

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

1. Τι εννοούμε λέγοντας θερμοδυναμικό σύστημα;

Είναι ένα κομμάτι ύλης που απομονώνουμε νοητά από το περιβάλλον.

Περιβάλλον του συστήματος είναι το σύνολο των σωμάτων που δεν ανήκουν στο σύστημα και μπορούν να αλληλεπιδράσουν με αυτό.

2. Πότε λέμε ότι ένα αέριο βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας;

Ένα αέριο βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας αν οι τιμές της πίεσης, θερμοκρασίας και πυκνότητας είναι οι ίδιες σε όλη την έκταση του όγκου του αερίου. Τότε η κατάσταση του αερίου περιγράφεται από ένα σημείο στο διάγραμμα p-V.

3. Ποια μεταβολή λέγεται αντιστρεπτή;

Αντιστρεπτή λέγεται η μεταβολή κατά τη οποία το αέριο διέρχεται από διαδοχικές καταστάσεις ισορροπίας. Η αντιστρεπτή μεταβολή παριστάνεται σε διάγραμμα P-V από μία γραμμή που ξεκινά από το αρχικό σημείο (P_1, V_1, T_1) και καταλήγει στο τελικό σημείο (P_2, V_2, T_2) .

Προϋποθέσεις για να είναι αντιστρεπτή η μεταβολή είναι οι εξής:

- α) Πρέπει να επικρατεί διαρκώς κατάσταση *θερμοδυναμικής ισορροπίας*.
- β) Δεν πρέπει να παρουσιάζονται *φαινόμενα τριβής* γιατί δεν θα έχουμε ίδιο έργο στην αρχική και την αντίστροφη μεταβολή.

4. Ποια μεταβολή λέγεται μη αντιστρεπτή;

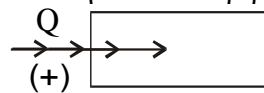
Είναι η μεταβολή κατά την οποία το σύστημα δεν βρίσκεται διαρκώς σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Αυτή δεν μπορεί να παρασταθεί από γραμμή γιατί δεν υπάρχουν καθορισμένα σημεία του διαγράμματος p-V μιας και δεν έχουμε καταστάσεις ισορροπίας.

5. Τι είναι η θερμότητα Q για ένα θερμοδυναμικό σύστημα;

Είναι η *θερμότητα που μεταφέρεται* από το αέριο στο περιβάλλον ή από το περιβάλλον στο

αέριο λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. **Κανόνας προσήμου:**

Δηλαδή θετική είναι η θερμότητα όταν προσφέρεται από το περιβάλλον στο αέριο και αρνητική αντιστρόφως.



6. Τι είναι η εσωτερική ενέργεια U για ένα αέριο;

Είναι το άθροισμα των ενεργειών των μορίων του αερίου. Επειδή στην περίπτωση του μονοατομικού αερίου το κάθε μόριο έχει ενέργεια $\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT$, η εσωτερική ενέργεια όλου του αερίου θα είναι: $U = N\bar{E}_k = \frac{3}{2}NkT$

$$U = N\bar{E}_k = \frac{3}{2}NkT = \frac{3}{2}nRT$$

7. Από τι εξαρτάται η εσωτερική ενέργεια ενός αερίου;

Από την προηγούμενη σχέση βλέπουμε ότι **εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη μάζα του αερίου.**

8. Πως μελετούμε τις μεταβολές της εσωτερικής ενέργειας;

Στην πραγματικότητα δεν μας ενδιαφέρει η ίδια η εσωτερική ενέργεια αλλά οι μεταβολές της. Έτσι θεωρούμε τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ΔU η οποία άλλοτε είναι θετική (όταν η U αυξάνεται) και άλλοτε αρνητική (όταν η U ελαττώνεται).

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση του αερίου και όχι από τη διαδρομή που ακολούθησε.

