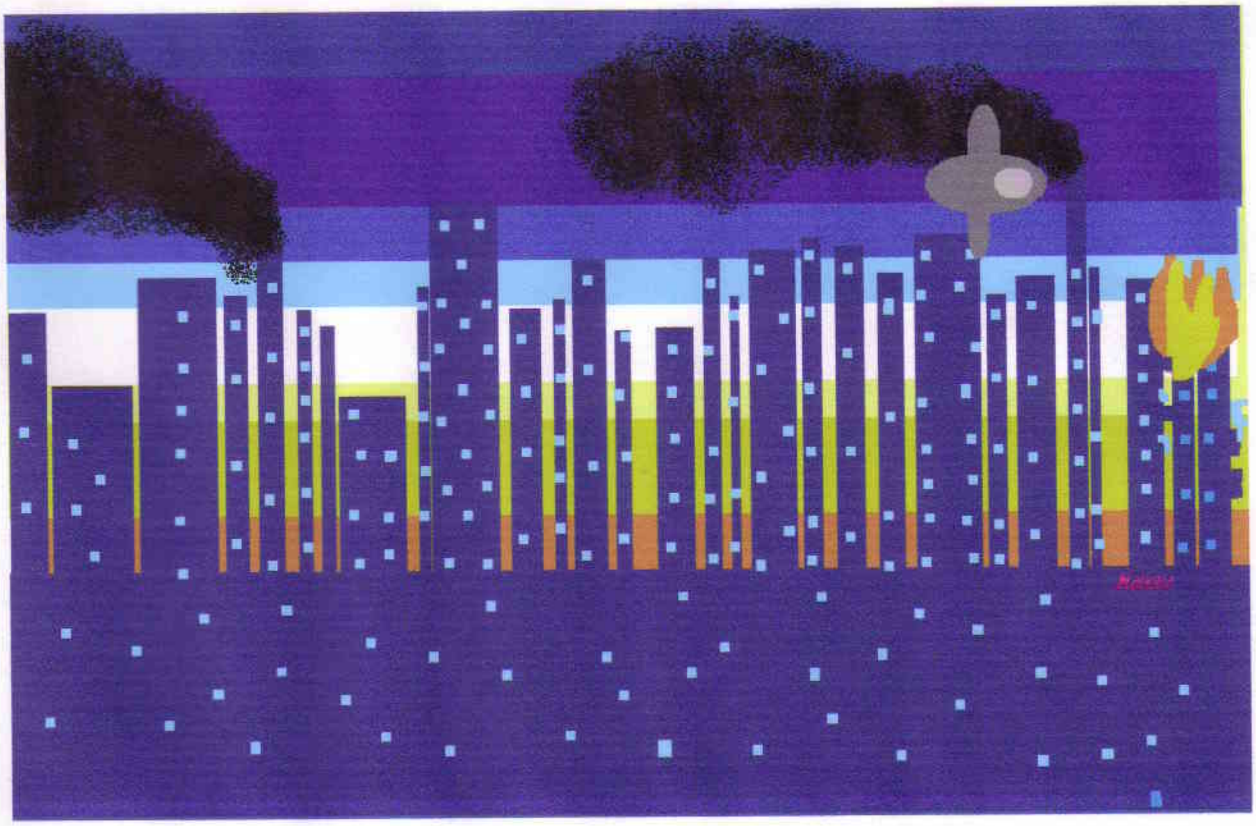
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΣΥΛΛΟΓΗ ΛΥΜΕΝΩΝ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Επιμέλεια:
Α.Μ. Σταματέλλος



Βόλος, Σεπτέμβριος 1992

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το μάθημα της Θερμοδυναμικής, στο οποίο εισάγεται από πολύ νωρίς ο νεαρός φοιτητής - μελλοντικός μηχανολόγος σε όλα τα Πολυτεχνεία του Κόσμου, είναι ίσως το βασικώτερο των Σπουδών του, πράγμα που δυστυχώς, πολλοί φοιτητές μας το αντιλαμβάνονται πολύ αργά.

Το πρόβλημα αυτό δυστυχώς έχει δυσάρεστες επιπτώσεις και στη διδασκαλία των υπόλοιπων μαθημάτων στην Ενεργειακή (και όχι μόνον) Περιοχή, η κυριώτερη από τις οποίες είναι ότι μας αναγκάζει να υποβιβάζουμε το επίπεδο διδασκαλίας σε πολλά από τα μαθήματα αυτά, αφού ένα σημαντικό τμήμα της τάξης ταλανίζεται από σημαντικά κενά στην κατάρτισή του όσον αφορά τη Θερμοδυναμική (κενά που συνήθως συνδυάζονται με ελλιπή Μαθηματική κατάρτιση), και αδυνατεί να παρακολουθήσει σε ανώτερο επίπεδο.

Προσπαθώντας να διαγνώσουμε τις αιτίες γι'αυτό το πρόβλημα, έχουμε καταλήξει, μετά από αρκετά χρόνια εμπειρίας, σε τρείς κατευθύνσεις που βοηθούν στην αντιμετώπισή του:

1. Ανύψωση του επιπέδου Μαθηματικής κατάρτισης, ιδιαίτερα στα Κεφάλαια της Μαθηματικής Ανάλυσης και των Διαφορικών Εξισώσεων.

2. Προσέλκυση από πολύ νωρίς του ενδιαφέροντος του φοιτητή, ώστε να αγαπήσει το μάθημα μέσα από τις πολυποίκιλες εφαρμογές του στην πράξη, οπότε διαπιστώνει το πόσο απλές λύσεις σε δύσκολα προβλήματα μπορεί να δώσει η Θερμοδυναμική Ανάλυση, πράγμα που του αυξάνει την αυτοπεποίθηση σαν μελλοντικού Μηχανικού.

3. Εξάσκηση του φοιτητή στην εκτέλεση και επαλήθευση υπολογισμών, στη χρήση Πινάκων, Διαγραμμάτων και Αλγορίθμων Η/Υ για την επίλυση προβλημάτων με βάση τις Αρχες της Θερμοδυναμικής, εργασία στην οποία σημαντικώτατη θέση θα πρέπει να κατέχει ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και η συσχέτισή τους με την εφαρμογή.

Εκτός από την 1η κατεύθυνση, που δεν περνάει από τα χέρια μας, οι άλλες δύο πιστεύουμε ότι υλοποιούνται σε σημαντικό βαθμό στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του νεοσύστατου Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, βοηθούντος και του μικρού αριθμού και της υψηλής στάθμης των φοιτητών μας, που ευχόμαστε και τα δύο να διατηρηθούν.

Το τεύχος αυτό εντάσσεται στις προσπάθειες για υλοποίηση της 3ης κατεύθυνσης, και βασίζεται στην πολύ καλή συλλογή ασκήσεων που περιέχεται στην 11η έκδοση του δόκιμου εγχειριδίου των συναδέλφων κ.κ. E. Schmidt, K. Stefan και E. Mayinger: Technische Thermodynamik (Springer Verlag, New York 1975).

Η παρούσα συλλογή λυμένων ασκήσεων, παραδίδεται στο φοιτητή για κατ'ιδίαν μελέτη, μαζί με την συλλογή 50 λυμένων παραδειγμάτων που περιέχονται στο σύγγραμμα του H.D. Baehr: Thermodynamik (επιμέλεια μετάφρασης Κ.Ν. Πάττα), που επίσης διανέμεται στους φοιτητές μας. Τελικός στόχος εδώ, είναι η ελάφρυνση της διδασκαλίας των ασκήσεων του μαθήματος από απλές έννοιες και υπολογισμούς που μπορεί άνετα να μελετήσει μόνος ο φοιτητής, έτσι ώστε να μας επιτραπεί στις 70 ώρες της εξαμηνιαίας διδασκαλίας στο Γ' εξάμηνο, να αναπτύξουμε το αντικείμενο σε όλο το πλάτος που προβλέπεται από το σχετικό *Οδηγό του Μαθήματος,* που, ομολογουμένως, δεν είναι διόλου ευκαταφρόνητο, και οπωσδήποτε, απαιτεί το αυξημένο ενδιαφέρον και συμμετοχή του φοιτητή.

Βόλος, Σεπτέμβριος 1992

Α.Μ. Σταματέλλος

1. Σε ένα χαλύβδινο δοχείο πίεσης όγκου $V_1 = 20$ l, περιέχεται υδρογόνο υπό πίεση $p_1 =$ 120 bar και θερμοκρασία $\theta_1 = 10^oC$.
Πόσο χώρο θα καταλάβει το περιεχόμενο του δοχείου στους 0°C και σε πίεση 1 bar, εάν αμελήσουμε τη μικρή απόκλιση του υδρογόνου από τη συμπεριφορά ιδανικού αερίου στην κατάσταση αυτή;

Με εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης:

$$p_1 \cdot V_1 = mRT_1,$$
$$p_2 \cdot V_2 = mRT_2,$$

προκύπτει:

$$V_2 = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \frac{120 \text{ bar} \cdot 273{,}15 \text{ K}}{1 \text{ bar} \cdot 283{,}15 \text{ K}} \cdot 0{,}02 \text{ m}^3,$$
$$V_2 = 2{,}315 \text{ m}^3.$$

2. Ενα αερόπλοιο Zeppelin, με αεροθαλάμους χωρητικότητας 20,000 m^3 μπορεί να γεμίσει εναλλακτικά με υδρογόνο ή με ήλιο. Η πλήρωσή του γίνεται με τέτοια ποσότητα, ώστε οι κλειστοί αεροθάλαμοι να φουσκώνουν εντελώς σε ύψος 4,500 m, όπου επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση 530 mbar και θερμοκρασία 0°C.
Πόσα kg υδρογόνο και ήλιο αντίστοιχα θα απαιτηθούν για την πλήρωση των θαλάμων; Τί όγκο θα καταλαμβάνουν οι αεροθάλαμοι στην επιφάνεια της γής, με ατμοσφαιρική πίεση 935 mbar και θερμοκρασία 20°C; Πόσο φορτίο μπορεί να σηκώσει το αερόπλοιο στις δύο περιπτώσεις (συνολικό φορτίο, που περιλαμβάνει τους αεροθαλάμους, το σκάφος και το ωφέλιμο φορτίο);

Σε υψόμετρο 4,500m, η πλήρωση των αεροθαλάμων απαιτεί:

$$m_{H_2} = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{530 \text{ mbar} \cdot 200000 \text{ m}^3}{4{,}1243 \text{ kJ/(kg K)} \cdot 273{,}15 \text{ K}},$$
$$m_{H_2} = 9409{,}2 \text{ kg Wasserstoff},$$

για το υδρογόνο, και αντίστοιχα:

$$m_{He} = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{530 \text{ mbar} \cdot 200000 \text{ m}^3}{2{,}0772 \text{ kJ/(kg K)} \cdot 273{,}15 \text{ K}},$$
$$m_{He} = 18682{,}1 \text{ kg Helium}.$$

για το Ηλιο.
Στην επιφάνεια της γής, το αέριο καταλαμβάνει όγκο V_2, του οποίου ο όγκος έχει την παρακάτω σχέση με τον όγκο V_1:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} \frac{T_2}{T_1} = \frac{530 \text{ mbar} \cdot 293{,}15 \text{ K}}{935 \text{ mbar} \cdot 273{,}15 \text{ K}} = 0{,}608$$

Η άνωση που δέχεται το αερόπλοιο είναι ίση με τη διαφορά του βάρους του εκτοπιζόμενου αέρα και του βάρους του αερίου πλήρωσης στην κατάσταση 1:

Για το υδρογόνο:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1}\left(\frac{1}{R_{\text{Luft}}} - \frac{1}{R_{H_2}}\right) \cdot g = \frac{530 \text{ mbar} \cdot 200000 \text{ m}^3}{273{,}15 \text{ K}}$$
$$\times \left(\frac{1}{0{,}2857 \text{ kJ/(kg K)}} - \frac{1}{4{,}1243 \text{ kJ/(kg K)}}\right) \cdot 9{,}80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1239760 \text{ N} \approx 1{,}24 \text{ MN},$$

και για το Ηλιο:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1}\left(\frac{1}{R_{\text{Luft}}} - \frac{1}{R_{He}}\right) g = \frac{530 \text{ mbar} \cdot 200000 \text{ m}^3}{273{,}15 \text{ K}}$$
$$\times \left(\frac{1}{0{,}2857 \text{ kJ/(kg K)}} - \frac{1 \text{ kgK}}{2{,}0772 \text{ kJ/(kg K)}}\right) \cdot 9{,}80655 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1148824 \text{ N} \approx 1{,}15 \text{ MN}.$$

3. Σε ένα ιδανικό, τέλεια θερμομονωμένο θερμιδόμετρο από ασήμι μάζας m_s= 250 g (c_{ps}= 0.234 kJ/(kg K)), που είναι γεμάτο με νερό μάζας m=800 g και θερμοκρασίας θ_1=15°C, (με ειδική θερμοχωρητικότητα c_p=4.186 kJ/(kg K)), τοποθετούνται 200 g αλουμινίου θερμοκρασίας θ_a=100°C. Μετά την αποκατάσταση θερμικής ισορροπίας, παρατηρείται ομοιόμορφη θερμοκρασία 19.24 °C.
Να υπολογιστεί η ειδική θερμοχωρητικότητα του αλουμινίου.

