



ΚΕΦ4. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Φυσική Β' Λυκείου – προσανατολισμού

Θ.Ταντανάσης

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος

Το ποσό **θερμότητας** (Q) που απορροφά ή αποβάλλει ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα της **μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας** (ΔU) και του **έργου** (W) που παράγει ή δαπανά το σύστημα.

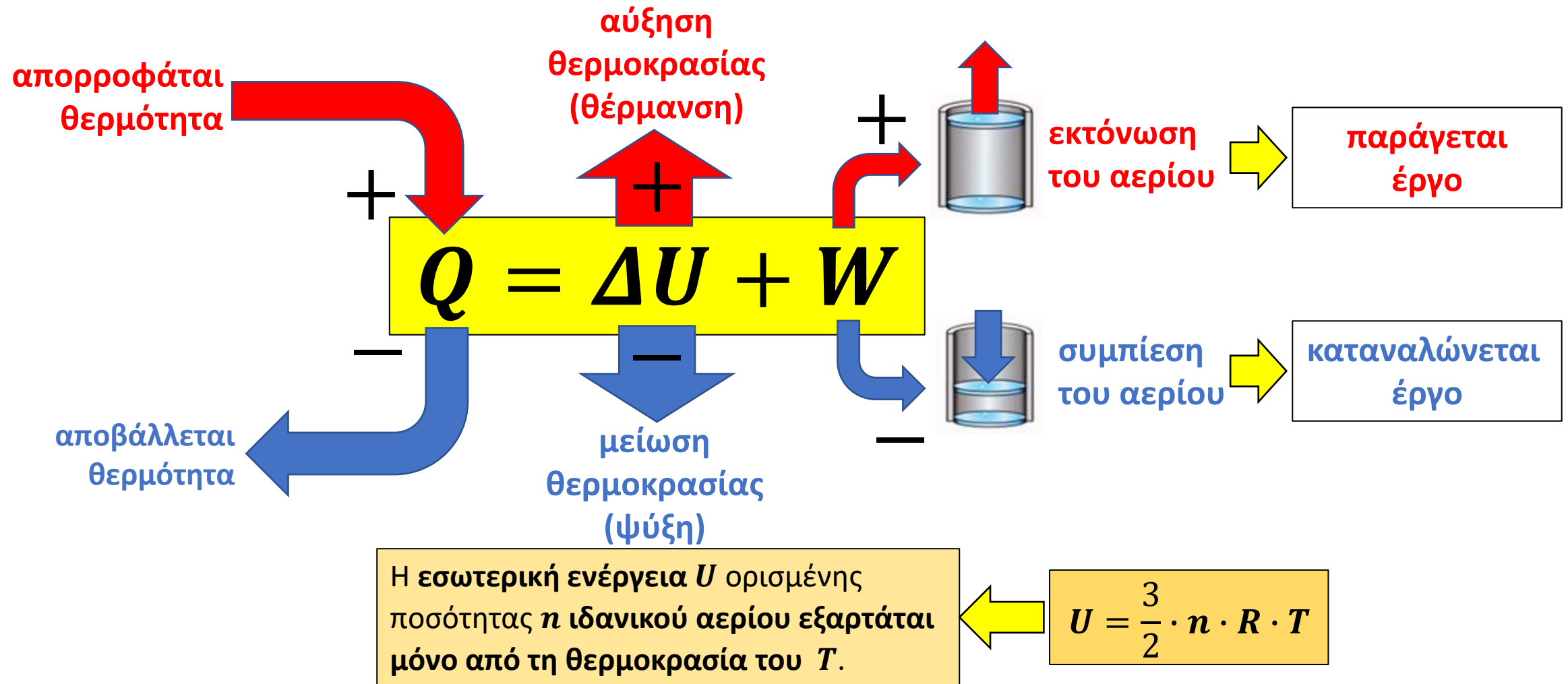
$$Q = \Delta U + W$$

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος

$$Q = \Delta U + W$$

- Αν το σύστημα **απορροφά** θερμότητα, το Q είναι **θετικό**,
- Αν το σύστημα **αποβάλλει** θερμότητα, το Q είναι **αρνητικό**.
- Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ΔU είναι **θετική** όταν **αυξάνεται** η θερμοκρασία του συστήματος.
- Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ΔU είναι **αρνητική** όταν **μειώνεται** η θερμοκρασία του συστήματος.
- Το **έργο** του αερίου είναι **θετικό** όταν το αέριο **εκτονώνεται**
- Το **έργο** του αερίου είναι **αρνητικό** όταν το αέριο **συμπιέζεται**.

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος



(A) Ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή

- Η μεταβολή γίνεται σε **σταθερή θερμοκρασία** T .
- Είναι $U_A = U_B$ άρα $\Delta U = 0$

