

Задача Капицы о нагреве самолета

И. И. Кравченко, 30 сентября, 2024.

Вот задача П. Л. Капицы, связанная с аэродинамикой больших скоростей.

Самолет летит со скоростью, близкой к звуковой; благодаря трению о воздух фюзеляж нагревается. Оценить предельно возможную температуру нагревания поверхности этого самолета.

Геометрия реального самолета довольно сложна, поэтому будем рассматривать так называемую критическую точку на поверхности самолета — «нос» самолета. Эта точка примечательна тем, что скорость потока воздуха относительно самолета в ней равна нулю: в этом месте воздух сильно сжимается, что приводит к увеличению его плотности, температуры и давления у «носа» самолета.

Оценивать температуру $T_{кр}$ воздуха перед «носом» самолета будем почти так же, как это сделано в книге А. Л. Стасенко «Физика полета» [1]. Каждая молекула массы m в набегающем невозмущенном потоке в системе отсчета самолета обладает кинетической энергией направленного(!) движения, приблизительно равной

$$\frac{1}{2}mv^2$$

где v — скорость самолета.

Вблизи критической точки молекулы воздуха совершают только тепловое беспорядочное движение, значит, их кинетическая энергия направленного движения почти целиком перешла в тепловую, которую можно выразить через добавку ΔT к температуре частицы:

$$\frac{1}{2}mv^2 \approx \frac{5}{2}k\Delta T,$$

где k — постоянная Больцмана (здесь множитель $5/2$ учитывает двухатомность молекул воздуха).

Отсюда выразим величину нагревания ΔT воздуха равна:

$$\Delta T \approx \frac{mv^2}{5k} = \frac{Mv^2}{5R},$$

где M — молярная масса воздуха, $R = = Mk/m = 8,31$ Дж/(моль · °С) — универсальная газовая постоянная.

Приняв $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и $v = 300$ м/с, получаем $\Delta T \approx 60^\circ\text{C}$. Полагая тепловое равновесие между воздухом и самолетом в критической точке, можно сказать, что температура поверхности самолета будет примерно на 60°C больше температуры воздуха вдали от самолета.

Найдем еще давление «заторможенного» перед самолетом воздуха. Выделим мысленно некоторое количество воздуха в набегающем потоке, который сталкивается с самолетом. Происходит сжатие этого воздуха, которое будем считать адиабатным; воздух будем считать двухатомным газом, поэтому для этого процесса запишем уравнение адиабаты в виде [2]:

$$P = \text{const} \cdot T^{7/2}. \quad (1)$$

Пусть воздух нагрелся от 20 до 80°C (то есть от 293 до 353 К), значит, его температура выросла примерно в $1,2$ раза. Согласно формуле (1) давление воздуха у «носа» нашего самолета почти в два раза превысит давление в невозмущенной атмосфере на данной высоте полета!

Литература

- [1] А. Л. Стасенко. *Физика полета*. Наука, 1988.
- [2] В. З. Кресин. «Адиабатный процесс». В: *Квант* 6 (1977), с. 25—29.