Η θερμοκρασία ισορροπίας του συστήματος, t_m, προκύπτει από ένα ισοζύγιο ενέργειας μεταξύ αρχικής κατάστασης και κατάστασης ισορροπίας:

$$t_m = \frac{(mc_p + m_s c_{p_s})\, t + m_a c_{p_a} t_a}{mc_p + m_s c_{p_s} + m_a c_{p_a}},$$

η σχέση αυτή, αναλυθεί ως προς το c_{pa}, δίνει:

$$c_{p_a} = \frac{(mc_p + m_s c_{p_s})(t - t_m)}{m_a (t_m - t_a)},$$

$$c_{p_a} = \frac{\left(0{,}8\ \text{kg} \cdot 4{,}186\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg grd}} + 0{,}25\ \text{kg} \cdot 0{,}234\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg grd}}\right)(15\ °\text{C} - 19{,}24\ °\text{C})}{0{,}2\ \text{kg}\ (19{,}24\ °\text{C} - 100\ °\text{C})},$$

$$c_{p_a} = 0{,}894\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg grd}}.$$

4. Σε ένα κλειστό δοχείο πίεσης, όγκου V=2 m^3, υπάρχει αέρας θερμοκρασίας θ_1=20°C και πίεσης p_1=5 bar.
Σε ποιά θερμοκρασία θ_2 θα πρέπει να θερμανθεί το δοχείο, για να ανυψωθεί η πίεσή του σε p_2= 10 bar; Πόση θερμότητα θα πρέπει να μεταφέρουμε στον αέρα για το σκοπό αυτό;

Από την καταστατική εξίσωση, θέτοντας V=const., προκύπτει μεταξύ των καταστάσεων 1 και 2:

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = \frac{10\ \text{bar}}{5\ \text{bar}} \cdot 293{,}15\ \text{K} = 586{,}30\ \text{K},$$

$$t_2 = 313{,}15\ °\text{C}.$$

Η θερμότητα που πρέπει να μεταφέρουμε στον αέρα, προκύπτει με ολοκλήρωση, υποθέτοντας c_v=const.:

$$Q_{12} = \int_1^2 mc_v dT = mc_v(T_2 - T_1),$$

$$m = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{5\ \text{bar} \cdot 2\ \text{m}^3}{0{,}2857\ \text{kJ/(kg K)} \cdot 293{,}15\ \text{K}} = 11{,}94\ \text{kg},$$

$$Q_{12} = 11{,}94\ \text{kg} \cdot 0{,}716\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\ (313{,}15\ °\text{C} - 20\ °\text{C}),$$

$$Q_{12} = 1794{,}40\ \text{kJ}.$$

5. Μιά σφαίρα από μολύβι πέφτει από ύψος z=100 m πάνω σε ένα σκληρό δάπεδο, και με την κρούση μετατρέπεται όλη η κινητική της ενέργεια σε εσωτερική ενέργεια. Τα 2/3 της ενέργειας αυτής μεταβιβάζονται στη σφαίρα. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του μολύβδου είναι $c_p \approx c_v = c = 0.126$ kJ/(kg K).
Πού θα φτάσει η θερμοκρασία της σφαίρας;

Η δυναμική ενέργεια της μολύβδινης σφαίρας μάζας m, πρίν από την πτώση της, είναι mgz. Αυτή η ενέργεια θα μετατραπεί εντελώς σε κινητική ενέργεια, οπότε τελικά, μετά την πρόσκρουση θα προκύψει η παρακάτω ανύψωση της θερμοκρασίας της σφαίρας:

$$\frac{2}{3} m \cdot g \cdot z = m c_v \Delta t,$$

$$\Delta t = \frac{2gz}{3\,c_v} = \frac{2 \cdot 9{,}81\ (\mathrm{m/s^2}) \cdot 100\ \mathrm{m}}{3 \cdot 0{,}126\ \mathrm{kJ/(kg\ K)}},$$

$$\Delta t = 5{,}32\ \mathrm{K} = 5{,}32\ {}^\circ\mathrm{C}.$$

6. Ενας κινητήρας πεδείται σε n=1200 rpm με υδραυλική πέδη, οπότε μετράται ροπή στρέψης M_d= 4905 Nm. Η πέδη τροφοδοτείται με 10 m^3 νερού ψύξης ανά ώρα, θερμοκρασίας εισόδου 10°C.
Ποιά η θερμοκρασία εξόδου του νερού από την πέδη, εάν υποτεθεί ότι όλη η ισχύς πέδησης μεταβιβάζεται στο νερό, αυξάνοντας την εσωτερική του ενέργεια;

Η ισχύς του κινητήρα είναι ίση με το γινόμενο της ροπής στρέψης επί τη γωνιακή ταχύτητα:

$$|P| = M_d \omega = M_d \cdot 2\pi n$$
$$= 4905\ \mathrm{Nm} \cdot 2\pi \cdot 1200\ \mathrm{min^{-1}},$$
$$|P| = 6{,}16 \cdot 10^5\ \frac{\mathrm{N \cdot m}}{\mathrm{s}} = 616\ \mathrm{kW}.$$

Η ισχύς αυτή, μετατρέπεται εντελώς σε θερμότητα, που οδηγεί στην αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του νερού ψύξης της υδραυλικής πέδης:

$$|P| = \dot{Q}_{12} = \dot{M} c (t_2 - t_1); \qquad c = 4{,}186\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\ K}}.$$

Ετσι υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του νερού, σε

$$t_2 = \frac{|P|}{\dot{M} c} + t_1 = \frac{616\ \mathrm{kW}}{8000\ \mathrm{kg/h} \cdot 4{,}186\ \mathrm{kJ/(kg\ K)}} + 10\ {}^\circ\mathrm{C} = 76{,}22\ {}^\circ\mathrm{C}.$$

7. Αέρας με πίεση p_1=10 bar και θ_1=25°C, αφήνεται να εκτονωθεί μέσα σε ένα κύλινδρο όγκου 0.01 m^3, που κλείνεται με έμβολο,
(i) ισόθερμα
(ii) αδιαβατικά
(iii) πολυτροπικά με n=1.3
μέχρι πίεση 1 bar με οιονεί-στατικές μεταβολές κατάστασης.

Να υπολογιστεί ο τελικός όγκος στις παραπάνω περιπτώσεις, καθώς και η τελική θερμοκρασία και το έργο που παράγεται από το αέριο. Πόση θερμότητα προσδίδεται στο αέριο στις περιπτώσεις (i) και (iii);

<u>(i)</u> <u>Ισόθερμη μεταβολή κατάστασης:</u>

Με εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης:

$$p_1 V_1 = mRT, \quad p_2 V_2 = mRT$$

προκύπτει ο τελικός όγκος:

$$V_2 = \frac{p_1}{p_2} V_1 = \frac{10\ \text{bar}}{1\ \text{bar}} \cdot 0{,}01\ \text{m}^3,$$

$$V_2 = 0{,}1\ \text{m}^3.$$

Το παραγόμενο έργο προκύπτει από τη σχέση:

$$L_{12} = p_1 \cdot V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = 10\ \text{bar} \cdot 0{,}01\ \text{m}^3 \cdot \ln 0{,}1,$$

$$L_{12} = -23{,}026\ \text{kJ}$$

και είναι βέβαια ίσο με τη θερμότητα που προσδίδεται (με βάση το 1ο Θ.Α.):

$$Q_{12} = -L_{12} = 23{,}026\ \text{kJ}.$$

<u>(ii)</u> <u>Οιονεί στατική, αδιαβατική μεταβολή κατάστασης:</u>

Ο τελικός όγκος δίνεται από τη σχέση για την αδιαβατική μεταβολή:

$$p_1 V_1^{\varkappa} = p_2 V_2^{\varkappa}$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/\varkappa}$$

$$= 0{,}01\ \text{m}^3 \left(\frac{10\ \text{bar}}{1\ \text{bar}}\right)^{1/1{,}4} \qquad \varkappa = 1{,}4 \text{ für Luft},$$

$$V_2 = 0{,}0518\ \text{m}^3,$$

και η τελική θερμοκρασία:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}} \quad \text{Gl. (58b)}$$

$$= 298.15\ \text{K} \cdot (0{,}1)^{0{,}4/1{,}4},$$

$$T_2 = 154{,}4\ \text{K}.$$

ενώ το παραγόμενο έργο δίνεται από τη σχέση:

$$L_{12} = \frac{p_1 V_1}{\varkappa - 1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}} - 1\right]$$

$$= \frac{10\ \text{bar} \cdot 0{,}01\ \text{m}^3}{0{,}4}[0{,}1^{0{,}4/1{,}4} - 1],$$

$$L_{12} = -12{,}051\ \text{kJ},$$

και βέβαια, η προσδιδόμενη θερμότητα είναι μηδενική:

$$Q_{12} = 0.$$

(iii) Πολυτροπική μεταβολή κατάστασης:

Ο τελικός όγκος δίνεται από τη σχέση για την πολυτροπική μεταβολή κατάστασης:

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad \text{mit} \quad n = 1{,}3,$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/n} = 0{,}01\ \text{m}^3 \cdot 10^{1/1{,}3},$$

$$V_2 = 0{,}0588\ \text{m}^3,$$

και η τελική θερμοκρασία προκύπτει:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$= 298{,}15\ \text{K} \cdot (0{,}1)^{(1{,}3-1)/1{,}3},$$

$$T_2 = 175{,}25\ \text{K},$$

ενώ το παραγόμενο έργο:

$$L_{12} = \frac{p_1 \cdot V_1}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right],$$

$$L_{12} = \frac{10\ \text{bar} \cdot 0{,}01\ \text{m}^3}{1{,}3 - 1} [0{,}1^{0{,}3/1{,}3} - 1],$$

$$L_{12} = -13{,}74\ \text{kJ},$$

και η προσδιδόμενη θερμότητα:

$$Q_{12} = L_{12} \frac{n - \varkappa}{\varkappa - 1},$$

$$Q_{12} = -13{,}74\ \text{kJ} \frac{1{,}3 - 1{,}4}{1{,}4 - 1},$$

$$Q_{12} = 3{,}435\ \text{kJ}.$$

8. Μιά αερόσουστα αποτελείται από ένα κύλινδρο αέρα μήκους 50 cm και διαμέτρου 20 cm, ο οποίος κλείνεται με ένα έμβολο. Ο αέρας μέσα στον κύλινδρο βρίσκεται σε ισορροπία με την ατμόσφαιρα (p_1= 1 at, θ_1= 20°C).
Πόση ενέργεια κρούσης μπορεί να παραλάβει η αερόσουστα, εάν το έμβολο μετακινηθεί 40cm προς τα κάτω, και υποθέτοντας αδιαβατική συμπίεση του αέρα; Ποιά θα είναι η τελική πίεση και θερμοκρασία του αέρα στην περίπτωση αυτή;

Ο αρχικός όγκος είναι:

$$V_1 = \frac{\pi d^2}{4} l_1 = \frac{\pi\,(0{,}2\ \text{m})^2}{4} \cdot 0{,}5\ \text{m} = 0{,}0157\ \text{m}^3,$$

$$V_2 = \frac{\pi d^2}{4} l_2 = \frac{\pi\,(0{,}2\ \text{m})^2}{4} (0{,}5\ \text{m} - 0{,}4\ \text{m}) = 0{,}00314\ \text{m}^3.$$

Για το ωφέλιμο έργο που παράγει το έμβολο, με λήψη υπόψη του έργου της ατμοσφαιρικής πίεσης επί του εμβόλου, λαμβάνεται από τη σχέση:

$$L_{n_{12}} = L_{12} + p_u (V_2 - V_1).$$

Κατά την αδιαβατική συμπίεση, ο αέρας παραλαμβάνει το παρακάτω ποσό ενέργειας:

$$L_{12} = \frac{p_1 V_1}{\varkappa - 1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}} - 1\right] = \frac{p_1 V_1}{\varkappa - 1} \left[\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\varkappa-1} - 1\right]$$

$$= \frac{1\ \text{bar} \cdot 0{,}0157\ \text{m}^3}{1{,}4 - 1} \left[\left(\frac{0{,}0157}{0{,}00314}\right)^{0{,}4} - 1\right], \qquad L_{12} = 3{,}547\ \text{kJ}$$

Από την ατμοσφαιρική πίεση γίνεται το έργο:

$$p_u (V_2 - V_1) = 1\ \text{bar}\ (0{,}00314 - 0{,}0157)\ \text{m}^3$$

$$= -1{,}256\ \text{kJ}$$

Ετσι τελικά η αερόσουστα παραλαμβανει την παρακατω ενεργεια κρούσης:

$$L_{n_{12}} = (3{,}547 - 1{,}256)\ \mathrm{kJ},$$
$$L_{n_{12}} = 2{,}291\ \mathrm{kJ} = 2291\ \mathrm{Nm}$$

Η τελική θερμοκρασία, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση για την ισεντροπική συμπίεση:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\varkappa - 1} = 293{,}15\ \mathrm{K} \left(\frac{0{,}0157}{0{,}00314}\right)^{0{,}4},$$
$$T_2 = 558{,}05\ \mathrm{K} \quad \text{oder} \quad t_2 = 284{,}90\ °\mathrm{C},$$

ενώ η τελική πίεση προκύπτει από τη γνωστή σχέση:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\varkappa},$$
$$p_2 = 1\ \mathrm{bar} \left(\frac{0{,}0157}{0{,}00314}\right)^{1{,}4},$$
$$p_2 = 9{,}52\ \mathrm{bar}.$$

9. Μιά εγκατάσταση παροχής πεπιεσμένου αέρα, θα πρέπει να παρέχει 1000 Nm^3/h πεπιεσμένου αέρα στα 15 bar. Ο αέρας αυτός θα αναρροφάται από το συμπιεστή σε πίεση 1 at και θερμοκρασία $\theta_1 = 20^{o}C$.
Πόσα kW ισχύ θα πρέπει να έχει ο συμπιεστής, που θεωρείται χωρίς απώλειες, εάν η συμπίεση γίνεται:

(i) ισόθερμα
(ii) αδιαβατικά
(iii) πολυτροπικά με n= 1.3

Πόση θερμότητα προσδίδεται στον αέρα στις περιπτώσεις (i) και (iii);

Η παροχή όγκου του αέρα που αναρροφά ο συμπιεστής, μπορεί να υπολογιστεί πολύ απλά με παραγώγιση της σχέσης για την ισόθερμη μεταβολή κατάστασης (διεργασία μόνιμης ροής):

$$\dot{V}_1 = \frac{p_2}{p_1} \dot{V}_2 = 15 \cdot 1000\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}} = 15000\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}.$$

Η παροχή αυτή θα ληφθεί η ίδια και στις τρείς περιπτώσεις, για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

