ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠ/ΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

Φυσική

Ομάδας Προσανατολισμού Θετικών Σπουδών

Β΄ ΤΑΞΗ ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ

Τόμος 4ος

ΟΜΑΔΑ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ
Ιωάννης Α. Βλάχος, Διδάκτορας, Σχολικός Σύμβουλος του κλάδου ΠΕ4.
Ιωάννης Γ. Γραμματικάκης, Επικουρος Καθηγητής Φυσικής στο Πανεπιστήμιο Αθηνών.
Βασίλης Α. Καραπαναγιώτης, Φυσικός, Καθηγητής Πειραματικού Σχολείου Πανεπιστημίου Αθηνών.
Περικλής Εμ. Περιστερόπουλος, Φυσικός, Υποψήφιος Διδάκτορας, Καθηγητής στο 3ο Λύκειο Βύρωνα.
Γιώργος Β. Τιμόθεου, Φυσικός, Λυκειάρχης στο 2ο Λύκειο Αγ. Παρασκευής.

Αλέκος Ιωάννου
Γιάννης Ντάνος
Άγγελος Πήττας
Σταύρος Ράπτης

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΓΡΑΦΙΚΗΣ ΟΜΑΔΑΣ
Παναγιώτης Β. Κόκκοτας, Καθηγητης της Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Αθηνών.
Οι συγγράφεις ευχαριστούν τον Ιωάννη Βαγιωνάκη, Φυσικό, για τη συμβολή του στη συγγραφή ασκήσεων και ερωτήσεων, για τις παρατηρήσεις και υποδείξεις του, καθώς και για τη βοήθειά του στην επιμέλεια έκδοσης.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΚΡΙΣΗΣ
Φλυτζάνης Νικόλαος (Πρόεδρος), Καθηγητής Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης.
Καλοψικάκης Εμμανουήλ, Φυσικός, τ. Σχολικός Σύμβουλος.
Ξενάκης Χρήστος, Δρ. Φυσικός, Σχολικός Σύμβουλος Φθιώτιδος.

Πάλλας Δήμος, Φυσικός, Υποδιευθυντής 1ου Λυκείου Λαμίας.
Στεφανίδης Κωνσταντίνος, Δρ. Φυσικός, Σχολικός Σύμβουλος Πειραιά

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΝΕΚΔΟΣΗΣ

Η επανέκδοση του παρόντος βιβλίου πραγματοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων «Διόφαντος» μέσω ψηφιακής μακέτας, η οποία δημιουργήθηκε με χρηματοδότηση από το ΕΣΠΑ / ΕΠ «Εκπαίδευση& Διά Βίου Μάθηση» / Πράξη «ΣΤΗΡΙΖΩ».

Οι αλλαγές που ενσωματώθηκαν στην παρούσα επανέκδοση έγιναν με βάση τις διορθώσεις του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου.

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ ΓΙΑ ΜΑΘΗΤΕΣ ΜΕ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΟΡΑΣΗ

Ομάδα Εργασίας Ινστιτούτου Εκπαιδευτικής Πολιτικής (Ι.Ε.Π.)

Μετατροπή: **Ιουστίνα Φλεμοτόμου**

Επιμέλεια: **Άννα Σπανάκη**

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ

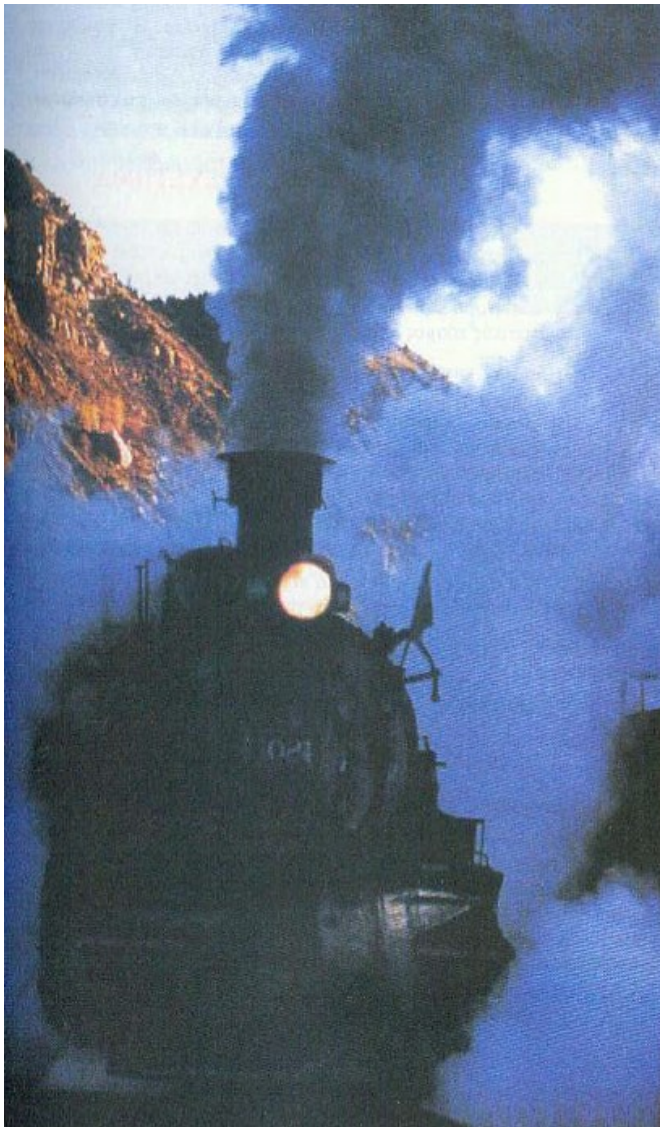
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠ/ΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΒΛΑΧΟΣ
ΙΩΑΝΝΗΣ Γ. ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΑΚΗΣ
ΒΑΣΙΛΗΣ Α. ΚΑΡΑΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Β. ΚΟΚΚΟΤΑΣ
ΠΕΡΙΚΛΗΣ ΕΜ. ΠΕΡΙΣΤΕΡΟΠΟΛΟΣ
ΓΙΩΡΓΟΣ Β. ΤΙΜΟΘΕΟΥ
ΑΛΕΚΟΣ ΙΩΑΝΝΟΥ ΓΙΑΝΝΗΣ ΝΤΑΝΟΣ ΑΓΓΕΛΟΣ ΠΗΤΤΑΣ ΣΤΑΥΡΟΣ ΡΑΠΤΗΣ
Η συγγραφή και η επιμέλεια του βιβλίου πραγματοποιήθηκε υπό την αιγίδα του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου

Φυσική
Ομάδας Προσανατολισμού Θετικών Σπουδών
Β΄ τάξη
Γενικού Λυκείου

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

4 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ



4.1 Εισαγωγή
4.2 Θερμοδυναμικό σύστημα
4.3 Ισορροπία θερμοδυναμικού συστήματος
4.4 Αντιστρεπτές μεταβολές

4.5 Έργο παραγόμενο από αέριο κατά τη διάρκεια μεταβολών όγκου
4.6 Θερμότητα
4.7 Εσωτερική ενέργεια
4.8 Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος
4.9 Εφαρμογή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου σε ειδικές περιπτώσεις
4.10 Γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες αερίων
4.11 Θερμικές μηχανές
4.12 Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος
4.13 Η μηχανή του Carnot
4.14 Εντροπία
4.15 Υπολογισμός της μεταβολής της εντροπίας σε μερικές περιπτώσεις

4-1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος θερμοδυναμική προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις θερμότητα και δύναμη.

Αν και η πρώτη θερμική μηχανή, που είναι ιστορικά γνωστή, κατασκευάστηκε από τον Ήρωνα τον Αλεξανδρινό περίπου το 100 μ.Χ., αφετηρία για την ανάπτυξη της θερμοδυναμικής στάθηκε η εφεύρεση της ατμομηχανής και οι προσπάθειες που ακολούθησαν για τη βελτίωση και τελειοποίηση των μηχανών που μετέτρεπαν τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο. Η θερμοδυναμική μελετάει τη μετατροπή της θερμότητας σε μηχανικό έργο και τους περιορισμούς που η φύση έχει επιβάλει.

Εικ. 4.1 Σχέδιο του ατμοστρόβιλου που επινόησε ο αρχαίος έλληνας εφευρέτης Ήρων (Αλεξάνδρεια, περ. 100 μ.Χ.). Το δοχείο είναι κλειστό και επικοινωνεί με τη σφαίρα με τους δύο κατακόρυφους σωλήνες. Με βρασμό νερού παράγεται ατμός στο δοχείο που εισέρχεται από τους σωλήνες στη σφαίρα και εξέρχεται με μεγάλη ταχύτητα από τα δύο ακροφύσια θέτοντας σε περιστροφή τη σφαίρα.

Από την εποχή που εφευρέθηκε η πρώτη ατμομηχανή μέχρι σήμερα έχουν περάσει πολλά χρόνια. Η πρόοδος της θερμοδυναμικής οδήγησε στην κατασκευή όλων των σύγχρονων θερμικών μηχανών, βενζινοκινητήρων, πετρελαιοκινητήρων, κινητήρων αεροσκαφών, ατμοστρόβιλων.

4-2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα χρησιμοποιούμε συχνά τον όρο θερμοδυναμικό σύστημα. Γενικά, **σύστημα** είναι ένα τμήμα του φυσικού κόσμου που διαχωρίζεται από τον υπόλοιπο κόσμο με πραγματικά ή νοητά τοιχώματα. Ο υπόλοιπος φυσικός κόσμος αποτελεί το **περιβάλλον** του συστήματος.

Αν κατά τη μελέτη ενός συστήματος, για την περιγραφή του χρησιμοποιούμε μόνο μεγέθη της μηχανικής, π.χ. δύναμη, ταχύτητα, επιτάχυνση, ορμή κ.λ.π. το σύστημα χαρακτηρίζεται μηχανικό. Στην περίπτωση που για την περιγραφή του χρησιμοποιούνται και θερμοδυναμικά μεγέθη, όπως θερμότητα, θερμοκρασία, εσωτερική ενέργεια και άλλα, το σύστημα χαρακτηρίζεται θερμοδυναμικό.

Εμείς θα ασχοληθούμε με τα απλούστερα θερμοδυναμικά συστήματα, δηλαδή αέρια που βρίσκονται μέσα σε δοχεία στο εσωτερικό των οποίων δε γίνονται χημικές αντιδράσεις. Ένα τέτοιο σύστημα θα χαρακτηρίζεται θερμικά μονωμένο ή απλά μονωμένο αν τα τοιχώματα του δοχείου δεν επιτρέπουν τη

μεταφορά θερμότητας από το αέριο προς το περιβάλλον ή αντίστροφα.

4-3 ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για να περιγραφεί ένα θερμοδυναμικό σύστημα χρειάζεται να γνωρίζουμε κάποια στοιχεία του. Για παράδειγμα, ορισμένη ποσότητα αερίου που βρίσκεται σε ένα δοχείο μπορεί να περιγραφεί αν γνωρίζουμε τον όγκο του, τη θερμοκρασία του και την πίεσή του. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται **θερμοδυναμικές μεταβλητές.**

Ο όγκος, η πίεση και η θερμοκρασία ορισμένης ποσότητας αερίου σχετίζονται μεταξύ τους με την καταστατική εξίσωση. Για να περιγράψουμε την κατάσταση συγκεκριμένης ποσότητας αερίου αρκούν δύο από αυτά αφού το τρίτο προκύπτει

από την καταστατική εξίσωση. **Οι δύο ποσότητες που είναι ικανές για την περιγραφή της κατάστασης ορισμένης ποσότητας αερίου αποτελούν τις ανεξάρτητες θερμοδυναμικές μεταβλητές του συστήματος.**

Όταν σ' ένα θερμοδυναμικό σύστημα οι θερμοδυναμικές μεταβλητές που το περιγράφουν διατηρούνται σταθερές με το χρόνο, το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση **θερμοδυναμικής ισορροπίας**. Σε αντίθετη περίπτωση το σύστημα μεταβάλλεται.

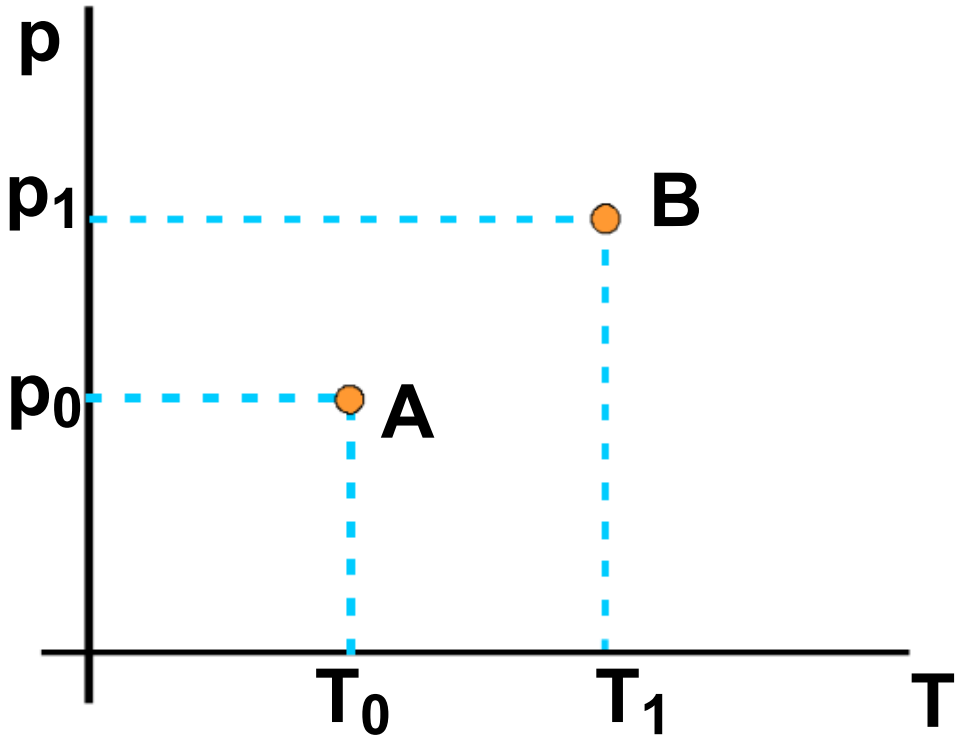
Ειδικότερα, λέμε ότι

μια ποσότητα αερίου βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας - ή απλά ισορροπίας - όταν η πίεση (p), η πυκνότητα (ρ) και η θερμοκρασία του (T) έχουν την

ίδια τιμή σε όλη την έκταση του αερίου.

(α) (β) (γ)

Σχ. 4.1 (α) Το αέριο βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. (β) Το αέριο δε βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Η θερμοκρασία, η πίεση και η πυκνότητα δεν έχουν την ίδια τιμή σε όλη του την έκταση. (γ) Το αέριο βρίσκεται σε νέα κατάσταση ισορροπίας



Σχ. 4.2 Η αρχική κατάστασή του αερίου του σχήματος 4.1 παριστάνεται με ένα σημείο το Α και η τελική κατάστασή του, που είναι κατάσταση ισορροπίας, με το σημείο Β.

Η κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας ενός αερίου μπορεί να παρασταθεί γραφικά με ένα σημείο σε σύστημα συντεταγμένων με άξονες δύο ανεξάρτητες θερμοδυναμικές μεταβλητές του συστήματος. Αν το σύστημα δε βρίσκεται σε ισορροπία η κατάστασή του δε μπορεί να

αποδοθεί γραφικά αφού δε μπορούμε να μιλήσουμε για πίεση ή θερμοκρασία του συστήματος. Η πίεση και η θερμοκρασία έχουν διαφορετικές τιμές στα διάφορα σημεία του αερίου.
Η κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας ενός συστήματος μπορεί να παρασταθεί γραφικά με ένα σημείο. Ένα σύστημα που δε βρίσκεται σε ισορροπία δεν παριστάνεται γραφικά.

4-4 ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ

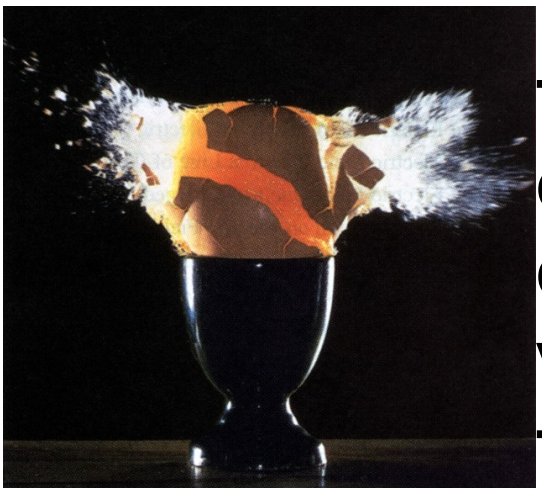
Όταν σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα πραγματοποιείται μια μεταβολή αλλάζουν τόσο το σύστημα όσο και το περιβάλλον του συστήματος.

Αντιστρεπτή ονομάζεται εκείνη η μεταβολή κατά την οποία υπάρχει η δυνατότητα επαναφοράς του

συστήματος και του περιβάλλοντος στην αρχική τους κατάσταση.

Οι μεταβολές στη φύση δεν είναι αντιστρεπτές. Η αντίστροφη πορεία ενός φαινομένου είναι αυτό που θα βλέπαμε εάν κινηματογραφούσαμε το φαινόμενο και παίζαμε την ταινία ανάποδα -προς τα πίσω. Εάν κινηματογραφούσαμε ένα κερί που καίγεται θα ήταν αποδεκτή η αντίστροφη πορεία, δηλαδή ένα κερί που το μήκος του αυξάνεται; Η αντίστροφη πορεία στην ανάπτυξη ενός φυτού θα ήταν το φυτό να μικραίνει μέχρι να ξαναγίνει σπόρος. Είμαστε τόσο εξοικειωμένοι με τη μη αντιστρεπτότητα των μεταβολών στη φύση ώστε η αντίστροφη πορεία ενός φαινομένου φαίνεται να

παραβιάζει την κοινή λογική.



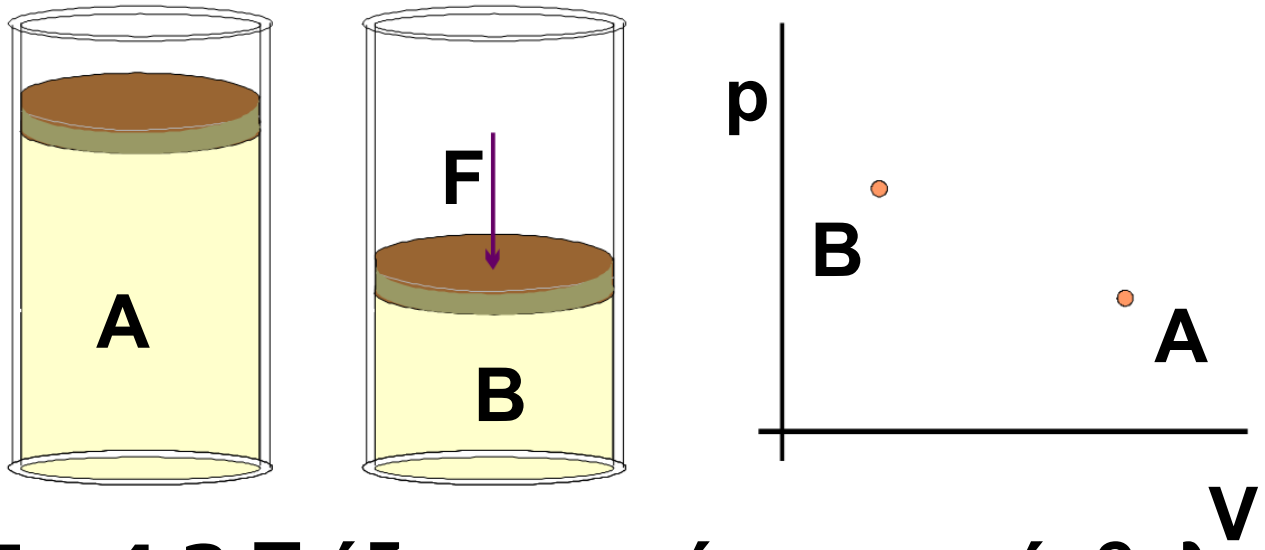
Εικ. 4.2 Για το αβγό της φωτογραφίας δεν υπάρχει καμιά δυνατότητα να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση.

Όμως, **η έννοια της αντιστρεπτής μεταβολής είναι χρήσιμη**. Έστω λοιπόν, ένα αέριο που βρίσκεται μέσα σε κύλινδρο. Ο κύλινδρος κλείνεται στο πάνω μέρος του με εφαρμοστό έμβολο. Το αέριο μέσα στο δοχείο βρίσκεται σε ισορροπία. Η θερμοκρασία του είναι T_A, ο όγκος που καταλαμβάνει V_A και η πίεση που ασκεί p_A. Θα μεταβάλουμε την κατάσταση του αερίου ώστε ο όγκος του να μειωθεί σε V_B και η πίεση και

η θερμοκρασία να πάρουν τελικά τις τιμές p_B και T_B.

Από τους πολλούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί η μεταβολή επιλέγουμε δυο ακραίες περιπτώσεις:

Στην **πρώτη** πιέζουμε απότομα το έμβολο ώστε ο όγκος του αερίου να μειωθεί στην επιθυμητή τιμή και περιμένουμε μέχρι να αποκατασταθεί ισορροπία στο αέριο. Στη διάρκεια της μεταβολής αυτής το αέριο βρίσκεται σε αναταραχή, η πίεση και η θερμοκρασία του δεν είναι ίδιες σε όλη την έκτασή του και επομένως δε μπορούμε να παραστήσουμε τη μεταβολή σε διάγραμμα. Σε διάγραμμα μπορεί να παρασταθεί μόνο η αρχική και η τελική κατάσταση του αερίου, που είναι καταστάσεις ισορροπίας.



Σχ. 4.3 Πιέζουμε απότομα το έμβολο ώστε το αέριο να μεταβεί στην κατάσταση Β. Η μεταβολή δεν είναι αντιστρεπτή. Στο διάγραμμα μπορεί να παρασταθεί μόνο η αρχική και η τελική κατάσταση του αερίου.

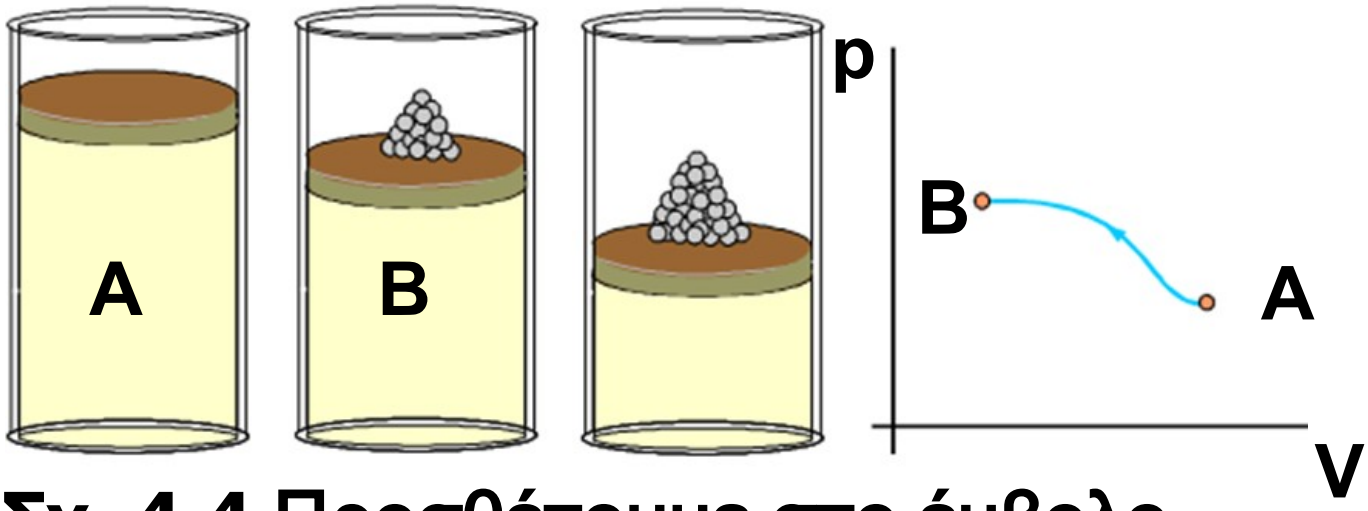
Στη **δεύτερη** περίπτωση ρίχνουμε πρώτα λίγους κόκκους άμμου πάνω στο έμβολο. Αυτό θα μειώσει ελάχιστα τον όγκο του αερίου. Περιμένουμε λίγο ώστε να ισορροπήσει το αέριο. Η νέα κατάσταση ισορροπίας βρίσκεται πολύ κοντά στη αρχική. Αν απεικονίζαμε γραφικά τη νέα κατάσταση ισορροπίας θα προ-

έκυπτε ένα σημείο πολύ κοντά στο σημείο που απεικονίζει την αρχική κατάσταση ισορροπίας. Στη συνέχεια ρίχνουμε πάλι λίγους κόκκους άμμου πάνω στο έμβολο, μειώνοντας ακόμα λίγο τον όγκο, περιμένουμε πάλι να αποκατασταθεί κατάσταση ισορροπίας, κ.ο.κ. Επαναλαμβάνοντας συνεχώς αυτή τη διαδικασία φέρνουμε το σύστημα στην τελική κατάσταση.

Κατά τη διάρκεια αυτής της μεταβολής το σύστημα περνάει από διαδοχικές καταστάσεις που μπορούμε να τις θεωρήσουμε καταστάσεις ισορροπίας.