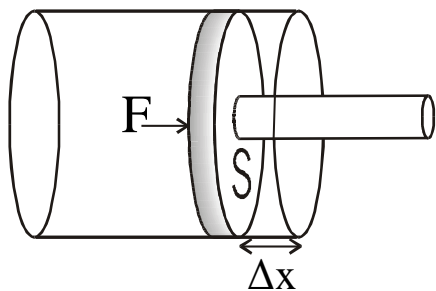
Η μεταβολή αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2}nRT_2 - \frac{3}{2}nRT_1 = \frac{3}{2}nR(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}nR\Delta T$$

$$\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T$$

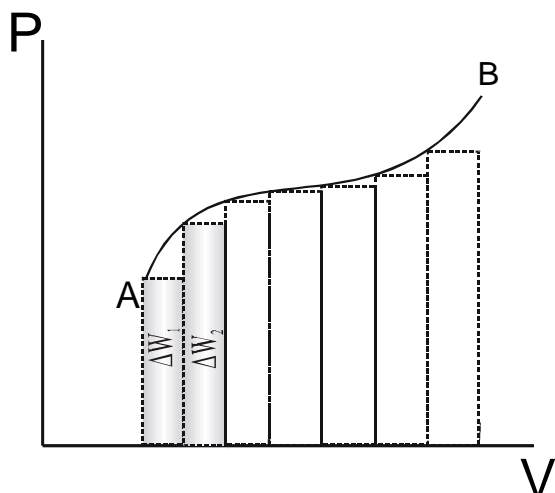
Από τη σχέση αυτή φαίνεται ότι **το πρόσημο της ΔU είναι ίδιο με το πρόσημο της ΔT .**

9. Πως υπολογίζεται το έργο σε μία οποιαδήποτε μεταβολή αερίου;



Θα υπολογίσουμε πρώτα το στοιχειώδες έργο ΔW που παράγει ένα αέριο σε μια μικρή μετακίνηση εμβόλου κατά την οποία η πίεση στο εσωτερικό παραμένει περίπου σταθερή: $\Delta W = F \cdot \Delta x = P \cdot S \cdot \Delta x = P \cdot \Delta V$

$$\Delta W = P \cdot \Delta V$$



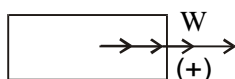
Εδώ χρησιμοποιήσαμε τον ορισμό της πίεσης

$$P = \frac{F}{S} \text{ και τον τύπο του όγκου κυλίνδρου}$$

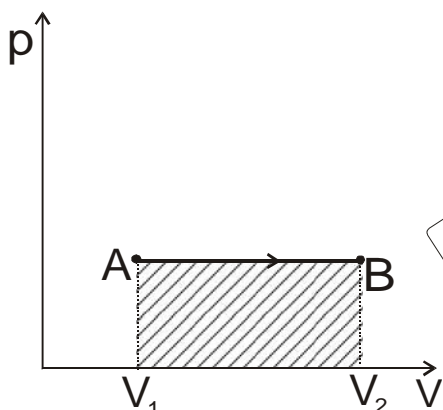
$$\Delta V = S \cdot \Delta x .$$

Το έργο οποιασδήποτε μεταβολής είναι άθροισμα στοιχειωδών έργων:
 $W = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \dots = p_1 \Delta V_1 + p_1 \Delta V_2 + \dots$ έτσι προκύπτει συνολικό έργο ίσο με το εμβαδόν μεταξύ της καμπύλης της μεταβολής και του άξονα V στο διάγραμμα p-V.

$$W = \text{εμβαδον σε } p-V$$



Κανόνας προσήμου: Δηλαδή θετικό είναι το έργο που παράγει το αέριο και το προσφέρει στο περιβάλλον και αρνητικό αντιστρόφως. Επίσης θετικό είναι το έργο στην εκτόνωση αερίου όπου το ΔV είναι επίσης θετικό. Αρνητικό (καταναλισκόμενο) είναι το έργο στη συμπίεση αερίου όπου το ΔV είναι αρνητικό.