(i) κατά την ισόθερμη μεταβολή κατάστασης, η θεωρητικά απαιτούμενη ισχύς για τη συμπίεση δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$P_{12} = p_1 \cdot \dot{V}_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$
$$= 1\ \mathrm{bar} \cdot 15000\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}} \ln 15,$$

και προκύπτει ίση με: $P_{12} = 1128{,}35\ \mathrm{kW}$

ενώ η θερμορροή που απάγεται, προκύπτει με εφαρμογή του 1ου Θ.Α.:

$$\dot{Q}_{12} = -P_{12} = -1128{,}35\ \mathrm{kW}$$

(ii) Με οιονεί-στατική, αδιαβατική συμπίεση, η θεωρητική ισχύς προκύπτει ίση με:

$$P_{12} = \frac{p_1 \dot{V}_1}{\varkappa - 1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}} - 1\right]$$

$$= \frac{1\ \mathrm{bar} \cdot 15000\ \mathrm{m^3/h}}{1{,}4 - 1}\left[15^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} - 1\right],$$

$$P_{12} = 1216{,}49\ \mathrm{kW},$$

$$\dot{Q}_{12} = 0.$$

(iii) Κατά την πολυτροπικη συμπίεση με πολυτροπικό εκθέτη n=1.3, η θεωρητικά απαιτούμενη ισχύς προκύπτει:

$$P_{12} = \frac{p_1 \dot{V}_1}{n - 1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

$$= \frac{1\ \mathrm{bar} \cdot 15000\ \mathrm{m^3/h}}{1{,}3 - 1}\left[15^{\frac{1{,}3-1}{1{,}3}} - 1\right],$$

$$P_{12} = 1205{,}73\ \mathrm{kW},$$

Οσον αφορά την θερμορροή που απορρίπτεται στο ψυκτικό μέσο στην περίπτωση αυτή, αυτή δίνεται από τη σχέση (που αποδεικνύεται εύκολα!):

$$\dot{Q}_{12} = \frac{n - \varkappa}{\varkappa - 1} P_{12}$$

$$= \frac{1{,}3 - 1{,}4}{1{,}4 - 1} \cdot 1205{,}73\ \mathrm{kW},$$

$$\dot{Q}_{12} = -301{,}43\ \mathrm{kW}.$$

10. Σ'ένα χώρο όγκου V=50 l, στον οποίο βρίσκεται αέρας σε ισορροπία με την ατμόσφαιρα (p = 760 Torr και θ = 20°C), θα πρέπει να δημιουργήσουμε κενό μέχρι τα 0.01 bar απόλυτη πίεση.
Πόσο έργο απαιτείται θεωρητικά για το σκοπό αυτό, εάν η άντληση γίνει στους 20°C;

Για τη δημιουργία του απαιτούμενου κενού, θα μπορούσαμε να σκεφτούμε την παρακάτω σειρά από οιονεί-στατικές διεργασίες:

Αφήνουμε τον αρχικό όγκο των 0.50 m^3 να εκτονωθεί ισόθερμα από την πίεση p_1=760 Torr σε p_2=0.01 bar.

Στη συνέχεια κρατάμε 0.050 m^3 από τον όγκο αυτό (όσο δηλ. χρειαζόμαστε), και το υπόλοιπο το ξανασυμπιέζουμε σε πίεση p_1.

Το άθροισμα των έργων που δαπανάμε για τις παραπάνω διεργασίες, συνυπολογιζόμενου και του έργου της ατμοσφαιρικής πίεσης, μας δίνει το θεωρητικά απαιτούμενο έργο:

$$L = -p_1 V \ln\frac{p_1}{p_2} + p_2(V_2 - V_1) - p_2(V_2 - V_1)\ln\frac{p_2}{p_1} + p_2 V[\frac{p_2}{p_1}(V_2 - V_1) - (V_2 - V_1)]$$

ή

$$-L = Vp_2\left(\frac{p_1}{p_2} - 1 - \ln\frac{p_1}{p_2}\right); \quad 760\ \mathrm{Torr} = 1{,}01325\ \mathrm{bar}$$

$$= 0{,}05\ \mathrm{m^3} \cdot 0{,}01\ \mathrm{bar}\left(\frac{760\ \mathrm{Torr}}{0{,}01\ \mathrm{bar}} - 1 - \ln\frac{760\ \mathrm{Torr}}{0{,}01\ \mathrm{bar}}\right),$$

$$-L = 4{,}785\ \mathrm{kJ}.$$

11. Ενας ηλεκτροκινητήρας ισχύος 5 kW πεδείται επί μία ώρα, και η θερμότητα Q που παράγεται από τις τριβές διοχετεύεται στο περιβάλλον σε θερμοκρασία 20°C. *Πόση παραγωγή εντροπίας έχουμε στην περίπτωση αυτή;*

Το αποδιδόμενο έργο είναι:

$$-L_{12} = 5\ \mathrm{kWh} = Q_{12}$$

και η παραγωγή εντροπίας:

$$\Delta S = \frac{Q_{12}}{T} = \frac{5\ \mathrm{kWh}}{293{,}15\ \mathrm{K}} = 61{,}4\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}.$$

12. Να εξαχθεί η σχέση του Maxwell:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s$$

με τη βοήθεια της θεμελιώδους εξίσωσης του Gibbs:

$$dH = T.dS + V.dp$$

Οπως είναι γνωστό η ενθαλπία μιάς καθαρής ουσίας, όπως και όλες οι άλλες θερμοδυναμικές συντεταγμένες, μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση δύο οποιωνδήποτε άλλων ανεξάρτητων μεταβλητών (θερμοδυναμικών συντεταγμένων):

$$H = H(S, p),$$

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p dS + \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S dp$$

Είναι όμως επίσης γνωστή (και θα πρέπει να την θυμόμαστε από μνήμης), η θεμελιώδης σχέση του Gibbs:

$$dH = TdS + Vdp.$$

(η οποία προκύπτει εύκολα εάν εκφραστεί η ενθαλπία σύμφωνα με τον ορισμό της, μέσω της εσωτερικής ενέργειας, και στη συνέχεια εφαρμοστεί το 1ο Θ.Α. στη διαφορική του μορφή). Εξισώνοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, προκύπτει σύμφωνα με τη θεωρία των συναρτήσεων πολλών μεταβλητών:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p = T, \quad \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S = V.$$

Επειδή τώρα η ενθαλπία είναι καταστατικό μέγεθος, η μεταβολή της μεταξύ δύο καταστάσεων δεν εξαρτάται από την πορεία της διεργασίας μεταβολής, άρα:

$$\left[\frac{\partial}{\partial p}\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p\right]_S = \left[\frac{\partial}{\partial S}\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_S\right]_p.$$

και επομένως προκύπτει:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p.$$

13. Δύο δοχεία πίεσης, από τα οποία το ένα, όγκου $V_1 = 5\ m^3$, περιέχει αέρα πίεσης $p_1 = 1$ bar και θερμοκρασίας $\theta_1 = 20^oC$, και το άλλο, όγκου $V_2 = 2\ m^3$, περιέχει αέρα πίεσης $p_2 = 20$ bar και θερμοκρασίας $\theta_2 = 20^oC$, συνδέονται μεταξύ τους με λεπτότοιχο σωλήνα, έτσι ώστε να εξισωθούν οι πιέσεις τους.
Ποιά θα είναι η τελική κατάσταση του αέρα στα δύο δοχεία, εάν:
(i) είναι θερμομονωμένα σε σχέση με το περιβάλλον, αλλά ανταλλάσσουν θερμότητα μεταξύ τους, και
(ii) είναι θερμομονωμένα και μεταξύ τους;

Πόση εντροπία παράγεται με την εξίσωση της πίεσης και της θερμοκρασίας;
Ποιό έργο μπορεί να παραχθεί εάν η εξίσωση των πιέσεων γίνει με αντιστρεπτό τρόπο, στην περίπτωση που τα δύο δοχεία διατηρούνται συνεχώς σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον, θερμοκρασίας 20^oC;

(i) Κατά την ανάμιξη, δεν μεταβάλλεται η συνολική εσωτερική ενέργεια του αέρα, και εφόσον η ειδική εσωτερική ενέργεια του αέρα θεωρηθεί σαν συνάρτηση αποκλειστικά της θερμοκρασίας, δεν θα μεταβληθεί και η θερμοκρασία.
Πριν από την ανάμιξη, περιέχονται στα δύο δοχεία, οι παρακάτω μάζες αέρα:

$$m_1 = \frac{p_1 V_1}{R \cdot T} = \frac{1\ \text{bar} \cdot 5\ \text{m}^3}{0{,}286\ \text{kJ/(kg K)} \cdot 293{,}15\ \text{K}},$$

$$m_1 = 5{,}96\ \text{kg},$$

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{R \cdot T} = \frac{20\ \text{bar} \cdot 2\ \text{m}^3}{0{,}286\ \text{kJ/(kg K)} \cdot 293{,}15\ \text{K}},$$

$$m_2 = 47{,}71\ \text{kg}$$

οπότε η συνολική μάζα είναι:

$$m_1 + m_2 = m = 53{,}67\ \text{kg}.$$

Για τον υπολογισμό της τελικής πίεσης στο ενιαίο πλέον δοχείο, εφαρμόζουμε την καταστατική εξίσωση πριν και μετά την ανάμιξη:

$$m_1 + m_2 = \frac{p(V_1 + V_2)}{RT} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{RT}.$$

Ετσι προκύπτει η ενιαία τελική πίεση:

$$p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2} = \frac{1\ \text{bar} \cdot 5\ \text{m}^3 + 20\ \text{bar} \cdot 2\ \text{m}^3}{5\ \text{m}^3 + 2\ \text{m}^3} = 6{,}43\ \text{bar},$$

$$p = 6{,}43\ \text{bar}.$$

(ii) Ο αέρας μάζας m_2 εκτονώνεται από πίεση p_2 σε πίεση p, και ο αέρας μάζας m_1 συμπιέζεται από πίεση p_1 σε πίεση p. Εάν η εξίσωση των πιέσεων γίνει αντιστρεπτά και ισόθερμα, τότε μπορεί να κερδηθεί το παρακάτω έργο:

$$L = p_2 V_2 \ln \frac{p_2}{p} - p_1 V_1 \ln \frac{p}{p_1}$$

$$= 20\ \mathrm{bar} \cdot 2\ \mathrm{m^3} \cdot \ln \frac{6{,}43}{20} - 1\ \mathrm{bar} \cdot 5\ \mathrm{m^3} \cdot \ln \frac{1}{6{,}43},$$

$$L = -3608{,}5\ \mathrm{kJ} = -Q$$

και έτσι θα προκύψει η παρακάτω αύξηση εντροπίας:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{3608{,}5\ \mathrm{kJ}}{293{,}15\ \mathrm{K}} = 12{,}31\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}$$

Κατά την εξίσωση μόνο των πιέσεων, και όχι των θερμοκρασιών, προκύπτει η ίδια τελική πίεση p=6.43 bar, από τη συνθήκη σταθερής εσωτερικής ενέργειας (1ο Θ.Α.). Στο δοχείο 2 εκτον'ωνεται ο αέρας αδιαβατικά και αντιστρεπτά από τα 20 bar στα 6.43 bar, και εξαιτίας αυτού ψύχεται σε:

$$T_2 = T\left(\frac{p}{p_2}\right)^{\frac{\varkappa - 1}{\varkappa}} = 293{,}15\ \mathrm{K}\left(\frac{6{,}43}{20}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}.$$

$$T_2 = 211{,}97\ \mathrm{K}$$

Ετσι μπορούμε να υπολογίσουμε τις ποσότητες αέρα στα δύο δοχεία:

$$m_2 = \frac{p \cdot V_2}{R T_2} = \frac{6{,}43\ \mathrm{bar} \cdot 2\ \mathrm{m^3\ kg\ K}}{0{,}286\ \mathrm{kJ} \cdot 211{,}97\ \mathrm{K}},$$

$$m_2 = 21{,}21\ \mathrm{kg},$$

$$m_1 = m - m_2 = (53{,}67 - 21{,}21)\ \mathrm{kg} = 32{,}46\ \mathrm{kg}$$

Από τη συνθήκη ότι η εσωτερική ενέργεια του αέρα στο ενιαίο δοχείο είναι ίση με το άθροισμα των εσωτερικών ενεργειών του αέρα στα δύο επι μέρους δοχεία, προκύπτει η τιμή της θερμοκρασίας T_1:

$$(m_1 + m_2)\, c_v T = m_1 c_v T_1 + m_2 c_v T_2,$$

$$T_1 = \frac{(m_1 + m_2)\, T - m_2 T_2}{m_1}$$

$$= \frac{53{,}67\ \mathrm{kg} \cdot 293{,}15\ \mathrm{K} - 21{,}21\ \mathrm{kg} \cdot 211{,}97\ \mathrm{K}}{32{,}46\ \mathrm{kg}},$$

$$T_1 = 346{,}19\ \mathrm{K}.$$

14. Ποιό έργο απαιτεί θεωρητικά η διάσπαση 1 kg αέρα θερμοκρασίας 20°C και πίεσης 1 bar, στα συστατικά του (79 vol% N_2 και 21 vol% O_2), εάν υποτεθεί ότι αυτά θα έχουν την ίδια πίεση και την ίδια θερμοκρασία;

Το απαιτούμενο έργο είναι ακριβώς το αντίθετο από αυτό που θα παραγόταν κατά την ισόθερμη και αντιστρεπτή ανάμιξη των παραπάνω συστατικών για τη δημιουργία 1 kg αέρα:

$$L = -pV\left(\frac{V_1}{V}\ln\frac{V}{V_1} + \frac{V_2}{V}\ln\frac{V}{V_2}\right),$$

$$pV = mRT; \qquad R = 0{,}286\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}},$$

$$L = -\,mRT\left(\frac{V_1}{V}\ln\frac{V}{V_1} + \frac{V_2}{V}\ln\frac{V}{V_2}\right),$$

$$L = -1\,\mathrm{kg}\cdot 0{,}286\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}}\cdot 293{,}15\,\mathrm{K}\left(0{,}79\ln\frac{1}{0{,}79} + 0{,}21\ln\frac{1}{0{,}21}\right),$$

$$L = -43{,}09\,\mathrm{kJ}.$$

15. Σε ένα περιβάλλον θερμοκρασίας $\theta_1 = +20^{o}C$, τήκονται 100 kg πάγου θερμοκρασίας -5°C και γίνονται νερό θερμοκρασίας +20°C. Η ενθαλπία τήξης του πάγου είναι q_s=333.7 kJ/kg, και η ειδική θερμοχωρητικότητά του c=2.03 kJ/(kg K).
Πόση είναι η αύξηση εντροπίας σ' αυτή τη μή αντιστρεπτή διεργασία; Πόσο έργο θα πρέπει να δαπανηθεί για να επανέλθει το σύστημα στην προηγούμενη κατάστασή του;