Κάθε μια από αυτές μπορεί να παρασταθεί γραφικά με ένα σημείο. Εφόσον η μια κατάσταση ισορροπίας διαδέχεται την άλλη, τα σημεία στο διάγραμμα θα βρίσκονται το

ένα δίπλα στο άλλο με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια γραμμή που ξεκινάει από την αρχική κατάσταση και οδηγεί στην τελική. Με αντίστροφους χειρισμούς, αφαιρώντας δηλαδή άμμο από το έμβολο, το σύστημα θα οδηγηθεί πάλι στην αρχική του κατάσταση.



Σχ. 4.4 Προσθέτουμε στο έμβολο αργά κόκκους άμμου μέχρι το αέριο να φτάσει στην τελική κατάσταση Β. Το αέριο μεταβαίνει από την κατάσταση Α στη Β μέσω διαδοχικών καταστάσεων που μπορούν να θεωρηθούν καταστάσεις ισορροπίας. Η μεταβολή αυτή είναι αντιστρεπτή και

παριστάνεται με μια γραμμή που οδηγεί από την αρχική στην τελική κατάσταση.

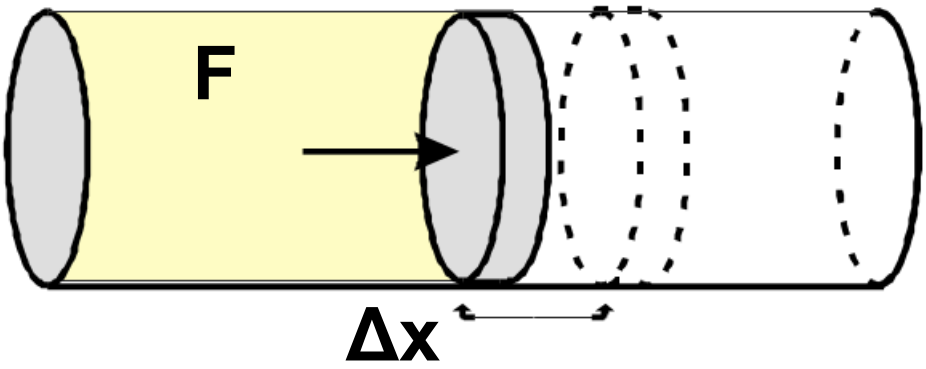
Η μεταβολή που περιγράψαμε απότελεί μια εξιδανίκευση, δεν είναι δυνατόν ένα σύστημα να βρίσκεται διαρκώς σε ισορροπία και ταυτόχρονα σιγά - σιγά να μεταβάλλεται.

Μια τέτοια εξιδανικευμένη μεταβολή κατά την οποία ένα σύστημα μεταβαίνει από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική μέσω διαδοχικών καταστάσεων ισορροπίας θα την ονομάζουμε αντιστρεπτή. Μια τέτοια μεταβολή είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και αντίστροφα.

Μια αντιστρεπτή μεταβολή παριστάνεται γραφικά με μια συνεχή γραμμή. Οι μη αντιστρεπτές

μεταβολές δε μπορούν να παρασταθούν γραφικά.

4-5 ΕΡΓΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΑΠΟ ΑΕΡΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΟΓΚΟΥ



Σχ. 4.5 Το αέριο εκτονώνεται και το έμβολο μετατοπίζεται κατά Δx. Η δύναμη F που ασκεί το αέριο στο έμβολο παράγει έργο ΔW.

Έστω ένα αέριο σε κύλινδρο που κλείνεται από εφαρμοστό έμβολο. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι ατμομηχανές, οι συμπιεστές στα ψυγεία και τα κλιματιστικά μηχανήματα χρησιμοποιούν κάποια παραλλαγή τέτοιου συστήματος.

Καθώς τα μόρια του αερίου μέσα στον κύλινδρο συγκρούονται με τα τοιχώματα του κυλίνδρου ασκούν δυνάμεις σ΄ αυτά. Έστω F η ολική δύναμη που ασκεί το αέριο στο έμβολο. Αν το έμβολο μετακινηθεί προς τα έξω κατά την πολύ μικρή απόσταση Δx, το έργο που παράγει η δύναμη που ασκεί το αέριο είναι:

$$\Delta W = F\,\Delta x \qquad (4.1)$$

Αν το εμβαδόν του εμβόλου είναι A και η πίεση του αερίου p, ισχύει

$$p = \frac{F}{A} \quad \text{ή} \quad F = p\,A$$

και η σχέση (2.1) γίνεται

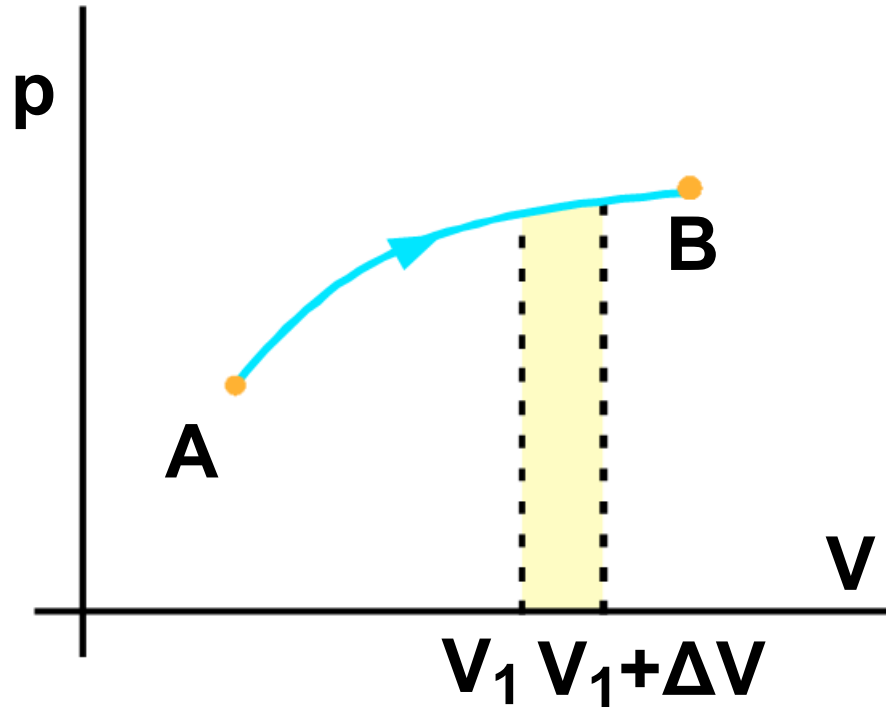
$$\Delta W = p\,A\,\Delta x \qquad (4.2)$$

Όμως $A\,\Delta x = \Delta V$
όπου ΔV η πολύ μικρή μεταβολή του όγκου του αερίου. Έτσι μπο-

ρούμε να εκφράσουμε το έργο που παράγει το αέριο

$$\Delta W = p\,\Delta V \qquad (4.3)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (4.3) το έργο είναι θετικό αν το αέριο εκτονώνεται (αυξάνει ο όγκος του) **και αρνητικό αν το αέριο συμπιέζεται. Προσοχή**: στο έμβολο μπορεί να ασκούνται και πολλές άλλες δυνάμεις. Η σχέση (4.3) δίνει το έργο της δύναμης που ασκεί το αέριο.



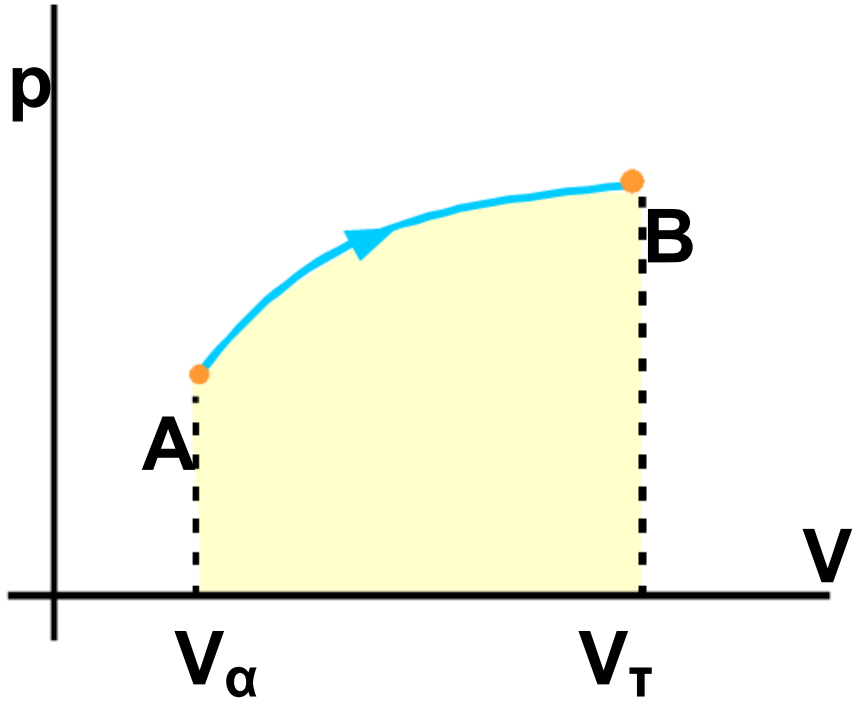
Σχ. 4.6 Σε μια τυχαία αντιστρεπτή μεταβολή το έργο κατά την εκτόνω-

ση του αερίου από όγκο V_1 σε όγκο $V_1+\Delta V$ είναι ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας με το κίτρινο χρώμα.

Έστω τώρα μια τυχαία αντιστρεπτή μεταβολή κατά την οποία το αέριο μεταβαίνει από την αρχική κατάσταση Α στην τελική κατάσταση Β (σχ.4.6). Αν η βάση (ΔV) της επιφάνειας με το κίτρινο χρώμα στο σχήμα 4.6 είναι πολύ μικρή, η επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί παραλληλόγραμμο. Το εμβαδόν της, που ισούται με το γινόμενο βάση $\times$ ύψος $= \Delta V \cdot p = \Delta W$, δίνει το έργο του αερίου κατά την εκτόνωσή του, από όγκο V_1 σε όγκο $V_1+\Delta V$.

Αν χωρίσουμε την επιφάνεια κάτω από τη γραμμή του διαγράμματος σε στοιχειώδεις τέτοιες επιφάνειες και αθροίσουμε τα εμβαδά θα πάρουμε το έργο του αερίου κατά την

μεταβολή του από την κατάσταση Α στην κατάσταση Β (σχ. 4.7).



Σχ. 4.7 Σε μια τυχαία αντιστρεπτή μεταβολή το έργο του αερίου κατά τη μεταβολή του από το Α στο Β είναι ίσο με το εμβαδόν κάτω από την γραμμή του διαγράμματος.

Το έργο ενός αερίου σε μια αντιστρεπτή μεταβολή είναι αριθμητικά ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας από την γραμμή του διαγράμματος μέχρι τον άξονα V, στο διάγραμμα p-V.

4-6 ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Αν έρθουν σε επαφή δύο σώματα με διαφορετικές θερμοκρασίες T_1 και T_2 ($T_1 > T_2$), μετά από κάποιο χρόνο θα αποκτήσουν ίδια θερμοκρασία Τ, μεταξύ των θερμοκρασιών T_1 και T_2 ($T_1 > T > T_2$). Φαίνεται σαν κάτι να μεταφέρεται από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα. Αυτό που μεταφέρεται είναι ενέργεια.

Η ενέργεια που μεταφέρεται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας δύο σωμάτων ονομάζεται θερμότητα και συμβολίζεται με Q.

Η θερμότητα, ως μορφή ενέργειας, στο SI μετριέται σε Joule. Πιο συνηθισμένη μονάδα της είναι η θερμίδα (cal από το calorie). 1 cal=4,186 J.

Προσοχή: Η θερμότητα δεν πρέπει να συγχέεται με τη θερμοκρασία. Η θερμότητα είναι ενέργεια ενώ η θερμοκρασία είναι το μέγεθος που επινοήσαμε για να μετράμε αντικειμενικά πόσο ζεστό ή κρύο είναι ένα σώμα.

4-7 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ένα αέριο σε υψηλή πίεση έχει τη δυνατότητα να παράγει έργο, επομένως το αέριο εμπεριέχει ενέργεια. Την ενέργεια αυτή θα την ονομάσουμε εσωτερική ενέργεια (συμβολίζεται με U), για να τη διακρίνουμε από οποιαδήποτε εξωτερική ενέργεια μπορεί να έχει το αέριο (π.χ. το αέριο μπορεί να έχει και κινητική ενέργεια λόγω μεταφορικής κίνησης που εκτελεί το δοχείο μέσα στο οποίο βρίσκεται).

Από μικροσκοπική άποψη, η ενέργεια που εμπεριέχει ένα σύστημα

οφείλεται στην ενέργεια που έχουν τα σωματίδια που το απαρτίζουν. Τα μόρια, τα άτομα ή τα ιόντα οποιουδήποτε σώματος, σε όποια φάση και αν βρίσκεται (στερεή, υγρή ή αέρια) διαρκώς κινούνται. Έχουν επομένως κινητική ενέργεια. Επιπλέον, στα στερεά και στα υγρά τα σωματίδια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, επομένως έχουν και δυναμική ενέργεια.

Κάθε σώμα εμπεριέχει ενέργεια, που είναι το άθροισμα των ενεργειών των σωματιδίων που το απαρτίζουν, ως αποτέλεσμα της σχετικής τους κίνησης ως προς το κέντρο μάζας του σώματος και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Αυτή την ενέργεια την ονομάζουμε εσωτερική ενέργεια.

Η εσωτερική ενέργεια ιδανικού αερίου

Τα μόρια του ιδανικού αερίου δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, επομένως δεν έχουν δυναμική ενέργεια. Η εσωτερική ενέργεια ενός ιδανικού αερίου οφείλεται στις κινητικές ενέργειες που έχουν τα μόριά του και είναι ίση με το άθροισμα αυτών των ενεργειών.

Η εσωτερική ενέργεια ενός ιδανικού αερίου είναι δυνατό να υπολογιστεί.

Η μέση κινητική ενέργεια ενός μορίου ιδανικού αερίου υπολογίστηκε στην παράγραφο 1-5 και βρέθηκε $\frac{1}{2}m\overline{u^2}=\frac{3}{2}kT$.

Αν το αέριο περιέχει N μόρια, η εσωτερική του ενέργεια θα είναι

$$U=N\frac{1}{2}m\overline{\upsilon^2}=N\frac{3}{2}kT \qquad (4.4)$$

Αλλά $N=nN_A$ όπου n ο αριθμός των mol του αερίου. Επομένως

$U=nN_A\frac{3}{2}kT$ και, αν λάβουμε υπόψη ότι $N_A k=R$, τελικά

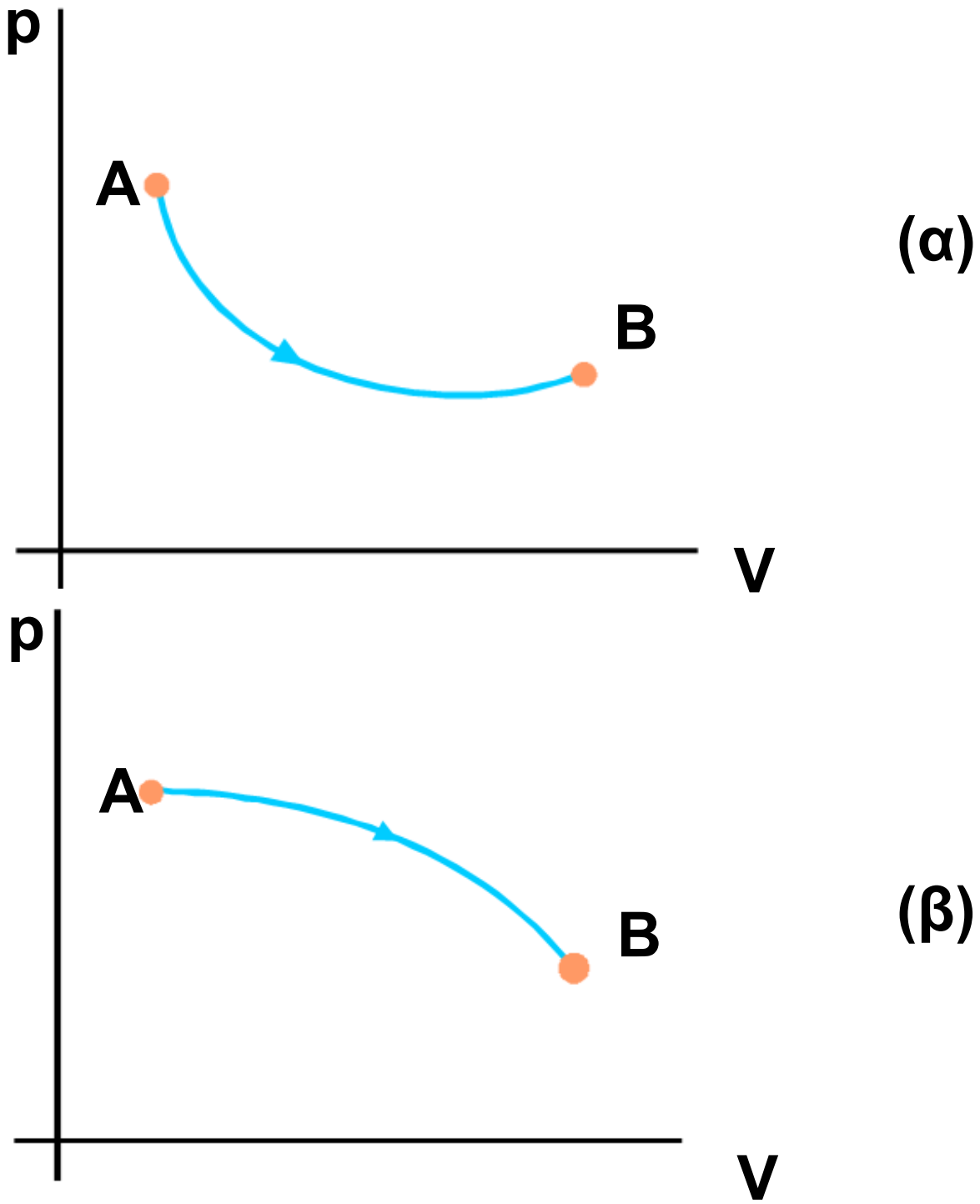
$$U=\frac{3}{2}nRT \qquad (4.5)$$

Η (4.5) δείχνει ότι **η εσωτερική ενέργεια ορισμένης ποσότητας ιδανικού αερίου εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του.**

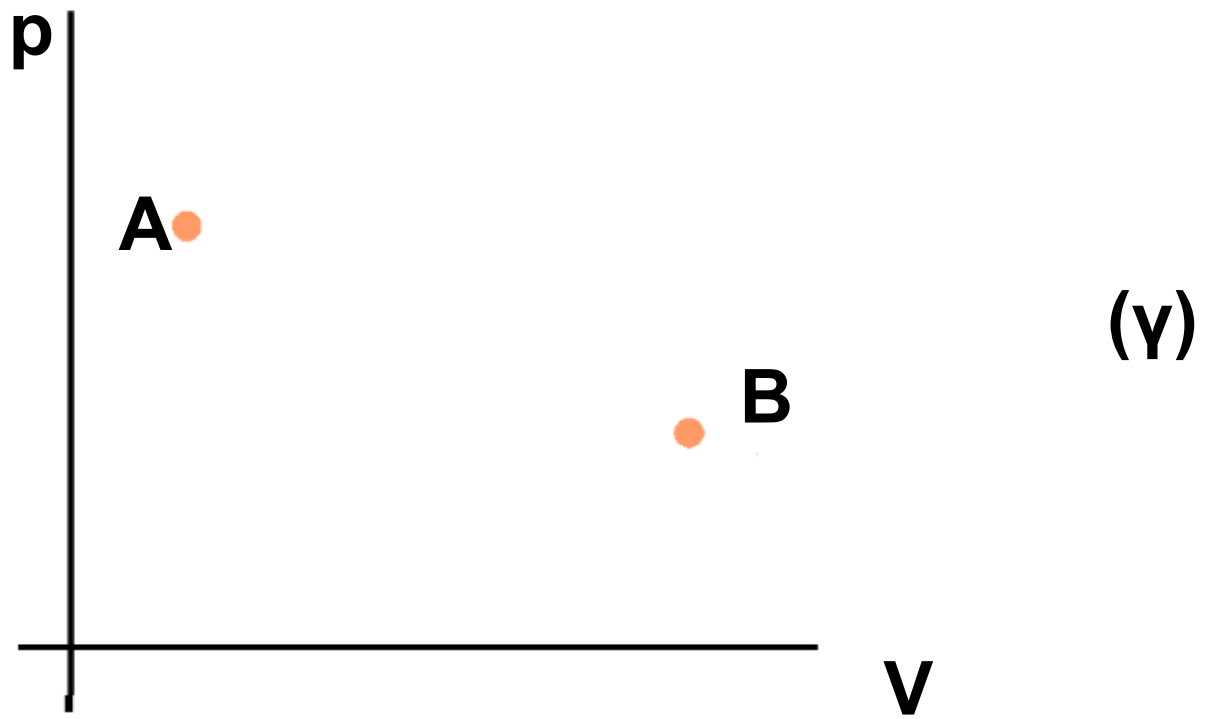
΄Εστω ένα ιδανικό αέριο που βρίσκεται αρχικά σε ισορροπία στην κατάσταση Α. Αν το αέριο μεταβεί σε μια άλλη κατάσταση ισορροπίας Β, η εσωτερική του ενέργεια θα μεταβληθεί. Σύμφωνα με τη σχέση (4.5) η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας

του αερίου εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική θερμοκρασία και όχι από τον τρόπο που πραγματοποιήθηκε η μεταβολή. Γενικότερα η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια ενός θερμοδυναμικού συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και την τελική κατάσταση του συστήματος.

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ενός θερμοδυναμικού συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και την τελική κατάσταση του συστήματος και όχι από τον τρόπο που πραγματοποιήθηκε η μεταβολή.



Σχ. 4.8 Στα (α) και (β) ένα αέριο σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση Α στη Β με, διαφορετικό κάθε φορά, αντιστρεπτό τρόπο.



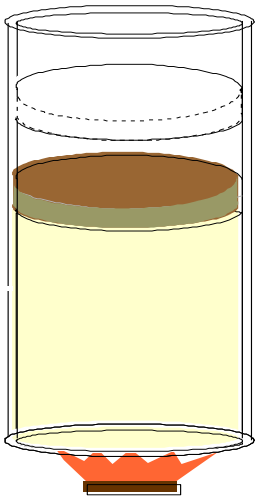
Στο (γ) το ίδιο σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση Α στη Β με μη αντιστρεπτό τρόπο. Η μεταβολή δεν μπορεί να παρασταθεί γραφικά. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις.

4-8 ΠΡΩΤΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Ένα αέριο μεταβαίνει από μια αρχική κατάσταση σε μια άλλη. Έστω ότι κατά τη διάρκεια αυτής της μεταβολής το αέριο απορρόφησε ποσό

θερμότητας Q και ότι το έργο που παράγει το αέριο κατά τη μεταβολή αυτή είναι W.

Η θερμότητα που προσφέρθηκε στο αέριο μετασχηματίζεται σε ενέργεια άλλης μορφής. Συγκεκριμένα, ένα μέρος της μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την εσωτερική ενέργεια του αερίου και το υπόλοιπο μετατρέπεται σε μηχανικό έργο.



Σχ. 4.9 Ποσότητα αέριου θερμαίνεται. Το αέριο κατά την διάρκεια της μεταβολής του παράγει έργο.

Το ποσό της θερμότητας που προσφέρεται στο αέριο, η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου και

το έργο που παράγει το αέριο συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση

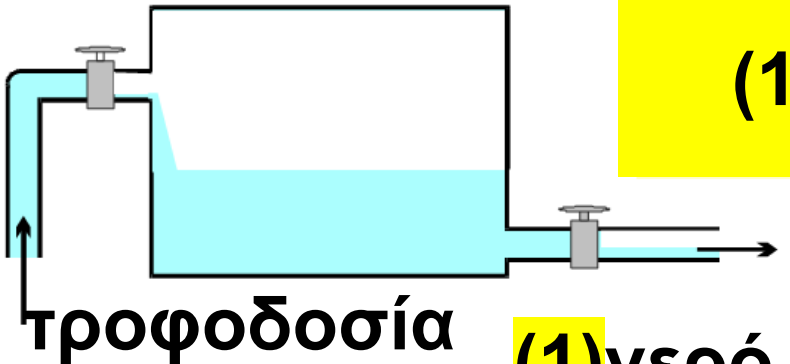
$$Q=\Delta U+W \qquad (4.6)$$

Η σχέση (4.6) αποτελεί **τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο.**

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

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος είναι η εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας στη θερμοδυναμική.

Το παράδειγμα που ακολουθεί αποτελεί ένα μηχανικό ισοδύναμο του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου.