$$Q = \cancel{\Delta U} + W \Rightarrow Q = W$$

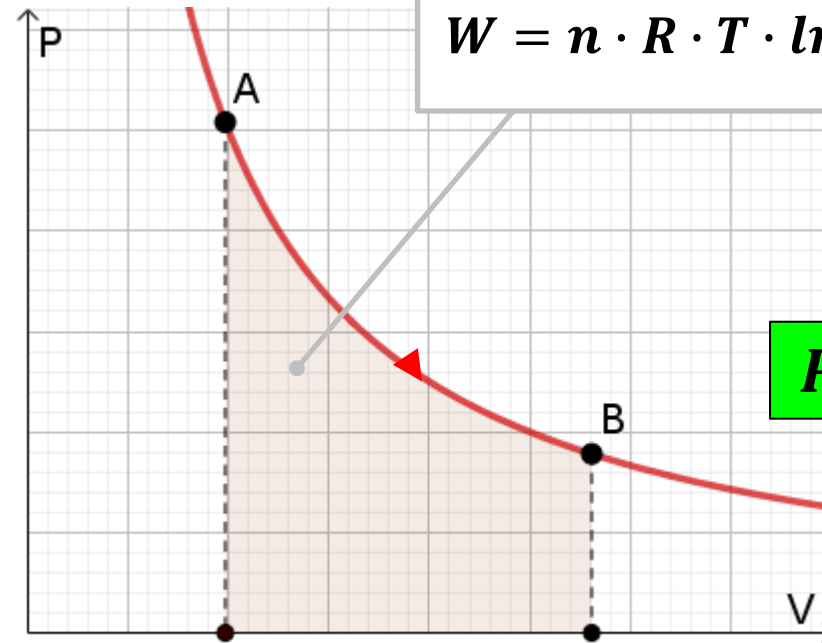
$$Q = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_\tau}{V_\alpha}$$

Στην **ισόθερμη εκτόνωση** όλο το ποσό θερμότητας (Q) που απορροφά το αέριο μετατρέπεται σε **μηχανικό έργο** (W).

παράγεται έργο:

$$W = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_\tau}{V_\alpha}$$

$$P \cdot V = \text{σταθ}$$



Εφόσον μετακινείται το έμβολο λόγω της αύξησης του όγκου παράγεται έργο.

(B) **Ισόχωρη** αντιστρεπτή μεταβολή

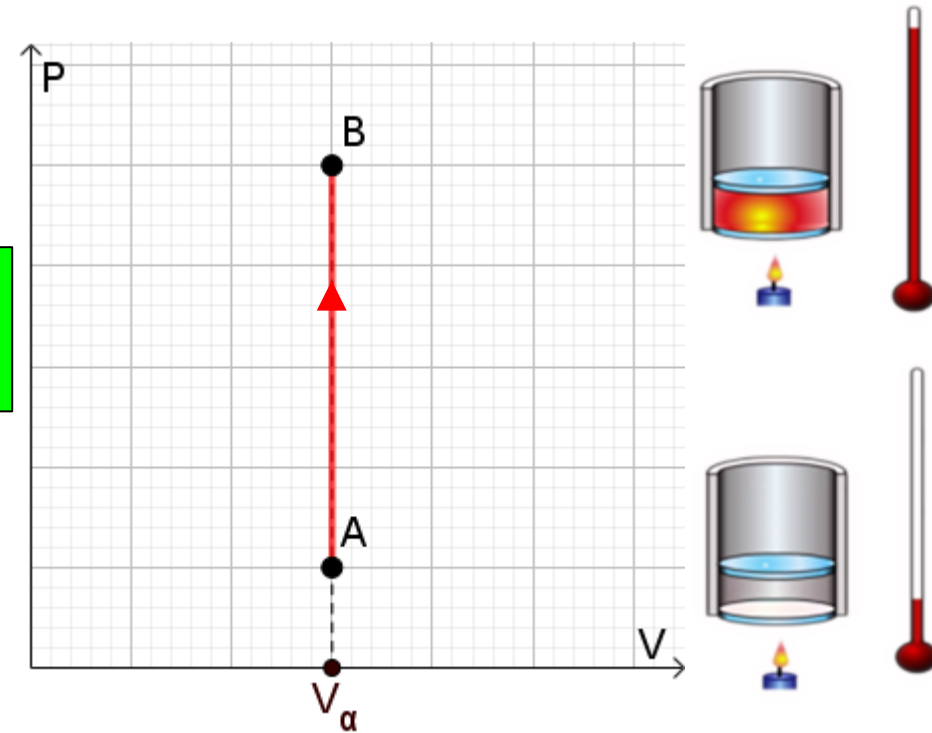
- Το αέριο θερμαίνεται με **σταθερό όγκο** V και η **θερμοκρασία** του T και η **πίεση** P αυξάνονται.
- Είναι $W = 0$ αφού το V δεν μεταβάλλεται.

$$Q = \Delta U + \cancel{W} \Rightarrow Q = \Delta U$$

Στην **ισόχωρη θέρμανση** όλο το ποσό θερμότητας (Q) που απορρόφησε το αέριο χρησιμοποιήθηκε για την **αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας** (ΔU).

$$\frac{P}{T} = \text{σταθ}$$

Εφόσον ο όγκος παραμένει αμετάβλητος δεν παράγεται έργο.



(Γ) Ισοβαρής αντιστρεπτή μεταβολή

- Το αέριο θερμαίνεται σε **σταθερή πίεση** P και ο **όγκος** V και η **θερμοκρασία** T του αυξάνονται.