Η τήξη του πάγου και η θέρμανση του νερού που προκύπτει έτσι μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, απαιτεί τη θερμότητα:

$$Q = [c(T_0 - T_1) + q_s + c_p(T_2 - T_0)]$$

$$= 100\,\mathrm{kg}\left[2{,}03\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}}\cdot 5\,\mathrm{K} + 333{,}7\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}} + 4{,}186\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}}\cdot 20\,\mathrm{K}\right],$$

$$Q = 42\,757\,\mathrm{kJ}.$$

Η παραπάνω θερμότητα μεταφέρεται από το περιβάλλον σε θερμοκρασία T_u=293.15 K, οπότε συνοδεύεται από μείωση εντροπίας του περιβάλλοντος κατά:

$$\frac{-Q}{T_u} = \frac{-42\,757\,\mathrm{kJ}}{293{,}15\,\mathrm{K}} = -145{,}84\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}},$$

Από την άλλη μεριά, ο πάγος υφίσταται αύξηση της εντροπίας του:

$$m\left[c\int_1^0 \frac{dT}{T} + \frac{q_s}{T_0} + c_p\int_0^2 \frac{dT}{T}\right]$$

$$= m\left[c\ln\frac{T_0}{T_1} + \frac{q_s}{T_0} + c_p\ln\frac{T_2}{T_1}\right]$$

$$= 100\,\mathrm{kg}\left[2{,}03\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}}\ln\frac{273{,}15}{268{,}15} + \frac{333{,}7\,\mathrm{kJ/kg}}{273{,}15\,\mathrm{K}} + 4{,}186\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}}\ln\frac{293{,}15}{268{,}15}\right]$$

$$= 163{,}23\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}.$$

Η παραγωγή εντροπίας που προκύπτει από τη διεργασία αυτή, είναι επομένως:

$$\Delta S = (163{,}23 - 145{,}85)\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}} = 17{,}38\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}.$$

Για να επανέλθει το σύστημα στην αρχική του κατάσταση, θα πρέπει να δαπανηθεί το παρακάτω έργο:

$$-L_{tex} = H_1 - H_2 - T_0(S_1 - S_2)$$

Εδώ ο δείκτης 1 σημαίνει πάγος -5°C, ο δείκτης 2 σημαίνει νερό 20°

C, και επομένως ισχύει H_2-H_1=Q=42.75 kJ, που είναι η θερμότητα που υπολογίστηκε παραπάνω, ενώ S_2-S_1=163.23 kJ/K η αύξηση εντροπίας του πάγου και T_o=293.15 K η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ετσι προκύπτει:

$$-L_{tex} = -42757\ \mathrm{kJ} - 293{,}15\ \mathrm{K} \cdot (-163{,}23\ \mathrm{kJ/K}) = 5093\ \mathrm{kJ}.$$

16. Σε ένα αεριοφυλάκιο πεπιεσμένου αέρα όγκου V=100 l, βρίσκεται αέρας πίεσης p_1=50 bar και θερμοκρασία θ_1=20°C. O αέρας του περιβάλλοντος έχει πίεση p_2=1 bar και θερμοκρασία θ_2=20°C.
Πόσο είναι το έργο που μπορεί να κερδηθεί, εάν εκτονώσουμε το περιεχόμενο του αεριοφυλακίου:

(i) ισόθερμα, και
(ii) αδιαβατικά

μέχρι την πίεση περιβάλλοντος; Ποιά είναι η ελάχιστη θερμοκρασία που θα επικρατεί στο αεριοφυλάκιο, εάν ανοίξουμε τη βαλβίδα και αφήσουμε το περιεχόμενο να εκτονωθεί στο περιβάλλον, έως ότου η πίεση στο αεριοφυλάκιο πέσει στο 1 bar, και με την παραδοχή ότι η διεργασία είναι τόσο γρήγορη, ώστε να ***μή*** *λάβει χώρα εναλλαγή θερμότητας μεταξύ αεριοφυλακίου και περιεχομένου του; Ποιά αύξηση εντροπίας έχει προκύψει από την εκτόνωση, τη στιγμή της εξίσωσης των θερμοκρασιών;*

(i) Κατά την ισόθερμη εκτόνωση, το αέριο αποδίδει το ωφέλιμο έργο:

$$\begin{aligned} L_{n_{12}} &= -\int_1^2 p\,dV + p_u(V_2 - V_1) \\ &= L_{12} + p_u(V_2 - V_1) \end{aligned}$$

Το έργο μεταβολής όγκου L_{12}, προκύπτει από τη γνωστή σχέση:

$$L_{12} = -p_1 V_1 \cdot \ln\frac{p_1}{p_2} = -50\ \mathrm{bar} \cdot 0{,}1\ \mathrm{m}^3 \cdot \ln 50,$$
$$L_{12} = -1956{,}01\ \mathrm{kJ}.$$

Το έργο που απαιτείται για την υπερνίκηση της ατμοσφαιρικής πίεσης, είναι:

$$p_u(V_2 - V_1) \quad \text{mit} \quad V_2 = \frac{p_1}{p_2} V_1 = 50 \cdot 0{,}1\ \mathrm{m}^3 = 5\ \mathrm{m}^3$$
$$= 1\ \mathrm{bar}\,(5 - 0{,}1)\ \mathrm{m}^3 = 490\ \mathrm{kJ}.$$

Το ωφέλιμο έργο κατά την ισόθερμη εκτόνωση, είναι επομένως:

$$L_{n_{12}} = (-1956{,}01 + 490)\ \mathrm{kJ} = -1466{,}01\ \mathrm{kJ}.$$

(ii) Κατά την οιονεί-στατική αδιαβατική εκτόνωση, ισχύει κατά τα γνωστά:

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/\varkappa} \\ &= 0{,}1\ \mathrm{m}^3 \cdot 50^{1/1{,}4} \\ V_2 &= 1{,}635\ \mathrm{m}^3 \end{aligned}$$

και το έργο μεταβολής όγκου L_{12} είναι:

$$L_{12} = \frac{p_1 V_1}{\varkappa - 1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}} - 1\right]$$
$$= \frac{50\ \mathrm{bar} \cdot 0{,}1\ \mathrm{m}^3}{1{,}4 - 1}\left[\left(\frac{1}{50}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} - 1\right],$$
$$L_{12} = -841{,}25\ \mathrm{kJ}.$$

Εδώ η εξώθηση της ατμόσφαιρας απαιτεί έργο: $p_u(V_2 - V_1) = 1\,\text{bar}\,(1{,}635 - 0{,}1)\,\text{m}^3 = 153{,}5\,\text{kJ}$,

οπότε το έργο που μπορεί να κερδηθεί είναι ό,τι απομένει:

$$L_{n_{12}} = (-\,841{,}25 + 153{,}5)\,\text{kJ} = -687{,}75\,\text{kJ}.$$

Η ελάχιστη θερμοκρασία, προκύπτει ίση με:

$$T_{min} = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}} = 293{,}15\,\text{K}\left(\frac{1}{50}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}},$$

$$T_{min} = 95{,}98\,\text{K}.$$

Η αύξηση εντροπίας που προκύπτει από την εκτόνωση στο περιβάλλον μετά την εξίσωση των θερμοκρασιών, μπορεί να υπολογιστεί εάν θεωρήσουμε αρχικά την υποθετική περίπτωση ισόθερμης αντιστρεπτής εκτόνωσης, οπότε, όπως υπολογίσαμε παραπάνω, θα παράγονταν 1466.01 kJ ωφέλιμου έργου, και στη συνέχεια θεωρήσουμε ότι το έργο αυτό σκεδάζεται μέσω τριβών σε εσωτερική ενέργεια. Ετσι προκύπτει η αύξηση εντροπίας:

$$\Delta S = \frac{-L_{n_{12}}}{T_0} = \frac{1466{,}01\,\text{kJ}}{293{,}15\,\text{K}} = 5{,}00\,\frac{\text{kJ}}{\text{K}}.$$

Διαφορετική είναι βέβαια η αύξηση εντροπίας του ίδιου του αερίου:

$$\frac{-L_{12}}{T_0} = \frac{1956{,}01\,\text{kJ}}{293{,}15\,\text{K}} = 6{,}703\,\frac{\text{kJ}}{\text{K}}.$$

17. 1 kg ιδανικού αερίου (R=0.286 kJ/(kg K), κ=1.4), εκτονώνεται από την κατάσταση 1, p_1= 8 bar, T_1= 400 K, στην κατάσταση περιβάλλοντος p_o= 1 bar, T_o= 300 K. *Ποιό είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να κερδηθεί;*

Το μέγιστο έργο που μπορεί να κερδηθεί, δίνεται βέβαια από την *εξέργεια*:

Ισχύει:

$$-L_{ex} = U_1 - U_0 - T_0(S_1 - S_0)$$
$$= mc_v(T_1 - T_0) - T_0\left[mc_p \ln\frac{T_1}{T_0} - mR\ln\frac{p_1}{p_0}\right].$$

$$c_p = R\frac{\varkappa}{\varkappa-1} = 0{,}286\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\cdot\frac{1{,}4}{0{,}4} = 1\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}},$$

$$c_v = c_p - R = 0{,}714\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}.$$

και επομένως:

$$-L_{ex} = 1\,\text{kg}\cdot 0{,}174\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}(400\,\text{K} - 300\,\text{K})$$
$$-\,300\,\text{K}\cdot\left[1\,\text{kg}\cdot 1\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\ln\frac{400}{300} - 1\,\text{kg}\cdot 0{,}286\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\ln\frac{8}{1}\right],$$

$$L_{ex} = -\,163{,}4\,\text{kJ}.$$

18. Σε έναν αεριοστρόβιλο, εκτονώνεται αδιαβατικά ιδανικό αέριο (R=0.286 kJ/(kg K), κ=1.4), από την αρχική κατάσταση p_1= 15 bar, T_1= 800 K, w_1≈0 , μέχρι πίεση p_2=1.5 bar. Το αέριο εγκαταλείπει την τουρμπίνα με θερμοκρασία T_2= 450 K και ταχύτητα w_2= 100 m/s.

(i) Πόση ισχύ αποδίδει η τουρμπίνα, εάν η ροή μάζας του αερίου είναι m= 10 kg/s.

(ii) Πόση είναι η απώλεια εξέργειας; Θερμοκρασία περιβάλλοντος T_o= 300 K.

(i) Σύμφωνα με το 1ο Θ.Α. για ανοικτά συστήματα, ισχύει, αφού αγνοηθούν οι μεταβολές δυναμικής ενέργειας, και με προϋπόθεση αδιαβατικών μεταβολών κατάστασης, με w_1=0:

$$P_{12} = \dot{M}\left[h_2 - h_1 + \frac{1}{2}w_2^2\right].$$

Ισχύει επίσης, για ιδανικά αέρια:

$$h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

με

$$c_p = \frac{\varkappa}{\varkappa - 1}R.$$

Οπότε, με αντικατάσταση στην παραπάνω εξίσωση:

$$P_{12} = \dot{M}\left[\frac{\varkappa}{\varkappa - 1}R(T_2 - T_1) + \frac{1}{2}w_2^2\right]$$

$$= 10\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}\left[\frac{1{,}4}{1{,}4 - 1}\cdot 0{,}286\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}}(450\ \mathrm{K} - 800\ \mathrm{K}) + \frac{1}{2}\cdot 10^2\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}\right],$$

$$P_{12} = -3453{,}5\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{s}} = -3453{,}5\ \mathrm{kW} = -3{,}4535\ \mathrm{MW}.$$

(ii) Για τις απώλειες εξέργειας ενός αδιαβατικού συστήματος, ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$L_{v12}^{(\mathrm{ad})} = \int_1^2 T_0\,dS = T_0(S_2 - S_1).$$

Η διαφορά εντροπίας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$s_2 - s_1 = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$= 1{,}001\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}}\ln\frac{450}{800} - 0{,}286\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}}\ln\frac{1{,}5}{15},$$

$$s_2 - s_1 = 0{,}0826\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}},$$

$$P_{v12}^{(\mathrm{ad})} = T_0\dot{M}(s_2 - s_1)$$

$$= 300\ \mathrm{K}\cdot 10\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}\cdot 0{,}0826\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\,K}},$$

$$P_{v12}^{(\mathrm{ad})} = 247{,}8\ \mathrm{kW}.$$

19. Σε ένα εναλλάκτη θερμότητας μεταφέρεται θερμορροή Q=100 kJ/h μεταξύ δύο ροών αερίων με μέσες θερμοκρασίες T_1= 360 K και T_2= 250 K. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι T_o= 300 K.

(i) Πόση είναι η απώλεια εξέργειας ανά μονάδα χρόνου;
(ii) Να ορίσετε ένα βαθμό απόδοσης του εναλλάκτη που να έχει νόημα!