(1) = (2) + (3)

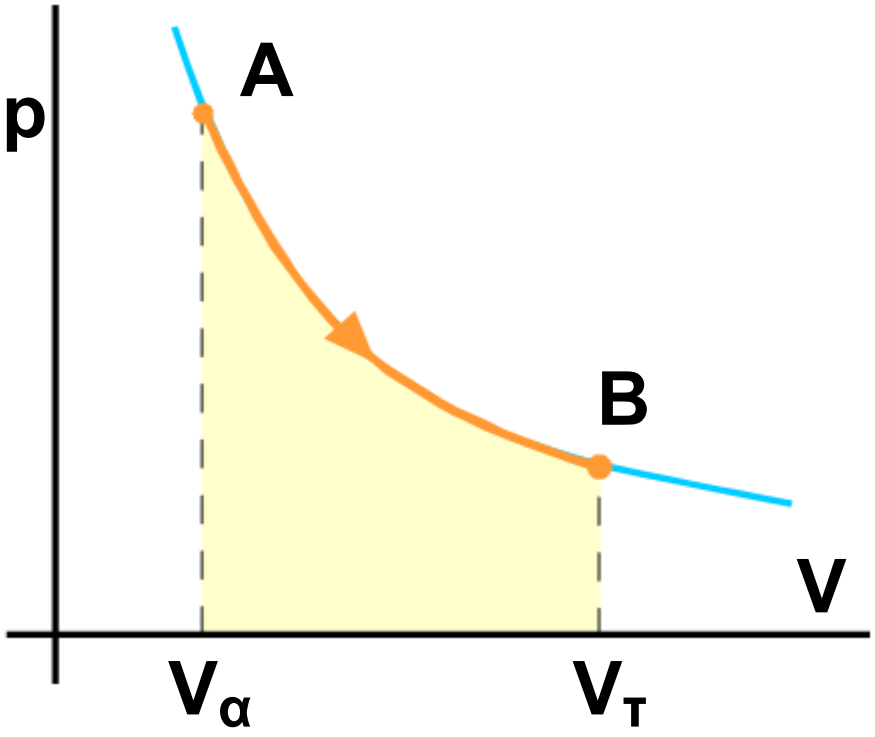
(1)νερό που μπαίνει στη δεξαμενή
(2)μεταβολή στην ποσότητα νερού της δεξαμενής
(3)νερό που έφυγε προς το δίκτυο

Σχ. 4.10 Η δεξαμενή τροφοδοτείται από κάποια πηγή και δίνει νερό σε δίκτυο, μέσω αγωγού. Η δεξαμενή παίζει το ρόλο του θερμοδυναμικού συστήματος. Το νερό μέσα στη δεξαμενή αντιστοιχεί στην εσωτερική ενέργεια, το νερό που εισέρχεται στη θερμότητα και το νερό που εξέρχεται στο μηχανικό έργο.

Αν το σύστημα απορροφά θερμότητα, το Q στην σχέση (4.6) είναι θετικό, αν αποβάλλει θερμότητα είναι αρνητικό. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας είναι θετική όταν αυξάνει η θερμοκρασία του συστήματος και αρνητική όταν μειώνεται. Το έργο του αερίου είναι θετικό όταν το αέριο εκτονώνεται και αρνητικό όταν συμπιέζεται.

4-9 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΝΟΜΟΥ ΣΕ ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ

Α) Ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή



Σχ.4.11 Το διάγραμμα παριστάνει την ισόθερμη εκτόνωση ενός αερίου από την αρχική κατάσταση Α στην τελική κατάσταση Β.

Έστω μια ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή ορισμένης ποσότητας

αερίου από την αρχική κατάσταση Α, όγκου $V_α$, στην τελική κατάσταση Β, όγκου $V_τ$.

Η μεταβολή γίνεται σε σταθερή θερμοκρασία Τ. Το σχήμα 4.11 παριστάνει γραφικά τη μεταβολή.

Το εμβαδόν κάτω από την γραμμή του διαγράμματος είναι ίσο με το έργο που παράγει το αέριο. Από τον υπολογισμό του εμβαδού, που δεν είναι δυνατόν να γίνει χωρίς τη χρήση ολοκληρωμάτων, προκύπτει ότι

$$W=nRT\ln\frac{V_τ}{V_α}$$

Επειδή η θερμοκρασία του αερίου δε μεταβάλλεται, $U_A=U_B$ επομένως $\Delta U=0$, οπότε ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος, στην ισόθερμη μετα-

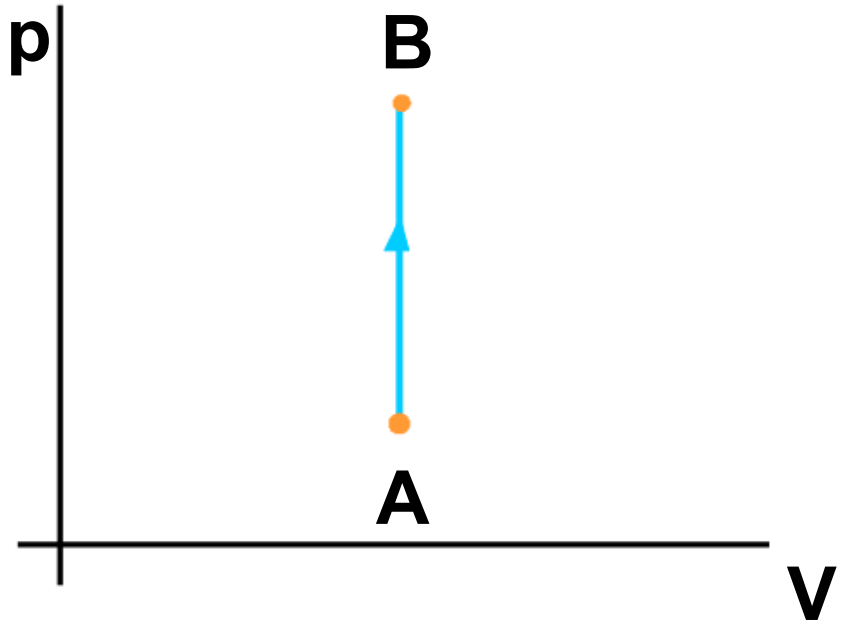
βολή, παίρνει τη μορφή

$$Q=W \quad \text{ή} \quad Q=nRT\ln\frac{V_T}{V_\alpha}$$

Στην ισόθερμη εκτόνωση όλο το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο μετατρέπεται σε μηχανικό έργο.

Β) Ισόχωρη αντιστρεπτή μεταβολή

Έστω η ισόχωρη αντιστρεπτή μεταβολή μιας ποσότητας αερίου, από την κατάσταση Α στην κατάσταση Β. Το αέριο θερμαίνεται με σταθερό όγκο και η θερμοκρασία του αυξάνεται. Το σχήμα 4.12 παριστάνει γραφικά τη μεταβολή.



Σχ. 4.12 Η ισόχωρη μεταβολή ενός αερίου από την κατάσταση Α στην κατάσταση Β.

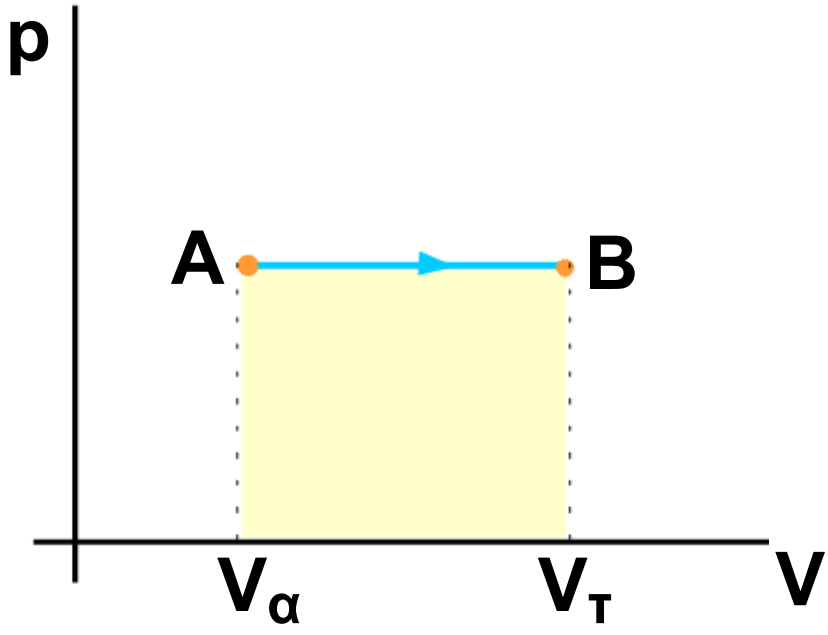
Από το σχήμα φαίνεται ότι το έργο του αερίου είναι μηδέν. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί έργο έχουμε μόνο όταν ο όγκος του αερίου μεταβάλλεται.

Έτσι από τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο προκύπτει

$$Q=\Delta U$$

Στην ισόχωρη θέρμανση όλο το ποσό θερμότητας που απορρόφησε το αέριο χρησιμοποιήθηκε για την αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας.

Γ) Ισοβαρής αντιστρεπτή μεταβολή



Σχ. 4.13 Η ισόβαρής μεταβολή ενός αερίου από την κατάσταση Α στην κατάσταση Β.

Ένα αέριο θερμαίνεται ισοβαρώς από την αρχική κατάσταση Α,

όγκου $V_α$, στην τελική κατάσταση Β, όγκου $V_τ$. Το σχήμα 2.13 παριστάνει γραφικά τη μεταβολή. Το εμβαδόν κάτω από την γραμμή του διαγράμματος δίνει το έργο του αερίου.

$$W=p\left(V_T-V_α\right) \quad \text{ή} \quad W=nR\left(T_T-T_a\right)$$

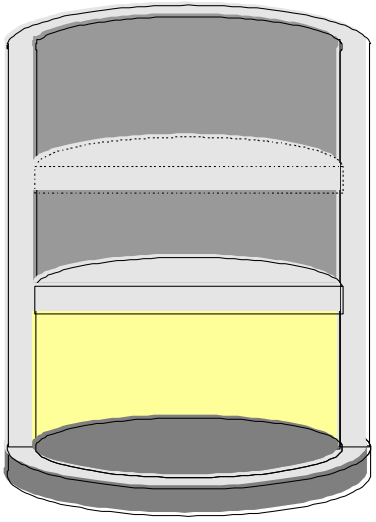
Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος παίρνει τη μορφή

$$Q=\Delta U+p\left(V_T-V_α\right)$$

Στην ισοβαρή θέρμανση ένα μέρος από το ποσό θερμότητας που απορρόφησε το αέριο από το περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε για την αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας και το υπόλοιπο αποδόθηκε εκ νέου στο περιβάλλον με τη μορφή έργου.

Δ) Αδιαβατική μεταβολή

Αδιαβατική ονομάζουμε τη μεταβολή κατά την οποία δε συντελείται μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον προς το σύστημα ή αντίστροφα.



Σχ. 4.14 Τα τοιχώματα του δοχείου καθώς και το έμβολο είναι από μονωτικό υλικό. Στη διάρκεια της μεταβολής το αέριο δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον.

Έστω ένα αέριο που εκτονώνεται με αντιστρεπτό τρόπο μέσα σε δο-

χείο με έμβολο από την κατάσταση Α ($p_α$, $V_α$) στην κατάσταση Β ($p_τ$, $V_τ$) (σχ. 4.14). Το δοχείο και το έμβολο είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να μην επιτρέπουν την ανταλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο αέριο και στο περιβάλλον (ένα τέτοιο δοχείο είναι το θερμός που χρησιμοποιούμε στα σπίτια μας). Η μεταβολή αυτή είναι μια αντιστρεπτή αδιαβατική μεταβολή.

Ο νόμος που διέπει τη μεταβολή είναι

$$pV^{\gamma}=\sigma\tau\alpha\theta.$$

[Νόμος του Poisson (Πουασόν)]

όπου γ ένας καθαρός αριθμός, μεγαλύτερος της μονάδας, που εξαρτάται από την ατομικότητα του αερίου και από το είδος των

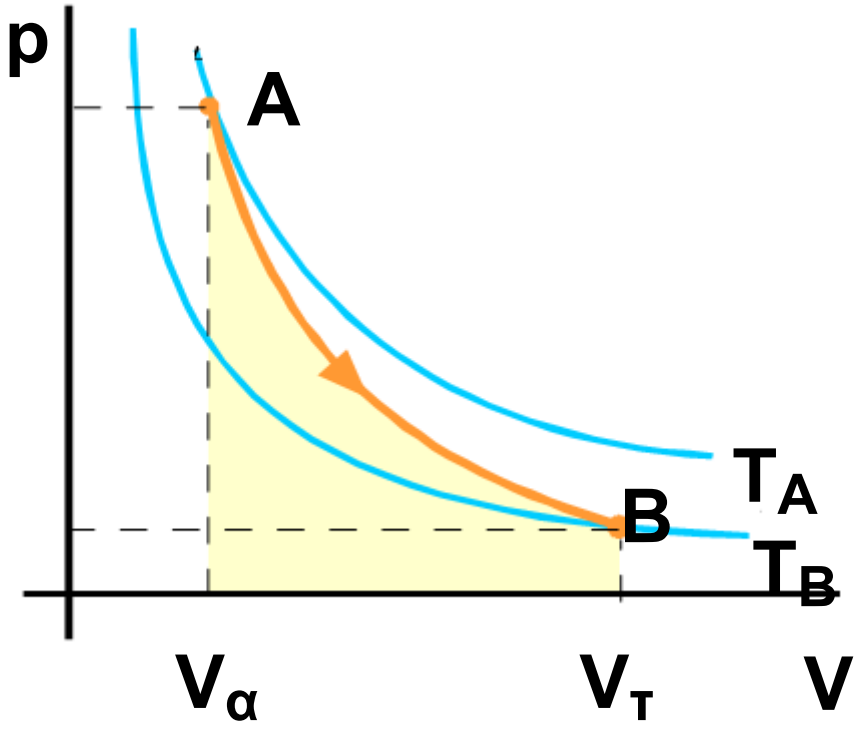
δεσμών που συγκρατούν τα άτομα στο μόριο. Για τον αριθμό αυτό θα μιλήσουμε στην επόμενη ενότητα.

Εφαρμόζοντας τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο και λαμβάνοντας υπόψη ότι Q=0 προκύπτει

$$0=\Delta U+W \quad \text{ή} \quad W=-\Delta U \qquad (4.7)$$

Στην αδιαβατική μεταβολή το έργο είναι ίσο με το αντίθετο της μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας.

Επειδή στη μεταβολή που περιγράψαμε το έργο είναι θετικό, από τη σχέση (4.7) προκύπτει ότι η εσωτερική ενέργεια μειώνεται, επομένως το αέριο ψύχεται.



Σχ. 4.15 Ένα αέριο εκτονώνεται αδιαβατικά από την αρχική κατάσταση Α στην τελική κατάσταση Β.

Το σχήμα 4.15 παριστάνει την αντιστρεπτή αδιαβατική μεταβολή που περιγράψαμε. Επειδή η τελική θερμοκρασία είναι μικρότερη από την αρχική, η καμπύλη της έχει μεγαλύτερη κλίση από την ισόθερμη που περνάει από το σημείο Α. Στην αδια-

βατική μεταβολή το έργο μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$W=\frac{p_T V_T - p_\alpha V_a}{1-\gamma}$$

Στην πράξη όταν ένα αέριο συμπιέζεται (ή εκτονώνεται) πολύ γρήγορα, πολύ μικρό ποσό θερμότητας μετακινείται από το αέριο προς το περιβάλλον ή αντίστροφα. Η διεργασία αυτή είναι σχεδόν αδιαβατική. Τέτοιες διεργασίες συμβαίνουν στον κύλινδρο του βενζινοκινητήρα.

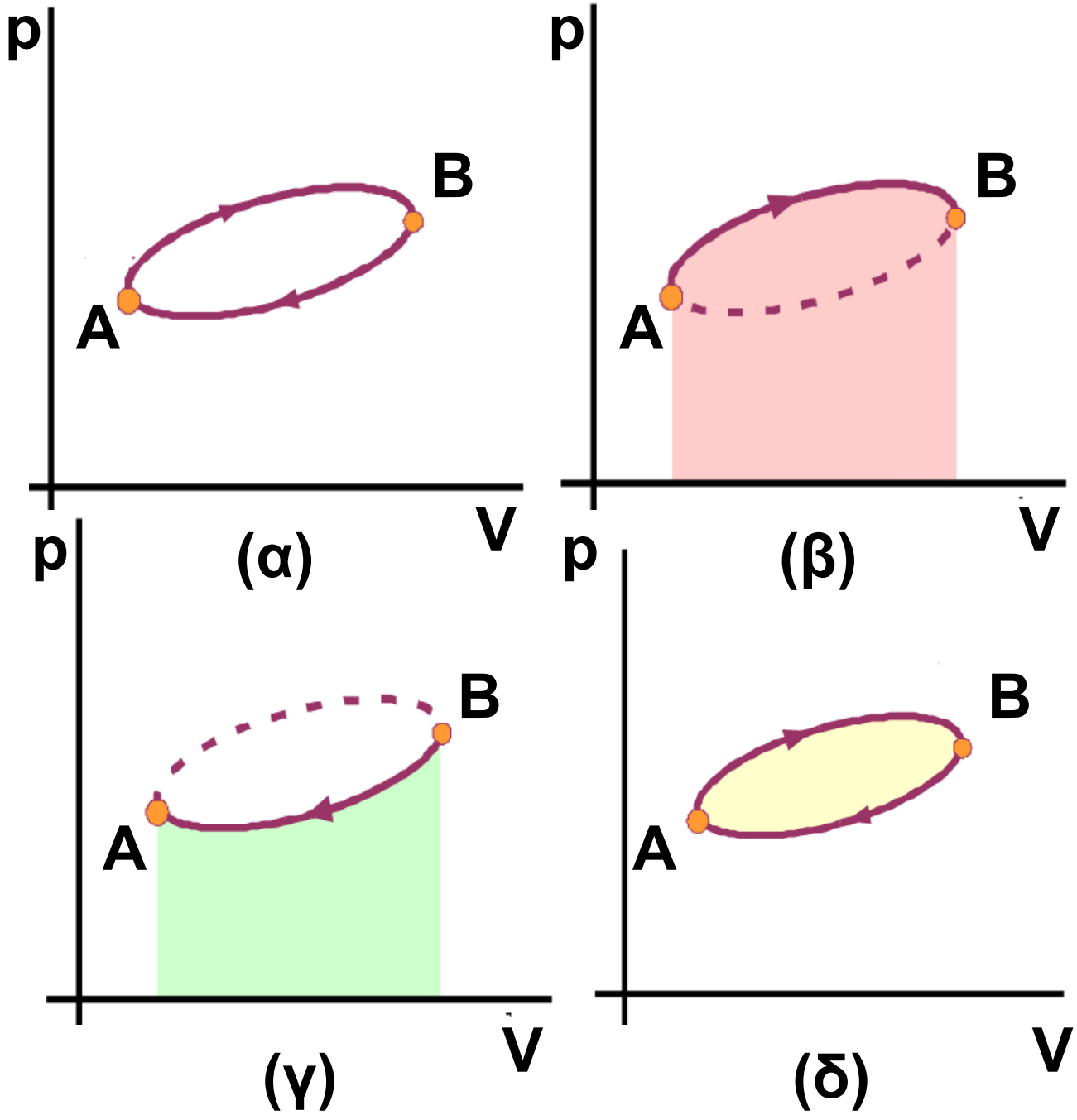
Ε) Κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή

Κυκλική ονομάζουμε μια μεταβολή στην οποία το σύστημα μετά από μια διεργασία επιστρέφει στην ίδια κατάσταση.

Το σχήμα 4.16 παριστάνει μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή ορισμένης ποσότητας αερίου. Το αέριο αρχικά βρισκόταν στην κατάσταση Α και μετά από μια διεργασία επιστρέφει πάλι στην αρχική κατάσταση Α.

Το έργο του αερίου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής: Το έργο του αερίου κατά τη μεταβολή από το Α στο Β είναι ίσο με το εμβαδόν του τμήματος που είναι σκιασμένο με κόκκινο και είναι θετικό, γιατί το αέριο εκτονώνεται. Το έργο, κατά τη μεταβολή από το Β στο Α, είναι ίσο με το εμβαδόν του τμήματος που είναι σκιασμένο με πράσινο και είναι αρνητικό γιατί το αέριο συμπιέζεται. Το έργο του αερίου σε ολόκληρη την κυκλική μεταβολή που είναι το αλγεβρικό άθροισμα

αυτών των έργων, είναι ίσο με το εμβαδόν που περικλείει η κλειστή γραμμή που περιγράφει τη μεταβολή.



Σχ. 4.16 Το σχήμα α παριστάνει γραφικά μια αντιστρεπτή κυκλική μεταβολή. Το εμβαδόν της χρωματισμένης επιφάνειας στο σχήμα β δίνει το έργο του αερίου κατά την μεταβολή Α→Β. Το έργο κατά τη μεταβολή Β→Α είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσο με το εμβαδόν της χρωματισμένης επιφάνειας στο σχήμα γ, η αλγεβρική του τιμή όμως είναι αρνητική. Το συνολικό έργο προκύπτει αν από το εμβαδόν του σχήματος β αφαιρέσουμε το εμβαδόν του σχήματος γ. Από την αφαίρεση αυτή προκύπτει το εμβαδόν που περικλείει η γραμμή του διαγράμματος (σχ. δ).

Το ολικό έργο σε μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή είναι ίσο με το εμβαδόν που περικλείεται

από τη γραμμή του διαγράμματος, στη γραφική παράσταση p-V.

Εάν η κυκλική μεταβολή διαγραφόταν κατά την αντίθετη φορά, για να υπολογίσουμε το έργο θα αφαιρούσαμε από το μικρό εμβαδόν το μεγάλο. Έτσι, το συνολικό έργο θα ήταν αρνητικό. Επομένως σε μια αντιστρεπτή κυκλική μεταβολή, 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.

Επειδή το αέριο επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, η μεταβολή στην εσωτερική του ενέργεια είναι μηδέν $\Delta U=0$.

Εφαρμόζοντας τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο στην κυκλική μεταβολή έχουμε

$$Q=W$$

Στην κυκλική μεταβολή η θερμότητα που απορροφά ή αποδίδει το αέριο ισούται με το έργο που παράγει ή δαπανά.

4-10 ΓΡΑΜΜΟΜΟΡΙΑΚΕΣ ΕΙΔΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΕΣ ΑΕΡΙΩΝ

Έχει βρεθεί πειραματικά ότι το ποσό θερμότητας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός σώματος μάζας m, κατά ΔΤ δίνεται από τη σχέση

$$Q=m\,c\,\Delta T \qquad (4.8)$$

όπου c είναι η ειδική θερμότητα του υλικού. Στα υγρά και στα στερεά η

ειδική θερμότητα του σώματος εξαρτάται μόνο από το υλικό του. Αν αντί για τη μάζα του σώματος χρησιμοποιήσουμε την ποσότητά του σε mol, επειδή m=n M, όπου M η γραμμομοριακή μάζα, μπορούμε να γράψουμε τη σχέση (4.8) με τη μορφή

$$Q=n\,M\,c\,\Delta T \qquad (4.9)$$

Το γινόμενο M c ονομάζεται **γραμμομοριακή ειδική θερμότητα** και συμβολίζεται με C. Αντικαθιστώντας το γινόμενο M c με το C η σχέση (4.9) γίνεται

$$Q=n\,C\,\Delta T$$

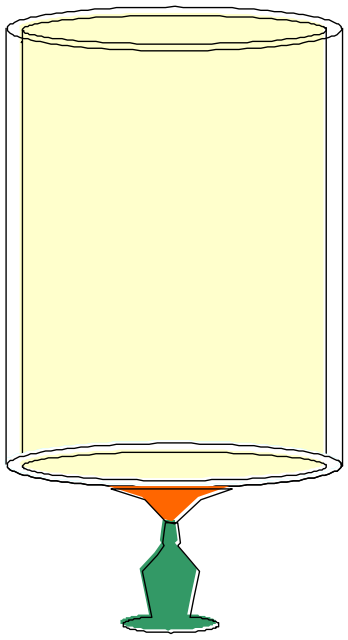
Η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα C, στο SI, μετριέται σε J/(mol K) και εκφράζει το ποσό θερμότη-

τας που πρέπει να προσφερθεί σε 1 mol του σώματος για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά ένα βαθμό.

Ενώ η ειδική θερμότητα στα υγρά και στα στερεά εξαρτάται μόνο από το υλικό, στα αέρια η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα εξαρτάται και από τον τρόπο με τον οποίο θερμαίνεται το αέριο.

Από όλους του δυνατούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να θερμανθεί ένα αέριο, και τις αντίστοιχες γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες που προκύπτουν, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν δύο, η θέρμανση με σταθερό όγκο και η θέρμανση με σταθερή πίεση.

Θέρμανση αερίου με σταθερό όγκο



Σχ. 4.17 Θέρμανση αερίου με σταθερό όγκο. Ο πυθμένας του δοχείου είναι διαθερμικός επιτρέπει δηλαδή τη με-ταφορά θερμότητας από την εστία θέρμανσης στο αέριο.

Το αέριο του σχήματος 4.17 βρίσκεται μέσα σε δοχείο σταθερού όγκου και θερμαίνεται ώστε η θερμοκρασία του να αυξηθεί κατά ΔΤ. Αν συμβολίσουμε με Q_V το ποσό θερμότη-

τας που απορροφά το αέριο και με C_V τη γραμμομοριακή ειδική θερμότητα κατά την ισόχωρη αυτή θέρμανση έχουμε

$$Q_V = nC_V\Delta T \qquad (4.10)$$

Αφού ο όγκος του αερίου δε μεταβάλλεται το έργο του αερίου είναι μηδέν. Εφαρμόζοντας τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο έχουμε

$$Q_V = \Delta U \qquad (4.11)$$

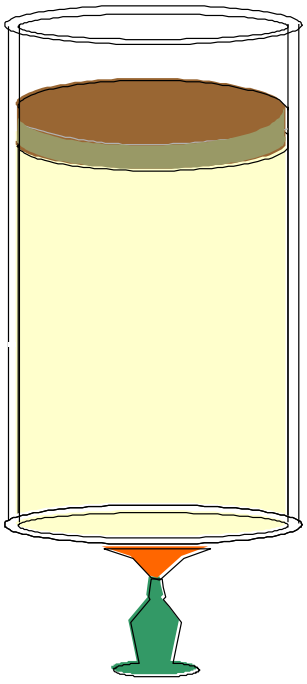
Η σχέση (4.11), λόγω της (4.10), γίνεται

$$\Delta U = n\, C_V\, \Delta T \qquad (4.12)$$

Πρέπει να τονιστεί ότι επειδή η εσωτερική ενέργεια ενός αερίου εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική θερμοκρασία του αερίου η σχέση (4.12) δίνει τη μεταβολή της

εσωτερικής ενέργειας σε κάθε περίπτωση που η θερμοκρασία ενός αερίου μεταβάλλεται κατά ΔΤ, με όποιον τρόπο και αν πραγματοποιείται αυτή η μεταβολή.