$$Q = \Delta U + W$$



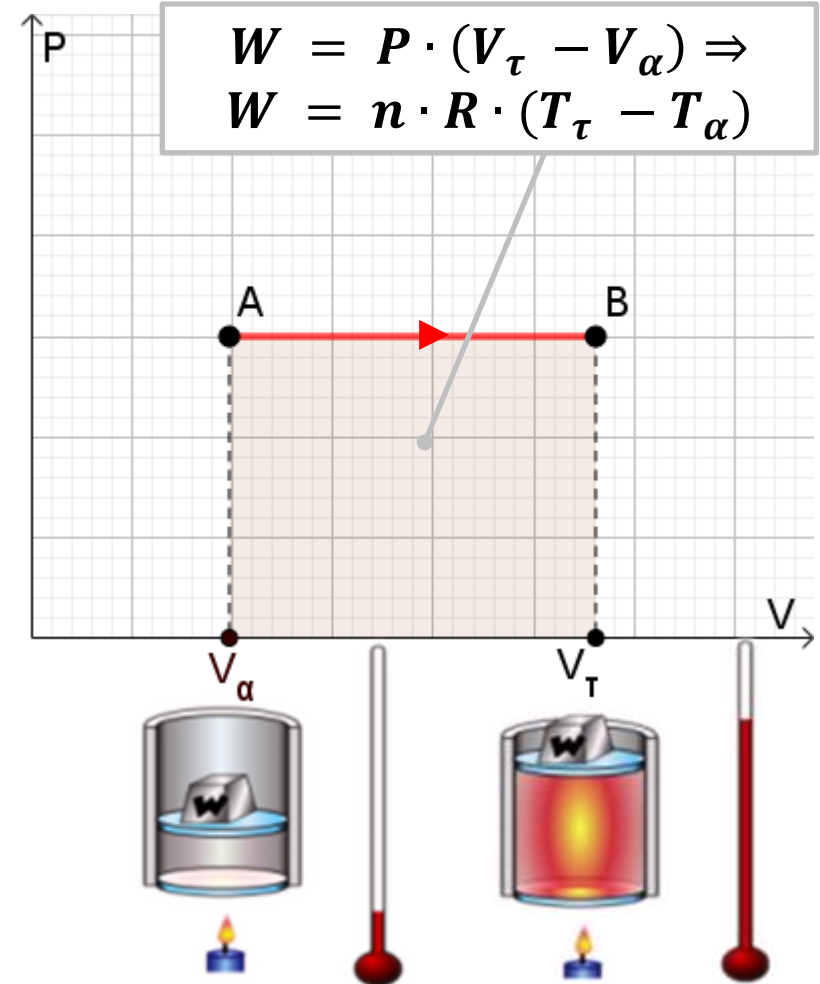
$$Q = \Delta U + n \cdot R \cdot (T_\tau - T_\alpha)$$

Στην **ισοβαρή θέρμανση** ένα μέρος από το ποσό θερμότητας (Q) που απορροφά το αέριο από το περιβάλλον χρησιμοποιείται για την **αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας** (ΔU) και το υπόλοιπο αποδίδεται εκ νέου στο περιβάλλον με τη **μορφή έργου** (W).

$$\frac{V}{T} = \text{σταθ}$$

παράγεται έργο:

$$W = P \cdot (V_\tau - V_\alpha) \Rightarrow$$
$$W = n \cdot R \cdot (T_\tau - T_\alpha)$$



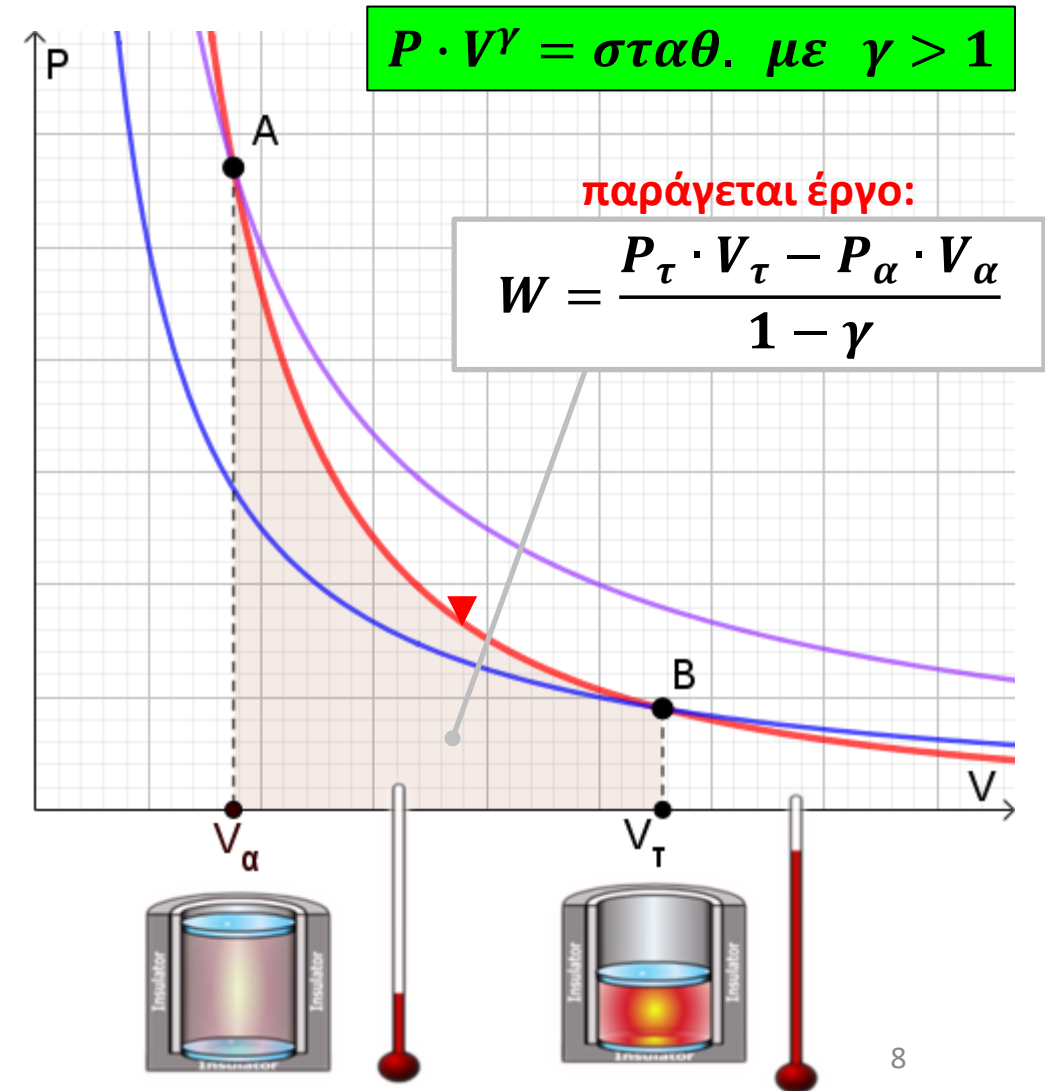
(Δ) Αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή

- Δεν συντελείται μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον προς το σύστημα ή αντίστροφα (μονωμένα τοιχώματα) επομένως $Q = 0$.

$$\cancel{Q} = \Delta U + W \Rightarrow W = -\Delta U$$

Κατά την **αδιαβατική εκτόνωση** το έργο είναι **θετικό** και από τη σχέση $W = -\Delta U$ προκύπτει ότι η εσωτερική ενέργεια **μειώνεται**, επομένως το **αέριο ψύχεται**.

Κατά την **αδιαβατική συμπίεση** το έργο είναι **αρνητικό** και από τη σχέση $W = -\Delta U$ προκύπτει ότι η εσωτερική ενέργεια **αυξάνεται**, επομένως το **αέριο θερμαίνεται**.



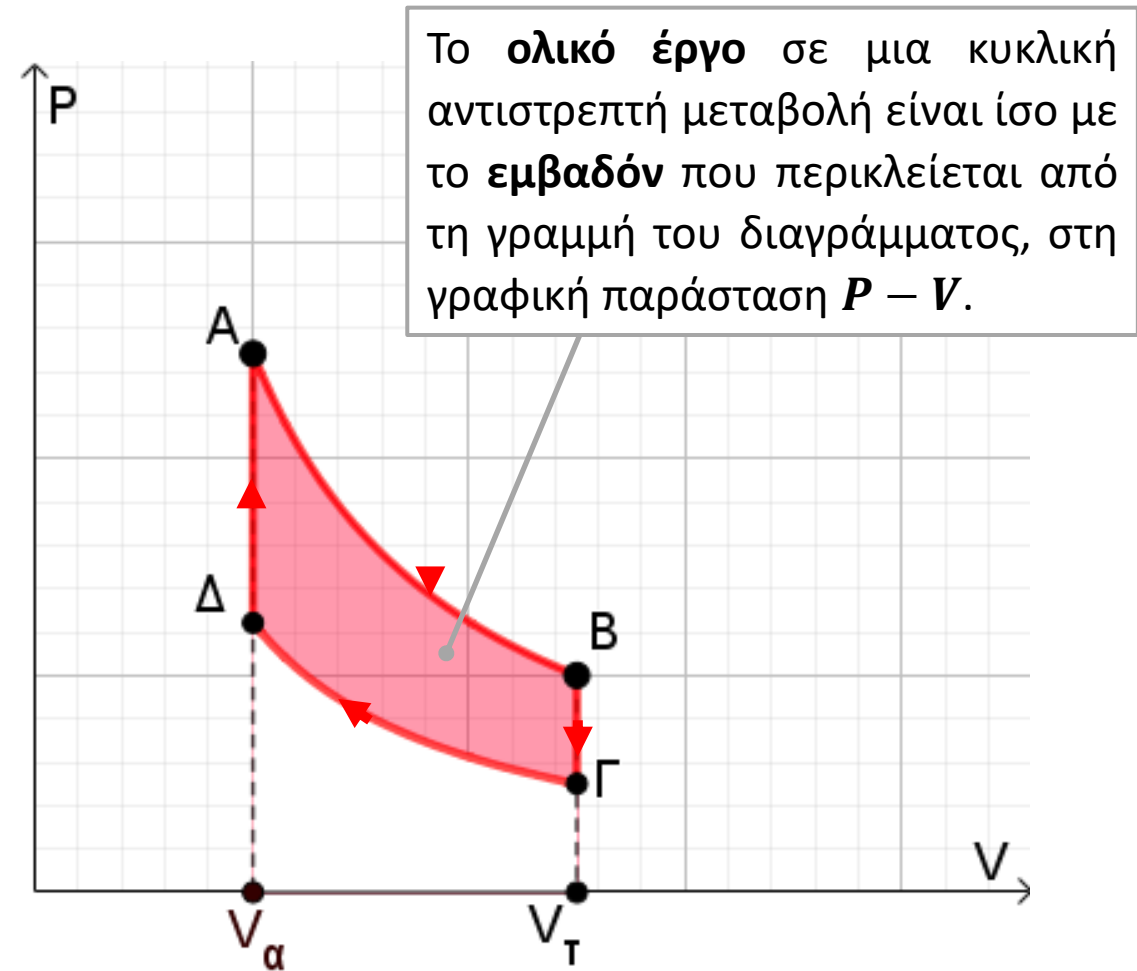
(Ε) Κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή

- Κυκλική ονομάζουμε μια μεταβολή στην οποία το σύστημα μετά από μια διεργασία επιστρέφει **στην ίδια κατάσταση** και άρα $\Delta U = 0$.