(i) Για τη ροή απωλειών εξέργειας ενός εναλλάκτη, ισχύει όπως εύκολα αποδεικνύεται:

$$P_{v_{12}} = T_0 \dot{Q}_{12} \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}$$
$$= 300\ \mathrm{K} \cdot 100\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{h}} \cdot \frac{(360\ \mathrm{K} - 250\ \mathrm{K})}{360\ \mathrm{K} \cdot 250\ \mathrm{K}},$$
$$P_{v_{12}} = 36{,}67\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{h}}.$$

(ii) Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{\text{εξέργεια της προσδιδόμενης θερμότητας} - \text{απώλειες εξέργειας}}{\text{εξέργεια της προσδιδόμενης θερμότητας}}$$

$$= 1 - \frac{T_0}{T_2 - T_0} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 0{,}634,$$

όπου η εξέργεια της προσδιδόμενης θερμότητας δίνεται από τη σχέση:

$$-dL_{ex} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ \quad \text{mit} \quad T = T_2.$$

Ο παραπάνω ορισμός για το βαθμό απόδοσης είναι οπωσδήποτε ορθολογικός, αφού το η παίρνει στην καλύτερη περίπτωση την τιμή 1 και στη χειρότερη την τιμή 0.

20. Από το περιβάλλον, θερμοκρασίας θ_o= +20°C, ρέουν ωριαία 35 kWh θερμότητας σε ένα ψυκτικό θάλαμο, όπου επικρατεί θερμοκρασία θ_1=-15°C.
Πόση ισχύς απαιτείται θεωρητικά από μιά ψυκτική μηχανή, η οποία διατηρεί τη θερμοκρασία των -15°C στο θάλαμο, εάν η μηχανή απορρίπτει θερμότητα σε θερμοκρασία +20°C στο νερό ψύξης. Πόσο νερό ψύξης απαιτείται ανά ώρα, εφόσον αυτό θερμαίνεται στους 7°C μέχρι να βγεί από τον εναλλάκτη;

Σύμφωνα με τον ορισμό του βαθμού απόδοσης της ιδανικής ψυκτικής μηχανής Carnot, ισχύει:

$$-P = \frac{T_1 - T_0}{T_1} \dot{Q}_0 = \frac{258{,}15\ \mathrm{K} - 293{,}15\ \mathrm{K}}{258{,}15\ \mathrm{K}} \cdot 35\ \mathrm{kW},$$
$$P = 4{,}74\ \mathrm{kW}\ \text{theoretische Leistung}.$$

(θεωρητική ισχύς).

Στο νερό ψύξης απάγεται η θερμορροή: $\dot{Q} = \dot{Q}_0 \frac{T_0}{T_1} = 39{,}7 \text{ kW}$

Η απαιτούμενη παροχή μάζας νερού ψύξης στο συμπυκνωτή, είναι:

$$\dot{M} = \frac{\dot{Q}}{c_p \Delta T} = \frac{39{,}7 \text{ kW}}{4{,}186 \text{ kJ/(kg K)} \cdot 7 \text{ K}} = \frac{39{,}7 \text{ (kJ/s)} \cdot 3600 \text{ (s/h)}}{4{,}186 \text{ kJ/(kg K)} \cdot 7 \text{ K}},$$

$$\dot{M} = 4877 \text{ kg/h}.$$

21. Σε ένα τέλεια θερμομονωμένο θερμαντήρα αέρα, θερμαίνεται ροή 10 kg/s αέρα ισοβαρώς από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_o= 300 K, με τη θερμότητα που αποδίδει ροή καυσαερίου 10 kg/s, το οποίο κρυώνει από τους 1200 K στους 800 K.

(i) Σε ποιά θερμοκρασία θερμαίνεται ο αέρας;
(ii) Πόση απώλεια εξέργειας προκύπτει από την εναλλαγή θερμότητας στο θερμαντήρα;
Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα c_{pL}= 1.0 kJ/(kg K)
Ειδική θερμοχωρητικότητα καυσαερίου c_{pR}= 1.1 kJ/(kg K)+ 0.5.10^{-3} kJ/(kg K^2).T

(i) Η θερμορροή που απορρίπτεται από το καυσαέριο, λαμβάνεται από τον αέρα:

$$\dot{Q}_{10} = \dot{M}_R \int_{T_{0R}}^{T_{1R}} c_{pR} dT = \dot{M}_L c_{p_L} (T_1 - T_0).$$

Η παραπάνω θερμορροή υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{M}_R \int_{T_{0R}}^{T_{1R}} c_{pR} dT = 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \int_{800 \text{ K}}^{1200 \text{ K}} \left(1{,}1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} + 0{,}5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}^2} \cdot T\right) dT = 6400 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}.$$

Ετσι προκύπτει:

$$T_1 = \frac{6400 \text{ kJ/s}}{10 \text{ kg/s} \cdot 1 \text{ kJ/(kg K)}} + 300 \text{ K} = 940 \text{ K}.$$

(ii) Οι απώλειες εξέργειας του τέλεια θερμομονωμένου (αδιαβατικού) θερμαντήρα αέρα, προκύπτει σαν το γινόμενο της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της παραγωγής εντροπίας λόγω μη αντιστρεπτότητας κατά τη μεταφορά θερμότητας:

$$L_v^{(\text{ad})} = T_0 \Delta S.$$

Η συνολική μεταβολή εντροπίας προκύπτει με άθροιση των μεταβολών εντροπίας του αέρα και του καυσαερίου.
Η μεταβολή εντροπίας του αέρα είναι:

$$\dot{M}_L c_{p_L} \ln \frac{T_1}{T_0} = 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \ln \frac{940}{300} = 11{,}42 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}}$$

και η μεταβολή εντροπίας του καυσαερίου:

$$\dot{M}_R \int_{1200 \text{ K}}^{800 \text{ K}} c_{p_R} \frac{dT}{T} = 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left[1{,}1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \ln \frac{800}{1200} + 0{,}5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}^2} (800 \text{ K} - 1200 \text{ K})\right]$$

$$= -6{,}47 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}}.$$

Ετσι προκύπτει η παρακάτω ροή απωλειών εξέργειας:

$$P_v^{(\text{ad})} = 300 \text{ K} \left(11{,}42 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}} - 6{,}47 \frac{\text{kJ}}{\text{sK}}\right) = 1488 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 1488 \text{ kW}.$$

22. Ενα θερμομονωμένο δοχείο περιέχει 5 kg ενός υγρού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, p_o= 1 bar, T_o= 300 K. Με τη βοήθεια ενός αναδευτήρα, προσδίδουμε ισόχωρα στο υγρό, έργο 0.2 kWh. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού είναι c_v= 0.8 kJ/(kg.K)

(i) Να δείξετε ότι η διεργασία αυτή είναι μή αντιστρεπτή!

(ii) Ποιό τμήμα της ενέργειας που προσδόθηκε με τον αναδευτήρα μπορεί να ανακτηθεί στην καλλίτερη περίπτωση;

(i) Με την ανάδευση αυξάνει η εσωτερική ενέργεια και επομένως και η θερμοκρασία του υγρού. Η θερμοκρασία T_1 μετά την αναδευση, προκύπτει από το 1ο Θ.Α.:

$$L_{10} = m\,(u_1 - u_0) = mc_v(T_1 - T_0)$$

$$T_1 = \frac{L_{10}}{m\,c_v} + T_0 = \frac{0{,}2\ \mathrm{kWh} \cdot 3600\ \mathrm{kJ/kWh}}{5\ \mathrm{kg} \cdot 0{,}8\ \mathrm{kJ/(kg\ K)}} + 300\ \mathrm{K} = 480\ \mathrm{K}.$$

Η εντροπία του υγρού αυξάνει κατά την παραπάνω ισόχωρη διεργασία ώς εξής:

$$S_1 - S_0 = mc_v \ln\frac{T_1}{T_0} = 5\ \mathrm{kg} \cdot 0{,}8\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\ K}} \ln\frac{480}{300} = 1{,}88\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}$$

και φυσικά, η διεργασία είναι μή αντιστρεπτή.

(ii) Η προσδιδόμενη ενέργεια σκεδάζεται ολόκληρη, έτσι ώστε στην καλύτερη περίπτωση η εξέργεια της προσδιδόμενης ενέργειας που μπορεί να κερδηθεί είναι ίση με:

$$-L_{ex} = \int_{T_0}^{T_1} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) d\Psi = \int_{T_0}^{T_1} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) mc_v\, dT\,,$$

$$-L_{ex} = mc_v(T_1 - T_0) - T_0 mc_v \ln\frac{T_1}{T_0} = L_{10} - T_0(S_1 - S_0)\,,$$

$$-L_{ex} = 0{,}2\ \mathrm{kWh} \cdot 3600\ \mathrm{kJ/kWh} - 300\ \mathrm{K} \cdot 1{,}88\ \mathrm{kJ/K} = 156\ \mathrm{kJ}\,,$$

$$L_{ex} = -\ 0{,}043\ \mathrm{kWh}.$$

23. Σε ένα θερμομονωμένο, χαλύβδινο δοχείο πίεσης, υπάρχουν δύο ιδανικά αέρια που χωρίζονται μεταξύ τους από ένα σταθερό αδιαβατικό τοίχωμα. Ο ένας χώρος περιέχει m' = 18 kg αερίου με V' = 10 m^3, p'_1 = 1 bar, T'_1 = 294 K, και ο άλλος χώρος m'' = 30 kg αερίου, V'' = 3 m^3, p''_1 = 10 bar, T''_1 = 530 K.

(i) Ποιά τελική θερμοκρασία και ποιά τελική πίεση θα αποκατασταθούν, εάν υποθέσουμε ότι εξαφανίζεται το διαχωριστικό τοίχωμα;

(ii) Να δείξετε, ότι η ανάμιξη είναι μή αντιστρεπτή, και να υπολογίσετε την απώλεια εξέργειας.

Σταθερές αερίων R' = R'' = 0.189 kJ/(kg K), ειδικές θερμοχωρητικότητες $c'_v = c''_v$ = 0.7 kJ/(kg K), θερμοκρασία περιβάλλοντος θ_o = 20°C.

Η εσωτερικη ενέργεια του αδιαβατικού δοχείου αποτελείται από το άθροισμα των εσωτερικών ενεργειών των δύο χώρων, και παραμένει σταθερή. Εξαιτίας αυτού, μετά την απομάκρυνση του διαχωριστικού τοιχώματος, η εσωτερική ενέργεια του ενός χώρου θα αυξηθεί κατά το ίδιο ποσό που θα μειωθεί η εσωτερική ενέργεια του άλλου:

$$m' c'_v (T'_1 - T_m) = -m'' c''_v \, (T''_1 - T_m) .$$

Ετσι προκύπτει η τελική θερμοκρασία:

$$T_m = \frac{m' c'_v T'_1 + m'' c''_v T''_1}{m' c'_v + m'' c''_v} = \frac{m' T'_1 + m'' T''_1}{m' + m''} ,$$

$$T_m = \frac{18 \text{ kg} \cdot 294 \text{ K} + 30 \text{ kg} \cdot 530 \text{ K}}{18 \text{ kg} + 30 \text{ kg}} = 441{,}5 \text{ K} .$$

Η τελική πίεση προκύπτει από τη θερμική καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων:

$$p = \frac{(m' + m'') R T_m}{V' + V''} = \frac{(18 \text{ kg} + 30 \text{ kg}) \cdot 0{,}189 \text{ kJ/(kg K)} \cdot 441{,}5 \text{ K}}{10 \text{ m}^3 + 3 \text{ m}^3} ,$$

$$p = 3{,}08 \text{ bar} .$$

(ii) Μετά την απομάκρυνση του διαχωριστικού τοιχώματος, η εντροπία του ενός αερίου μεταβλήθηκε κατά:

$$\Delta S' = m' \left[c'_v \ln \frac{T_m}{T'_1} + R' \ln \frac{V' + V''}{V'} \right]$$

$$= 18 \text{ kg} \left[0{,}7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \ln \frac{441{,}5 \text{ K}}{294 \text{ K}} + 0{,}189 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \ln \frac{10 \text{ m}^3 + 3 \text{ m}^3}{10 \text{ m}^3} \right] ,$$

$$\Delta S' = 6 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} ,$$

και του άλλου κατά:

$$\Delta S'' = m'' \left[c''_v \ln \frac{T_m}{T''_1} + R' \ln \frac{V' + V''}{V''} \right]$$

$$= 30 \text{ kg} \left[0{,}7 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \ln \frac{441{,}5 \text{ K}}{530 \text{ K}} + 0{,}189 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \ln \frac{10 \text{ m}^3 + 3 \text{ m}^3}{3 \text{ m}^3} \right] ,$$

$$\Delta S'' = 4{,}49 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} .$$

Η εντροπία του συνολικού, αδιαβατικού συστήματος, μεταβλήθηκε επομένως κατά:

$$\Delta S = \Delta S' + \Delta S'' = 10{,}49 \text{kJ/K}$$

Ετσι, η ανάμιξη είναι μη-αντιστρεπτή.
Η απώλεια εξέργειας μπορεί να υπολογιστεί κατά τα γνωστά:

$$L_v = T_0 \Delta S = 293{,}15 \text{ K} \cdot 10{,}43 \text{ kJ/K} = 3076 \text{ kJ} .$$

24. Μιά διάταξη ατμοπαραγωγής παράγει ωριαία 20 t ατμού πίεσης 100 bar και θερμοκρασίας 450°C. Για το σκοπό αυτό ο προθερμαντήρας του λέβητα τροφοδοτείται με νερό 100 bar και 30°C, που προθερμαίνεται στους 180°C. Από εκεί το νερό οδηγείται στο λέβητα, όπου φτάνει στη θερμοκρασία βρασμού και ατμοποιείται. Στη συνέχεια υπερθερμαίνεται ο ατμός μέχρι τους 450°C στον υπερθερμαντήρα.
Πόση θερμότητα προσδίδεται στα επί μέρους τμήματα της διάταξης ατμοπαραγωγής;

Από τους Πίνακες Ατμών, είτε με χρήση διαγράμματος Mollier h-s, προκύπτουν τα παρακάτω προσδιδόμενα ποσά θερμότητας:

στον προθερμαντήρα: $12{,}6 \cdot 10^6$ kJ/h = 3,51 MW,
στο λέβητα: $38{,}2 \cdot 10^6$ kJ/h = 10,9 MW
στον υπερθερμαντήρα: $10{,}3 \cdot 10^6$ kJ/h = 2,88 MW.