Θέρμανση αερίου με σταθερή πίεση



Σχ. 4.18 Θέρμανση αερίου με σταθερή πίεση.

Έστω ότι η ίδια ποσότητα αερίου θερμαίνεται ισοβαρώς (σχ. 4.18) ώστε η θερμοκρασία του να μετα-

βληθεί κατά το ίδιο ποσό ΔΤ. Αν συμβολίσουμε με Q_p και C_p τη θερμότητα και τη γραμμομοριακή ειδική θερμότητα του αερίου στην ισοβαρή θέρμανση, μπορούμε να γράψουμε

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

Το έργο που παράγει το αέριο είναι $W = p\, \Delta V$.

Από την καταστατική εξίσωση έχουμε $p\, \Delta V = n\, R\, \Delta T$, οπότε η σχέση που δίνει το έργο γίνεται

$$W = n\, R\, \Delta T \qquad (4.13)$$

Από τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο $Q = \Delta U + W$, αν λάβουμε υπόψη τις (4.12) και (4.13), προκύπτει

$$n\, C_p\, \Delta T = n\, C_V\, \Delta T + n\, R\, \Delta T$$

ή

$$C_p = C_V + R \qquad (4.14)$$

Η σχέση 4.14 δείχνει ότι η C_p είναι μεγαλύτερη από τη C_V κατά την ποσότητα R.

Υπολογισμός των C_p και C_V

Η εσωτερική ενέργεια ιδανικού αερίου δίνεται από τη σχέση $U=\frac{3}{2}n\,R\,T$. Όταν η θερμοκρασία του αερίου μεταβάλλεται κατά ΔT η εσωτερική του ενέργεια μεταβάλλεται κατά $\Delta U=\frac{3}{2}n\,R\,\Delta T$. Από τη σχέση (4.12) προκύπτει

$$n\,C_V\,\Delta T=\frac{3}{2}n\,R\,\Delta T$$

άρα

$$C_V = \frac{3}{2}R = 12{,}47 \text{ J/mol} \cdot K \qquad (4.15)$$

Για τη C_p ισχύει :

$$C_p = C_V + R = \frac{3}{2}R + R$$

οπότε $$C_p = \frac{5}{2}R = 20{,}78 \text{ J/mol} \cdot K \qquad (4.16)$$

Η ποσότητα γ που συναντήσαμε στο νόμο της αδιαβατικής μεταβολής είναι ο λόγος των δύο γραμμομοριακών ειδικών θερμοτήτων.

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

το γ είναι καθαρός αριθμός μεγαλύτερος της μονάδας και στα ιδανικά

αέρια σύμφωνα με τις σχέσεις (4.15) και (4.16) έχει την τιμή $\gamma=\frac{5}{3}$.

Για τα πραγματικά αέρια η τιμή του λόγου $\frac{C_p}{C_v}$ εξαρτάται από την ατομικότητά του και το είδος των δεσμών που συγκρατούν τα άτομα στο μόριο.

Ο πίνακας που ακολουθεί δίνει τις γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες ορισμένων αερίων όπως μετρήθηκαν πειραματικά.

Τύπος αερίου	Αέριο	C_V (J/mol·K)	C_p (J/mol·K)	C_p-C_V (J/mol·K)	$\gamma = C_p/C_V$
Μονοατομικό	He	12,47	20,78	8,31	1,67
	A	12,47	20,78	8,31	1,67
Διατομικό	H_2	20,42	28,74	8,32	1,41
	N_2	20,76	29,07	8,31	1,4
	O_2	20,85	29,17	8,31	1,4
	CO	20,85	29,16	8,31	1,4
Πολυατομικό	CO_2	28,46	36,94	8,48	1,3
	SO_2	31,39	40,37	8,98	1,29
	H_2S	34,6	34,6	8,65	1,33

Παρατηρούμε ότι η θεωρητική πρόβλεψη για τα C_V και C_p με βάση το ιδανικό αέριο, συμφωνεί απόλυτα με τα πειραματικά δεδομένα αν πρόκειται για μονοατομικό αέριο, ενώ αποκλίνει αισθητά για τα διατομικά και πολυατομικά αέρια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ τα μόρια των μονοατομικών αερίων προσεγγίζουν το μοντέλο του ιδανικού αερίου τα μόρια που αποτελούνται από περισσότερα άτομα εμφανίζουν δομή που δεν γίνεται να αγνοηθεί.

Πιο συγκεκριμένα, στο ιδανικό αέριο θεωρήσαμε τα μόρια υλικά σημεία, οπότε η μόνη δυνατότητα κίνησης είναι η μεταφορική κίνηση και υπολογίσαμε την εσωτερική του ενέργεια ως το άθροισμα των μεταφο-

ρικών κινητικών ενεργειών των μορίων του. Τα διατομικά μόρια, όπως τα μόρια του N_2 και του O_2 πρέπει να θεωρηθούν ότι αποτελούνται από δύο σωματίδια συνδεδεμένα μεταξύ τους. Εκτός από τη δυνατότητα που έχει ένα τέτοιο μόριο να κάνει μεταφορική κίνηση, τα σωματίδια που το αποτελούν έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους και, κάτω από ορισμένες συνθήκες (υψηλή θερμοκρασία), να ταλαντώνονται. Όλες αυτές οι κινήσεις συνεισφέρουν στην εσωτερική ενέργεια. Έτσι, αν θέλαμε να κάνουμε πιο ακριβείς υπολογισμούς όταν υπολογίζουμε την εσωτερική ενέργεια θα πρέπει για τέτοια αέρια

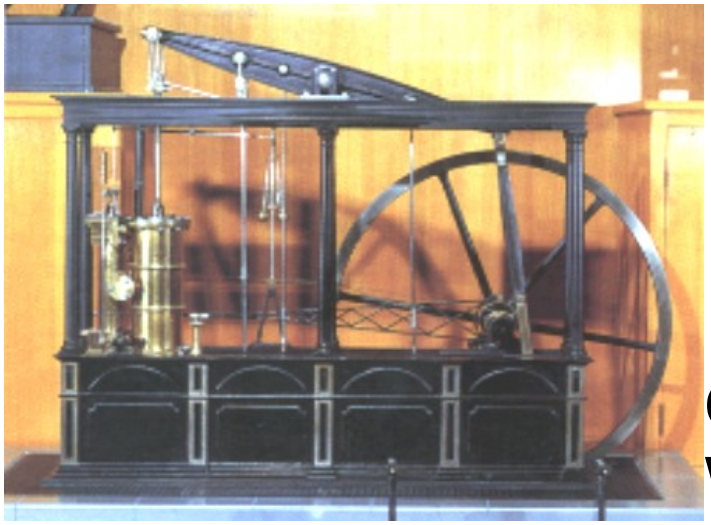
(διατομικά-τριατομικά) να λάβουμε υπόψη όλες τις κινήσεις.

Όμως, όπως φαίνεται στον πίνακα, ακόμα και σ΄ αυτές τις περιπτώσεις (διατομικά ή πολυατομικά μόρια) η διαφορά C_p-C_V συμφωνεί, με μεγάλη προσέγγιση, με τη σχέση 4.14.

4-11 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Θερμικές μηχανές ονομάζουμε τις διατάξεις που μετατρέπουν τη θερμότητα σε μηχανικό έργο.

Η ιστορία των μηχανών αυτών αρχίζει το 1712 όταν ο Thomas Newcomen (Τόμας Νιουκάμεν) επινόησε την πρώτη ατμομηχανή. Η ατμομηχανή του Newcomen ήταν αρκετά χοντροκομμένη και χρησιμοποιήθηκε για την άντληση νερού από τα ορυχεία.



Εικ. 4.3 Η ατμομηχανή του Watt.

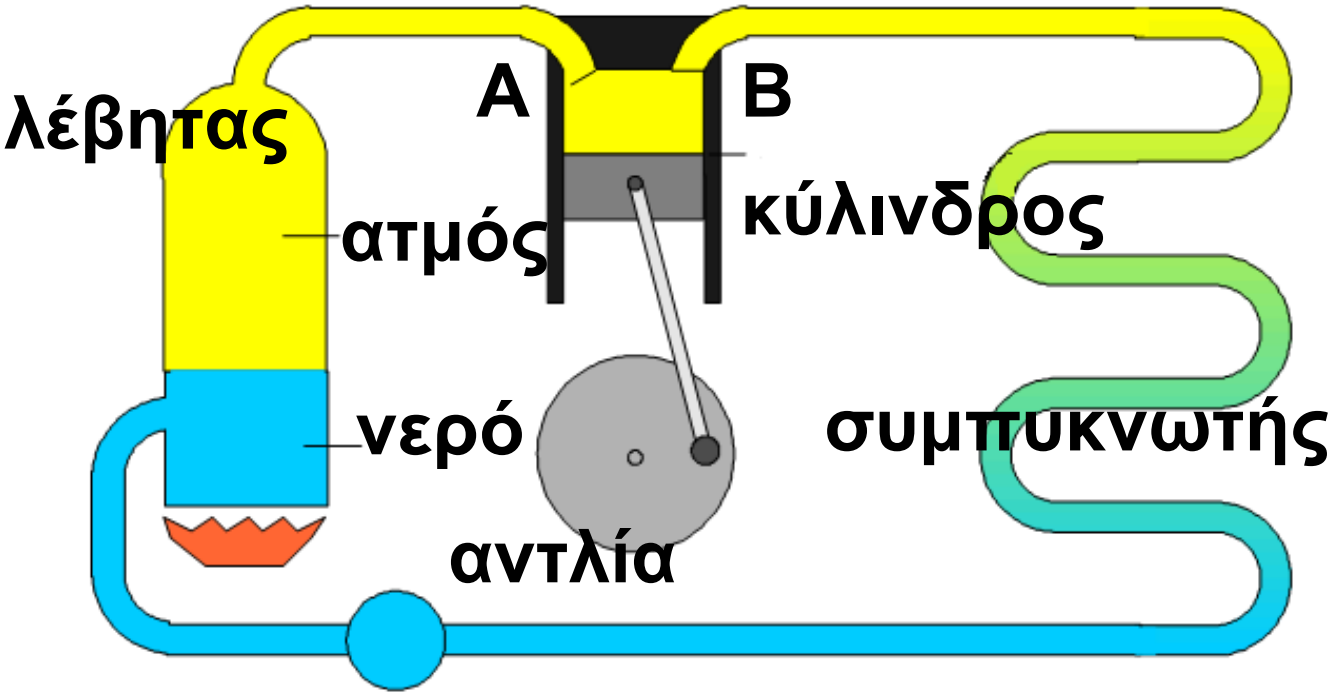
Το 1769 ο Watt, βελτίωσε την μηχανή του Newcomen και παρουσίασε μια μηχανή για πολλές χρήσεις. Η εφεύρεση της ατμομηχανής και στη συνέχεια η διάδοση της χρήσης της είχε ως αποτέλεσμα βαθιές αλλαγές στη ζωή των ανθρώπων και στις κοινωνικές δομές. Η περίοδος που ακολούθησε ονομάστηκε βιομηχανική επανάσταση.

Από την εποχή του Newcomen και του Watt μέχρι σήμερα οι θερμικές μηχανές έκαναν μεγάλο δρόμο. Οι ατμομηχανές τελειοποιήθηκαν, επι-

νοήθηκαν νέες θερμικές μηχανές, όπως οι μηχανές ντίζελ, οι βενζινοκινητήρες, οι αεροστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα και οι ατμοστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που χρησιμοποιούμε σήμερα σχετίζεται με τη χρήση των θερμικών μηχανών.

Το σχήμα 4.19 παριστάνει το μοντέλο μιας ατμομηχανής. Στο λέβητα παράγεται θερμός ατμός υψηλής πίεσης, ο οποίος - μέσω της βαλβίδας Α (βαλβίδα εισαγωγής) – διοχετεύεται στον κύλινδρο, σπρώχνει το έμβολο και παράγει έργο. Καθώς ο ατμός εκτονώνεται μέσα στον κύλινδρο, η πίεση και η θερμοκρασία του ελαττώνονται. Στη συνέχεια

ο ατμός που τώρα έχει χαμηλή πίεση αποβάλλεται από τον κύλινδρο, από τη βαλβίδα Β (βαλβίδα εξαγωγής), και διοχετεύεται σε μια διάταξη που ονομάζεται συμπυκνωτής. Εκεί ο ατμός ψύχεται με τρεχούμενο νερό ή από τον αέρα και συμπυκνώνεται πάλι σε νερό. Το νερό οδηγείται πίσω στο λέβητα.

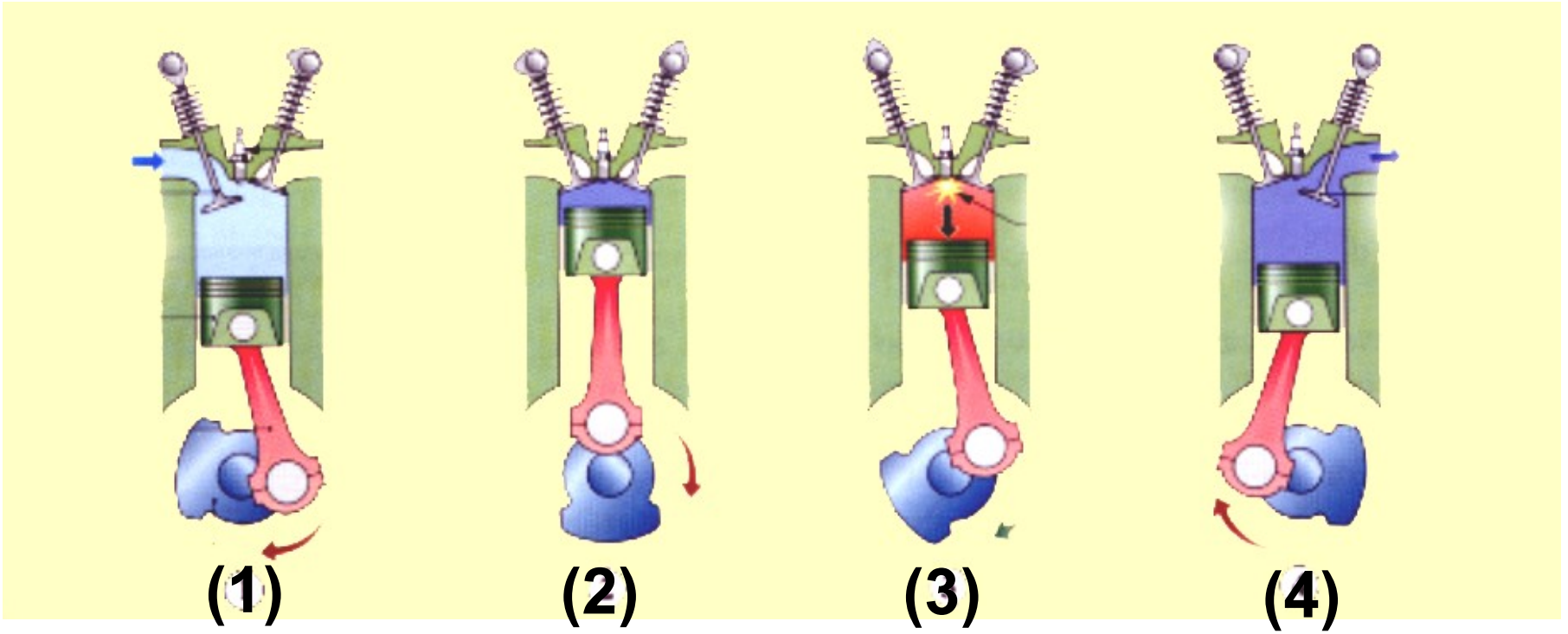


Σχ. 4.19 Αρχή λειτουργίας της ατμομηχανής.

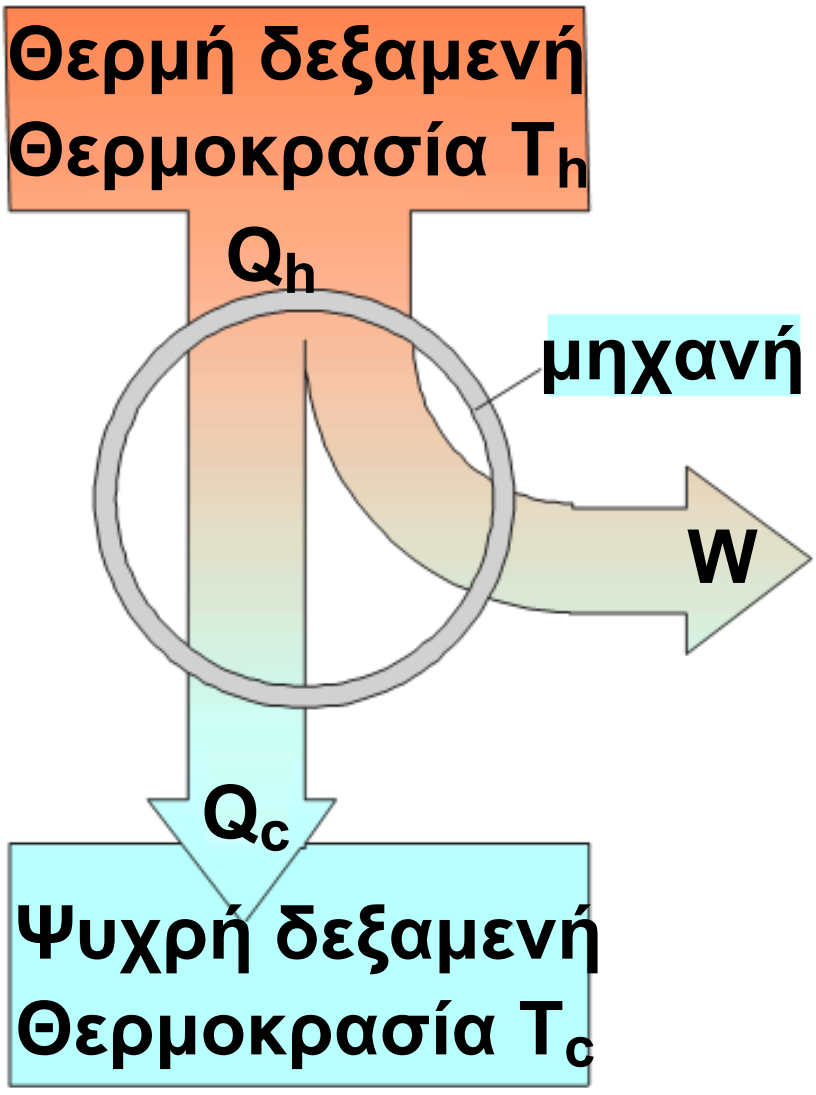
Στους βενζινοκινητήρες, τα θερμά αέρια που παράγονται από την καύση της βενζίνης με τον αέρα σπρώχνουν το έμβολο του κυλίν-δρου και παράγουν έργο. Στη συνέχεια αποβάλλονται από τον κύλινδρο και μέσω της εξάτμισης διοχετεύονται στο περιβάλλον.

Εικ. 4.4 Κύκλος βενζινοκινητήρα τεσσάρων χρόνων. (1) Το έμβολο κατεβαίνει. Η βαλβίδα εισόδου είναι ανοικτή, μίγμα βενζίνης - αέρα γεμίζει τον κύλινδρο.(2) Το έμβολο ανεβαίνει. Οι βαλβίδες είναι κλειστές και το μίγμα συμπιέζεται

(στην επόμενη σελίδα)



(3) Το μίγμα αναφλέγεται με το σπινθήρα που προκαλεί το μπουζί και τα αέρια της καύσης απωθούν βίαια το έμβολο προς τα κάτω (4) Το έμβολο ανεβαίνει. Η βαλβίδα εξαγωγής είναι ανοικτή και τα καυσαέρια απομακρύνονται από τον κύλινδρο.



Σχ. 4.20 Αρχή λειτουργίας μιας θερμικής μηχανής. Η κυκλική περιοχή συμβολίζει τη μηχανή η οποία δέχεται ποσό θερμότητας Qh από τη θερμή δεξαμενή, παράγει έργο W και αποβάλλει ποσό θερμότητας Qc στην ψυχρή δεξαμενή.

Σχηματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η θερμική μηχανή είναι μια διάταξη που υποβάλλει ένα «μέσον» σε μια μεταβολή. **Επειδή η μηχανή μετατρέπει συνεχώς τη θερμότητα σε έργο πρέπει η μεταβολή στην οποία υποβάλλεται το μέσον να είναι κυκλική**, ώστε, όταν ολοκληρωθεί η μεταβολή, η μηχανή να επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση και να επαναλάβει την ίδια διαδικασία ξανά και ξανά. Στην ατμομηχανή το υλικό που υποβάλλεται στην κυκλική διεργασία είναι το νερό. Το νερό αφού γίνει ατμός και ολοκληρώσει την πορεία του μέσω του κυλίνδρου και του συμπυκνωτή επιστρέφει στο λέβητα στις ίδιες συνθήκες.

Κατά τη διάρκεια της κυκλικής μεταβολής του μέσου, η μηχανή

1. απορροφά θερμότητα (Q_h) από μια δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας T_h.

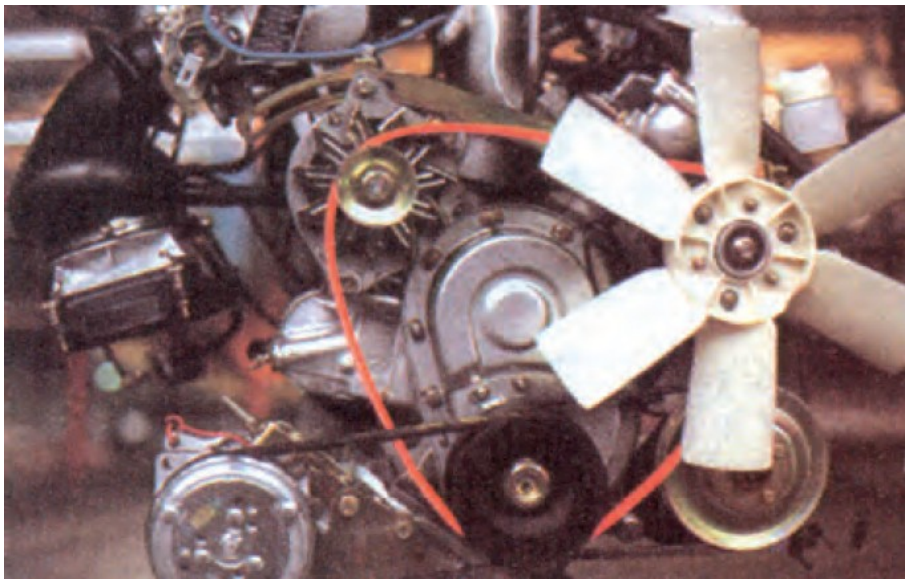
2. παράγει έργο.

3. αποβάλλει θερμότητα (Q_c) σε μια δεξαμενή χαμηλότερης θερμοκρασίας T_c.

Προηγουμένως χρησιμοποιήσαμε τον όρο δεξαμενή θερμότητας. Έτσι συνηθίζουμε να λέμε ένα σώμα που παραμένει σε σταθερή θερμοκρασία ακόμη κι αν παίρνει ή δίνει θερμότητα. Στην ατμομηχανή δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας είναι ο λέβητας, του οποίου η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή μέσω της ελεγχόμενης καύσης κάποιου καυσίμου,

ενώ δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας είναι ο συμπυκνωτής, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή ή με την ατμόσφαιρα ή με μια μάζα νερού, οπότε η θερμοκρασία του διατηρείται επίσης σταθερή. Στις μηχανές εσωτερικής καύσης το καιόμενο υγρό καύσιμο μέσα στο θάλαμο καύσης -κύλινδρο- είναι η δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας και το περιβάλλον, όπου διοχετεύονται τα καυσαέρια, η δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας.

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



Εικ. 4.5 Βενζινοκινητήρας αυτοκινήτου.