$$Q = \cancel{\Delta U} + W \Rightarrow Q = W$$

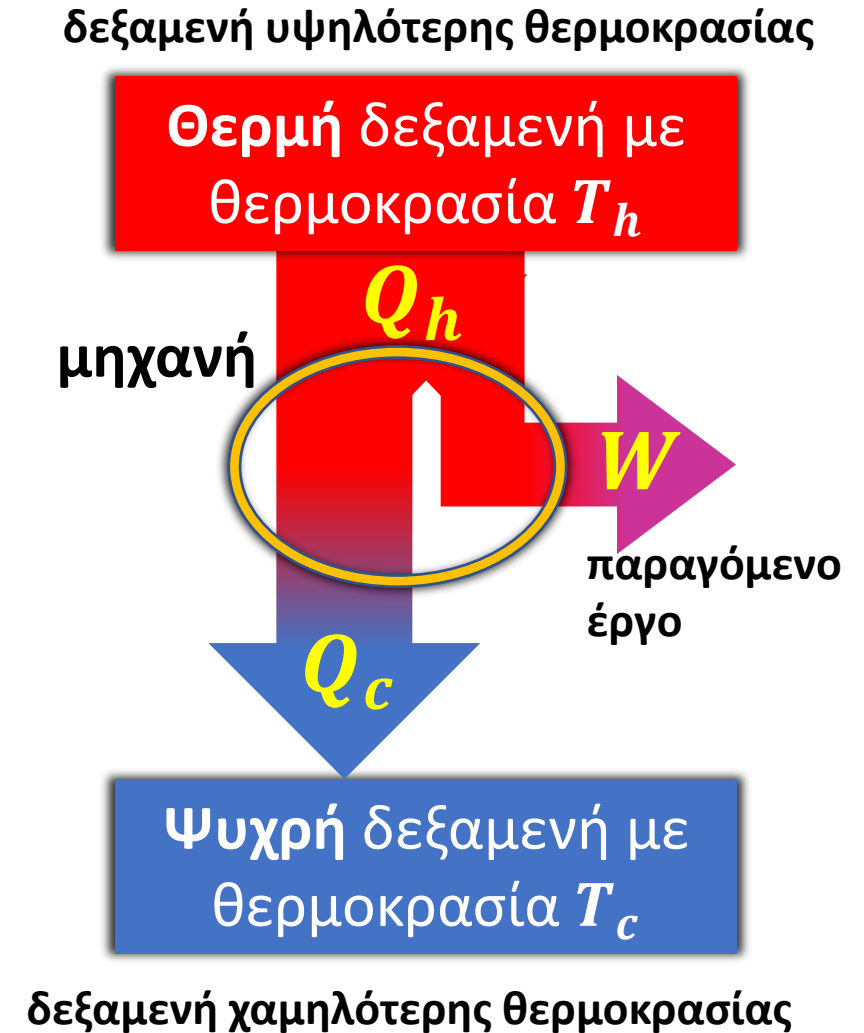
Στην κυκλική μεταβολή η **θερμότητα** (Q) που **απορροφά** ή **αποδίδει** το αέριο ισούται με το **έργο** (W) που **παράγει** ή **δαπανά**.

Το έργο είναι **θετικό** όταν η γραφική παράσταση της μεταβολής διαγράφεται με την **φορά των δεικτών του ρολογιού** και **αρνητικό** όταν διαγράφεται με την αντίθετη φορά.



Αρχή λειτουργίας θερμικής μηχανής

- Η κυκλική περιοχή συμβολίζει τη μηχανή η οποία δέχεται ποσό θερμότητας Q_h από τη **θερμή** δεξαμενή, παράγει έργο W και αποβάλλει ποσό θερμότητας Q_c στην **ψυχρή** δεξαμενή.
- Κατά τη διάρκεια της κυκλικής μεταβολής του μέσου, η μηχανή:
 - Απορροφά θερμότητα (Q_h) από μια δεξαμενή **υψηλής** θερμοκρασίας T_h .
 - Παράγει έργο W .
 - Αποβάλλει θερμότητα (Q_c) σε μια δεξαμενή **χαμηλότερης** θερμοκρασίας T_c .



Συντελεστής απόδοσης θερμικής μηχανής

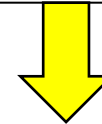
- Ο **συντελεστής απόδοσης (e)** οποιασδήποτε μηχανής είναι ο λόγος του **ωφέλιμου έργου (W)** που μας δίνει η μηχανή προς την **ενέργεια (Q_h) που δαπανούμε** για να λειτουργήσει.

$$e = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} \Rightarrow e = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h}$$

Στη θερμική μηχανή η **ενέργεια που δαπανούμε** είναι η θερμότητα Q_h με την οποία τροφοδοτούμε τη μηχανή από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας.

Στην **κυκλική μεταβολή** το **έργο** που παράγει το αέριο ισούται με το **καθαρό ποσό θερμότητας που απορροφά**: $W = Q_h - |Q_c|$

Ο συντελεστής απόδοσης μια **μηχανής Carnot** εξαρτάται μόνο από τις θερμοκρασίες των δύο δεξαμενών θερμότητας. Η απόδοση είναι **μεγάλη** όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγάλη και είναι πολύ **μικρή** όταν οι θερμοκρασίες διαφέρουν λίγο.



$$e_{Carnot} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

ΑΣΚΗΣΗ Φ5.Α10 (Ασκ.63 βιβλ.):

Ιδανική θερμική μηχανή λειτουργεί με τον **αντιστρεπτό κύκλο** του σχήματος δεξιά.