25. Σε ένα λέβητα χωρητικότητας 2m^3 βρίσκονται 1000 kg νερού και ατμού σε πίεση 121 bar και θερμοκρασία κορεσμού.
Ποιό ειδικό όγκο έχει ο ατμός; Πόσος ατμός και πόσο νερό υπάρχουν μέσα στο λέβητα; Ποιά η ενθαλπία του ατμού και του νερού στο λέβητα;

Ο ειδικός όγκος του υδρατμού είναι 0.01462 m^3/kg.
Στο λέβητα υπάρχουν 38.2 kg ατμού και 961.8 kg νερού.
Η ενθαλπία του ατμού είναι 102,500 kJ.
Η ενθαλπία του νερού είναι 1,440,000 kJ.

26. Σε ένα χιλιόγραμμο υγρού ατμού πίεσης 10 bar και περιεχομένου σε ατμό x=0.49 προσδίδεται τόση θερμότητα, ώστε διπλασιάζεται ακριβώς ο όγκος του.
Πόση είναι η θερμότητα που προσδίδεται, και ποιά είναι η κατάσταση του ατμού μετά;

Θα πρέπει να προσδοθούν 1000 kJ/kg, οπότε το περιεχόμενο σε ατμό θα αυξηθεί σε x=0.986

27. Η πίεση σε ένα ατμολέβητα περιεχομένου 5 m^3, στον οποίο ευρίσκονται 3000 kg νερού και ατμού, πέφτει στα 2 bar σε μιά φάση που τίθεται εκτός λειτουργίας.
Πόση θερμότητα θα πρέπει να προσδοθεί στο περιεχόμενο του λέβητα, ώστε να ανυψωθεί η πίεση στα 20 bar; Πόσο νερό θα ατμοποιηθεί τότε;

Θα πρέπει να προσδοθούν 1.22 E6 kJ, οπότε θα ατμοποιηθούν 12.9 kg νερού.

28. Ατμός πίεσης 15 bar και υπερθερμοκρασίας 60°C, εκτονώνεται αδιαβατικά και αντιστρεπτά μέχρι πίεση 1 bar.
Ποιά θα είναι η τελική κατάσταση του ατμού; Σε ποιά πίεση θα γίνει ξηρός κεκορεσμένος; Ποιό έργο μπορεί να κερδηθεί ανά kg ατμού κατά την εκτόνωση σε μία συνεχώς εργαζόμενη μηχανή;

Από το διάγραμμα h-s, προκύπτει τελική θερμοκρασία ίση με 99.1^{o}C, και περιεχόμενο σε ατμό x=0.91
Κατά την εκτόνωση μέχρι τα 6.2 bar, ο ατμός θα γίνει ακριβώς ξηρός κεκορεσμένος.
Το έργο εκτόνωσης κατά την εκτόνωση μέχρι το 1 bar, είναι ίσο με 490 kJ/kg ατμού.

29. Υγρός ατμός πίεσης 20 bar εκτονώνεται μέχρι πίεση 1 bar μέσα σε θερμιδόμετρο στραγγαλισμού για να μετρηθεί το περιεχόμενό του σε νερό, οπότε η θερμοκρασία του πέφτει στους 110^{o}C.
Ποιό το περιεχόμενό του σε νερό; Ποιά η αύξηση εντροπίας του ατμού κατά τον στραγγαλισμό; Πόση είναι η απώλεια εξέργειας εάν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 20^{o}C;

Το περιεχόμενο σε νερό είναι 5.4%
Η αύξηση εντροπίας είναι 1.285 kJ/kgK
Η απώλεια εξέργειας είναι 376.5 kJ/kg.

30. Στη γειτονιά του τριπλού σημείου, η πίεση ατμών της υγρής αμμωνίας δίνεται από τη σχέση:

$$\ln\frac{p}{1atm}=12.652-\frac{3023.3K}{T}$$

και της στερεάς αμμωνίας από τη σχέση:

$$\ln\frac{p}{1atm}=16.394-\frac{3754K}{T}$$

Να υπολογίσετε την πίεση και τη θερμοκρασία στο τριπλό σημείο. Πόση είναι η ενθαλπία εξάτμισης και η ενθαλπία εξάχνωσης;

Η σταθερά αερίου της αμμωνίας είναι R=0.4882 kJ/(kg K), ο ειδικός όγκος της υγρής αμμωνίας στο τριπλό σημείο v'=0.1365.10^{-2}m^{3}/kg, και της στερεάς αμμωνίας v_f=0.1224.10^{-2}m^{3}/kg.

Η θερμοκρασία και η πίεση στο τριπλό σημείο, θα προκύψουν σαν σημεία τομής των δοσμένων καμπυλών πίεσης ατμών.

$$\ln\frac{p}{\text{atm}} = 12{,}652 - \frac{3023{,}3\ \text{K}}{T},$$

$$\ln\frac{p}{\text{atm}} = 16{,}394 - \frac{3754\ \text{K}}{T},$$

$$12{,}652 - \frac{3023{,}3}{T_{\text{Tr}}} = 16{,}394 - \frac{3754\ \text{K}}{T_{\text{Tr}}},$$

$$T_{\text{Tr}} = \frac{3754 - 3023{,}3}{16{,}394 - 12{,}652}\ \text{K},$$

$$T_{\text{Tr}} = 195{,}23\ \text{K}.$$

Αντικατάσταση στην πρώτη εξίσωση, δίνει για τη θερμοκρασία:

$$\frac{p_{Tr}}{\text{atm}} = \exp\left[12{,}652 - \frac{3023{,}3}{T_{Tr}}\right],$$

$$p_{Tr} = 0{,}05888 \text{ atm}.$$

Η ενθαλπία εξάτμισης δίνεται από την περίφημη εξίσωση Clausius-Clapeyron,

$$r = (v'' - v')\, T_{Tr} \left(\frac{dp}{dT}\right)_{Tr}.$$

Ο ειδικός όγκος του κεκορεσμένου ατμού θα πρέπει να υπολογιστεί στην πολύ χαμηλή πίεση του τριπλού σημείου, από την καταστατική εξίσωση:

$$v'' = \frac{0{,}4882 \text{ kJ/(kg K)} \cdot 195{,}25 \text{ K}}{0{,}05888 \text{ atm}} = 15{,}978 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

Παραπέρα, προκύπτει από την εξίσωση της πίεσης ατμών:

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{Tr} = \exp\left[12{,}652 - \frac{3023{,}3}{195{,}25}\right] 3023{,}3 \text{ K} \cdot \frac{1}{195{,}25^2 \text{ K}^2} \text{atm},$$

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{Tr} = 0{,}4669 \cdot 10^{-2} \frac{\text{atm}}{\text{K}}.$$

Με αντικατάσταση των τιμών στην εξίσωση Clausius-Clapeyron, προκύπτει η ενθαλπία εξάτμισης:

$$r = 195{,}25 \text{ K} (15{,}978 - 0{,}1365 \cdot 10^{-2}) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 0{,}4669 \cdot 10^{-2} \frac{\text{atm}}{\text{K}},$$

$$r = 1475{,}76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

Για την ενθαλπία εξάχνωσης ισχύει αντίστοιχα:

$$r_s = T_{Tr}(v'' - v_{fest}) \left(\frac{dp}{dT}\right)_{Tr},$$

με

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{Tr} = \exp\left[16{,}394 - \frac{3754}{195{,}25}\right] 3754 \text{ K} \cdot \frac{1}{195{,}25^2 \text{ K}^2} \text{atm},$$

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{Tr} = 0{,}5796 \cdot 10^{-2} \frac{\text{atm}}{\text{K}},$$

$$r_s = 195{,}25 \text{ K} (15{,}978 - 0{,}1224 \cdot 10^{-2}) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 0{,}5796 \cdot 10^{-2} \frac{\text{atm}}{\text{K}},$$

$$r_s = 1831{,}99 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

31. Σε μιά εστία καύσης καίγονται τέλεια 500 kg λιθάνθρακα με την ακόλουθη σύσταση: c=0.78, h=0.05, o=0.08, s=0.01, w=0.02, a=0.06, με περίσσεια αέρα (λόγος αέρα λ=1.4).
Ποιά είναι η θερμογόνος δύναμη του λιθάνθρακα αυτού; Πόσος αέρας θα πρέπει να διοχετεύεται ανά ώρα στην εστία, πόσο καυσαέριο θα παράγεται, και ποιά θα είναι η σύστασή του;

Εδώ έχουμε καύση στερεού καυσίμου γνωστής σύστασης με γνωστό λόγο αέρα, οπότε καταστρώνουμε τον πίνακα με τις αντιδράσεις καύσης των επι μέρους σύστατικών, κατά το παράδειγμα του Κεφ.8 της Θερμοδυναμικής του H.D. Baehr.

32. Βενζόλιο (C_6H_6) καίγεται τέλεια με 50% περίσσεια αέρα.
Ποιά θεωρητική θερμοκρασία θα έχει η φλόγα, εάν ο αέρας και το καύσιμο είχαν αρχική θερμοκρασία 20^oC; (ειδική θερμοχωρητικότητα βενζολίου: 0.44 kcal/kg.grd).

Πρόκειται για καύση αερίου καυσίμου γνωστής σύστασης με γνωστό λόγο αέρα, οπότε καταστρώνουμε τον πίνακα με τις αντιδράσεις καύσης των επι μέρους σύστατικών, κατά το σχετικό παράδειγμα του Κεφ.8 της Θερμοδυναμικής του H.D. Baehr.

Η θερμοκρασία της φλόγας προκύπτει με βάση το 1ο Θ.Α., με ισοζύγιο που λαμβάνει υπόψη την εκλυση θερμότητας από τις εξώθερμες αντιδράσεις.

33. Υδραέριο με την ακόλουθη σύσταση: $(H_2)_b$=0.50, $(CO)_b$=0.40, $(CH_4)_b$=0.005, $(CO_2)_b$=0.050, $(N_2)_b$=0.045, καίγεται τέλεια με περίσσεια αέρα. Η ανάλυση του ξηρού καυσαερίου έδωσε: $[CO_2]_r$=0.136, $[O_2]_r$=0.069, $[N_2]_r$=0.795.
Πόση ήταν η περίσσεια αέρα;

Πρόκειται για καύση αερίου καυσίμου γνωστής σύστασης με περίσσεια αέρα. Η κατάστρωση του πίνακα με τις αντιδράσεις καύσης των επι μέρους σύστατικών, κατά το σχετικό παράδειγμα του Κεφ.8 της Θερμοδυναμικής του H.D. Baehr, γίνεται με βάση τον άγνωστο λόγο αέρα λ, η τιμή του οποίου θα προκύψει από τη σύσταση του ξηρού καυσαερίου.

34. Σε ένα δοχείο όγκου 50 l, εκρήγνυται υπό σταθερό όγκο ένα μίγμα μονοξειδίου του άνθρακα και αέρα με λόγο αέρα λ=1.5, αρχική θερμοκρασία 0^oC και αρχική πίεση 1 at.
Πόση θα είναι η τελική θερμοκρασία και η τελική πίεση αμέσως μετά την έκρηξη, δηλαδή πρίν παρατηρηθεί σημαντική μεταφορά θερμότητας προς τα τοιχώματα;
Πόση θερμότητα θα έχει μεταφερθεί μέσα από το τοίχωμα, όταν η πίεση θα έχει πέσει στό μισό της μέγιστης τιμής της;

Πρόκειται για καύση καθαρής ουσίας με γνωστό λόγο αέρα. Από την εξίσωση της καύσης του μονοξειδίου του άνθρακα, προκύπτει η εκλυόμενη ενέργεια της εξώθερμης αντίδρασης. Με εφαρμογή του 1ου Θ.Α. και της καταστατικής εξίσωσης, προκύπτουν η τελική θερμοκρασία και η τελική πίεση αμέσως μετά την έκρηξη, και αντίστοιχα υπολογίζονται οι απώλειες θερμότητας κατά τη στιγμη που η πίεση έχει υποδιπλασιαστεί.

35. Με ένα διβάθμιο συμπιεστή θα πρέπει να συμπιέσουμε αερα με πολυτροπική συμπίεση από τις συνθήκες p_1 ,T_1 μέχρι την τελική πίεση p_2, όπου ο αέρας ψύχεται στην αρχική θερμοκρασία του T_1 υπο σταθερή πίεση p_z μεταξύ των δύο κυλίνδρων του συμπιεστή (ενδιάμεση ψύξη).

Πόση είναι η οικονομία σε δαπανώμενο έργο έναντι μιάς μινοβάθμιας, πολυτροπικής συμπίεσης;
Να υπολογίσετε το λόγο πιέσεων p_2/p_1, για τον οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη εξοικονόμηση έργου.

Αρχικά υπολογίζουμε τη βέλτιστη τιμή για την ενδιάμεση πίεση μεταξύ των δύο βαθμίδων, όπως παρακάτω:
Κατα την πολυτροπική συμπίεση, αλλά και κατά την αδιαβατική αντιστρεπτή, (n=κ), το άθροισμα των έργων των δύο βαθμίδων είναι ίσο με:

$$L = mRT_1 \frac{n}{n-1}\left[\left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] + mRT_1 \frac{n}{n-1}\left[\left(\frac{p_2}{p_x}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

ή

$$L = mRT_1 \frac{n}{n-1}\left[\left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{p_2}{p_x}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 2\right].$$

Εδώ το p_x θα πρέπει να εκλεγεί έτσι ώστε η παράσταση:

$$\left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{p_2}{p_x}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

να ελαχιστοποιείται.
Με τον απλοποιητικό συμβολισμό m=(n-1)/n και με παραγώγιση ως προς p_x, μηδενίζοντας την παράγωγο βρίσκουμε τη βέλτιστη τιμή:

$$\frac{m p_x^{m-1}}{p_1^m} - \frac{m p_2^m}{p_x^{m+1}} = 0$$

$$p_x^{2m} = p_1^m p_2^m \quad \text{oder} \quad \frac{p_x}{p_1} = \frac{p_2}{p_x}.$$

Επομένως η μέγιστη εξοικονόμηση έργου επιτυγχάνεται όταν εξισωθούν οι σχέσεις πιέσεων των δύο βαθμίδων συμπίεσης. Στην περίπτωση αυτή μάλιστα, τα έργα των δύο βαθμίδων εξισώνονται επίσης, πράγμα που παρέχει πλεονεκτήματα κατά την κατασκευή. Ανάλογη σχέση ισχύει και για συμπιεστές περισσότερων βαθμίδων, όπως θα δείτε στο μάθημα των Στροβιλομηχανών.

