать такую температуру, поэтому применяется несколько методов защиты от нагрева.

## **2. Способы защиты**

Наиболее распространены два способа защиты, выбор которых зависит от задач, стоящих перед аппаратом и его типа

### **2.1. Абляционная защита**

Абляционная защита — это защитный слой материала нескольких типов материалов

- Разлагающийся (например, полиэтилен)
- Сублимирующийся (например, графит)
- Плавящийся (например, керамика)

В любом случае такая защита происходит по средствам уноса материала с поверхности. Несмотря на то, что тепловая энергия должна уйти на разогрев и плавку и испарение материала, уносимого в окружающую среду, главным фактором, влияющим на защиту, является перенос испаренного вещества с поверхности защиты в пограничный слой.

Так как коэффициент теплопроводности газа (от которого напрямую зависит способность газа проводить тепловую энергию) определяется по формуле

$$\lambda = \frac{1}{3} \bar{V} \bar{l} C_v \rho$$

Где

$\bar{V}$  – средняя скорость перемещения молекул газа

$\bar{l}$  – средняя длина свободного пробега молекул газа

$C_v$  – удельная теплоемкость при постоянном объеме

Коэффициент позволяет вычислить плотность потока тепловой энергии

(количество энергии, проходящей в единицу времени через единицу

площади, перпендикулярной каждой оси) по формуле

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad} T$$

Откуда следует, что способность газа проводить тепло зависит прямо

пропорционально от его плотности, скорости молекул в нем и его удельной

теплоемкости. Кроме того, средняя квадратичная скорость молекул газа

определяется по формуле

$$\bar{V}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

Где

$\mu$  – молярная масса газа

Отсюда следует, что средняя скорость молекул обратно пропорционально корню из молярной массы газа. Из выше перечисленных фактов следует, что способность газов проводить тепло уменьшается увеличением молярной массы газа. А так как сложные молекулы материала защиты (например, полиэтилена) много тяжелее молекул воздуха, способность пограничного слоя проводить тепло при попадании в него молекул испаренного слоя абляционного покрытия значительно уменьшается.

## **2.2. Не расходуемая защита**

Второй из наиболее часто используемых способов защиты основан на использовании веществ высокой теплоемкости и с крайне низкими теплопроводящими свойствами, например композитов из углеродных тканей и графита (применялись на Space Shuttle). Этот способ особо удобно использовать на многоразовых кораблях, так как нет уноса вещества с поверхности, а защита полагается на стойкость материала и на особые процедуры полета. Space Shuttle использовавший такой способ защиты

выполнял вход в атмосферу под малым углом (угол прямо влияет на нагрев, так как при больших углах аппарат быстрее переходит в более плотную среду, увеличивая нагрев) и выполнял серии разворотов чтобы поочередно уменьшая нагрев с разных сторон корпуса чтобы избежать расплавления и дать одной стороне остыть, пока нагревается другая.

### **Заключение**

Атмосферный нагрев при входе в атмосферу — сложная проблема, требующая постоянного исследования и разработки новых технологий. В ходе данного доклада мы рассмотрели причины атмосферного нагрева, физические законы, определяющие этот процесс, а также инженерные проблемы и возможные решения.

Понимание явления атмосферного нагрева имеет важное значение для безопасности и эффективности космических миссий. Продолжение исследований и развитие новых подходов позволят разработать материалы и технологии, способные более эффективно справляться с высокими температурами и термическими нагрузками.



Углубление наших знаний о физических законах и механизмах нагрева и их применение в практике позволят обеспечить безопасность и устойчивость входа в атмосферу, расширить границы исследований в космосе и аэродинамике, и сделать новые открытия в этих областях.