

Коэффициент наполнения. Заряд воздуха в цилиндре.

Основная задача газообмена состоит в наполнении цилиндров двигателя зарядом свежего воздуха. В идеальном случае в цилиндре двигателя может быть размещено G_{V_S} воздуха. Для этого необходимо, чтобы весь рабочий объем был заполнен только воздухом при параметрах p_s и T_s . В действительности количество размещающегося в цилиндре свежего заряда G_B всегда меньше теоретически возможного G_{V_S} . Причины этого в основном сводятся к следующим двум факторам.

Первый фактор, определяющий снижение заряда воздуха, состоит в уменьшении давления и повышении температуры поступающего в цилиндр воздуха в процессе наполнения.

Давление в цилиндре в конце наполнения p_a , как правило, меньше давления перед цилиндром p_s вследствие потерь на перетекание воздуха из ресивера в цилиндр и составляет в двигателях четырехтактном $p_a \approx (0.9 \div 0.96)p_s$, двухтактном $p_a \approx (0.96 \div 1.1)p_s$. Верхние пределы характерны для двигателя с импульсным наддувом.

Температура воздуха в цилиндре в конце наполнения T_a выше температуры T_s , так как во время наполнения воздух нагревается от стенок цилиндра на $\Delta T_a = 5 \div 10$ и в цилиндре смешивается с находящимися в нем остаточными газами, имеющими температуру $t_r = 700 \div 800^\circ\text{C}$.

Температура

$$T_a = \frac{T'_s + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r} \quad (1)$$

где $T'_s = T_s + \Delta T_a$

Из уравнения состояния $pV = RT$, которое может быть также записано $p/\rho = RT$, находим плотность $\rho = p/RT$. Отсюда плотность воздуха в ресивере $\rho_s = p_s/(RT_s)$, в цилиндре $\rho_a = p_a/(RT_a)$.

Поскольку $p_a < p_s$; $T_a > T_s$, то плотность воздуха в цилиндре ρ_a меньше плотности воздуха перед цилиндром ρ_s (в ресивере). В результате масса заряда воздуха, попавшего в период наполнения в цилиндр, находится в прямой зависимости от плотности и будет меньше массы, которую можно было бы разместить, если бы параметры воздуха оставались равными p_s и T_s .

Второй фактор, определяющий сокращение заряда воздуха, состоит в невозможности полного использования рабочего объема цилиндра для размещения в нем воздуха. Часть объема занимают *оставшиеся после газообмена продукты сгорания* (остаточные газы), которые полностью удалить из цилиндра не удастся.

Количество остаточных газов характеризуется коэффициентом $\gamma_r = G_r/G_B$, значение которого зависит от совершенства процессов очистки цилиндра от продуктов сгорания и газообмена в целом.

Мерой количественной оценки процесса наполнения цилиндров воздухом служит *коэффициент наполнения* $\eta_n = G_B/G_{V_s}$ — отношение массы оставшегося в цилиндре к окончанию газообмена заряда воздуха G_B к массе воздуха G_{V_s} которая теоретически могла бы заполнить рабочий объем цилиндра V_s при параметрах

перед цилиндром ρ_s и T_s . Для более глубокого анализа и расчетов можно воспользоваться выражениями

$$\eta_H = \frac{V_a}{V_s} \frac{\rho_a}{\rho_s} \frac{1}{1+\gamma_T} \quad (2)$$

$$\eta_H = \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \frac{\rho_a}{\rho_s} \frac{1}{1+\gamma_T} \quad (3)$$

где ε — действительная степень сжатия.

Выражения составлены исходя из предположения, что при наполнении используется полезный объем цилиндра V_s . Поэтому если необходимо η_H отнести ко всему рабочему объему V'_s , то необходимо выражение умножить на отношение $V_s/V'_s = 1-\psi_s$ (где ψ_s — относительные значения потеряннного хода поршня на газообмен).