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

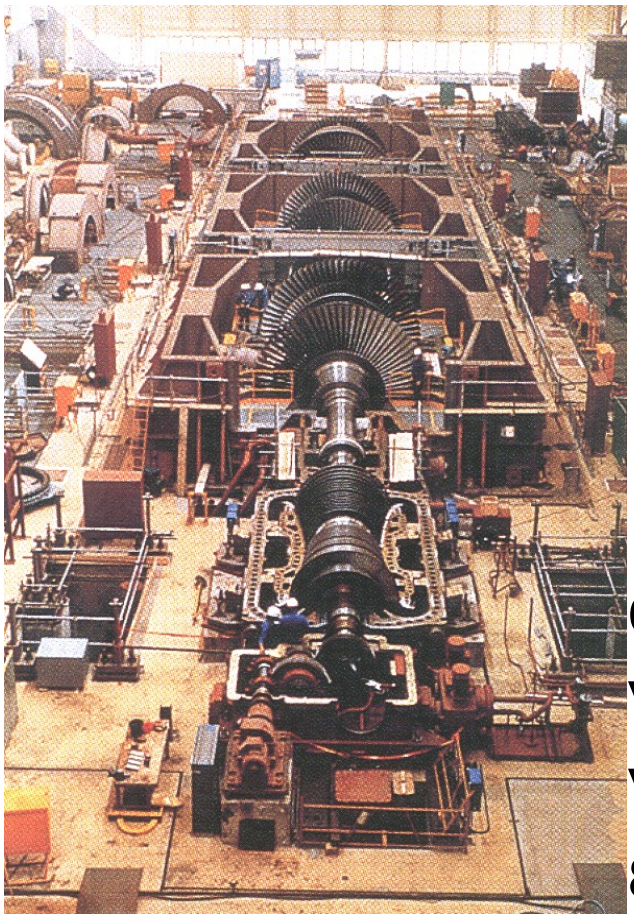
Επομένως $$e=\frac{W}{Q_h} \qquad (4.17)$$

Το καθαρό ποσό θερμότητας Q που απορροφά το μέσον είναι το ποσό θερμότητας που παίρνει από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας

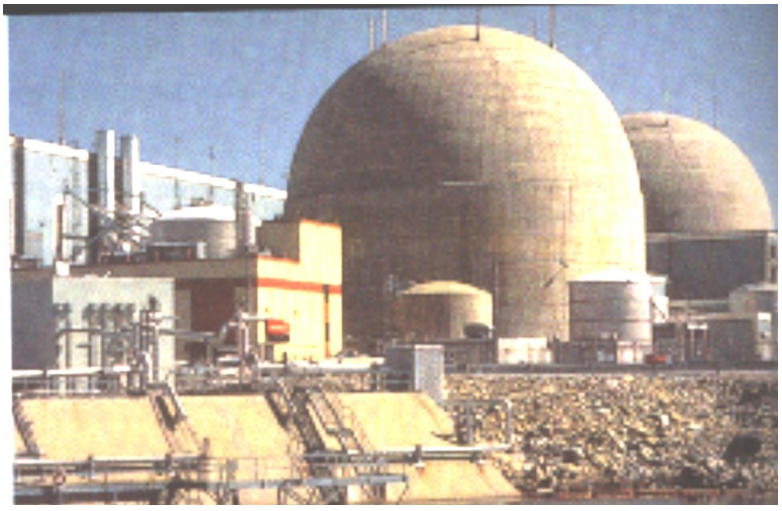
μείον αυτό που αποβάλλει στη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας, $Q_h - |Q_c|$. Στην κυκλική μεταβολή το έργο που παράγει το αέριο ισούται με το καθαρό ποσό θερμότητας που απορροφά δηλαδή $W = Q_h - |Q_c|$. Αντικαθιστώντας στη (2.17) βρίσκουμε

$$e = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} \quad \text{ή} \quad e = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} \qquad (4.18)$$

Οι ατμομηχανές έχουν απόδοση έως 18%, ενώ στις ατμομηχανές που είναι εφοδιασμένες με στρόβιλο, αντί για κύλινδρο και έμβολο, η απόδοση φτάνει μέχρι και 40%. Οι βενζινομηχανές έχουν απόδοση περίπου 20%, ενώ οι μηχανές ντίζελ από 35% έως 40%.



Εικ. 4.6 Ατμοστρόβιλος σε εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικ. 4.7 Πυρηνικό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Βιρτζίνια των Η.Π.Α. Παράγει ηλεκτρική ισχύ 900 MW και

ταυτόχρονα αποβάλλει στο κοντινό ποτάμι θερμότητα με ρυθμό 2100 MW. Το εργοστάσιο αυτό όπως και τα υπόλοιπα του είδους του «πε-τάει» πολύ περισσότερη ενέργεια από όση αποδίδει σε χρήσιμη μορφή.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.1

Μηχανή εσωτερικής καύσης κατα-ναλώνει σε κάθε κύκλο λειτουργίας της θερμότητα 5000 J και αποβάλ-λει στην εξάτμιση θερμότητα 3500 J. Υπολογίστε το συντελεστή απόδοσης της μηχανής.

Απάντηση :

Ο συντελεστής απόδοσης μιας μηχανής δίνεται από την σχέση (4.18)

$$e=1-\frac{|Q_c|}{Q_h}=1-\frac{3500\ J}{5000\ J}=0,3 \text{ ή } 30\%$$

Για τη λειτουργία της μηχανής δαπανάται θερμότητα 8000 J σε κάθε κύκλο.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.2

Θερμική μηχανή έχει απόδοση 25%, και σε κάθε κύκλο παράγει ωφέλιμο έργο 2000 J. Υπολογίστε την ενέργεια που δαπανάται για κάθε κύκλο λειτουργίας της μηχανής.

Απάντηση :

Ο συντελεστής απόδοσης μιας μηχανής δίνεται από τη σχέση (4.17)

$$e=\frac{W}{Q_h} \quad \text{άρα} \quad Q_h=\frac{W}{e}=\frac{2000J}{0,25}=8000J$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.3

Εικ. 4.8 Φινλανδικός κινητήρας Diesel Wartsila
12 κύλινδροι σε διάταξη V.
Εσωτερική διάμετρος κυλίνδρου : 200 mm.
Διαδρομή εμβόλου : 240 mm.
Κυλινδρισμός : 7,54 L ανά κύλινδρο.
Ισχύς : 220 kW ανά κύλινδρο για ταχύτητα 15 κόμβων.

Ο κινητήρας Diesel της εικόνας χρησιμοποιείται σε μι φορτηγά

πλοία. Ο συντελεστής απόδοσης ενός τέτοιου κινητήρα είναι 0,25. Το πλοίο που τον φέρει ταξιδεύει με 15 κόμβους. Οι δεξαμενές του πλοίου περιέχουν 150 τόνους καυσίμου. Ποια απόσταση μπορεί να διανύσει το πλοίο με αυτά τα καύσιμα;
[1 κόμβος = 1 ναυτικό μίλι /h = 1852 m/h. 1 kg καυσίμου αποδίδει κατά την καύση του 39800 kJ].

Απάντηση :

Ο κινητήρας αποδίδει ισχύ
$P=12\times220\,kW=2640\,kW$

Η απόδοση του κινητήρα είναι ο λόγος της μηχανικής ισχύος (P) που αποδίδει ο κινητήρας κατά τη λειτουργία του προς την θερμική ισχύ (P_h) που παίρνει κατά την καύση του καυσίμου.

$$e=\frac{P}{P_h} \quad \text{οπότε} \quad P_h=\frac{P}{e}=10560\,kW$$

Από τα καύσιμα, σε χρονικό διάστημα $\Delta t = 1\ h$ αποδίδεται θερμότητα

$$Q_h=P_h\Delta t=10.560\,kW\times 3.600\,s=$$
$$=38.016.000\,kJ$$

Η μάζα του καυσίμου που αποδίδει τόση θερμότητα κατά την καύση της είναι $m=\frac{38.016.000\,kJ}{39.800\,kJ/kg}\approx 955\,kg$

Σε μια ώρα το πλοίο διανύει

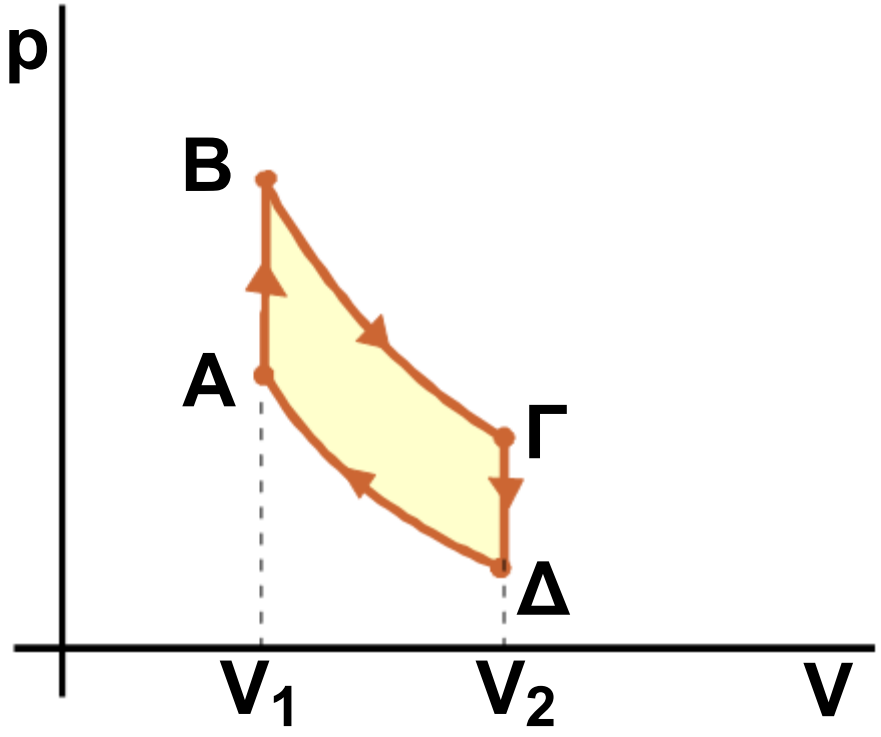
$$15\,v.\mu./h\times 1852\,m/v.\mu.\times 1h=$$
$$=27780\,m=27,78\,km$$

Αφού με 955 kg καυσίμου το πλοίο διανύει 27,78 km με τους 150 τόνους θα διανύσει

$$27,78\,km\,\frac{150000\,kg}{955\,kg}\approx 4363\,km$$

84 / 114-115

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.4



Σχ. 4.21

Κύκλος Otto (βενζινοκινητήρας)
Το ιδανικό αέριο θερμικής μηχανής εκτελεί την κυκλική μεταβολή του σχήματος 4.21 που περιλαμβάνει τις πιο κάτω διαδοχικές μεταβολές.

ΑΒ : ισόχωρη θέρμανση σε όγκο V_1.

ΒΓ : αδιαβατική εκτόνωση.

ΓΔ : ισόχωρη ψύξη σε όγκο V_2.

ΔΑ : αδιαβατική συμπίεση.

Να βρεθεί ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής.

Απάντηση :

$Q_{AB} = nC_V(T_B - T_A)$

$T_B > T_A$ οπότε $Q_{AB} >$
(απορροφάται από το σύστημα)

Η μεταβολή ΒΓ είναι αδιαβατική
οπότε $Q_{B\Gamma} = 0$

$Q_{\Gamma\Delta} = nC_V(T_\Delta - T_\Gamma)$

$T_\Delta < T_\Gamma$ οπότε $Q_{\Gamma\Delta} < 0$
(αποδίδεται στο περιβάλλον)

Η μεταβολή ΔΑ είναι αδιαβατική
οπότε $Q_{\Delta A} = 0$

Η θερμότητα που απορροφάται συνολικά είναι

$Q_h = Q_{AB} = nC_V(T_B - T_A)$

Η θερμότητα που αποδίδεται στο περιβάλλον είναι

$$Q_c = Q_{\Gamma\Delta} = nC_V\left(T_\Delta - T_\Gamma\right)$$

Και

$$\left|Q_c\right| = -nC_V\left(T_\Delta - T_\Gamma\right) = nC_V\left(T_\Gamma - T_\Delta\right)$$

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

$$= 1 - \frac{nC_V\left(T_\Gamma - T_\Delta\right)}{nC_V\left(T_B - T_A\right)}$$

οπότε

$$e = 1 - \frac{T_\Gamma - T_\Delta}{T_B - T_A} \qquad (4.19)$$

Από το νόμο του Poisson για την αδιαβατική μεταβολή $B \rightarrow \Gamma$ γνωρίζουμε ότι

$$p_B V_1^\gamma = p_\Gamma V_2^\gamma \qquad (4.20)$$

Από την καταστατική εξίσωση προκύπτει $p_B=\frac{nRT_B}{V_1}$ και

$$p_\Gamma=\frac{nRT_\Gamma}{V_2}$$

Αντικαθιστώντας στη (4.20) τα p_B και p_Γ με τα ίσα τους προκύπτει

$$T_B V_1^{\gamma-1}=T_\Gamma V_2^{\gamma-1} \quad (4.21)$$

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο προκύπτει επίσης

$$T_A V_1^{\gamma-1}=T_\Delta V_2^{\gamma-1} \quad (4.22)$$

Αφαιρώντας κατά μέλη τις (4.22) και (4.21) βρίσκουμε

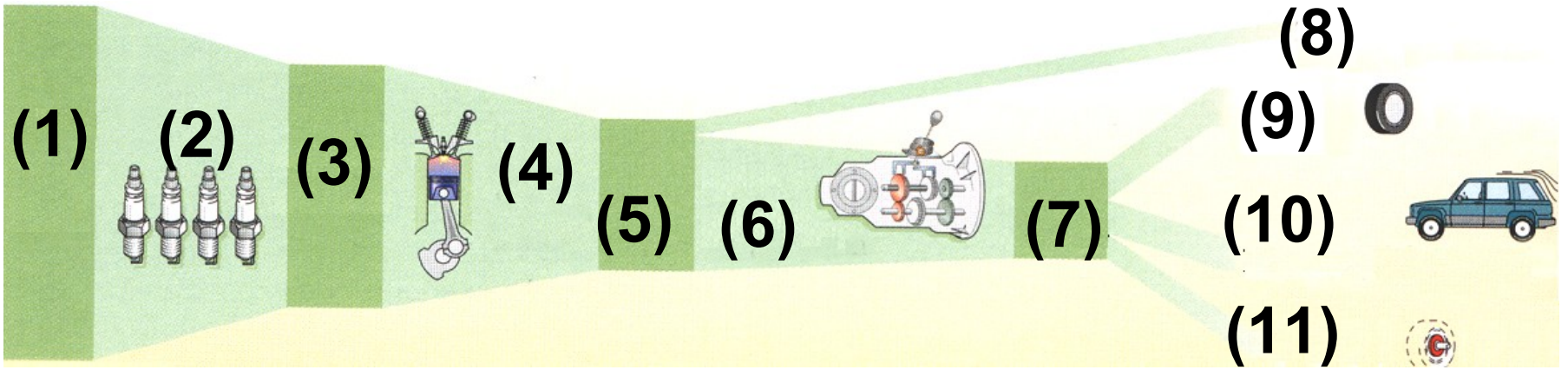
$$V_1^{\gamma-1}\left(T_B-T_A\right)=V_2^{\gamma-1}\left(T_\Gamma-T_\Delta\right)$$

ή $$\frac{T_\Gamma-T_\Delta}{T_B-T_A}=\frac{V_1^{\gamma-1}}{V_2^{\gamma-1}}$$

και τελικά από τη (4.19) προκύπτει

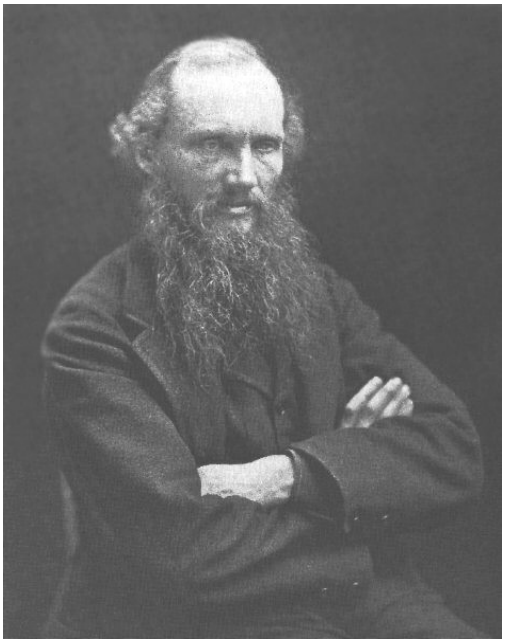
$$e=1-\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

Εικ. 4.9 Όταν ένα αυτοκίνητο κινείται, μόλις το ένα έκτο της ενέργειας που παρέχεται από το καύσιμο στη μηχανή αξιοποιείται για την προώθησή του.



(1) 100 λίτρα
(2) Απώλειες της καύσης
(3) 40 λίτρα
(4) Απώλειες του κινητήρα
(5) 18,6 λίτρα
(6) Απώλειες της μετάδοσης
(7) 14,81 λίτρα
(8) 2,2 λίτρα στα εξαρτήματα, (9) 5,21 λίτρα στα ελαστικά, (10) 4,89 λίτρα αεροδυναμική, (11) 7,71 στα φρένα

4-12 Ο ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ



Εικ. 4.10 Λόρδος Κέλβιν (Ουίλιαμ Τόμσον) (1825-1907). Αγγλία. Από οικογέ-νεια εύπορη αλλά ταπεινής καταγωγής ο νεαρός Ουίλιαμ ήταν ένα παιδί θαύμα.
Σε ηλικία 22 ετών κατείχε την έδρα της Φυσικής Φιλοσοφίας στο πανεπι-στήμιο της Γλασκόβης. Ασχολήθηκε σχεδόν με τα πάντα, με πολλούς κλάδους της φυσικής, με επιχειρή-

σεις (εγκατέστησε το πρώτο τηλεγραφικό καλώδιο μεταξύ Αμερικής - Ευρώπης) και με την πολιτική (πήρε τίτλο ευγενείας και ήταν μέλος της Βουλής των Λόρδων). Μια από τις δεσπόζουσες προσωπικότητες της επιστήμης στο 19ο αιώνα, σε μια εποχή που η Αγγλία κρατούσε τα σκήπτρα της επιστημονικής πρωτοπορίας.

Η θερμοδυναμική έκανε τα πρώτα της βήματα στις αρχές του 19ου αιώνα, προσπαθώντας να δώσει λύση στα πρακτικά προβλήματα που επέβαλε η χρήση των θερμικών μηχανών. Όπως φαίνεται και από τη σχέση (4.18), ο συντελεστής απόδοσης μιας θερμικής μηχανής είναι μικρότερος από ένα. Θα ήταν ένα αν η μηχανή μετέτρεπε όλο το

ποσό της θερμότητας σε ωφέλιμο έργο, ωστόσο κανένας δεν κατόρθωσε να κατασκευάσει μια τέτοια μηχανή. Όλες οι μηχανές εκμεταλλεύονται μόνο ένα μέρος της θερμότητας και αποβάλλουν σημαντικά ποσά θερμότητας στο περιβάλλον. Οι επανειλημμένες αποτυχίες των ερευνητών να κατασκευάσουν την “τέλεια” θερμική μηχανή που θα μετέτρεπε πλήρως τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο έπεισαν ότι η αδυναμία οφείλεται σε περιορισμούς που θέτει η ίδια η φύση. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στη διατύπωση του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, από τους **Kelvin** και **Planck** (Κέλβιν και Πλανκ):

Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί θερμική μηχανή που να

μετατρέπει εξ ολοκλήρου τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο.

Μιλώντας για τη θερμότητα, είπαμε ότι, από μόνη της, μεταφέρεται πάντα από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σώματα. Η αντίστροφη πορεία απαιτεί δαπάνη ενέργειας. Το ψυγείο και το κλιματιστικό είναι μηχανήματα που αναγκάζουν τη θερμότητα να μεταφερθεί από ψυχρά σώματα σε θερμότερα. Το ψυγείο, για παράδειγμα, μεταφέρει θερμότητα από τα τρόφιμα στο περιβάλλον, που είναι θερμότερο. Όμως για τη λειτουργία αυτών των μηχανών δαπανούμε ενέργεια. Δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ψυγείο που να λειτουργεί χωρίς να δαπανάται ενέργεια. Αυτή η διαπί-στωση οδήγησε σε μια άλλη διατύ-

πωση του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου από τον **Clausious** (Κλαούζιους):
Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μηχανή που να μεταφέρει θερμότητα από ένα ψυχρό σώμα σε ένα θερμότερο χωρίς να δαπανάται ενέργεια για τη λειτουργία της.

Οι δύο διατυπώσεις του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου που φαινομενικά είναι εντελώς ασύνδετες, είναι ισοδύναμες. Αν αληθεύει η μία από αυτές θα αληθεύει και η άλλη.

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος δεν θέτει περιορισμούς στις μετατροπές της ενέργειας. Σύμφωνα με το δεύτερο, όμως, η φύση θέτει περιορισμούς στη μετατροπή ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη. Η θερμότητα δε μπορεί να μετασχη-

ματιστεί κατά 100% σε μηχανική ενέργεια. Επίσης ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος, καθορίζοντας ότι η θερμότητα μεταφέρεται πάντα από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σώματα, καθορίζει την κατεύθυνση προς την οποία τα φαινόμενα συμβαίνουν αυθόρμητα στη φύση.

4-13 Η ΜΗΧΑΝΗ ΤΟΥ CARNOT

Σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, μια θερμική μηχανή δε μπορεί να έχει απόδοση 100%. Ποιος είναι όμως ο μεγαλύτερος συντελεστής απόδοσης που μπορεί να έχει μια μηχανή, όταν δίνονται οι θερμοκρασίες T_h και T_c, των δεξαμενών θερμότητας της μηχανής; Το

ερώτημα αυτό απαντήθηκε το 1824 από το Γάλλο μηχανικό Carnot (Καρνό).

Εικ. 4.11 Σαντί Καρνό (1796-1832). Γαλλία. Στρατιωτικός και μηχανικός. Απόφοιτος της περίφημης Ecole Polytechnique που ίδρυσε ο Ναπολέων για να αντιπαρατεθεί στην ανωτερότητα των Άγγλων στις επιστήμες.

Ο Carnot περιέγραψε μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή, που ονομάστηκε **κύκλος Carnot**, και απέδειξε ότι μια θερμική μηχανή που θα ακολουθούσε αυτόν τον αντιστρε-

πτό κύκλο θα είχε τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση. Μια τέτοια, υποθετική, εξιδανικευμένη μηχανή ονομάζεται μηχανή Carnot και η απόδοσή της αποτελεί το ανώτερο όριο για την απόδοση όλων των άλλων μηχανών. Το συμπέρασμα αυτό είναι γνωστό ως θεώρημα Carnot:

Δεν μπορεί να υπάρξει θερμική μηχανή που να έχει μεγαλύτερη απόδοση από μια μηχανή Carnot η οποία λειτουργεί ανάμεσα στις ίδιες θερμοκρασίες.

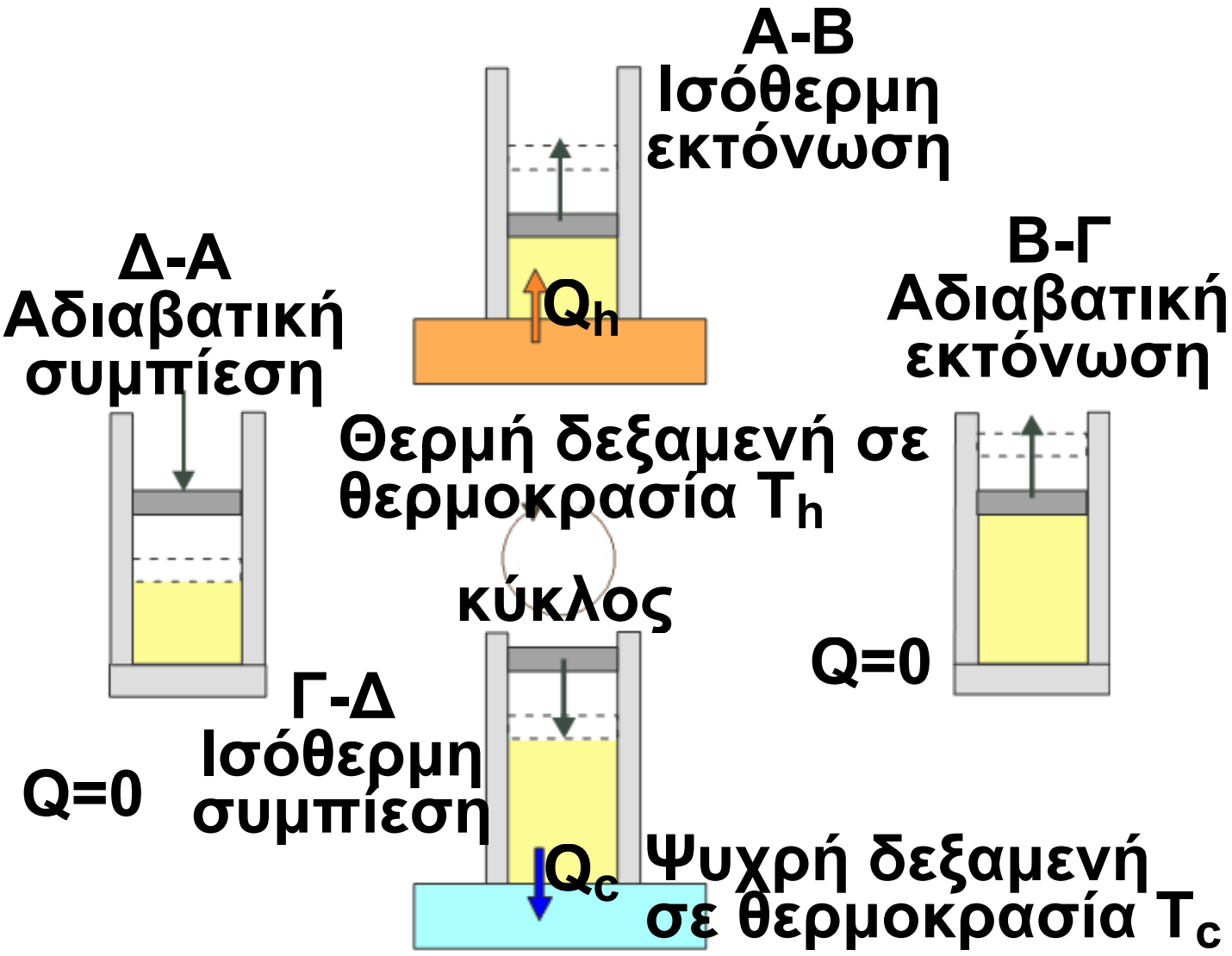
Ο κύκλος Carnot αποτελείται από τέσσερις μεταβολές, δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές. Θα περιγράψουμε τον κύκλο Carnot για ιδανικό αέριο που βρίσκεται μέσα σε κύλινδρο, που φράσσεται με έμβολο.

1. Κατά τη μεταβολή Α→Β, το αέριο βρίσκεται σε επαφή με τη θερμή δεξαμενή και εκτονώνεται ισόθερμα σε θερμοκρασία T_h, απορροφώντας θερμότητα Q_h.