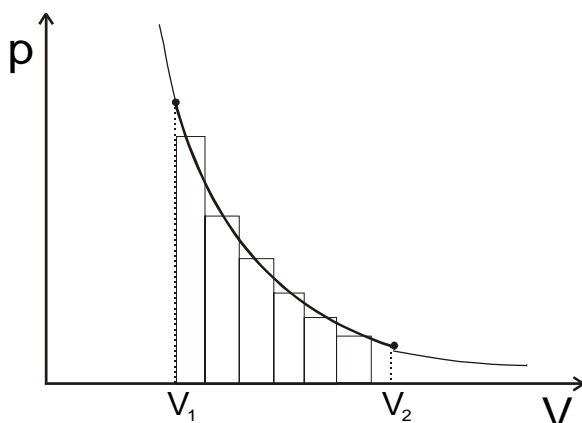
10. Πως υπολογίζεται το έργο στην ισοβαρή μεταβολή;

Επειδή στην ισοβαρή μεταβολή κάθε στιγμή η πίεση παραμένει σταθερή, θα έχουμε:

$$W = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \dots = p_1 \Delta V_1 + p_1 \Delta V_2 + \dots = p(\Delta V_1 + \Delta V_2 + \dots) = p \Delta V$$

$$\text{ισοβαρης } W = p \cdot \Delta V$$

11. Πως υπολογίζεται το έργο στην ισόθερμη μεταβολή;



Όπως κάθε έργο μεταβολής, έτσι και εδώ θα έχουμε άθροισμα στοιχειωδών έργων το οποίο αν υπολογιστεί μας δίνει:

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = nRT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Το έργο αυτό είναι αριθμητικά ίσο με το εμβαδόν μεταξύ της ισόθερμης καμπύλης και του άξονα V.

12. Ποιος είναι ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος;

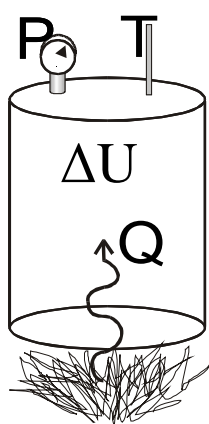
Το ποσό της θερμότητας Q που ανταλλάσσει ένα σύστημα με το περιβάλλον ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα της μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας και του έργου που παράγει ή καταναλώνει το σύστημα.

$$Q = \Delta U + W$$

13. Τι εκφράζει ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος;

Εκφράζει την αρχή της διατήρησης της ενέργειας.

14. Πως υπολογίζουμε τη θερμότητα στην ισόχωρη μεταβολή;



Η θερμότητα σε μία ισόχωρη μεταβολή είναι ανάλογη με την μάζα του αερίου, τη μεταβολή της θερμοκρασίας και το είδος του αερίου.

Η θερμότητα αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$Q_v = n \cdot C_v \cdot \Delta T$$

Όπου n =αριθμός moles, C_v = γραμμομοριακή ειδική θερμότητα με σταθερό όγκο και ΔT = μεταβολή θερμοκρασίας αερίου.

Η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο C_v εκφράζει τη θερμότητα που πρέπει να προσλάβει ένα mole για να ανεβάσει τη θερμοκρασία του κατά $1^\circ K$. Μονάδα μέτρησης είναι το $1 \text{ cal/mole} \cdot K$

15. Πως υπολογίζουμε τη θερμότητα στην ισοβαρή μεταβολή;

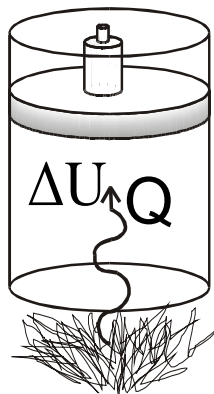
Η θερμότητα σε μία ισοβαρή μεταβολή είναι ανάλογη με την μάζα του αερίου, τη μεταβολή της θερμοκρασίας και το είδος του αερίου.