Зная коэффициент наполнения η_H , нетрудно определить массу заряда воздуха $G_B = G_{V_s} \eta_H$. В свою очередь $G_{V_s} = \rho_s V_s$ тогда

$$G_B = V_s \eta_H \rho_s \quad (4)$$

К снижению заряда воздуха G_B , а именно оно может отрицательно отразиться на мощности и экономичности двигателя, приводит уменьшение коэффициента наполнения η_H и плотности воздуха ρ_s . Коэффициент наполнения мало меняется при изменении режима работы двигателя (частоты вращения и нагрузки), практически не зависит от параметров окружающей среды, но может существенно понизиться при загрязнении впускного и выпускного трактов двигателя, продувочных и выпускных окон. Плотность воздуха ρ_s в противоположность η_H существенно зависит от состояния окружающей среды—давления p_0 и температуры T_0 атмосферного воздуха, его влажности

φ , температуры забортной воды $T_{вз}$. Уменьшение плотности ρ_s возможно, когда падает давление p_s и растет температура T_s

$$\begin{aligned} p_s &= \pi_k p_0 - \Delta p_{во} \\ T_s &= T_{вз} + \Delta T_{охл} \end{aligned}$$

где π_k — степень повышения давления в ГТК; $\Delta p_{во}$ — падение давления в воздухоохладителе вследствие его сопротивления ($\Delta p_{во} \sim 0,001 - 0,002$ МПа); $\Delta T_{охл}$ — температурный напор в воздухоохладителе ($\Delta T_{охл} - 10 - 12$ °С).

Из представленных выражений видно, что давление p_a находится в прямой зависимости от p_0 и с его падением соответственно снижается, приводя к уменьшению плотности воздуха ρ_s и заряда воздуха в цилиндрах G_B .

Однако само изменение атмосферного давления не столь уж велико ~ обычно 96—105 кПа (720—780 мм рт. ст.). Более существенно изменение температуры воздуха T_0 , которая в тропиках может увеличиться до 35°С, соответственно до 32—33° возрастает температура забортной воды. Если воздухоохладитель обладает достаточно развитой поверхностью охлаждения и находится в технически исправном состоянии, он будет поддерживать температуру воздуха перед цилиндрами T_a на необходимом уровне вне зависимости от изменений T_0 и $T_{вз}$. Это означает, что в таком двигателе плотность ρ_s и заряд воздуха G_B оказываются независимыми от внешних условий. Иначе, если воздухоохладитель не обладает необходимым запасом охлаждающей способности, на изменение температуры окружающей среды будет

реагировать двигатель. У такого двигателя при переходе судна в тропики температура воздуха за турбокомпрессорами T_k будет расти пропорционально росту T_0 , следуя зависимости $T_k = T_0 \pi_k^{(n_k-1)n_k}$. Будет увеличиваться и температура за воздухоохладителями T_s , а это, как уже отмечалось, приведет к падению p_s и снижению заряда воздуха G_B .

Как будет дальше показано, уменьшение заряда воздуха в цилиндрах отрицательно сказывается на сгорании топлива и влечет за собой рост температур и температурных напряжений в ЦПГ. Поэтому приходится идти на снижение мощности двигателя путем сокращения подачи топлива в цилиндры. Существенное влияние на воздух оказывает его влажность, характеризуемая относительной влажностью

$$\varphi = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{\Pi_{max}}}$$

где ρ_{Π} — плотность водяного пара во влажном воздухе; $\rho_{\Pi_{max}}$ — максимально возможная плотность пара при данных давлениях и температуре смеси

Таблица 1

Температура. °С	$d, \%$, при φ			
	70	80	90	100
10	5	6	7	8
20	10	12	13	15
30	19	22	25	28
40	34	39	45	50
50	59	69	78	88

содержащегося в воздухе пара. Для пересчета можно воспользоваться формулой

$$G_{\text{ввл}} = G_{\text{в}} \frac{1+d}{1+1,61d} = V_s \eta_n \rho_s \frac{1+d}{1+1,61d} \quad (5)$$

где $d = G_{\text{п}}/G_{\text{в}}$ — влагосодержание (здесь $G_{\text{п}}$ — масса водяного пара, табл. 1).

Литература

Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Том 2. / И.В.Возницкий, А.С.Пунда – М.:МОРКНИГА, 2010.- 382 с стр.20-30