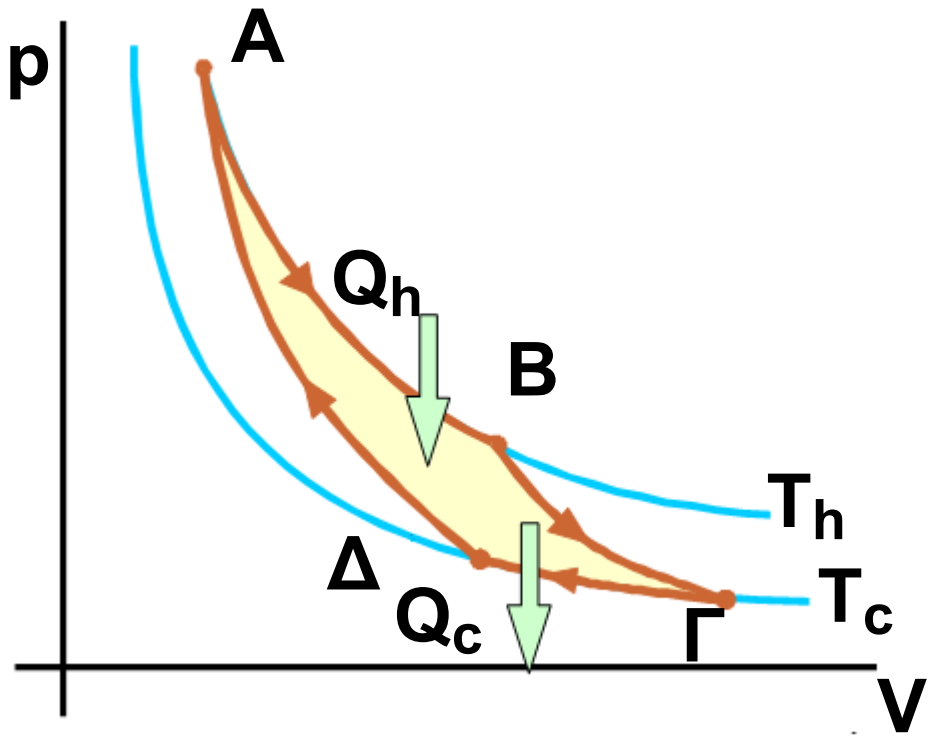
2. Κατά τη μεταβολή Β→Γ, το αέριο είναι θερμικά μονωμένο και εκτονώνεται αδιαβατικά μέχρι η θερμοκρασία του να πάρει την τιμή T_c.

3. Κατά τη μεταβολή Γ→Δ, το αέριο βρίσκεται σε επαφή με τη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας T_c και συμπιέζεται ισόθερμα σε θερμοκρασία T_c, αποβάλλοντας θερμότητα Q_c.

4. Κατά τη μεταβολή Δ→Α, το αέριο είναι θερμικά μονωμένο και συμπιέζεται αδιαβατικά ώστε να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση.



Σχ. 4.22 Οι τέσσερις φάσεις του κύκλου Carnot. Το αέριο βρίσκεται σε δοχείο που κλείνεται με έμβολο. Το έμβολο και τα πλευρικά τοιχώματα είναι αδιαβατικά ενώ η βάση του δοχείου διαθερμική



Σχ. 4.23 Διάγραμμα p-V για τον κύκλο Carnot. Το παραγόμενο έργο W, ισούται με την θερμότητα, Qh-|Qc|, που απορροφά το μέσον σε ένα κύκλο.

Ο συντελεστής απόδοσης μιας θερμικής μηχανής είναι

$$e=1-\frac{|Q_c|}{Q_h} \qquad (4.23)$$

Αποδεικνύεται ότι για τον κύκλο Carnot ισχύει

$$\frac{|Q_c|}{Q_h} = \frac{T_c}{T_h} \quad (4.24)$$

Αντικαθιστώντας τη (4.24) στη (4.23) βρίσκουμε ότι ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής Carnot είναι

$$e_{Carnot} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (4.25)$$

Το αποτέλεσμα δηλώνει, ότι 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. Επειδή οι περισσότερες πρακτικές εφαρμογές έχουν σαν ψυχρή δεξαμενή το περιβάλλον, δηλαδή

θερμοκρασία περίπου 300 K, όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία έχει το σώμα που "δίνει" θερμότητα τόσο πιο αποδοτική μπορεί να είναι η εκμετάλλευσή της. Επίσης το αποτέλεσμα επιβεβαιώνει το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο. Για να έχουμε απόδοση 100% πρέπει $T_c=0$, που είναι αδύνατον.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.5

Μηχανή Carnot λειτουργεί ανάμεσα στις θερμοκρασίες $T_h=500$ K και $T_c=300$ K. Σε κάθε κύκλο αποδίδει έργο W=2000J. Υπολογίστε την απόδοση της μηχανής και την ενέργεια που δαπανάται σε κάθε κύκλο.

Απάντηση :

Η απόδοση της μηχανής θα υπολογιστεί από τη σχέση (4.25)

$$e_{Carnot} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = \frac{2}{5} = 0,4$$

Η θερμότητα που δαπανάται για κάθε κύκλο λειτουργίας της μηχανής θα υπολογιστεί από τη σχέση (4.17)

$$e = \frac{W}{Q_h} \quad \text{άρα} \quad Q_h = \frac{W}{e} = \frac{2000J}{0,4} = 5000\,J$$

4-14 ΕΝΤΡΟΠΙΑ

Εικ. 4.12 Ρούντολφ Κλαούζιους (1822-1888). Γερμανία. Ένας από τους θεμελιωτές της θερμοδυναμικής.

Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος, όπως διατυπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δεν καταλήγει σε κάποια ποσοτική σχέση.

Ποσοτική διατύπωση του 2ου θερμοδυναμικού νόμου έγινε δυνατή με την εισαγωγή μιας νέας έννοιας, της έννοιας εντροπία (σύμβολο S).

Η εντροπία εισήχθη από τον Clausius, ο οποίος όρισε τη μεταβολή της εντροπίας (ΔS) συστή-

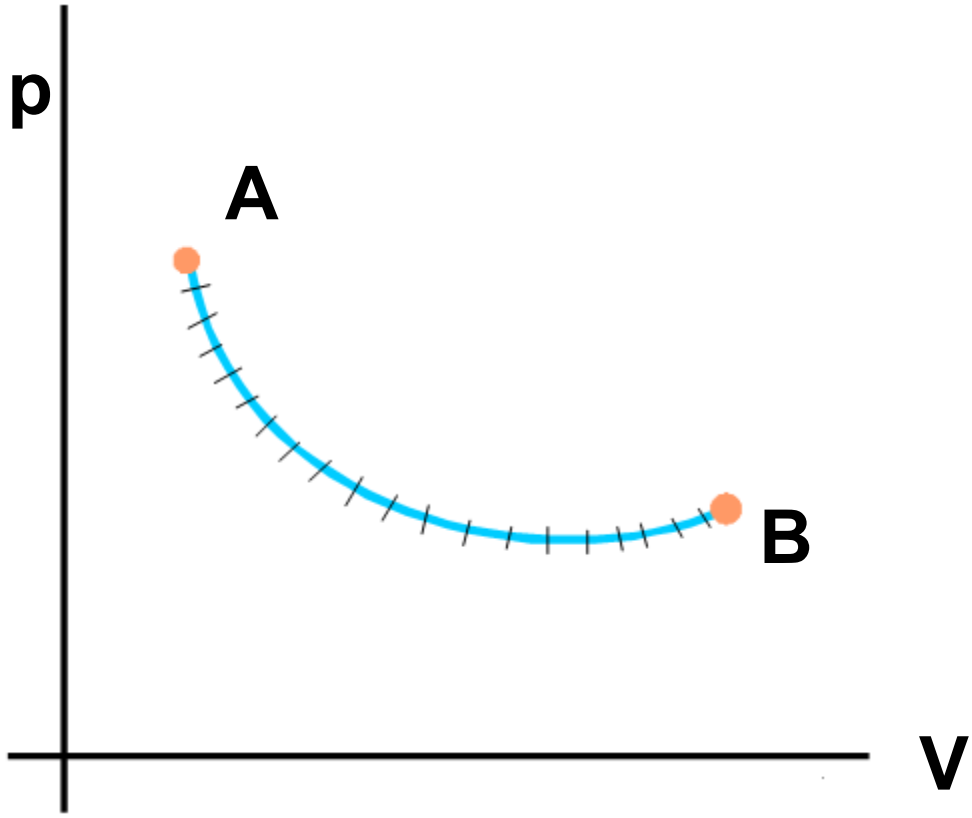
ματος κατά τη διάρκεια μιας πολύ μικρής αντιστρεπτής μεταβολής, τόσο μικρής ώστε η θερμοκρασία του συστήματος να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, ως το πηλίκο του ποσού θερμότητας ΔQ που απορρόφησε ή απέβαλε το σύστημα προς τη θερμοκρασία του συστήματος.

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \qquad (4.26)$$

Μονάδα της εντροπίας στο SI είναι το 1 J/K.

Όταν σε μια αντιστρεπτή μεταβολή το σύστημα απορροφά θερμότητα το ΔQ είναι θετικό, επομένως η εντροπία αυξάνεται. Όταν το σύστημα αποβάλλει θερμότητα το ΔQ είναι αρνητικό και επομένως η εντροπία μειώνεται.

Προσοχή_: η σχέση (4.26))δεν ορίζει την εντροπία αλλά μόνο τη μεταβολή της σε μια πολύ μικρή αντιστρεπτή διεργασία.



Σχ. 4.24 Σε μια αντιστρεπτή μεταβολή, η μεταβολή της εντροπίας υπολογίζεται αν χωρίσουμε τη μεταβολή σε πολύ μικρές μεταβολές και αθροίσουμε τις μεταβολές της εντροπίας σε κάθε μια από αυτές.

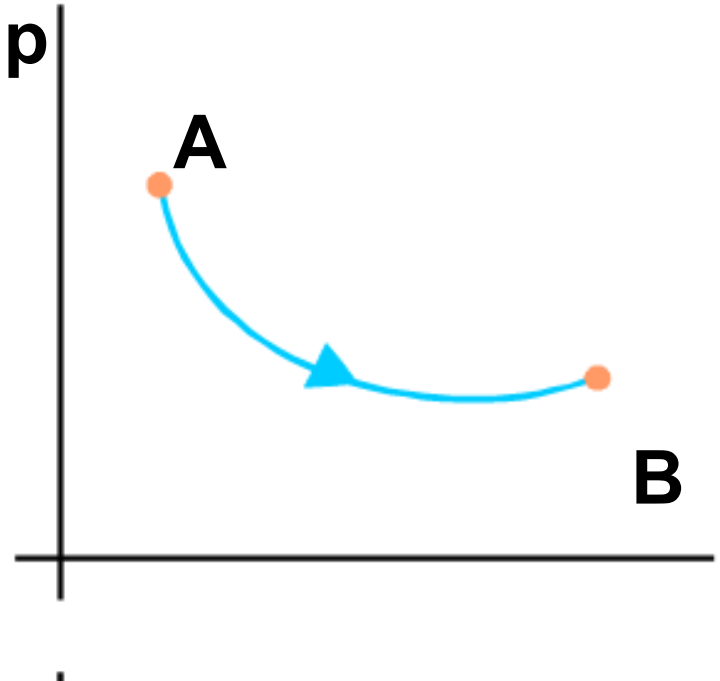
Σε μια αντιστρεπτή μεταβολή κατά την οποία ένα θερμοδυναμικό σύστημα μεταβαίνει από μία αρχική κατάσταση Α σε μια τελική κατάσταση Β, η συνολική μεταβολή της εντροπίας μπορεί να υπολογιστεί αν χωρίσουμε τη διεργασία σε πολύ μικρές μεταβολές (σχ. 4.24), υπολογίσουμε τη μεταβολή της εντροπίας σε κάθε μια από αυτές και αθροίσουμε όλους τους όρους.

$$S_B - S_A = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \cdots \Delta S_v =$$

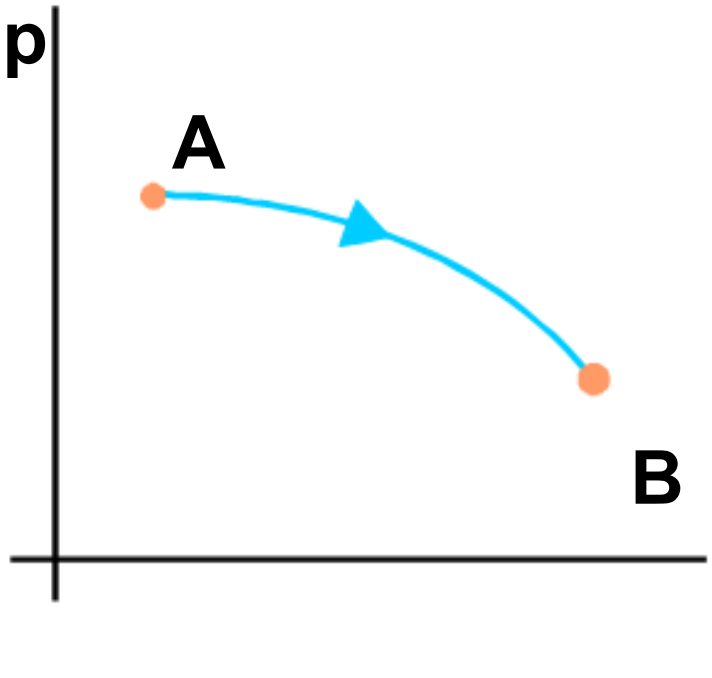
$$= \frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} + \cdots \frac{\Delta Q_v}{T_v} \qquad (4.27)$$

Η μεταβολή της εντροπίας ενός συστήματος έχει την ίδια τιμή για όλες τις μεταβολές που οδηγούν από μία αρχική κατάσταση Α σε μία τελική κατάσταση Β, αντιστρεπτές ή μη.

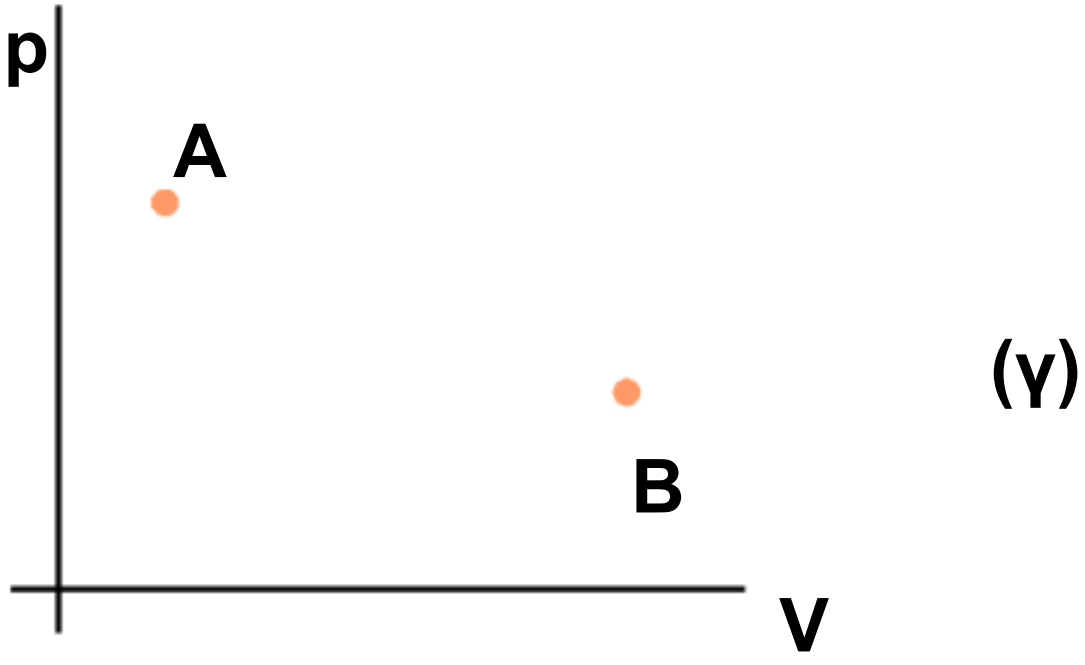
Η μεταβολή της εντροπίας ενός συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική του κατάστα-ση και όχι από το πώς πραγματοποιήθηκε η μεταβολή.



(α)

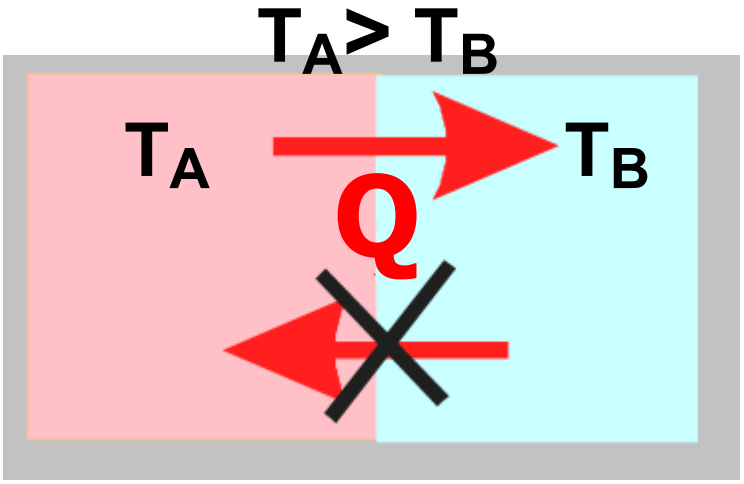


(β)



Σχ. 4.25 Στα διαγράμματα (α) και (β) ένα θερμοδυναμικό σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση Α στην κατάσταση Β με διαφορετικό κάθε φορά αντιστρεπτό τρόπο. Στο (γ) το ίδιο σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση Α στη Β με μη αντιστρεπτό τρόπο που δεν μπορεί να παρασταθεί γραφικά.
Η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος, είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις.

Ίσως βέβαια τα όσα είπαμε μέχρι τώρα να μη βοήθησαν καθόλου στο να κατανοήσετε την ανάγκη εισαγωγής αυτής της νέας έννοιας, της εντροπίας.
Ελπίζουμε όμως στη συνέχεια να πεισθείτε για την χρησιμότητα του νέου μεγέθους.



Σχ. 4.26 Η θερμότητα μεταφέρεται αυθόρμητα από σώματα υψηλότερης θερμοκρασίας προς σώματα χαμηλότερης. Το αντίστροφο αποκλείεται.

Έστω ένα σύστημα που αποτελείται από δύο σώματα το Α και το Β,

με θερμοκρασίες T_A και T_B αντίστοιχα. Το σύστημα είναι μονωμένο από το περιβάλλον (σχ. 4.26). Αν $T_A>T_B$, θα μετακινηθεί θερμότητα από το σώμα Α στο Β. Το αντίστροφο το αποκλείει ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος. Ας φανταστούμε μια αντιστρεπτή διαδικασία που μεταφέρει ένα πολύ μικρό ποσό θερμότητας ΔQ από το σώμα Α στο Β, τόσο μικρό ώστε να μπορούμε να λέμε ότι οι θερμοκρασίες των σωμάτων δεν μεταβλήθηκαν. Η μεταβολή της εντροπίας του σώματος Α θα είναι $\Delta S_A=-\frac{|\Delta Q|}{T_A}$, ενώ του Β $\Delta S_B=\frac{|\Delta Q|}{T_B}$. Η εντροπία του συστήματος θα μεταβληθεί, κατά

$$\Delta S=\Delta S_A+\Delta S_B=-\frac{|\Delta Q|}{T_A}+\frac{|\Delta Q|}{T_B}$$

και επειδή $T_A>T_B$ είναι $\frac{|\Delta Q|}{T_B}>\frac{|\Delta Q|}{T_A}$

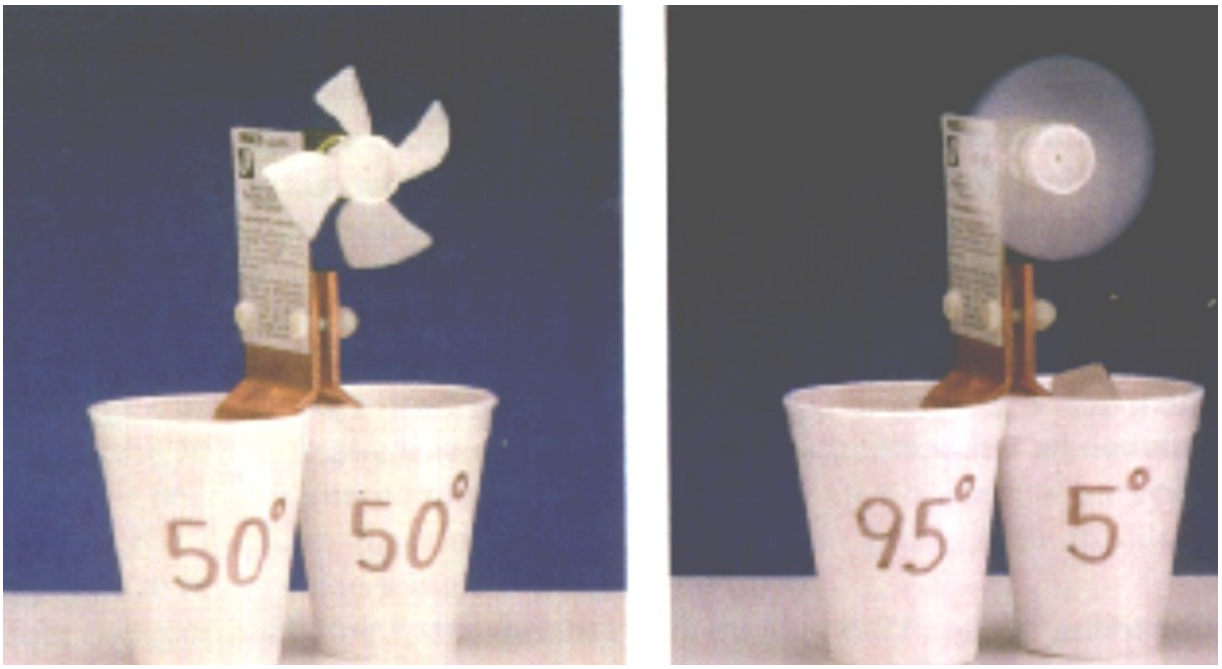
επομένως $\Delta S>0$.

Στο υποθετικό αυτό παράδειγμα, ο δεύτερος νόμος μάς οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η εντροπία του απομονωμένου συστήματος αυξήθηκε. Το ίδιο συμβαίνει σε κάθε απομονωμένο σύστημα. Επομένως η έννοια της εντροπίας μάς επιτρέπει να επαναδιατυπώσουμε το δεύτερο νόμο ως εξής:

Κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε μεταβολής ενός απομονωμένου συστήματος η εντροπία πάντοτε αυξάνεται.

Η εντροπία του συστήματος αποκτά τη μέγιστη τιμή της όταν επέλθει ισορροπία. Στην περίπτωσή μας το σύστημα ισορροπεί όταν εξισωθούν οι θερμοκρασίες των δύο σωμάτων.

Από ενεργειακή άποψη στο σύστημα αυτό αρχικά θα μπορούσε να λειτουργήσει μια θερμική μηχανή χρησιμοποιώντας σαν δεξαμενή ψηλής θερμοκρασίας το σώμα Α και σαν δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας το σώμα Β. Η εξίσωση των θερμοκρασιών δεν παρέχει πια αυτή τη δυνατότητα.



(α) (β)

Εικ.4.13 Τα δύο χάλκινα ελάσματα όταν βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες αναπτύσσουν μεταξύ τους διαφορά δυναμικού που επιτρέπει τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Στην περίπτωση (α) το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, έχει τη μέγιστη δυνατή εντροπία και δεν έχει δυνατότητα παραγωγής έργου. Στην περίπτωση (β) το σύστημα δεν βρίσκεται σε ισορροπία, η εντροπία του

είναι μικρότερη και έχει τη δυνατότητα παραγωγής έργου.

Η αύξηση της εντροπίας ενός συστήματος οδηγεί στην ελάττωση της ικανότητας του συστήματος να παράγει ωφέλιμο έργο.

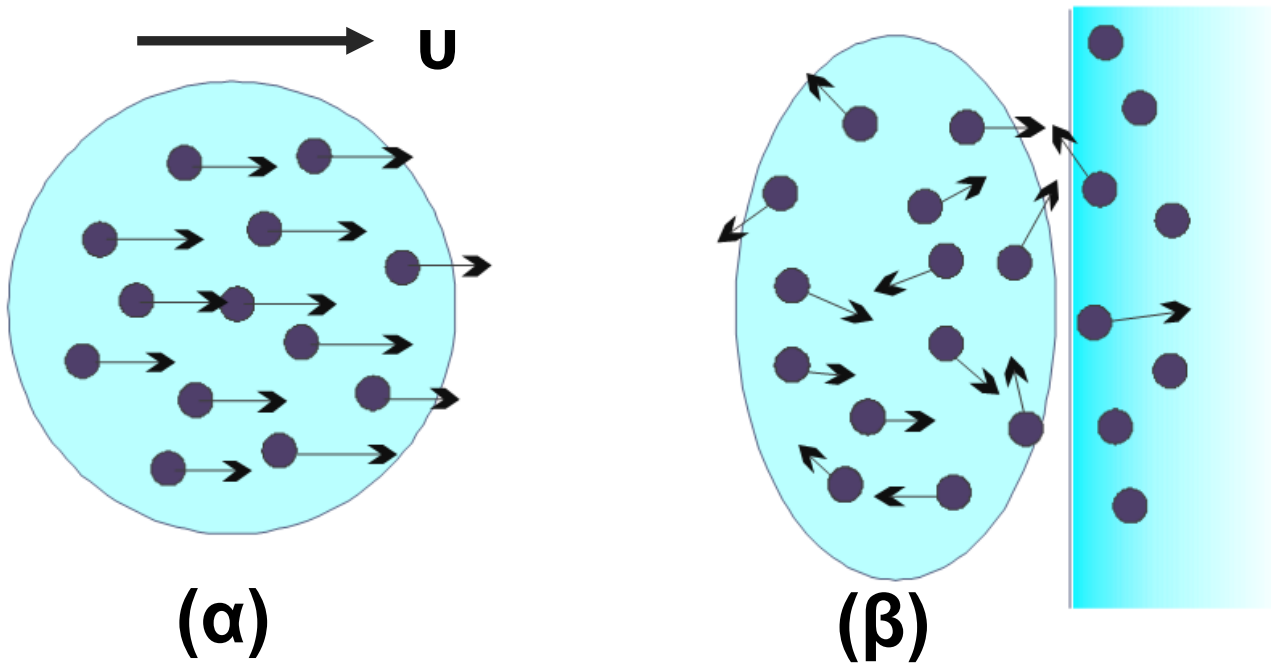
Μικροσκοπική ερμηνεία της εντροπίας

Στη δεκαετία του 1870 ο Boltzmann συνέδεσε την εντροπία, έννοια μακροσκοπική, με τη μικροσκοπική δομή του συστήματος και έδωσε στην έννοια νέο περιεχόμενο. Ο Boltzmann συνέδεσε το μέγεθος εντροπία με την αταξία που επικρατεί στα δομικά στοιχεία ενός συστήματος.