Η θερμότητα αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$Q_p = n \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Όπου n =αριθμός moles, C_p = γραμμομοριακή ειδική θερμότητα με σταθερή πίεση και ΔT = μεταβολή θερμοκρασίας αερίου.

Η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση C_p εκφράζει τη θερμότητα που πρέπει να προσλάβει ένα mole για να ανεβάσει τη θερμοκρασία του κατά $1^\circ K$. Μονάδα μέτρησης είναι το $1 \text{ cal/mole} \cdot K$



16. Ποια η μορφή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου στην περίπτωση της ισόχωρης και της ισοβαρούς μεταβολής;

Ισόχωρη: $Q_v = \Delta U$ διότι το W είναι μηδέν

Ισοβαρής: $Q_p = \Delta U + W$ όπου το W δεν είναι μηδέν.

17. Ποια από τις C_p , C_v είναι μεγαλύτερη και γιατί;

Για να τις συγκρίνουμε θεωρούμε θέρμανση με ίδια μεταβολή στη θερμοκρασία τη μια με ισόχωρη μεταβολή και την άλλη με ισοβαρή. Από την ερώτηση 7 βλέπουμε ότι έχουμε την ίδια αύξηση ΔU της εσωτερικής ενέργειας, όμως στην ισοβαρή έχουμε και επιπλέον παραγωγή έργου W . Συνεπώς είναι:

$$C_p > C_v$$

18. Τι είναι ο συντελεστής γ ;

Είναι το πηλίκο C_p/C_v

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

19. Πως μπορούμε να υπολογίσουμε τα C_p , C_v , γ ;

Από τις σχέσεις $Q_v = \Delta U$ και $\Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$ και για *ιδανικό αέριο* έχουμε:

$$Q_v = \frac{3}{2} nR\Delta T \Rightarrow nC_v\Delta T = \frac{3}{2} nR\Delta T \Rightarrow C_v = \frac{3}{2} R$$

$$C_v = \frac{3}{2} R$$

Για την ισοβαρή μεταβολή έχουμε: $Q_p = \Delta U + W$

$$\Rightarrow nC_p\Delta T = nC_v\Delta T + p\Delta V \Rightarrow nC_p\Delta T = nC_v\Delta T + nR\Delta T \Rightarrow C_p = C_v + R$$

$$C_p = C_v + R$$

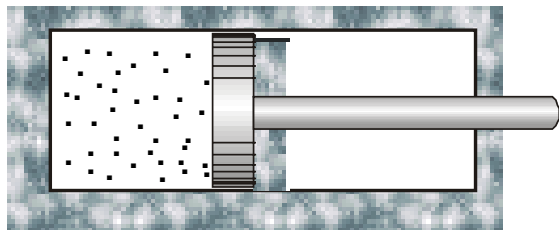
$$C_p = \frac{3}{2} R + R \Rightarrow C_p = \frac{5}{2} R$$

$$C_p = \frac{5}{2} R$$

Ο συντελεστής γ υπολογίζεται:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{5}{3}$$

20. Ποια μεταβολή λέγεται αδιαβατική;



Είναι η μεταβολή κατά την οποία το αέριο δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον.

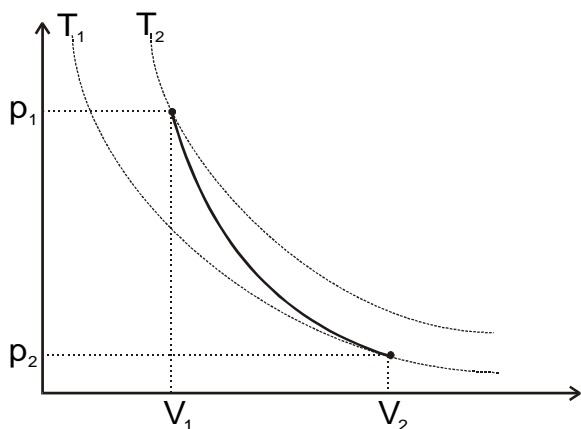
Το αέριο τότε πρέπει να περιέχεται σε δοχείο με μονωτικά τοιχώματα.