36. Ενας διβάθμιος συμπιεστής απλής ενεργείας, θα πρέπει να συμπιέζει σε n=300 rpm, $V=100m^3/h$ αέρα από τις συνθήκες p_1=760 Torr και θ_1= 15C, σε p_2=40 bar. *Πόση είναι θεωρητικά η ισχύς κάθε βαθμίδας, εάν η συμπίεση γίνεται πολυτροπικά με εκθέτη n=1.30 και ο αέρας ψύχεται μεταξύ των δύο βαθμίδων υπό σταθερή πίεση:*

$$p_m = \sqrt{p_1 \cdot p_2}$$

έτσι ώστε να εισέρχεται στη δεύτερη βαθμίδα με θερμοκρασία 50°C.

Η βέλτιστη τιμή της ενδιάμεσης πίεσης, υπολογίζεται ως εξής: $p_m = \sqrt{1{,}013 \cdot 40}\ \text{bar} = 6{,}37\ \text{bar}.$

Η παροχή μάζας του αναρροφώμενου αέρα είναι ίση με 122 kg/h, και η ισχύς της πρώτης βαθμίδας συμπίεσης:

$$232 \cdot 10^5\ \text{J/h} = 6{,}44\ \text{kW},$$

Η ισχύς της 2ης βαθμίδας είναι 260 E5 J/h=7.23 kW.
Η απορριπτόμενη θερμορροή στον κύλινδρο της χαμηλής πίεσης είναι 4433 kJ/h, ενώ στον ενδιάμεσο ψύκτη 1.438 E4 kJ/h. Η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του κυλίνδρου

υψηλής πίεσης είναι 221°C.
Ο κυλινδρισμός του κυλίνδρου χαμηλής πίεσης προκύπτει 6.17 l, ενώ του κυλίνδρου υψηλής πίεσης 1.18 l.

37. Ενας κινητήρας Otto κυλινδρισμού 2 λίτρων και όγκου συμπίεσης 0.25 l, αναρροφά καύσιμο μίγμα θερμοκρασίας 20°C και πίεσης 1 bar (κατάσταση (1)), συμπιέζει αντιστρεπτά και αδιαβατικά (2), το μίγμα αναφλέγεται και καίγεται υπό σταθερό όγκο (3), έως ότου επιτευχθεί πίεση 30 bar. Στη συνέχεια το αέριο εκτονώνεται αντιστρεπτά και αδιαβατικά μέχρι το τέλος του εμβολισμού (4). Η καύση και η εξαγωγή θεωρείται ότι συμβαίνουν με μεταφορά θερμότητας υπό σταθερό όγκο. Για το εργαζόμενο μέσο, μπορεί να ληφθούν οι ιδιότητες του αέρα, και επι πλέον σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα.
Πόση είναι η πίεση και η θερμοκρασία στα σημεία 1 έως 4 της διεργασίας; Πόση θερμότητα εκλύεται από την καύση, και πόση θερμότηταaποβάλλεται στο κάτω νεκρό σημείο; Ποιό θεωρητικό έργο παράγει η μηχανή ανα εμβολισμό;

$p_2 = 18{,}38$ bar, $t_2 = 400$ °C, $t_3 = 826$ °C, $p_4 = 1{,}63$ bar, $t_4 = 205$ °C.

Προσδιδόμενη θερμότητα Q=0.733 kJ/εμβολισμό
Απορριπτόμενη θερμότητα Q_o=0.318 kJ/εμβολισμό,
Παραγόμενο έργο L=0.415 kJ/εμβολισμό.

38. Μιά μηχανή diesel απλής ενεργείας, έχει κυβισμό 13 l και όγκο συμπίεσης 1 l. Η διεργασία παραγωγής έργου της μηχανής, μπορεί να προσεγγιστεί με τον παρακάτω ιδανικό κύκλο: αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση του αέρα που στο τέλος του εμβολισμού αναρρόφησης έχει θερμοκρασία 70°C και πίεση 1 bar (1), μέχρι το άνω νεκρό σημείο (2). Στη θέση της έγχυσης πετρελαίου και της καύσης, να ληφθεί μεταφορά θερμότητας στη διάρκεια του 1/13 του εμβολισμού (3). Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση των προϊόντων της καύσης στη συνέχεια, μέχρι το πέρας του εμβολισμού (4). Στη θέση του εμβολισμού εξαγωγής και της αναρρόφησης αέρα, να θεωρηθεί ότι αφαιρείται θερμότητα στο κάτω νεκρό σημείο, μέχρι να επιτευχθεί η θερμοκρασία και πίεση του αέρα εισαγωγής (1). Για το εργαζόμενο μέσο να ληφθούν οι ιδιότητες του αέρα, καθώς και σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα.
Να παρασταθεί η διεργασία σε διαγράμματα p,v και T,s. Ποιές είναι οι θερμοκρασίες και πιέσεις στους κόμβους του διαγράμματος; Πόση θερμότητα άγεται προς ή απαγεται από το αέριο στη διάρκεια κάθε εμβολισμού; Ποιά είναι η θεωρητική ισχύς της μηχανής, εάν θεωρηθεί ότι εργάζεται με την αρχη του δίχρονου ντηζελοκινητήρα, σε σταθερές στροφές (250 rpm).

$p_2 = 40{,}2$ bar, $t_2 = 712$ °C, $p_3 = 40{,}2$ bar, $t_3 = 1697$ °C, $p_4 = 2{,}63$ bar,
$t_4 = 632$ °C,

Προσδιδόμενη θερμότητα Q=13.86 kJ/εμβολισμό
Απορριπτόμενη θερμότητα Q_o=5.61 kJ/εμβολισμό,
Παραγόμενο έργο L=8.25 kJ/εμβολισμό.
Θεωρητική Ισχύς στις 250 στροφές ανά λεπτό, P=34.4 kW.

39. Να αποδείξετε την παρακάτω σχέση για το θεωρητικό βαθμό απόδοσης του βενζινοκινητήρα:

$$\eta = 1 - \frac{\psi.\phi^{\kappa} - 1}{\varepsilon^{k-1}[\psi - 1 + \kappa.\psi(\phi - 1)]}$$

όπου $\psi = p_{2'}/p_2$ είναι ο λόγος της πίεσης μετά την απότομη αύξηση της πίεσης (καύση), προς την πίεση κατά το τέλος της συμπίεσης.

Με βάση τα αναφερόμενα στη σχετική ενότητα του Οδηγού, η προσδιδόμενη θερμότητα είναι:

$$c_v(T_{2'} - T_2) + c_p(T_{3'} - T_{2'}),$$

και η απορριπτόμενη:

$$c_v(T_4 - T_1),$$

οπότε ισχύει:

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_{2'} - T_2) + c_p(T_{3'} - T_{2'})} \\ &= 1 - \frac{T_4/T_1 - 1}{T_{2'}/T_1 - T_2/T_1 + \varkappa(T_{3'}/T_1 - T_{2'}/T_1)},\end{aligned}$$

και αφού:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad \text{und} \quad \frac{T_{2'}}{T_2} = \frac{p_{2'}}{p_2} = \psi$$

προκύπτει:

$$\eta = 1 - \frac{T_3/T_{2'} \cdot T_{2'}/T_2 - 1}{T_2/T_1[\psi - 1 + \varkappa\psi(T_{3'}/T_{2'} - 1)]},$$

οπότε με αντικατάσταση $\varphi = T_{3'}/T_{2'}$ και $T_2/T_1 = \varepsilon^{\kappa-1}$, προκύπτει η ζητούμενη σχέση.

40. Ενας κινητήρας Stirling, στον οποίο ο αέρας που εκτονώνεται καταλαμβάνει στον ψυχρό χώρο του κυλίνδρου, όγκο 3 l, και στη συνέχεια συμπιέζεται στον ίδιο χώρο σε όγκο 0.5 l, εργάζεται στις 2000 rpm. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται στον κύκλο, είναι 800^{o}C.
Ποιά είναι η μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται στη διάταξη αυτή, όταν η μηχανή αναπτύσσει ισχύ 50 kW και ποιός ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης της διεργασίας;

Το παραγόμενο έργο ανα περιστροφή της μηχανής προκύπτει ίσο με 1,500 J.
Για την αποφυγή απωλειών εξέργειας, θα πρέπει να διατηρείται ο ψυχρός κύλινδρος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με τη δοσμένη μέγιστη θερμοκρασία των 800^{o}C, και τη σχέση συμπίεσης μεταξύ 0.5 και 3 l, προκύπτει απαιτούμενη μάζα γόμωσης ίση με 3.74ε-3 kg. Αυτή η μάζα θα έχει πίεση 1.049 bar κατά την εκτόνωση στον ψυχρό κύλινδρο, και θα επιτυγχάνει τη μέγιστη πίεση των 23.04 bar με ισόθερμη συμπίεση και ισόχωρη θέρμανση. Ο βαθμός απόδοσης της μηχανής προκύπτει ίσος με $n_{th} = 0.727$

41. Σε μιά διάταξη ατμοστροβίλου, οδηγούνται 10,000 kg/h νερού 32.5^{o}C και μετατρέπονται σε υπέρθερμο ατμό 25 bar και 400^{o}C. Ο ατμός εκτονώνεται στην τουρμπίνα με θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης 80% μέχρι πίεση 0.05 bar, και στη συνέχεια συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή. Το συμπύκνωμα επανατροφοδοτείται στη διάταξη στους 32.5^{o}C.
Πόση θερμότητα μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο στον λέβητα και στον υπερθερμαντήρα, και πόση απάγεται στο συμπυκνωτή; Με ποιό περιεχόμενο υγρασίας οδηγείται ο ατμός στο συμπυκνωτή; Ποιά η ισχύς που αποδίδει η τουρμπίνα στον άξονά της, εάν έχει μηχανικό βαθμό απόδοσης 95%; Ποιά η κατανάλωση ατμού και θερμότητας της διάταξης, για κάθε kWh που παράγει;

Με χρήση των Πινάκων Ατμών προκύπτει η ενθαλπία του συμπυκνώματος ίση με 136.11 kJ/kg, και του υπέρθερμου ατμού ίση με 3240.7 kJ/kg.
Στο λέβητα και τον υπερθερμαντήρα θα πρέπει να προσδοθούν 3104.6 E4 kJ/h.
Η αδιαβατική ενθαλπική πτώση κατά την εκτόνωση στα 0.05 bar, προκύπτει ίση με 1100.7 kJ/kg. Επειδή όμως ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της τουρμπίνας είναι 0.8, η πτώση ενθαλπίας του ατμού είναι μόνο 0.8x1100.7 kJ/kg, οπότε αυτός εισέρχεται στον συμπυκνωτή με x=0.918
Η ισχύς στον άξονα της τουρμπίνας είναι ίση με 0.95 0.80 1100.7 E4 kJ/h= 2323.7 kW
Η κατανάλωση ατμού είναι 4.30 kg/kWh, και η κατανάλωση θερμότητας 1.336 E4 kJ/kWh.

42. Ποιός είναι ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης μιάς διάταξης ατμοστροβίλου, η οποία λειτουργεί με ατμό 100 bar και 400^{o}C και απορρίπτει ατμό στο συμπυκνωτή στα 0.05 bar, εάν λειτουργεί με βάση:
(i) το συνήθη κύκλο Clausius-Rankine
(ii) με δύο φορές ενδιάμεση υπερθέρμανση στους 400^{o}C, κάθε φορά που φτάνει ο ατμός την οριακή καμπύλη.
Πόσο περιεχόμενο νερού έχει ο ατμός στην περίπτωση (i) και (ii) κατά την είσοδο στο συμπυκνωτή; Και για τις δύο περιπτώσεις, να γίνει παράσταση της διεργασίας σε διαγράμματα T,s και h,s.