Όταν μεγαλώνει η αταξία που επικρατεί σε ένα σύστημα μεγαλώνει και η εντροπία του.

Έστω ένα σώμα πολύ χαμηλής θερμοκρασίας (κοντά στο απόλυτο μηδέν), που κινείται με ταχύτητα υ. Τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται το σώμα έχουν όλα τη μεταφορική ταχύτητα υ του σώματος και λόγω της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας είναι σχεδόν ακίνητα ως προς αυτό. Η κινητική ενέργεια του σώματος είναι, σχεδόν, όση και το άθροισμα των κινητικών ενεργειών των μορίων του. Το σώμα στην πορεία του συναντά ένα εμπόδιο και συγκρούεται. Κατά τη σύγκρουση δε χάνεται ενέργεια. Αν αθροίσουμε τις κινητικές ενέργειες των μορίων του σώματος μετά τη σύγκρουση η ενέργεια που θα πάρουμε είναι όση και πριν. Για να είμαστε πιο ακριβείς, στους υπολογισμούς μας θα πρέπει να συμπερι-

λάβουμε και την αύξηση των κινητικών ενεργειών των μορίων του εμποδίου γύρω από το σημείο της σύγκρουσης.



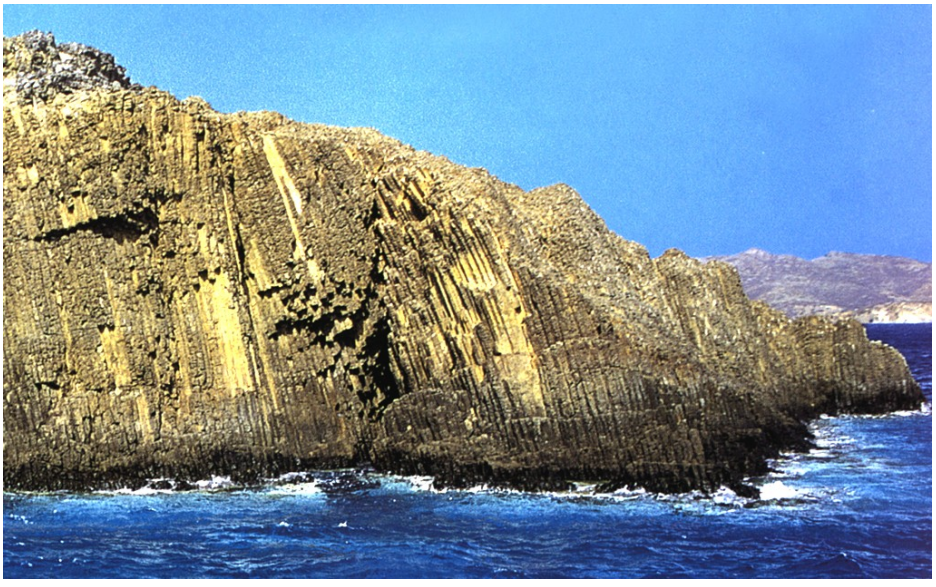
Σχ. 4.27 (α) Σώμα πολύ χαμηλής θερμοκρασίας εκτελεί μεταφορική κίνηση. Όλα τα μόριά του έχουν την ίδια ταχύτητα (β) Το σώμα έχει συγκρουστεί με ακίνητο εμπόδιο. Οι ταχύτητες των μορίων έχουν τυχαίο

προσανατολισμό. Η εντροπία, κατά τη σύγκρουση, αυξήθηκε.

Όμως, ενώ πριν συγκρουστεί τα μόρια του σώματος είχαν όλα την ίδια ταχύτητα (σχ. 4.27α) μετά τη σύγκρουση τα μόρια κινούνται άτακτα προς όλες τις κατευθύνσεις (σχ. 4.27β). Πριν τη σύγκρουση το σώμα είχε κάποια κινητική ενέργεια η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή έργου, λόγου χάριν θα μπορούσε να καρφώσει μια πινέζα στον τοίχο. Μετά τη σύγκρουση η συνολική ενέργεια δεν άλλαξε είναι όμως αδύνατον πια να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια του συστήματος. Η αταξία του συστήματος αυξήθηκε, μετά τη σύγκρουση. Αν μπορούσαμε να τη

μετρήσουμε θα διαπιστώναμε ότι η εντροπία αυξήθηκε.

Από μακροσκοπική άποψη η αύξηση της εντροπίας οδηγεί σε μείωση της ικανότητας για παραγωγή έργου, ενώ από μικροσκοπική άποψη η αύξηση της εντροπίας οδηγεί σε αύξηση της αταξίας του συστήματος.

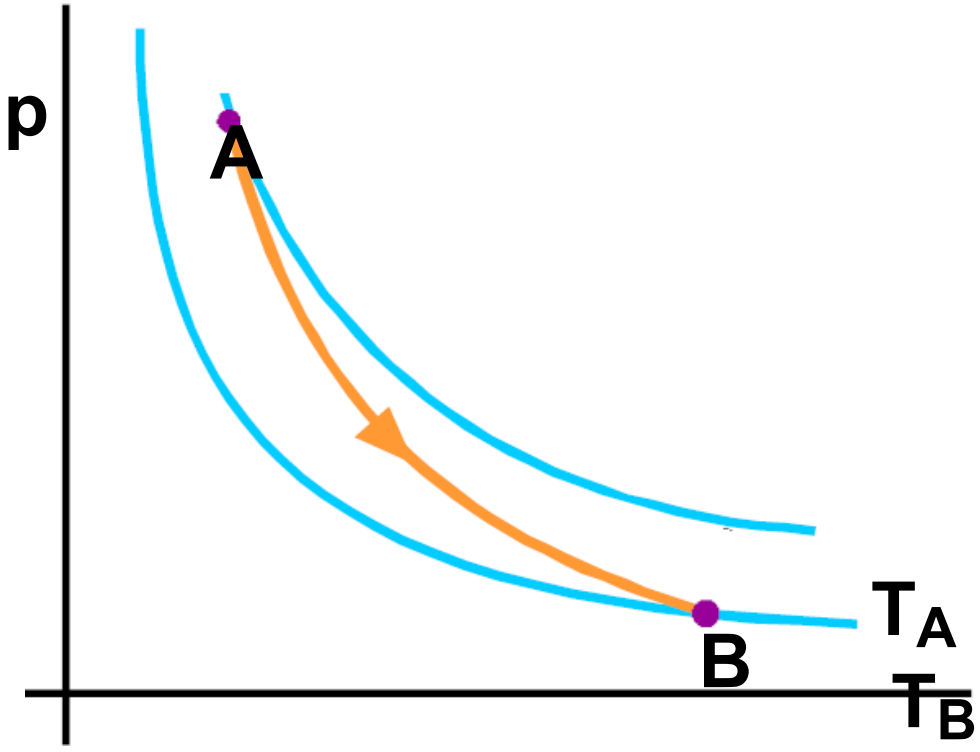


Εικ. 4.14 Τα Γλαρονήσια, στα βόρεια της Μήλου, έχουν προκύψει από ηφαιστειακή δράση. Η λάβα κατά την ψύξη της πήρε ασυνήθι-

στα γεωμετρικά, ραβδόμορφα σχήματα. Η εντροπία της λάβας μειώθηκε. Δεν γνωρίζουμε κάτω από ποιες συνθήκες συνέβη αυτό. Εκείνο για το οποίο μπορούμε να είμαστε βέβαιοι είναι το ότι καθώς μειωνόταν η εντροπία της λάβας, αυξανόταν η εντροπία του περιβάλλοντος.

4-15 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΜΕΡΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ

Αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή



Σχ. 4.28 Ένα αέριο εκτονώνεται αδιαβατικά από την αρχική κατάσταση Α στην τελική κατάσταση Β. Η εντροπία του παραμένει σταθερή

Έστω ότι ένα αέριο, που βρίσκεται αρχικά στην κατάσταση Α (p_A, V_A,

T_A), εκτονώνεται αδιαβατικά μέχρι την κατάσταση Β (p_B, V_B, T_B). Η μεταβολή του αερίου παριστάνεται γραφικά στο σχήμα 4.28.

Επειδή πρόκειται για αντιστρεπτή μεταβολή, η μεταβολή της εντροπίας ΔS_{AB}, μπορεί να υπολογιστεί αν χωρίσουμε την διεργασία σε στοιχειώδεις μεταβολές, υπολογίσουμε την μεταβολή της εντροπίας σε κάθε στοιχειώδη μεταβολή και αθροίσουμε όλους του όρους.

$$\Delta S_{AB} = \frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} + \dots \frac{\Delta Q_v}{T_v}$$

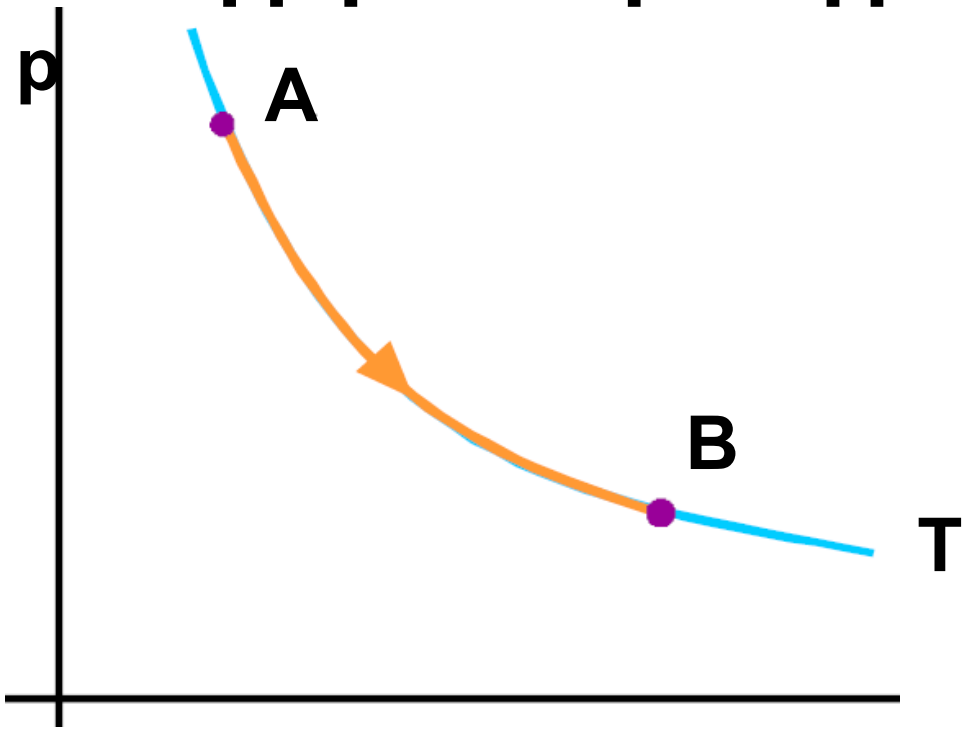
Όμως στην αδιαβατική μεταβολή το αέριο δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον, επομένως όλοι οι αριθμητές στο δεύτερο μέλος της παραπάνω σχέσης είναι μηδέν, με

αποτέλεσμα

$$\Delta S_{AB}=0$$

Στην αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή η εντροπία δε μεταβάλλεται.

Ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή



Σχ. 4.29 Το αέριο εκτονώνεται ισόθερμα από την αρχική κατάσταση Α στην τελική κατάσταση Β. Η εντροπία του αερίου αυξάνεται.

Έστω ένα αέριο που βρίσκεται αρχικά στην κατάσταση Α και εκτονώνεται ισόθερμα σε θερμοκρασία Τ μέχρι την κατάσταση Β. Το σχήμα 2.29 αποδίδει γραφικά τη μεταβολή του αερίου.

Και εδώ επειδή η διεργασία είναι αντιστρεπτή η μεταβολή της εντροπίας υπολογίζεται όπως πριν.

$$\Delta S_{AB} = \frac{\Delta Q_1}{T} + \frac{\Delta Q_2}{T} + \cdots \frac{\Delta Q_v}{T} =$$

$$= \frac{\Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \cdots + \Delta Q_v}{T}$$

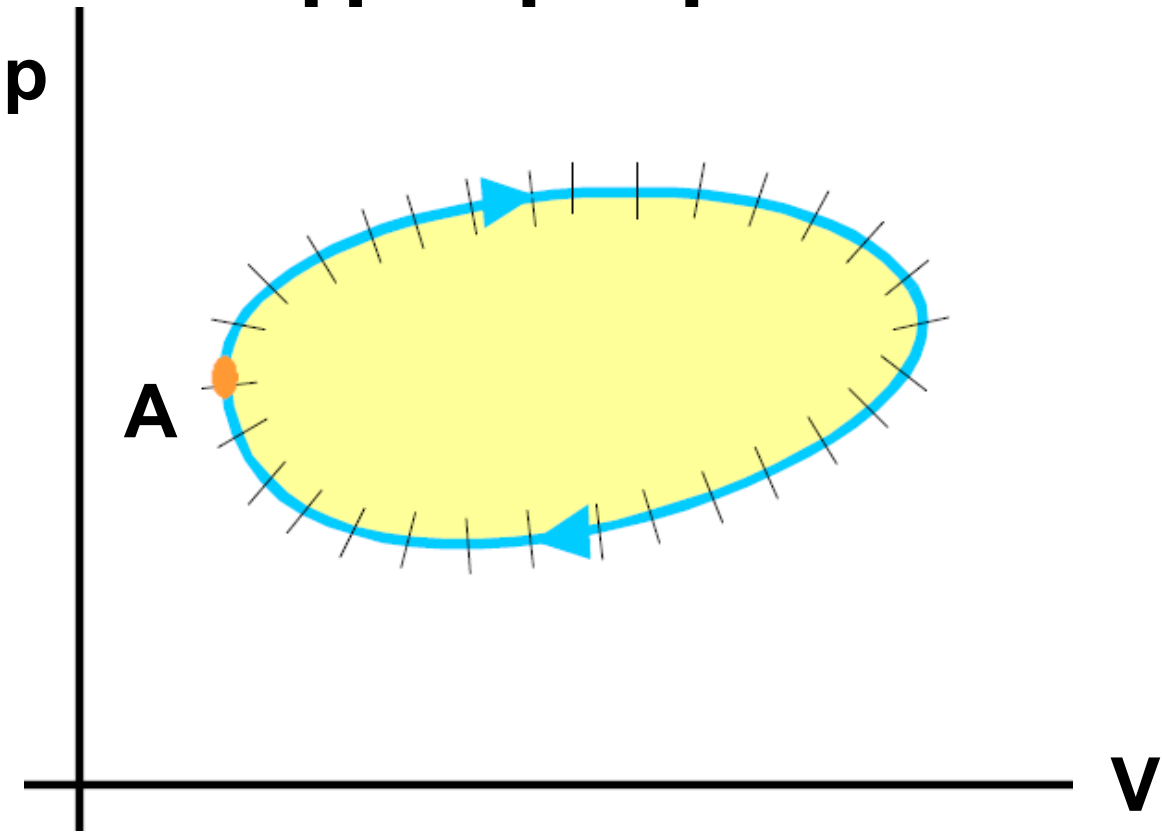
Το άθροισμα στον αριθμητή δίνει το συνολικό ποσό θερμότητας Q που απορρόφησε το αέριο κατά την με-ταβολή. Έτσι, η σχέση γίνεται:

$$\Delta S_{AB} = \frac{Q}{T} \qquad (4.28)$$

Στην ισόθερμη μεταβολή η θερμότητα που ανταλλάσσει το αέριο με το περιβάλλον δίνεται από τη σχέση $Q=nRT\ln\frac{V_B}{V_A}$ και επομένως

$$\Delta S_{AB}=nR\ln\frac{V_B}{V_A} \qquad (4.29)$$

Κυκλική μεταβολή



Σχ. 4.30 Αν χωρίσουμε την κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή σε στοιχειώ-

δεις, τότε το άθροισμα των dS, σε όλη την κυκλική διαδρομή, είναι μηδέν.

Εφ΄ όσον σε μια κυκλική μεταβολή - αντιστρεπτή ή όχι - το σύστημα επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, η εντροπία του συστήματος δε μεταβάλλεται.

$$\Delta S_{o\lambda} = 0$$

Στην περίπτωση που η κυκλική μεταβολή είναι αντιστρεπτή, αν τη χωρίσουμε σε ν στοιχειώδη τμήματα, ώστε σε καθένα από αυτά να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία είναι σταθερή, θα ισχύει :

$$\Delta S_{o\lambda} = \frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} + \ldots\ldots\ldots + \frac{\Delta Q_n}{T_n}$$

όπου ΔQ_1, ΔQ_2, ...,ΔQ_v τα στοιχειώδη ποσά θερμότητας που προσλαμβάνει ή αποδίδει το σύστημα σε κάθε στοιχειώδες τμήμα της μεταβολής.

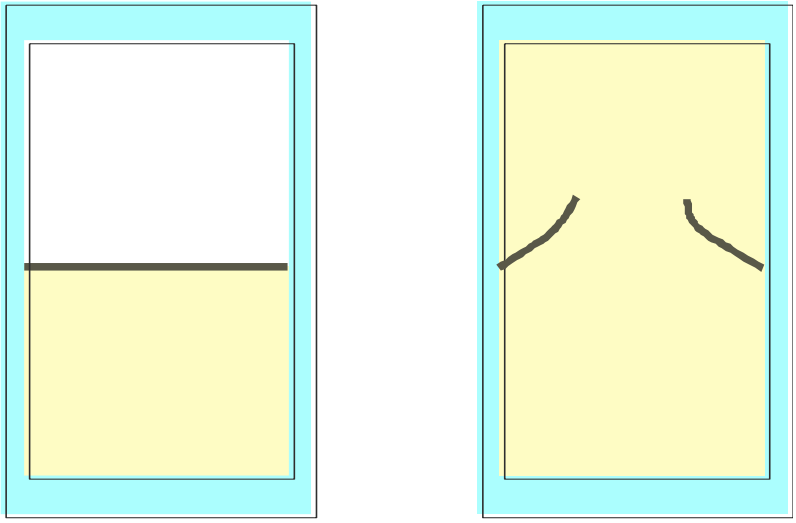
Σε μία κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή λοιπόν ισχύει και

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1}+\frac{\Delta Q_2}{T_2}+.....+\frac{\Delta Q_v}{T_v}=0$$

Ελεύθερη εκτόνωση

Ένα θερμικά μονωμένο δοχείο χωρίζεται με μεμβράνη σε δύο χώρους. Ο ένας περιέχει αέριο σε θερμοκρασία Τ και ο άλλος είναι κενός. Κάποια στιγμή η μεμβράνη σπάει και το αέριο εκτονώνεται και καταλαμβάνει αστραπιαία τον όγκο ολόκληρου του δοχείου (σχ.. 4.31). Η διαδικασία εκτόνωσης είναι πολύ

βίαιη και με κανένα τρόπο δε μπορεί να χαρακτηριστεί αντιστρεπτή. Θα υπολογίσουμε τη μεταβολή της εντροπίας του αερίου.



Σχ. 4.31 Ελεύθερη εκτόνωση αερίου. Όταν διαρραγεί η μεμβράνη η οποία περιορίζει το αέριο, το αέριο εκτονώνεται ελεύθερα με μη αντιστρεπτό τρόπο και καταλαμβάνει όλο τον όγκο του δοχείου.

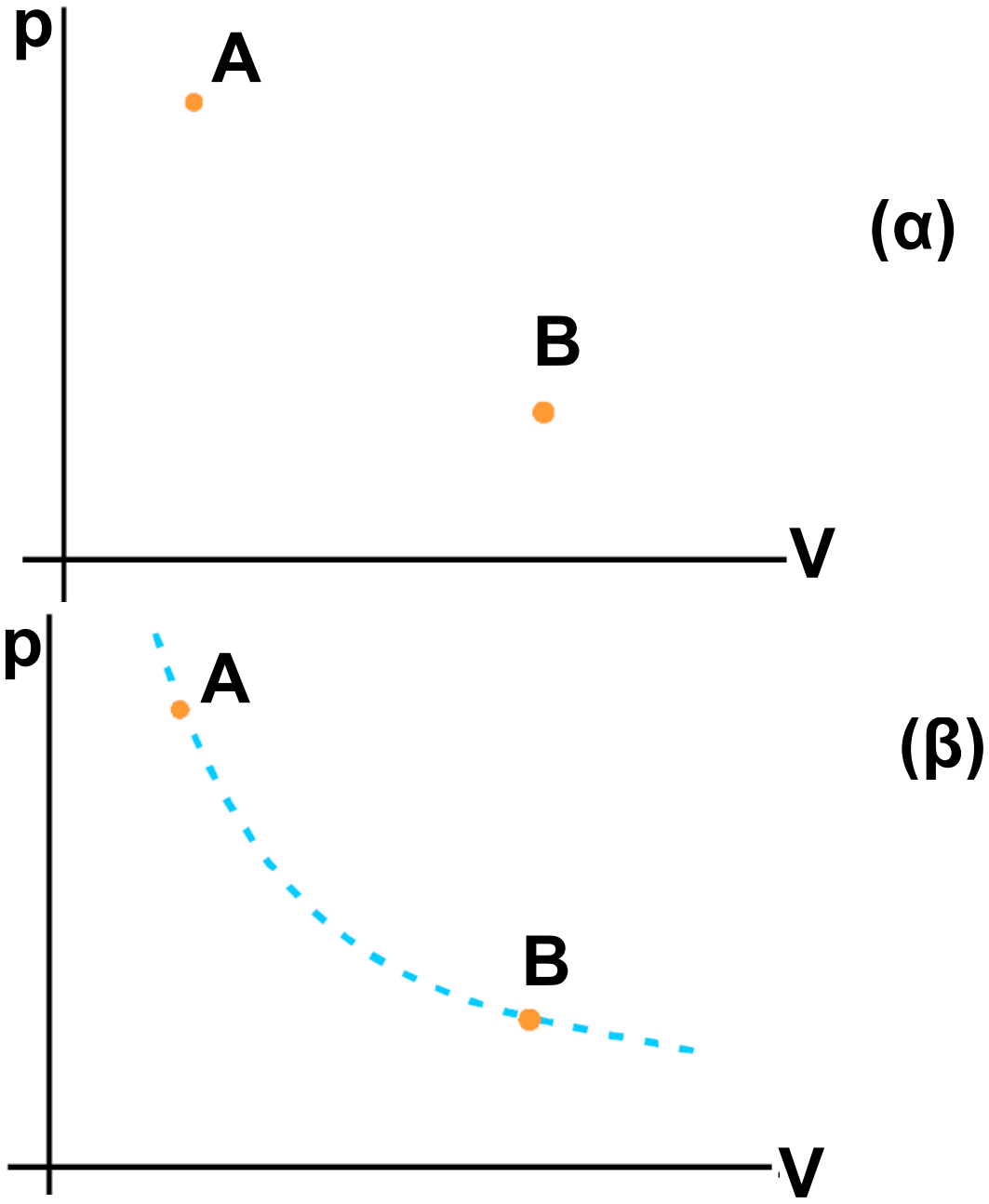
Μη βιαστείτε να πείτε ότι, αφού το αέριο δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον, σύμφωνα με τη

(4.26), θα είναι ΔS=0. Η (4.26) ισχύει μόνο για αντιστρεπτές μεταβολές.

Αφού η μεταβολή είναι μη αντιστρεπτή δεν μπορεί να παρασταθεί γραφικά. Γραφικά μπορούν να απεικονισθούν μόνο η αρχική και τελική κατάσταση Α και Β του αερίου, που είναι καταστάσεις ισορροπίας (σχ. 4.32α). Το έργο που παράγει το αέριο για να καταλάβει τον κενό χώρο είναι μηδενικό και, όπως είπαμε, τα τοιχώματα του δοχείου δεν επιτρέπουν τη μεταφορά θερμότητας.

Από τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο ($Q = \Delta U + W$) προκύπτει ΔU=0. Η εσωτερική ενέργεια του αερίου εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική θερμοκρασία και, αφού η εσωτερική ενέργεια δε μεταβάλλεται, η τελική θερμοκρασία του αερίου είναι ίση με την αρχική Τ.

Επειδή $T_A = T_B = T$ η αρχική κατάσταση (Α) και η τελική κατάσταση (Β), βρίσκονται πάνω στην ίδια ισόθερμη καμπύλη (σχ. 4.32β).



Σχ. 4.32 Η μεταβολή κατά την ελεύθερη εκτόνωση είναι μη αντιστρεπτή. Γραφικά μπορούν να παρασταθούν μόνο η αρχική και τελική κατάσταση του αερίου Α και Β. Επειδή κατά την ελεύθερη εκτόνωση η αρχική θερμοκρασία του αερίου είναι ίση με την τελική, η αρχική και η τελική κατάσταση του αερίου βρίσκονται πάνω στην ίδια ισόθερμη.