21. Πως εφαρμόζεται ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος για την αδιαβατική μεταβολή;

Είναι: $Q = \Delta U + W \Rightarrow 0 = \Delta U + W \Rightarrow W = -\Delta U$ Δηλαδή το έργο στην αδιαβατική μεταβολή είναι ίσο με το αντίθετο της μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας.

$$W = -\Delta U$$

22. Ποια είναι η εξίσωση της αδιαβατικής μεταβολής;



Η εξίσωση της αδιαβατικής μεταβολής είναι:

Νομος Poisson $p \cdot V^\gamma = \text{σταθ.}$

$p_1 \cdot V_1^\gamma = p_2 \cdot V_2^\gamma$

Η γραφική παράσταση δείχνεται στο διπλανό σχήμα. Παρατηρούμε ότι η καμπύλη της αδιαβατικής μεταβολής ξεκινά από μια θερμοκρασία T_1 και καταλήγει σε άλλη θερμοκρασία T_2 .

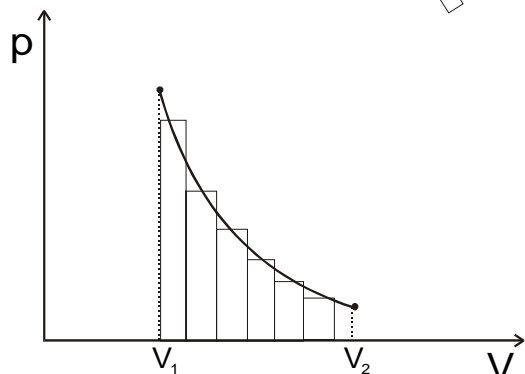
Η καμπύλη αυτή είναι πιο απότομη από την

καμπύλη της ισόθερμης μεταβολής.

23. Γιατί η αδιαβατική καμπύλη είναι πιο απότομη από την ισόθερμη;

Θεωρούμε μια αδιαβατική εκτόνωση στην οποία είναι $W = -\Delta U$ δηλαδή $W > 0$ και $\Delta U < 0$ οπότε στην αδιαβατική εκτόνωση θα πρέπει το η θερμοκρασία να ελαττώνεται δηλαδή θα πρέπει η καμπύλη να είναι πιο απότομη από την ισόθερμη.

24. Πως υπολογίζεται το έργο στην αδιαβατική μεταβολή;

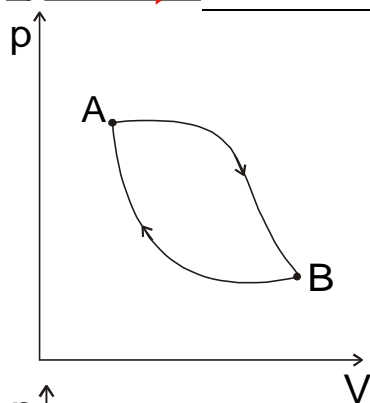


Όπως κάθε έργο μεταβολής, έτσι και εδώ θα έχουμε άθροισμα στοιχειωδών έργων το οποίο αν υπολογιστεί μας δίνει:

[Empty box for the answer]

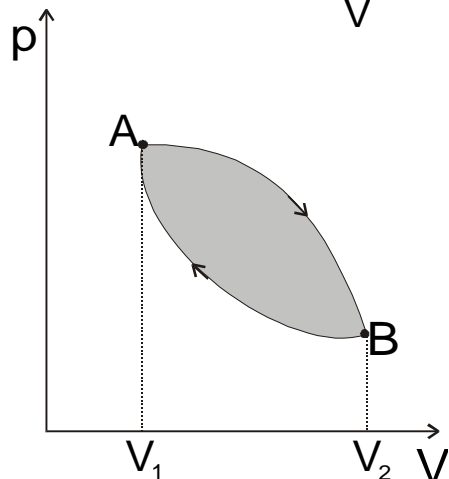
Το έργο αυτό είναι αριθμητικά ίσο με το εμβαδόν μεταξύ της αδιαβατικής καμπύλης και του άξονα V .