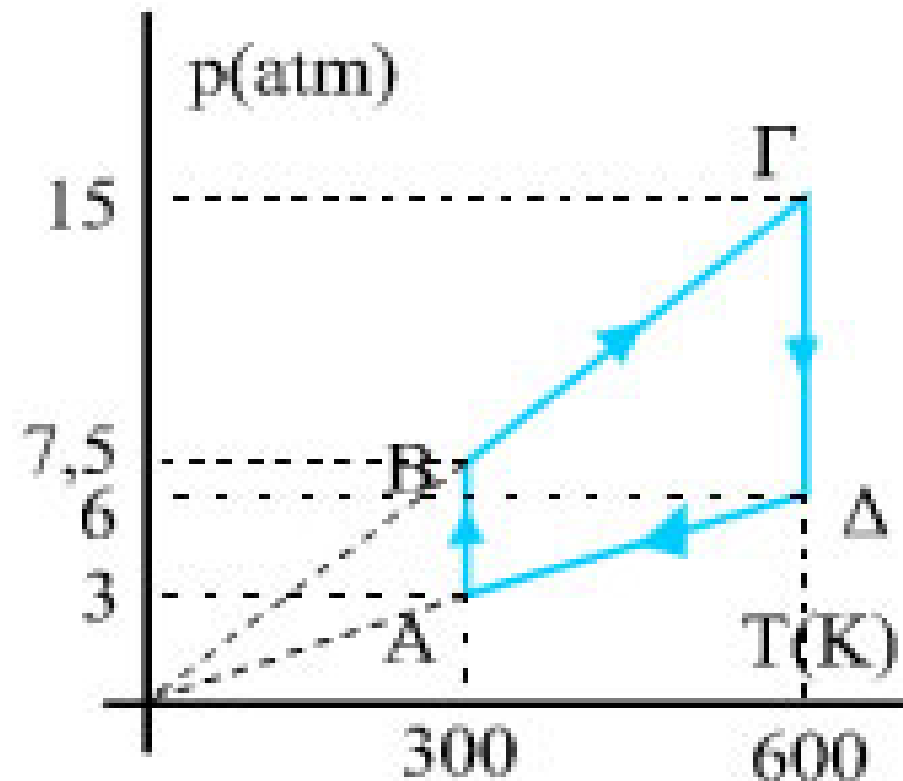
- α) Να παρασταθεί γραφικά η κυκλική μεταβολή σε άξονες $V - T$ και $P - V$.
- β) Να υπολογιστεί το **έργο** που παράγει η μηχανή στη διάρκεια ενός κύκλου.
- γ) Να υπολογιστεί ο **συντελεστής απόδοσης** της μηχανής.

Δίνονται: η ποσότητα του αερίου

$$n = 0,975 \text{ mol}, C_V = 3R/2,$$

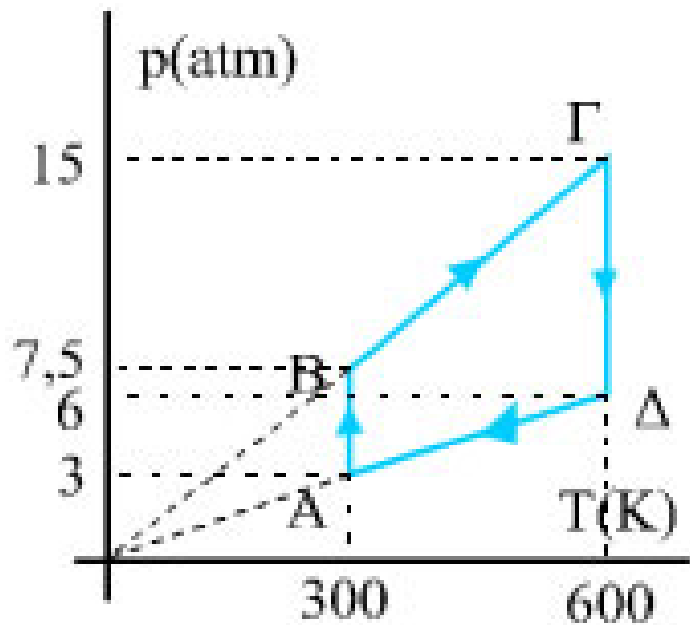
$$R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 0,082 \text{ L} \cdot \text{atm}/(\text{mol} \cdot \text{K}),$$

$$\ln 2,5 = 0,9163$$



ΑΣΚΗΣΗ Φ5.Α10 (Ασκ.63 βιβλ.): ΑΠΑΝΤΗΣΗ (α)

Αρχικά συμπληρώνουμε τις τιμές από το γράφημα που μας δίνεται τις τιμές στον παρακάτω πίνακα:



ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P (atm)	V (L)	T (°K)
A	3		300
B	7,5		300
Γ	15		600
Δ	6		600
A	3		300

ΑΣΚΗΣΗ Φ5.Α10 (Ασκ.63 βιβλ.): ΑΠΑΝΤΗΣΗ (α)

Από την **καταστατική εξίσωση των αερίων** μπορούμε να υπολογίσουμε τον αρχικό όγκο V_A :

$$P_A \cdot V_A = n \cdot R \cdot T_A \Rightarrow$$

$$V_A = \frac{n \cdot R \cdot T_A}{P_A} \Rightarrow$$

$$V_A = \frac{0,975 \cdot 0,082 \cdot 300}{3} = 7,995 \approx \boxed{8 \text{ L}}$$

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P (atm)	V (L)	T (°K)
A	3	8	300
B	7,5		300
Γ	15		600
Δ	6		600
A	3	8	300

ΑΣΚΗΣΗ Φ5.A10 (Ασκ.63 βιβλ.): ΑΠΑΝΤΗΣΗ (α)

Υπολογίζουμε το V_B από την **ισόθερμη** μεταβολή $A \rightarrow B$:

$$P_A \cdot V_A = P_B \cdot V_B \Rightarrow$$

$$V_B = \frac{P_A \cdot V_A}{P_B} \Rightarrow$$

$$V_B = \frac{3 \cdot 8}{7,5} = \boxed{3,2 \text{ L}}$$

Παρατηρούμε ότι οι καταστάσεις A και B έχουν την ίδια θερμοκρασία άρα η μεταβολή $A \rightarrow B$ είναι **ισόθερμη**:

