

5. Двигатель может совершать работу за счет внутренней энергии окружающей среды и внутренней энергии воды.

Работа льда при его замерзании и расширении определяется по формуле

$$A = P\Delta V, \quad (1)$$

где $\Delta V = M\left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_g}\right)$ - увеличение его объема при замерзании, M - масса

льда, ρ_l, ρ_g - плотности льда и воды, соответственно.

Массу льда, которую можно заморозить найдем из уравнения теплового баланса

$$M\lambda = mL \Rightarrow M = m\frac{L}{\lambda}, \quad (2)$$

где m - масса имеющегося в нашем распоряжении жидкого азота, L - удельная теплота парообразования азота, λ - удельная теплота кристаллизации воды.

Максимальное давление льда опреляется прочностью стенок цилиндра двигателя.

Выделим на поверхности цилиндра узкую полоску длиной l и видимую с оси цилиндра под малым углом α . Сила давления льда

$$F = PS_0 = Pl\alpha R \quad (3)$$

уравновешивается силами механического напряжения в стенках цилиндра

$$T = \sigma_{np} S_l = \sigma_{np} lh. \quad (4)$$

В формулах (3)-(4) обозначено: R - радиус цилиндра, h - толщина его стенок, σ_{np} - предел прочности стали, S_0 - площадь выделенной полоски, S_l - площадь ее боковых торцов. Записывая условие равновесия выделенного элемента в проекции на радиальное направление, получим

$$F = 2T \sin \frac{\alpha}{2}, \Rightarrow F = T\alpha, \Rightarrow PlR\alpha = \sigma_{np} lh\alpha. \quad (5)$$

При выводе последнего соотношения учтена малость угла α .

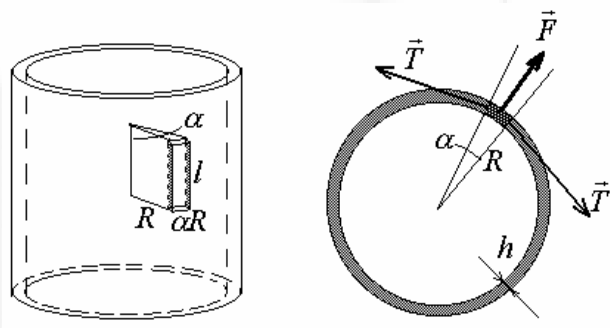
Из уравнения (5) определяем максимально возможное давление льда

$$P = \frac{\sigma_{np} h}{R}. \quad (6)$$

Таким образом, максимальная работа, которую может совершить двигатель, рассчитывается по формуле

$$A = \frac{\sigma_{np} h}{R} m \frac{L}{\lambda} \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_g} \right) \approx 280 \text{ Дж}. \quad (7)$$

Коэффициент полезного действия определяется отношением совершенной работы к количеству полученной теплоты, которая в данном случае равна количеству теплоты, которое требуется на плавление льда ($Q = M\lambda$)



$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{\sigma_{np} \cdot h}{R\lambda} \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v} \right) \approx 1.4 \cdot 10^{-3} . \quad (8)$$

Схема оценивания.

Номер пункта	Содержание	баллы всего	в том числе за подпункты
1	Источник энергии	1	
2	Максимальное давление	3	
	- выделение узкой полоски		1
	- напряжение в стенке (4)		1
	- условие равновесия		1
2	Работа льда	4	
	- формула (1)		1
	- изменение объема		1
	- тепловой баланс		1
	- численное значение		1
3	Расчет КПД	2	
	- определение кпд и расчет теплоты		1
	- численное значение		1
	итого	10	