25. Ποια μεταβολή λέγεται κυκλική;



Κυκλική λέγεται η μεταβολή στην οποία το αέριο αρχικά βρίσκεται σε ορισμένη κατάσταση $A(p_A, V_A, T_A)$ και μετά από ορισμένες μεταβολές επιστρέφει πάλι σ' αυτήν.

26. Πως υπολογίζουμε το έργο σε μια κυκλική μεταβολή;



Θεωρούμε μια κυκλική μεταβολή που αποτελείται από μία εκτόνωση και μία συμπίεση. Το έργο στην εκτόνωση A-B είναι θετικό και ίσο αριθμητικά με το αντίστοιχο εμβαδόν. Το έργο στη συμπίεση B-A είναι αρνητικό και ίσο κατά απόλυτη τιμή με το αντίστοιχο εμβαδόν. Το συνολικό έργο είναι ίσο με τη διαφορά των δύο εμβαδών δηλαδή ισούται με το περικλειόμενο εμβαδόν στην κυκλική μεταβολή. Με βάση τα προηγούμενα εύκολα προκύπτει ότι το έργο της κυκλικής είναι θετικό αν η κυκλική μεταβολή έχει «δεξιόστροφη» φορά και αρνητικό αν έχει «αριστερόστροφη» φορά. Επίσης επειδή στην κυκλική μεταβολή είναι $\Delta U=0$ βγάζουμε το συμπέρασμα ότι ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος γίνεται: $Q=W$

ΕΙΔΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	ΕΞΙΣΩΣΗ	Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ		
			Q	=	ΔU + W
ΙΣΟΘΕΡΜΗ ΕΚΤΟΝΩΣΗ		T = σταθ. PV = σταθ. P ₁ V ₁ = P ₂ V ₂	Q > 0 Q	0	W = ηRT ln $\frac{V_2}{V_1}$ > 0 (ή ln $\frac{P_1}{P_2}$)
ΙΣΟΘΕΡΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ			Q < 0 Q	0	W = ηRT ln $\frac{V_2}{V_1}$ < 0 (ή ln $\frac{P_1}{P_2}$)
ΙΣΟΒΑΡΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗ		P = σταθ. $\frac{V}{T} = \text{σταθ.}$	Q _P Q _P = ηC _P ΔT Q _P > 0	ΔU $\Delta U = \eta C_V \Delta T$ $\Delta U > 0$	W W = PΔV = ηRΔT W > 0
ΙΣΟΒΑΡΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗ		$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ PΔV = ηRΔT	Q _P Q _P = ηC _P ΔT Q _P < 0	ΔU $\Delta U = \eta C_V \Delta T$ $\Delta U < 0$	W W = PΔV = ηRΔT W < 0
ΙΣΟΧΩΡΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ		V = σταθ. $\frac{P_1}{T_1} = \text{σταθ.}$	Q _V Q _V = ηC _V ΔT Q _V > 0	ΔU $\Delta U = \eta C_V \Delta T$ $\Delta U > 0$	0
ΙΣΟΧΩΡΗ ΨΥΞΗ		$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$ VΔP = ηRΔT	Q _V Q _V = ηC _V ΔT Q _V < 0	ΔU $\Delta U = \eta C_V \Delta T$ $\Delta U < 0$	0
ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΕΚΤΟΝΩΣΗ		P · V ^γ = σταθ. P ₁ V ₁ ^γ = P ₂ V ₂ ^γ	0	ΔU $\Delta U = \eta C_V \Delta T$ $\Delta U < 0$	W W = $\frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - \gamma}$ W > 0
ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ		T V ^{γ-1} = σταθ. T ₁ V ₁ ^{γ-1} = T ₂ V ₂ ^{γ-1}	0	ΔU $\Delta U = \eta C_V \Delta T$ $\Delta U > 0$	W W = $\frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - \gamma}$ W < 0