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P (atm)	V (L)	T (°K)
A	3	8	300
B	7,5	3,2	300
Γ	15		600
Δ	6		600
A	3	8	300

ΑΣΚΗΣΗ Φ5.A10 (Ασκ.63 βιβλ.): ΑΠΑΝΤΗΣΗ (α)

Παρατηρούμε ότι η μεταβολή $B \rightarrow \Gamma$ είναι **ισόχωρη** επειδή ισχύει:

$$\frac{P_B}{T_B} = \frac{P_\Gamma}{T_\Gamma}$$

$$\frac{7,5}{300} = \frac{15}{600} \Rightarrow \frac{1}{1} = \frac{2}{2}$$

Επομένως θα είναι:

$$V_\Gamma = V_B = \boxed{3,2L}$$

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P (atm)	V (L)	T (°K)
A	3	8	300
B	7,5	3,2	300
Γ	15	3,2	600
Δ	6		600
A	3	8	300

ΑΣΚΗΣΗ Φ5.Α10 (Ασκ.63 βιβλ.): ΑΠΑΝΤΗΣΗ (α)

Υπολογίζουμε το V_{Δ} από την ισόθερμη μεταβολή $\Gamma \rightarrow \Delta$:

$$P_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma} = P_{\Delta} \cdot V_{\Delta} \Rightarrow$$

$$V_{\Delta} = \frac{P_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma}}{P_{\Delta}} \Rightarrow$$

$$V_{\Delta} = \frac{15 \cdot 3,2}{6} = \boxed{8 \text{ L}}$$

Παρατηρούμε ότι οι καταστάσεις Γ και Δ έχουν την ίδια θερμοκρασία άρα η μεταβολή $\Gamma \rightarrow \Delta$ είναι **ισόθερμη**:

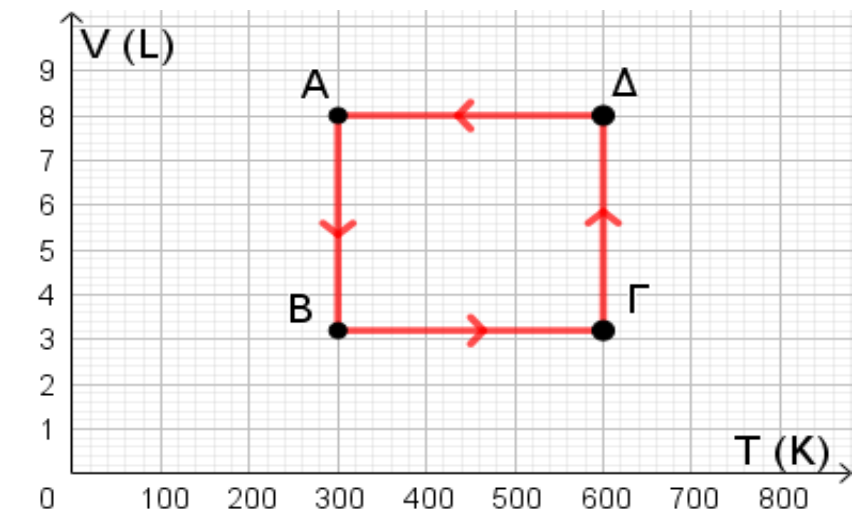
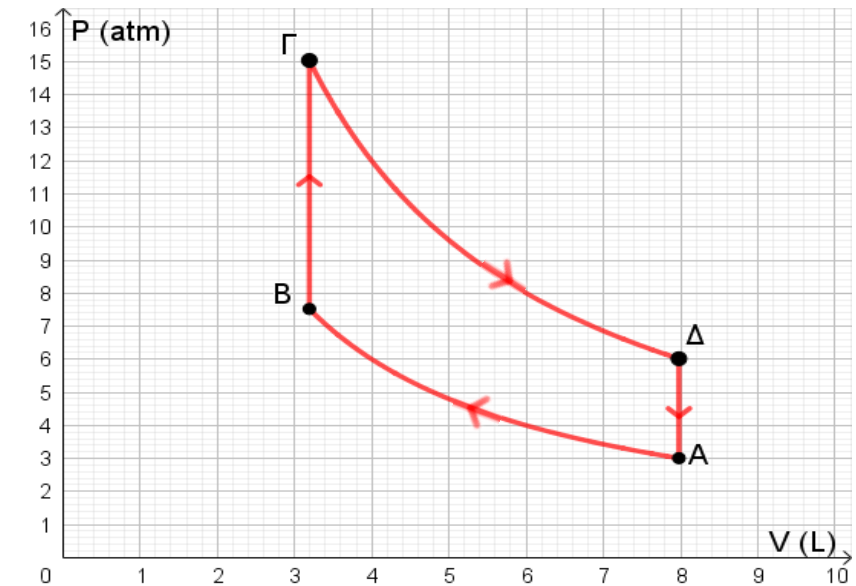
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P (atm)	V (L)	T ($^{\circ}\text{K}$)
A	3	8	300
B	7,5	3,2	300
Γ	15	3,2	600
Δ	6	8	600
A	3	8	300

Παρατηρούμε ότι η μεταβολή $\Delta \rightarrow A$ είναι **ισόχωρη**

ΑΣΚΗΣΗ Φ5.Α10 (Ασκ.63 βιβλ.): ΑΠΑΝΤΗΣΗ (α)

Από τον παρακάτω ολοκληρωμένο πίνακα τιμών μπορούμε να σχεδιάσουμε τα ζητούμενα γραφήματα.