Απο το διάγραμμα h-s προκύπτει για τη διεργασία Clausius-Rankine, βαθμός απόδοσης η=0.407, με περιεχόμενο σε ατμό x=0.725, ενώ με δυό φορές ενδιάμεση υπερθέρμανση προκύπτει η=0.417 με x=0.947

43. Σε μιά διάταξη ατμοστροβίλου υψηλής πίεσης γίνεται η παρακάτω διεργασία: Στην κρίσιμη πίεση, εξάγεται από νερό 28.6^{o}C, ατμός 400^{o}C. Ο ατμός που λαμβάνεται από το λέβητα, στραγγαλίζεται στα 100 bar και στη συνέχεια υπερθερμαίνεται και πάλι στους 400^{o}C, και στην κατάσταση αυτή οδηγείται στο τμήμα υψηλής πίεσης της τουρμπίνας, η οποία τον χρησιμοποιεί με βαθμό ποιότητας 0.85 μέχρι πίεση 12 bar. Μετά από μιά ενδιάμεση υπερθέρμανση στους 400^{o}C, ο ατμός εκτονώνεται στο τμήμα χαμηλής πίεσης μέχρι πίεση 0.04 bar με βαθμό ποιότητας 0.7 .
Πόση θερμότητα προσδίδεται σε κάθε kg ατμού στο λέβητα και στους δύο υπερθερμαντήρες; Πόση θερμότητα απάγεται στο συμπυκνωτή; Ποιός είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης της διάταξης; Πόσο επί πλέον έργο ανά kg ατμού θα μπορούσε να κερδηθεί, εάν αντικατασταθεί ο στραγγαλισμός από την κρίσιμη πίεση μέχρι τα 100bar, με κατάλληλη τουρμπίνα με βαθμό ποιότητας 0.7, και στη συνέχεια υπερθέρμανση του ατμού στους 400^{o}C;

Ανά kg ατμού θα προσδίδονται:
στο λέβητα 2628.9 kJ
στον 1ο υπερθερμαντήρα 485 kJ
στο 2ο υπερθερμαντήρα 548.8 kJ

Στον συμπυκνωτή θα απορρίπτονται 2412.8 kJ
Ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι η=0.304
Το έργο ανα kg ατμού είναι 1114.8 kJ
Με τοποθέτηση μιάς τουρμπίνας αντί για το στραγγαλισμό από την κρίσιμη πίεση μέχρι τα 100 bar, θα κερδίζαμε επι πλέον έργο 94.5 kJ/kg, ή 8.48 %

44. Σε μιά συνδυασμένη διεργασία ατμού νερού - ατμού ψυκτικού μέσου, οδηγείται στην τουρμπίνα ατμού νερού υπέρθερμος ατμός 150 bar και 500°C, ο οποίος εκτονώνεται αδιαβατικά και αντιστρεπτά μέχρι τα 22 bar. Ο ατμός που εξέρχεται από την τουρμπίνα αποδίδει θερμότητα σε έναν εναλλάκτη θερμότητας στο υγρό διφθορο-διχλωρο-μεθάνιο θερμοκρασίας 27°C και πίεσης 32.5 bar, το οποίο θερμαίνεται στη θερμοκρασία βρασμού και ατμοποιείται, ενώ ο ατμός του υπερθερμαίνεται στον ίδιο εναλλάκτη μεχρι τους 220°C. Ο ατμός του ψυκτικού μέσου εκτονώνεται στη συνέχεια σε μιά τουρμπίνα μέχρι τα 11 bar και συμπυκνώνεται. Η συνολική διάταξη έχει ισχύ 500 MW.
Πώς κατανέμεται η ισχύς αυτή στις τουρμπίνες ατμού νερού και ατμού ψυκτικού μέσου; Ποιό θεωρητικό βαθμό απόδοσης έχει η διάταξη, και ποιές οι παροχές των δύο μέσων που εξέρχονται από τις τουρμπίνες; Ποιές παροχές όγκου θα απέδιδαν οι τουρμπίνες, εάν η συμπύκνωση γινόταν σε σταθερή πίεση συμπυκνωτή 0.04 bar;

Ο ατμός 150 bar και 500°C έχει ειδική ενθαλπία 3313.2 kJ/kg και ειδική εντροπία 6.3504 kJ/kg K. Κατά την αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση μέχρι τα 22 bar, μετατρέπονται 489.31 kJ/kg σε έργο στην τουρμπίνα.
Ο εκτονωμένος ατμός εισέρχεται στον εναλλάκτη με h=2823.9 kJ/kg και συμπυκνώνεται εντελώς. Το συμπύκνωμα έχει h=930.95 kJ/kg, οπότε για κάθε kg νερού διατίθενται (2823.9-930.95)=1892.9 kJ για την προθέρμανση, εξάτμιση και υπερθέρμανση του CF_2Cl_2
Το υγρό ψυκτικό έχει c=1.42 kJ/kg K και η ενθαλπία εξάτμισής του στα 32.5 bar είναι 116.06 kJ/kg, η ενθαλπία κορεσμού του ατμού του 634.49, και η ενθαλπία υπερθέρμανσης στους 220 C και 32.5 bar 780.91 kJ/kg. Ετσι κάθε kg ψυκτικού μέσου, απορροφά 329.22 kJ από τον εναλλάκτη.
Ο λόγος των ροών μάζας ατμού και ψυκτικού μέσου προκύπτει από το ισοζύγιο του εναλλάκτη:

$$\frac{1892{,}94\ \mathrm{kJ/kg\ H_2O}}{329{,}22\ \mathrm{kJ/kg\ KM}} = 5{,}75\,\frac{\mathrm{kg\ KM}}{\mathrm{kg\ H_2O}}.$$

Μετά την αδιαβατική και αντιστρεπτή εκτόνωση από τα 32.5 στα 11 bar στη 2η τουρμπίνα, το ψυκτικό μέσο έχει h=736.22 kJ/kg και αποδίδει έργο 44.69 kJ/kg.
Η τουρμπίνα ατμού νερού αποδίδει 327.8 MW, ενώ η τουρμπίνα ατμού ψυκτικού μέσου 172.2 MW. Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης είναι 0.31
Η τουρμπίνα ατμού νερού διαρρέεται από παροχή 62.22 m^3/s, ενώ η άλλη από 137.14 m^3/s.
Εάν δεν υπήρχε ο συνδυασμένος κύκλος και είχαμε μιά απλή τουρμπίνα ατμού με πίεση

συμπυκνωτή 0.04 bar, τότε για ισχύ 500 MW θα είχαμε παροχή 9144 m^3/s στην έξοδο της τουρμπίνας, δηλαδή 67 φορές μεγαλύτερη απ'αυτην στην έξοδο της τουρμπίνας του ψυκτικού. Αυτό σημαίνει ότι η διάμετρος της τουρμπίνας αυτής θα ήταν 8 φορές μεγαλύτερη από την τουρμπίνα χαμηλής πίεσης.

45. Ο συμπιεστής μιάς ψυκτικής μηχανής με αμμωνία, συμπιέζει ατμό αμμωνίας από τους -10°C και 2% υγρασία, μέχρι τα 10 bar, με ενδεικνύμενο βαθμό απόδοσης 75%, ανηγμένο στην αδιαβατική διεργασία. Ο συμπιεσμένος ατμός ψεκάζεται σε ένα συμπυκνωτή και η υγρή αμμωνία υποψύχεται στους +15°C. Μέσα από μιά στραγγαλιστική βαλβίδα, οδηγείται το υγρό στον εξατμιστήρα, όπου ατμοποιείται στους -10°C. Ο ατμός αναρροφάται και πάλι από το συμπιεστή. Μ'αυτή την ψυκτική διάταξη θα πρέπει να παράγονται 500 kg/h πάγος από νερό θερμοκρασίας +20°C. *Πόσα kg αμμωνία θα πρέπει να συμπιέζονται ανά ώρα από τον συμπιεστή, και πόση είναι η ψυκτική ισχύς; Πόση θερμότητα απόδίδεται στο νερό ψύξης στο συμπυκνωτή, και πόση είναι η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα του συμπιεστή, άν ληφθεί υπόψη μηχανικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή 80%; Πόσες εκατοστιαίες μονάδες είναι χαμηλότερος ο αριθμός ισχύος της διεργασιας από αυτόν του κύκλου Carnot μεταξύ των ίδιων επιπέδων θερμοκρασίας; Πόσο είναι το περιεχόμενο σε ατμό της αμμωνίας στο τέλος του στραγγαλισμού; Ποιόν όγκο εμβολισμού απαιτείται να έχει ο συμπιεστής (απλής ενεργείας), εάν λειτουργεί με αριθμό στροφών 500 rpm και βαθμό πλήρωσης 90%;*

Η ενθαλπία τήξης του πάγου είναι 332 kJ/kg. Απαιτείται λοιπόν ισχύς 57.81 kW.

Από τους πίνακες ατμων για την αμμωνία, λαμβάνεται για θερμοκρασία κορεσμού -10 C:

$$p_0 = 2{,}91 \text{ bar},\ v_0'' = 0{,}418 \text{ m}^3/\text{kg},\ h_0' = 372{,}6 \text{ kJ/kg},\ h_0'' = 1669{,}3 \text{ kJ/kg},$$
$$v_0 = 1296{,}7 \text{ kJ/kg},\ s_0' = 4{,}015 \text{ kJ/kg K},\ s_0'' = 8{,}943 \text{ kJ/kg K};$$

σε πίεση κορεσμού 10 bar : $t_s = 24{,}9\ ^\circ\text{C},\ h' = 535{,}9 \text{ kJ/kg},\ h'' = 1703{,}1 \text{ kJ/kg};$

για την υγρή αμμωνία στους +15 C, που αντιστοιχεί στην υπόψυξη (σημείο 5 του κύκλου με υπόψυξη), ισχύει h'_5=488.6 kJ/kg.

Στο σημείο 1 με x_1=0.98 ισχύει $h_1 = h_0' + x_1 \cdot v_0 = 1643{,}3 \text{ kJ/kg},$

στο σημείο 8 είναι: $h_8 = h_5' = 488{,}6 \text{ kJ/kg},$

οπότε προκύπτει η ψυκτική ισχύς h_1-h_8=1154.7 kJ/kg.

Αρα θα πρέπει να συμπιέζονται M=180.2 kg αμμωνίας ανα ώρα. Το περιεχόμενο σε ατμό στο τέλος του στραγγαλισμού προκύπτει ίσο με 0.894

Κατά τη συμπιεση έχουμε υπερθέρμανση του ατμού. Από το διάγραμμα Mollier της αμμωνίας βρίσκουμε πάνω σε ισεντροπική γραμμή από το σημείο 1 μέχρι την ισοβαρή των 10 bar: h_2=1806.2 kJ/kg

Στο νερό ψύξης απορρίπτονται 68.7 kW,

το έργο ανά kg αμμωνίας είναι 217.1 kJ και ο αριθμός ισχύος $\varepsilon = \frac{h_1 - h_8}{h_2 - h_1} = 7{,}09.$

Η διεργασία Carnot μεταξύ -10 και 24.9 C θα είχε ε=7.83

Η ισχύς του συμπιεστή είναι 13.59 kW.

Ο όγκος εμβολισμού του με ειδικό όγκο $v_1 = 0{,}98 \cdot v_0'' = 0{,}41 \text{ m}^3/\text{kg}$

και βαθμό πλήρωσης λ=0.9, είναι 2.734 l.

46. Σε ένα αεροπλάνο, μετριέται η ταχύτητα πτήσης με βάση την πίεση ανακοπής ενός σωλήνα Prandtl που τοποθετείται στην κατεύθυνση πτήσης. Ο σωλήνας αυτός δείχνει πίεση ανακοπής 300 mm νερού σε θερμοκρασία αέρα -10^oC και απόλυτη πίεση αέρα 700 mbar. *Πόση είναι η ταχύτητα του αεροπλάνου;*

Με πυκνότητα αέρα ρ=0.925 kg/m^3, προκύπτει w=80 m/s=288 km/h

47. Ενας ατμολέβητας παράγει 10 τόννους κεκορεσμένο ατμό 15 bar ανά ώρα. Πόση θα πρέπει να είναι η ελάχιστη ελεύθερη διατομή της βαλβίδας ασφαλείας του;

Η βαλβίδα ασφαλείας θα πρέπει να μπορεί να απάγει τη συνολική παραγωγή ατμού. Η αντίθλιψη είναι μικρότερη από την κρίσιμη, επομένως προκύπτει η απαιτούμενη διατομή, για ψ_{max}=0.450 και u_o=0.1317 m^3/kg, ίση με A=12.93 cm^2
Η διατομή αυτή είναι θεωρητική, και για την πραγματική διατομή της βαλβίδας θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατάλληλος συντελεστής εκροής.

48. Σε μιά σωλήνωση ατμού, μέσω της οποίας ρέει ατμός 1.0 bar και 150^oC, τοποθετείται ένα ακροφύσιο διαμέτρου d_o=60 mm (συντελεστής εκροής α=0.648) για τη μέτρηση της ροής μάζας του ατμού. Ο μετρητής διαφοράς πίεσης δείχνει 200 mm νερού πτώση πίεσης. *Πόση είναι η ροή μάζας ατμού μέσα στο σωλήνα;*

για 200 mm νερού = $200 \cdot 9{,}81\ \mathrm{kgm/s^2\ m^2}\quad \alpha = 0{,}648$

(από πίνακες ατμών) $\varrho = 0{,}517\ \mathrm{kg/m^3}$
προκύπτει

$$\dot{M} = 0{,}648 \cdot 2{,}83 \cdot 10^{-3}\mathrm{m^2} \sqrt{2 \cdot 0{,}517\ \mathrm{kg/m^3} \cdot 9{,}81\ \mathrm{kgm/s^2} \cdot 200 \cdot 1/\mathrm{m^2}} = 0{,}0826\ \mathrm{kg/s} = 297{,}36\ \mathrm{kg/h}.$$

49. Σε ένα δοχείο όπου επικρατεί απόλυτο κενό, όγκου V=1.5 m^3, οδηγείται ατμοσφαιρικός αέρας θερμοκρασίας θ_o=20^oC και πίεσης p_o= 1 bar, μέσω ενός ακροφυσίου με στενώτερη διατομή 2 mm^2, με ροή χωρίς απώλειες.
Να υπολογίσετε τη χρονική μεταβολή της πίεσης στο δοχείο, όταν
(i) η εναλλαγή θερμότητας του αέρα στο δοχείο με τα τοιχώματά του είναι τόσο καλή, ώστε η θερμοκρασία αέρα δεν ανεβαίνει αισθητά, και
(ii) καμμία εναλλαγή θερμότητας δεν λαμβάνει χώρα μεταξύ αέρα και δοχείου.

Εφόσον η θερμοκρασία του αερίου στο δοχείο κρατιέται σταθερή σε T_o με απόρριψη θερμότητας, εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης δίνει για χρονικό διάστημα z:

$$\frac{dp}{dz} \cdot \frac{V}{RT_0} = \frac{dm}{dz} = \dot{M},$$

οπότε

$$\dot{M} = A\psi \sqrt{2 \frac{p_0}{v_0}}$$

και επομένως

$$\frac{dp}{dz} = A\psi \frac{RT_0}{V} \sqrt{2 \frac{p_0}{v_0}},$$

Με χωρισμό μεταβλητών και ολοκλήρωση προκύπτει ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η πίεση στο δοχείο στην τιμή p

$$z = \frac{V}{ART_0} \sqrt{2 \frac{v}{p_0}} \int_0^p \frac{1}{\psi}\, dp.$$

Tafel B

Mollier log p,h-Tafel von Ammoniak

(Nach dem Diagramm des Bureau of Standards. In der Mitte ist aus dem Naßdampfgebiet ein Stück fortgelassen. Bei 0 °C ist $h' = 1{,}000$ kcal/kg. $s' = 1{,}000$ kcal/kg K gesetzt.)