

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ πραγματικού κύκλου

1. Συμπίεσής 1→2

$$r_C = \frac{p_{t2}}{p_{t1}}$$

- Λόγος πίεσης συμπίεσής

$$\eta_{c,is} = \frac{h_{t2, is} - h_{t1}}{h_{t2} - h_{t1}} \quad \text{ή για } c_{pa} = \text{const} \quad \eta_{c,is} = \frac{T_{t2, is} - T_{t1}}{T_{t2} - T_{t1}}$$

- Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης

από την ισεντροπική μεταβολή $\frac{T_{t2, is}}{T_{t1}} = \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} = r_C^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}}$, μπορούμε να ορίσουμε με παρόμοιο τρόπο την

πραγματική μεταβολή ως $\frac{T_{t2}}{T_{t1}} = \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\eta_{pc} \gamma_a}} = r_C^{\frac{\gamma_a - 1}{\eta_{pc} \gamma_a}}$, όπου η_{pc} είναι ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του

συμπίεσής. Από την σχέση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης μπορούμε να βρούμε ότι

$$\eta_{c,is} = \frac{T_{t2, is} - T_{t1}}{T_{t2} - T_{t1}} = \frac{\frac{T_{t2, is}}{T_{t1}} - 1}{\frac{T_{t2}}{T_{t1}} - 1} = \frac{r_C^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1}{r_C^{\frac{\gamma_a - 1}{\eta_{pc} \gamma_a}} - 1} \quad \text{από όπου προκύπτει ότι}$$

$$\eta_{pc} = \frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a} \frac{\ln[r_C]}{\ln\left[1 + \frac{1}{\eta_{c,is}} \left(r_C^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1\right)\right]}$$

- Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης

Αντί του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο πολυτροπικός εκθέτης της πραγματικής

μεταβολής, δηλαδή $\frac{T_{t2}}{T_{t1}} = \left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{n-1}{n}} = r_C^{\frac{n-1}{n}}$, και να εκφράσουμε τη σχέση που τους συνδέει ως $\frac{n-1}{n} = \frac{1}{\eta_{pc}} \frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}$

$$\Delta T_{tC} = (T_{t2} - T_{t1}) = \frac{T_{t1}}{\eta_{c,is}} \left[\left(\frac{p_{t2}}{p_{t1}}\right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1 \right]$$

- Αύξηση θερμοκρασίας στο συμπίεσής
Απόλυτες πιέσεις και θερμοκρασίες, $\eta_{c,is}$ ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπίεσής, $\gamma_a = 1.40$ για αέρα

$$w_{iC} = h_{t2} - h_{t1} = c_{p1-2} (T_{t2} - T_{t1})$$

- Ειδικό έργο συμπίεσής

2. Θάλαμος Καύσης 2→3

Γνωρίζοντας την πίεση στην έξοδο του στροβίλου, και το ποσοστό των απωλειών πίεσης στο θάλαμο καύσης της μηχανής υπολογίζουμε την πίεση στην είσοδο του στροβίλου p_{i3} από τη σχέση

$$p_{i3} = p_{i2}(1 - K_b)$$

▪ Πίεση είσοδο του στροβίλου

από τον ισολογισμό θερμότητας στον θάλαμο καύσης (1^{ος} θερμοδυναμικός νόμος) $Q_{2 \rightarrow 3}^{\downarrow} - W_{2 \rightarrow 3}^{\uparrow} = H_{2 \rightarrow 3}^a$, δεχόμενοι ότι η καύση συντελείται αδιαβατικά $Q_{2 \rightarrow 3}^{\downarrow} = 0$ και καθώς έργο δεν παράγεται θα έχουμε θεωρώντας τις καθολικές ενθαλπίες (συμπεριλαμβάνεται και η χημική ενέργεια) των αντιδρώντων και των προϊόντων ότι $0 = H_{2 \rightarrow 3}^a$ ή ακόμα ότι $H_{g3}^a - (H_{a2}^a + H_f^a) = 0$, όπου H_{g3}^a είναι η καθολική ενθαλπία του καυσαερίου στην θερμοκρασία εξόδου από το θάλαμο καύσης - εισόδου στο στρόβιλο, H_{a2}^a η καθολική ενθαλπία του αέρα στη θερμοκρασία εξόδου από το συμπιεστή - εισόδου στο θάλαμο καύσης, και H_f^a η καθολική ενθαλπία του καυσίμου στη θερμοκρασία που προσάγεται στο θάλαμο καύσης. Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιώντας τις τιμές σχηματισμού των χημικών στοιχείων και των ενώσεων που μετέχουν στην καύση (στη θερμοκρασία αναφοράς T_r), δηλαδή τις $H_{gr}^a, H_{ar}^a, H_{fr}^a$, γράφεται $H_{g3}^a - H_{gr}^a - (H_{a2}^a - H_{ar}^a) - (H_f^a + H_{fr}^a) + (H_{gr}^a - H_{ar}^a - H_{fr}^a) = 0$, ή ακόμα γράφοντας την για 1kg εργαζόμενο μέσου $(1+f)(h_{g3}^a - h_{gr}^a) - (h_{a2}^a - h_{ar}^a) - f \cdot (h_f^a + h_{fr}^a) + [(1+f)h_{gr}^a - h_{ar}^a - h_{fr}^a] = 0$. Ο τελευταίος όρος συνήθως προσεγγίζεται από την τιμή της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου q_{LHV} εκτελώντας το πείραμα της καύσης, καθώς δεν είναι πάντα επ' ακριβώς γνωστή η σύσταση των προϊόντων της καύσης. Έτσι έχουμε $(1+f)(h_{ig3} - h_{igr}) - (h_{ia2} - h_{iar}) - f \cdot (h_{if} + h_{ifr}) - f \cdot q_{LHV} = 0$, έχοντας διώξει πλέον και τον εκθέτη καθολικών ενθαλπιών. Οι διαφορές ενθαλπιών αναφέρονται στις ολικές ενθαλπίες ανάμεσα στις ζητούμενες θερμοκρασίες και στην θερμοκρασία αναφοράς, και υπολογίζονται κατά τα γνωστά από τιμές που υπάρχουν σε πίνακες.

Προσεγγιστικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση

$$f = \frac{c_{p3}T_{i3} - c_{p2}T_{i2}}{\eta_b \cdot q_{LHV} - c_{p3}T_{i3}}$$

▪ Λόγος καυσίμου αέρα
όπου η_b ο βαθμός απόδοσης της καύσης

3. Στρόβιλος (εκτονωτής) 3→4

Γνωρίζοντας την πίεση στην έξοδο της μηχανής, και το ποσοστό των απωλειών πίεσης από την έξοδο του στροβίλου έως την έξοδο της μηχανής υπολογίζουμε την πίεση p_{i4} από τη σχέση $p_{i \text{ exit}} = p_{i4}(1 - K_{\text{exit}})$

$$r_T = \frac{p_{i3}}{p_{i4}}$$

▪ Λόγος πίεσης στροβίλου

$$\eta_{T, is} = \frac{h_{i3} - h_{i4}}{h_{i3} - h_{i4is}} \quad \text{ή για } c_{pg} = \text{const} \quad \eta_{T, is} = \frac{T_{i3} - T_{i4}}{T_{i3} - T_{i4is}}$$

▪ Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης

από την ισεντροπική μεταβολή $\frac{T_{i3}}{T_{i4is}} = \left(\frac{p_{i3}}{p_{i4}}\right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} = r_T^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}}$, μπορούμε να ορίσουμε με παρόμοιο τρόπο την

πραγματική μεταβολή ως $\frac{T_{i3}}{T_{i4}} = \left(\frac{p_{i3}}{p_{i4}}\right)^{\eta_{pT} \cdot \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} = r_T^{\eta_{pT} \cdot \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}}$, όπου η_{pT} είναι ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του

στροβίλου. Από την σχέση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης μπορούμε να βρούμε ότι

$$\eta_{T,is} = \frac{T_{t3} - T_{t4}}{T_{t3} - T_{t4is}} = \frac{1 - \frac{T_{t4}}{T_{t3}}}{1 - \frac{T_{t4is}}{T_{t3}}} = \frac{1 - r_T^{-\eta_{PT} \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}}}{1 - r_T^{-\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}}}$$
 από όπου προκύπτει ότι

$$\eta_{PT} = -\frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1} \frac{\ln \left[1 - \eta_{T,is} \left(1 - \frac{1}{r_T^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}}} \right) \right]}{\ln[r_T]}$$

▪ Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης

Αντί του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο πολυτροπικός εκθέτης της πραγματικής

μεταβολής, δηλαδή $\frac{T_{t3}}{T_{t4}} = \left(\frac{p_{t3}}{p_{t4}} \right)^{\frac{n-1}{n}} = r_T^{\frac{n-1}{n}}$, και να εκφράσουμε τη σχέση που τους συνδέει ως $\frac{n-1}{n} = \eta_{PT} \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}$

$$\Delta T_{IT} = (T_{t3} - T_{t4}) = \eta_{T,is} T_{t3} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{p_{t3}}{p_{t4}} \right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}}} \right]$$

▪ Πτώση θερμοκρασίας στο στρόβιλο
Απόλυτες πιέσεις και θερμοκρασίες, $\eta_{T,is}$ ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή, $\gamma_g = 1.33$ για αέρα

$$w_{IT} = h_{t3} - h_{t4} = c_{p3-4} (T_{t3} - T_{t4})$$

▪ Ειδικό έργο στροβίλου

4. Καθαρή ισχύς στην έξοδο

$$\dot{W} = \left[\dot{m}_g \cdot c_{pg} \cdot \Delta T_{IT} - \frac{1}{\eta_{m shaft}} \dot{m}_a \cdot c_{pa} \cdot \Delta T_{IC} \right]$$

| \dot{m} | \dot{W} |
|-----------|-----------|
| Kg/s | J/s ή W |
| lbm /s | Btu/s |

5. Θερμικός Βαθμός απόδοσης

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_a \cdot f \cdot q_{LHV}}$$

- η (θερμικός) βαθμός απόδοσης του αεροστροβίλου
- Q_{LHV} κατώτερη θερμογόνος δύναμη του καυσίμου
- m_a παροχή αέρα, m_g παροχή καυσαερίου $\dot{m}_g = (1 + f)\dot{m}_a$
- f λόγος καυσίμου αέρα