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P (atm)	V (L)	T (°K)
A	3	8	300
B	7,5	3,2	300
Γ	15	3,2	600
Δ	6	8	600
A	3	8	300



ΑΣΚΗΣΗ Φ5.Α10 (Ασκ.63 βιβλ.): ΑΠΑΝΤΗΣΗ (β)

Οι μεταβολές $B \rightarrow \Gamma$ και $\Delta \rightarrow A$ είναι **ισόχωρες** επομένως σε αυτές είναι $W_{B\Gamma} = 0$ και $W_{\Delta A} = 0$.

Για την **ισόθερμη** $A \rightarrow B$ ισχύει:

$$W_{AB} = n \cdot R \cdot T_A \cdot \ln \frac{V_B}{V_A} \Rightarrow$$

$$W_{AB} = 0,975 \cdot 8,314 \cdot 300 \cdot \ln \frac{3,2}{8} =$$

$$2.431,8 \cdot \ln \frac{1}{2,5} = -2.431,8 \cdot \ln 2,5 = -2.431,8 \cdot 0,9163 = -2.228,27 \text{ J}$$

Για την **ισόθερμη** $\Gamma \rightarrow \Delta$ ισχύει:

$$W_{\Gamma\Delta} = n \cdot R \cdot T_{\Gamma} \cdot \ln \frac{V_{\Delta}}{V_{\Gamma}} \Rightarrow$$

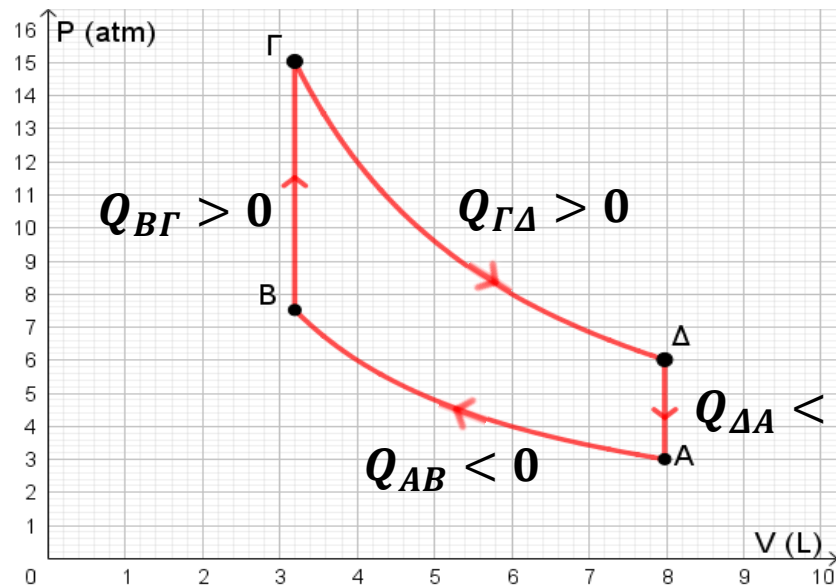
$$W_{\Gamma\Delta} = 0,975 \cdot 8,314 \cdot 600 \cdot \ln \frac{8}{3,2} = +4.456,55 \text{ J}$$

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	P (atm)	V (L)	T (°K)
A	3	8	300
B	7,5	3,2	300
Γ	15	3,2	600
Δ	6	8	600
A	3	8	300

$$\ln \frac{1}{2,5} = \ln 2,5^{-1} = -\ln 2,5$$

$$W_{ολ} = W_{AB} + W_{\Gamma\Delta} = -2.228,27 + 4.456,55 = 2.228,3 \text{ J}$$

ΑΣΚΗΣΗ Φ5.Α10 (Ασκ.63 βιβλ.): ΑΠΑΝΤΗΣΗ (γ)



Για την **ισόθερμη συμπίεση** $A \rightarrow B$ ισχύει: $Q_{AB} = W_{AB}$
Εφόσον προσφέρεται έργο είναι: $W_{AB} < 0 \Rightarrow Q_{AB} < 0$

Για την **ισόχωρη ψύξη** $\Delta \rightarrow A$ ισχύει: $Q_{\Delta A} = \Delta U_{\Delta A}$
Εφόσον μειώνεται η εσωτερική ενέργεια είναι:
 $\Delta U_{\Delta A} < 0 \Rightarrow Q_{\Delta A} < 0$

Σε αυτές τις δύο μεταβολές η θερμότητα αποβάλλεται.

Για την **ισόχωρη θέρμανση** $B \rightarrow \Gamma$ ισχύει: $Q_{B\Gamma} = \Delta U_{B\Gamma} > 0$. Η θερμότητα που απορροφάται θα είναι: $Q_{B\Gamma} = n \cdot C_V \cdot (T_\Gamma - T_B) = 0,975 \cdot 1,5 \cdot 8,314 \cdot 300 = 3.647,76 \text{ J}$

Για την **ισόθερμη εκτόνωση** $\Gamma \rightarrow \Delta$ ισχύει: $Q_{\Gamma\Delta} = W_{\Gamma\Delta} = +4456,55 \text{ J}$

Η προσφερόμενη θερμότητα είναι: $Q_h = Q_{B\Gamma} + Q_{\Gamma\Delta} = 3.647,76 + 4.456,55 = 8.104,31 \text{ J}$

Ο **συντελεστής απόδοσης** είναι:

$$e = \frac{W_{o\lambda}}{Q_h} = \frac{2.228,3}{8.104,31} = 0,275$$