Για να υπολογίσουμε τη μεταβολή της εντροπίας θα εκμεταλλευτούμε το ότι αυτή εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση του συστήματος. Μια αντιστρεπτή διαδικασία που έχει τα ίδια άκρα Α και Β είναι η ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή από την κατάσταση Α στη Β.

$$\Delta S_{AB} = \Delta S_{AB}^{\text{ισοθερμη}} = nR \ln \frac{V_B}{V_A}$$

Τέλος, επειδή $V_B > V_A$, η εντροπία του αερίου αυξάνεται ($\Delta S > 0$). Το αποτέλεσμα μπορούσαμε να το προβλέψουμε, αφού στις πραγματικές (μη αντιστρεπτές) μεταβολές η εντροπία ενός απομονωμένου συστήματος αυξάνεται μέχρις ότου το σύστημα έρθει σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

ΣΥΝΟΨΗ

Οι ποσότητες που είναι ικανές για την περιγραφή της κατάστασης θερμοδυναμικού συστήματος, αποτελούν τις ανεξάρτητες θερμοδυναμικές μεταβλητές του συστήματος.

Μια ποσότητα αερίου βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας όταν η πίεση, η πυκνότητα, και η θερμοκρασία του, έχουν την ίδια τιμή σε όλη την έκτασή του.

Μια κατάσταση ισορροπίας παριστάνεται γραφικά με ένα σημείο.

Αντιστρεπτή ονομάζεται η μεταβολή στην οποία υπάρχει η δυνατότητα επαναφοράς του συστήματος και του περιβάλλοντος στην αρχική τους κατάσταση. Οι πραγματικές

μεταβολές είναι μη αντιστρεπτές.

Η μεταβολή στην οποία το σύστημα μεταβαίνει από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική κατάσταση μέσω διαδοχικών καταστάσεων που μπορούν να θεωρηθούν καταστάσεις ισορροπίας είναι αντιστρεπτή. Σε μια τέτοια μεταβολή μπορεί να πραγματοποιηθεί και η αντίστροφη πορεία.

Μια αντιστρεπτή μεταβολή παριστάνεται γραφικά με μια συνεχή γραμμή. Οι μη αντιστρεπτές μεταβολές δε μπορούν να παρασταθούν γραφικά.

Το έργο του αερίου για μια πολύ μικρή μεταβολή του όγκου του είναι $\Delta W=p\Delta V$. Είναι θετικό αν το αέριο εκτονώνεται και αρνητικό αν συ-

μπιέζεται. Το έργο ενός αερίου σε μια αντιστρεπτή μεταβολή είναι ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας από τη γραμμή του διαγράμματος μέχρι τον άξονα V, στο διάγραμμα p-V.

Θερμότητα ονομάζεται η μορφή της ενέργειας που μεταφέρεται από ένα σώμα σε ένα άλλο λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο σωμάτων.

Κάθε σώμα εμπεριέχει ενέργεια, που είναι το άθροισμα των ενεργειών των σωματιδίων που το απαρτίζουν ως αποτέλεσμα της σχετικής τους κίνησης ως προς το κέντρο μάζας του σώματος και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Αυτή την ενέργεια την ονομάζουμε **εσωτερική ενέργεια**.

Η εσωτερική ενέργεια ιδανικού αερίου είναι $U=\frac{3}{2}nRT$.

Η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια ενός θερμοδυναμικού συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και την τελική κατάσταση του συστήματος.

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος : Το ποσό θερμότητας που απορροφά ή αποβάλλει ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα της μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας και του έργου που παράγει ή δαπανά το σύστημα. $Q=\Delta U+W$.

Στην ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή είναι $W=nRT\ln\frac{V_T}{V_\alpha}$.

Στην ισόχωρη αντιστρεπτή μεταβολή $W=0$.

Στην ισοβαρή αντιστρεπτή μεταβολή $W=p\left(V_{\tau}-V_{\alpha}\right)$.

Αδιαβατική ονομάζουμε εκείνη τη μεταβολή κατά την οποία δε συντελείται μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον προς το σύστημα ή αντίστροφα. Στην αδιαβατική μεταβολή $pV^{\gamma}=\sigma\tau\alpha\theta.$

Το έργο στην αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή είναι

$$W=\frac{p_{\tau}V_{\tau}-p_{\alpha}V_{\alpha}}{1-\gamma}$$

Κυκλική ονομάζουμε τη μεταβολή κατά την οποία το σύστημα, μετά από μια διεργασία, επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση

Το έργο σε μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή είναι ίσο με το εμβαδόν που ορίζεται από τη γραμμή του διαγράμματος , στο διάγραμμα p-V.

Το ποσό θερμότητας που απαιτείται για να μεταβληθεί η θερμοκρασία μιας ποσότητας αερίου κατά ΔΤ είναι $Q=n\,C\,\Delta T$.

Η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα με σταθερό όγκο και η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα με σταθερή πίεση συνδέονται με τη σχέση $C_p=C_V+R$.

Οι γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες C_p και C_V για ένα αέριο έχουν σταθερό λόγο.

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

Η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια ενός αερίου δίνεται από την σχέση $\Delta U = nC_V \Delta T$.

Οι θερμικές μηχανές υποβάλλουν ένα αέριο σε κυκλική μεταβολή κατά τη διάρκεια της οποίας

1) Η μηχανή απορροφά θερμότητα (Q_h) από μια δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας T_h
2) Η μηχανή παράγει έργο
3) Η μηχανή αποβάλλει θερμότητα (Q_c) σε μια δεξαμενή χαμηλότερης θερμοκρασίας T_c.

Η απόδοση μιας θερμικής μηχανής είναι $e = \frac{W}{Q_h}$ ή $e = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h}$.

Δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος : Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί θερμική μηχανή που να μετατρέπει

εξ ολοκλήρου τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο ή να κατασκευαστεί μηχανή που να μεταφέρει θερμότητα από ένα ψυχρό σώμα σε ένα θερμότερο χωρίς να δαπανάται ενέργεια για τη λειτουργία της.

Ο Carnot περιέγραψε μια ιδανική κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή, που ονομάστηκε κύκλος Carnot, και απέδειξε ότι μια θερμική μηχανή που θα ακολουθούσε αυτόν τον αντιστρεπτό κύκλο θα είχε την μεγαλύτερη δυνατή απόδοση.

Η μηχανή του Carnot ακολουθεί τον εξής αντιστρεπτό κύκλο:

1) ισόθερμη εκτόνωση
2) αδιαβατική εκτόνωση
3) ισόθερμη συμπίεση
4) αδιαβατική συμπίεση.

Η απόδοση της μηχανής Carnot είναι $e_{Carnot}=1-\frac{T_c}{T_h}$.

Η **μεταβολή της εντροπίας** κατά τη διάρκεια μιας πολύ μικρής αντιστρεπτής διεργασίας ορίζεται ως το πηλίκο του ποσού θερμότητας που απορρόφησε ή απέβαλε το σύστημα προς τη θερμοκρασία του συστήματος.

$$\Delta S=\frac{\Delta Q}{T}$$

Η μεταβολή της εντροπίας ενός συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάστασή του.

Κατά τη διάρκεια πραγματικών μεταβολών η εντροπία ενός μονωμένου συστήματος πάντοτε αυξάνεται μέχρι να επέλθει ισορροπία, οπότε η εντροπία αποκτά τη μέγι-

στη τιμή της.

Η αύξηση της εντροπίας ενός συστήματος οδηγεί στην ελάττωση της ικανότητας του συστήματος να παράγει ωφέλιμο έργο.

Η εντροπία συνδέεται μικροσκοπικά με την αταξία που επικρατεί στα δομικά στοιχεία του συστήματος. Αύξηση της αταξίας συνεπάγεται αύξηση της εντροπίας του συστήματος.

Περιπτώσεις υπολογισμού μεταβολής της εντροπίας

Στην αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή $\Delta S=0$

Στην ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή $\Delta S=\frac{Q}{T}$ ή

$$\Delta S = nR\ln\frac{V_B}{V_A}.$$

Στην κυκλική μεταβολή $\Delta S_{ολ} = 0$

Στην ελεύθερη εκτόνωση

$$\Delta S = nR\ln\frac{V_B}{V_A}.$$

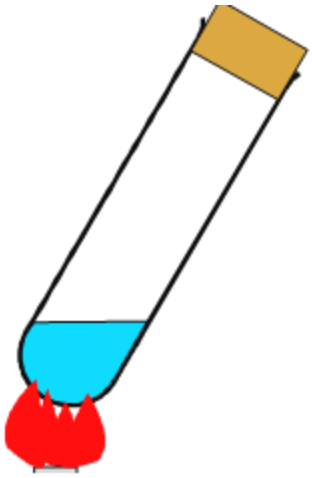
ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

1. Θερμότητα και έργο

Σχ. 4.33

Πάρτε ένα λάστιχο (από αυτά που χρησιμοποιούμε για να κλείνουμε μικρά δέματα) και τεντώστε το μπροστά στο πάνω χείλος σας. Θα διαπιστώσετε ότι είναι λίγο θερμό-τερο από το περιβάλλον. Κρατήστε το έτσι για λίγο και μετά αφήστε το να ξαναπάρει το αρχικό του μήκος. Θα δείτε ότι τώρα φαίνεται λίγο πιο ψυχρό από το περιβάλλον. Πώς εξηγείται αυτό;

2. Η μετατροπή της θερμότητας σε έργο.



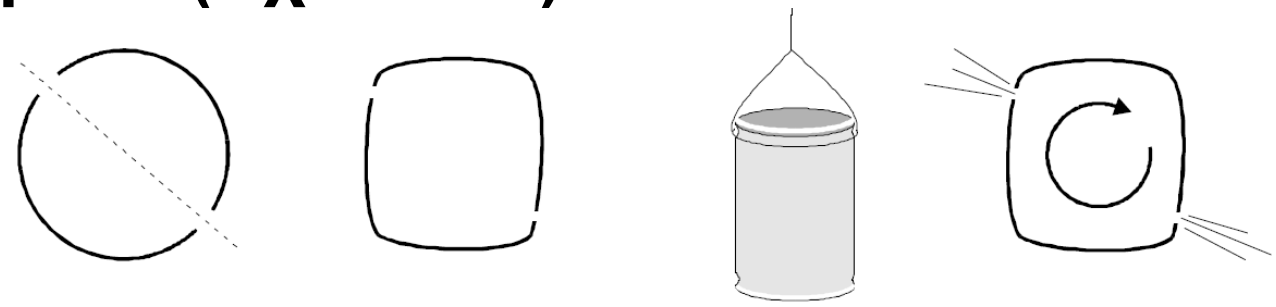
Σχ. 4.34

Σε ένα δοκιμαστικό σωλήνα ρίξτε λίγο νερό και στη συνέχεια κλείστε τον με ένα φελλό. Τοποθετήστε τον όρθιο, με το κλειστό του άκρο προς τα κάτω, στη σιγανή φωτιά ενός καμινέτου. Σε λίγο το νερό θα αρχίσει να βράζει και αν περιμένετε λίγο ο φελλός θα εκτιναχτεί. Περιγράψτε τις ενεργειακές μεταβολές που συμβαίνουν.

Προσοχή : ο σωλήνας δεν πρέπει να σημαδεύει εσάς ή κάποιον άλλο.

3. Κατασκευάστε ένα ατμοστρόβιλο.

Θα χρησιμοποιήσετε ένα κλειστό μεταλλικό κουτάκι από αναψυκτικό. Χωρίς να ανοίξετε το κουτάκι ανοίξετε με ένα καρφί δύο τρύπες σε αντιδιαμετρικά σημεία της κυλινδρικής επιφάνειας, που βρίσκονται στο ίδιο ύψος και αδειάστε το περιεχόμενο (σχ. 4.35α).



(α) (β) (γ) (δ)

Σχ. 2.35 (α) Τομή του κυλινδρικού δοχείου με τις τρύπες. (β) Τομή του δοχείου μετά την παραμόρφωση. Προσέξτε που βρίσκονται οι τρύπες. (γ) Το δοχείο κρέμεται όρθιο, δεμένο με ένα σκοινί. (δ) Ο ατμός φεύγει

από τις τρύπες και το δοχείο στρέφεται.

Πιέστε με τα χέρια την κυρτή επιφάνεια ώστε το κουτί, να αποκτήσει τέσσερις γωνίες. Πρέπει να πιέσετε το κουτάκι με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε τρύπα να βρίσκεται κοντά σε κάποια γωνία (σχ. 4.35β). Βάλτε από τις τρύπες που ανοίξατε περίπου ένα δάχτυλο νερό. Δέστε το κουτάκι από το επάνω μέρος του με σκοινί ώστε να μπορεί να στρέφεται γύρω από τον άξονα του (σχ. 4.35γ). Κρεμάστε το από κάπου και τοποθετήστε ακριβώς από κάτω του ένα γκαζάκι με σιγανή φωτιά. Όταν το νερό αρχίσει να βράζει, ο ατμός θα αρχίσει να φεύγει με ταχύτητα από τις τρύπες και το δοχείο να στρέφεται.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

Ισορροπία – αντιστρεπτές μεταβολές – έργο αερίου

1 Αναφέρετε δύο μη αντιστρεπτές μεταβολές, διαφορετικές από αυτές που αναφέρονται στο βιβλίο.

2 Το έργο ενός αερίου είναι ..... όταν ..... και αρνητικό όταν ..... (Συμπληρώστε τα κενά).

3 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις που αφορούν στο έργο ενός αερίου είναι σωστές;

α) Ένα αέριο παράγει έργο μόνο όταν υποβάλλεται σε αντιστρεπτή μεταβολή.

β) Αν ο όγκος του αερίου δε μεταβάλλεται, το έργο του αερίου είναι μηδέν.

γ) Σε κάθε μεταβολή, αντιστρεπτή ή όχι, το έργο ενός αερίου μπορεί να υπολογιστεί από το διάγραμμα p-V.

δ) Ο υπολογισμός του έργου του αερίου από το διάγραμμα p-V είναι δυνατός μόνο στην περίπτωση της μη αντιστρεπτής μεταβολής.

4 Διαθέτουμε ένα δοχείο χωρισμένο στη μέση με μεμβράνη. Στον ένα χώρο του δοχείου βρίσκεται κάποιο αέριο ενώ ο άλλος είναι κενός. Κάποια στιγμή σπάει η μεμβράνη και το αέριο καταλαμβάνει όλο το χώρο του δοχείου. Το έργο του αερίου είναι θετικό, αρνητικό ή μηδέν; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.

Θερμότητα – Εσωτερική ενέργεια

5 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;

α) Ένα σώμα έχει θερμότητα όταν είναι ζεστό.

β) Εάν φέρουμε σε θερμική επαφή δύο σώματα Α και Β, διαφορετικής θερμοκρασίας ($T_A > T_B$) μεταφέρεται ενέργεια (θερμότητα) από το σώμα με την υψηλότερη θερμοκρασία προς το σώμα με τη χαμηλότερη θερμοκρασία. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της εσωτερικής ενέργειας του σώματος Α και την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του σώματος Β.

γ) Με την τριβή δεν αυξάνεται η θερμότητα των σωμάτων που

τρίβονται αλλά η εσωτερική τους ενέργεια.

δ) Θερμότητα και θερμοκρασία είναι διαφορετικές ονομασίες που αποδίδονται στην ίδια έννοια.

ε) Η εσωτερική ενέργεια ενός αερίου είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του.

6 Επιλέξτε τη σωστή πρόταση.

α) Η εσωτερική ενέργεια ενός αερίου είναι το άθροισμα των δυναμικών ενεργειών των μορίων του.

β) Η εσωτερική ενέργεια ενός αερίου εξαρτάται μόνο από την πίεση στην οποία βρίσκεται.

γ) Ένα θερμοδυναμικό σύστημα μπορεί να μεταβεί από μια αρχική

κατάσταση σε κάποια άλλη με πολλούς τρόπους. Η μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα μεταβαίνει από την αρχική στην τελική κατάσταση.

δ) Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ιδανικού αερίου εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση.

7 Σώμα αφήνεται να ολισθήσει σε πλάγιο επίπεδο. Η εσωτερική ενέργεια του σώματος μεταβάλλεται:

α) αν μεταβληθεί η θερμοκρασία του.

β) διότι μεταβάλλεται η ταχύτητά του.

γ) διότι μεταβάλλεται το ύψος στο οποίο βρίσκεται το σώμα.

Επιλέξτε τη σωστή πρόταση.

8 Δύο διαφορετικές ποσότητες αερίου βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Ποια από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστή;

α) Οι δύο ποσότητες έχουν την ίδια εσωτερική ενέργεια.

β) Μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια έχει η μεγαλύτερη ποσότητα.

γ) Μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια έχει η ποσότητα που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο όγκο.

δ) Μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια έχει το αέριο με τη μεγαλύτερη πίεση.

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος

9 Σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, το ποσό θερμότητας που απορροφά ή αποβάλλει ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα

1) της μεταβολής .... του συστήματος και

2) ..... που παράγει ή δαπανά το σύστημα.

(Συμπληρώστε τις λέξεις που λείπουν).

10 Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος:

α) Αποτελεί μια έκφραση της αρχής διατήρησης της ενέργειας.

β) Αναφέρεται σε μονωμένα θερμοδυναμικά συστήματα.

γ) Ισχύει μόνο στα αέρια.

δ) Ισχύει μόνο στις αντιστρεπτές μεταβολές.

Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

11 Να αντιστοιχίσετε τα στοιχεία της αριστερής στήλης σε στοιχεία της δεξιάς.

(στην επόμενη σελίδα)

1) Ισοβαρής αντιστρεπτή μεταβολή

2) Ισόχωρη αντιστρεπτή μεταβολή

3) Ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή

4) Κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή

5) Αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή

α) $W=nRT\ln\frac{V_\tau}{V_\alpha}$

β) $W=\frac{p_a+p_\tau}{2}\Delta V$

γ) $W=p\Delta V$

δ) $W=0$

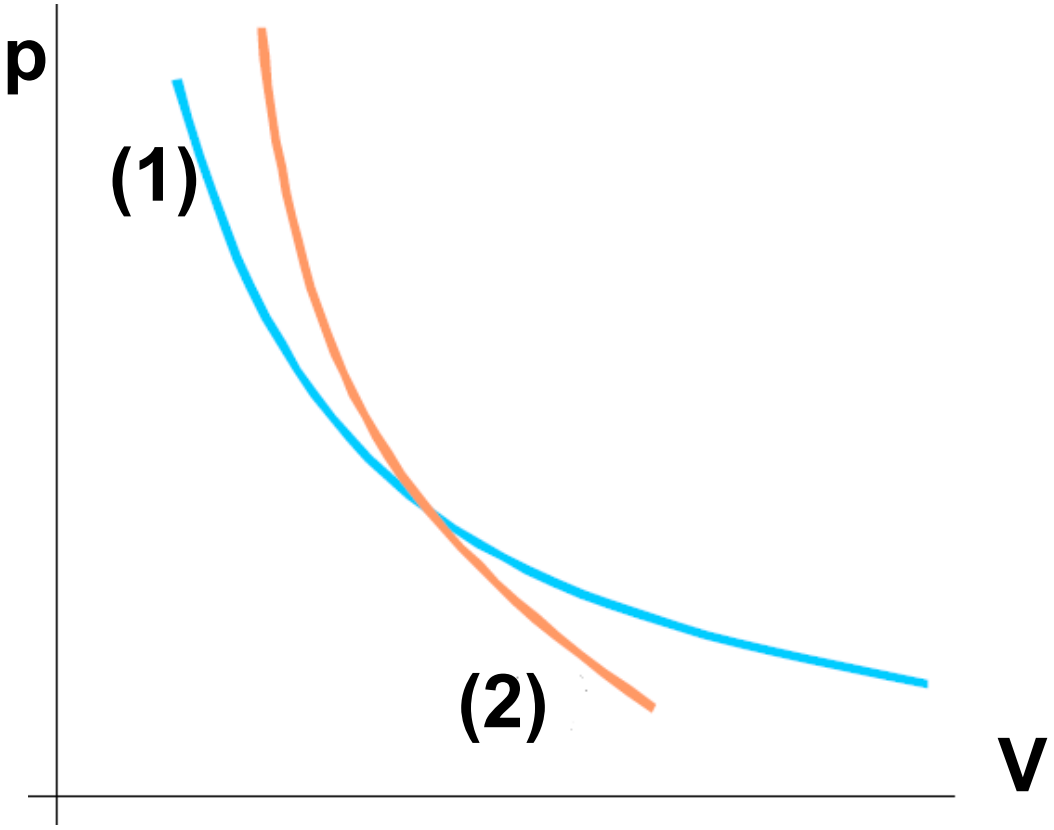
ε) $W=\frac{p_\tau V_\tau - p_\alpha V_\alpha}{1-\gamma}$

στ) Εμβαδόν που περικλείεται από την κλειστή γραμμή στο διάγραμμα p=f(V)

12 Να συμπληρώσετε τα κενά:

Το έργο ενός αερίου είναι θετικό όταν το αέριο ……. Στην ……. αντιστρεπτή εκτόνωση το έργο του αερίου είναι ίσο με την ελάττωση της εσωτε-ρικής του ενέργειας. Στην ……. αντιστρεπτή εκτόνωση το έργο του αερίου είναι ίσο με τη θερμότητα που απορροφά το αέριο.

13

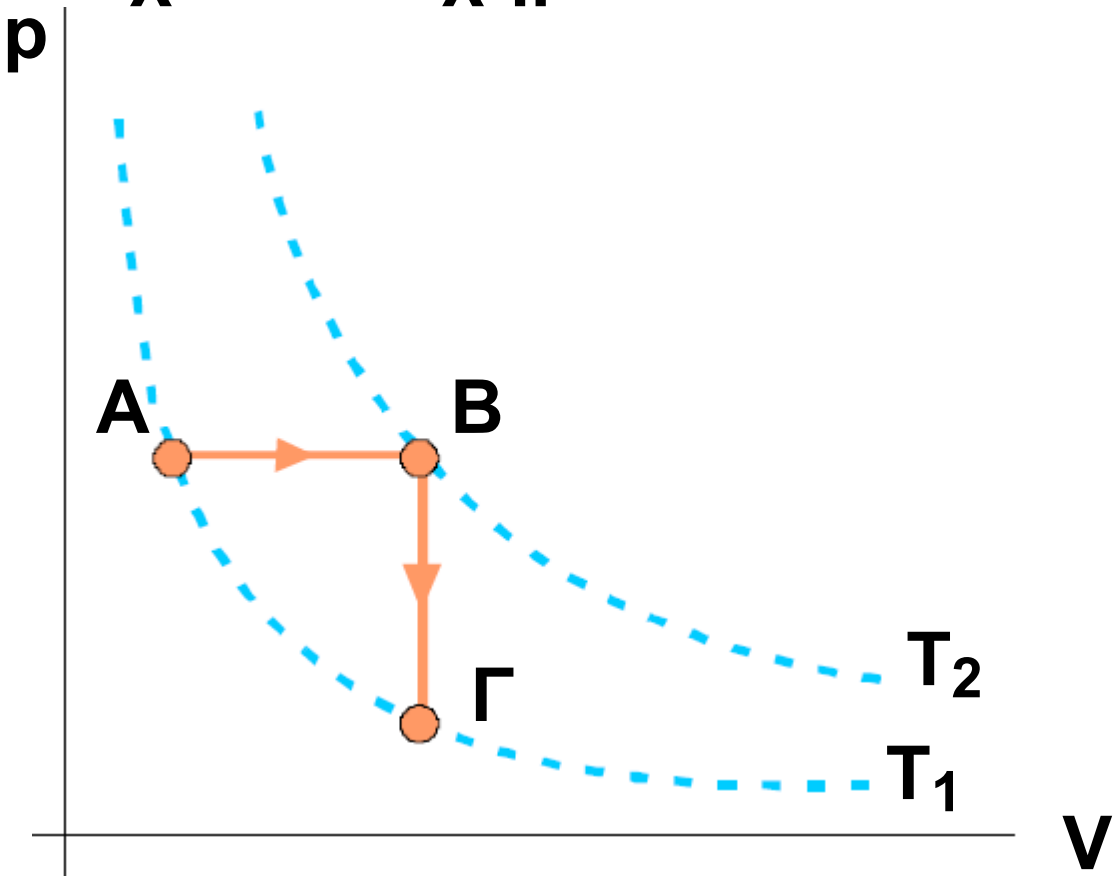


Σχ. 4.36

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.36 παριστάνεται μια ισόθερμη και μια αδιαβατική μεταβολή ορισμένης ποσότητας αερίου. Ποια καμπύλη αντιστοιχεί σε κάθε μεταβολή; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

14 Ένα αέριο, που αρχικά βρίσκεται στην κατάσταση Α, μεταβαί-

νει στην κατάσταση Β με σταθερή πίεση και στη συνέχεια στην κατάσταση Γ, με σταθερό όγκο, όπως δείχνει το σχήμα 4.37.



Σχ. 4.37

1. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου κατά τη διεργασία ΑΒ είναι:
   α) Θετική;
   β) Αρνητική;

γ) Μηδέν;

2. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου κατά τη διεργασία ΒΓ είναι:

α) Θετική;

β) Αρνητική;

γ) Μηδέν;

3. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος κατά τη μετάβασή του από την κατάσταση Α στην Γ είναι:

α) Θετική;

β) Αρνητική;

γ) Μηδέν;

Αιτιολογήστε τις απαντήσεις σας.

15 Επιλέξτε τη σωστή πρόταση.

α) Στην ισόθερμη εκτόνωση αερίου ένα μέρος της θερμότητας

που απορροφά το αέριο μετατρέπεται σε έργο.

β) Στην ισοβαρή εκτόνωση, το έργο του αερίου είναι ίσο με το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο.

γ) Στην ισόχωρη θέρμανση, η θερμότητα που απορροφά το αέριο είναι ίση με τη μεταβολή στην εσωτερική του ενέργεια.

δ) Στην αδιαβατική εκτόνωση το έργο του αερίου είναι ίσο με τη μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας.

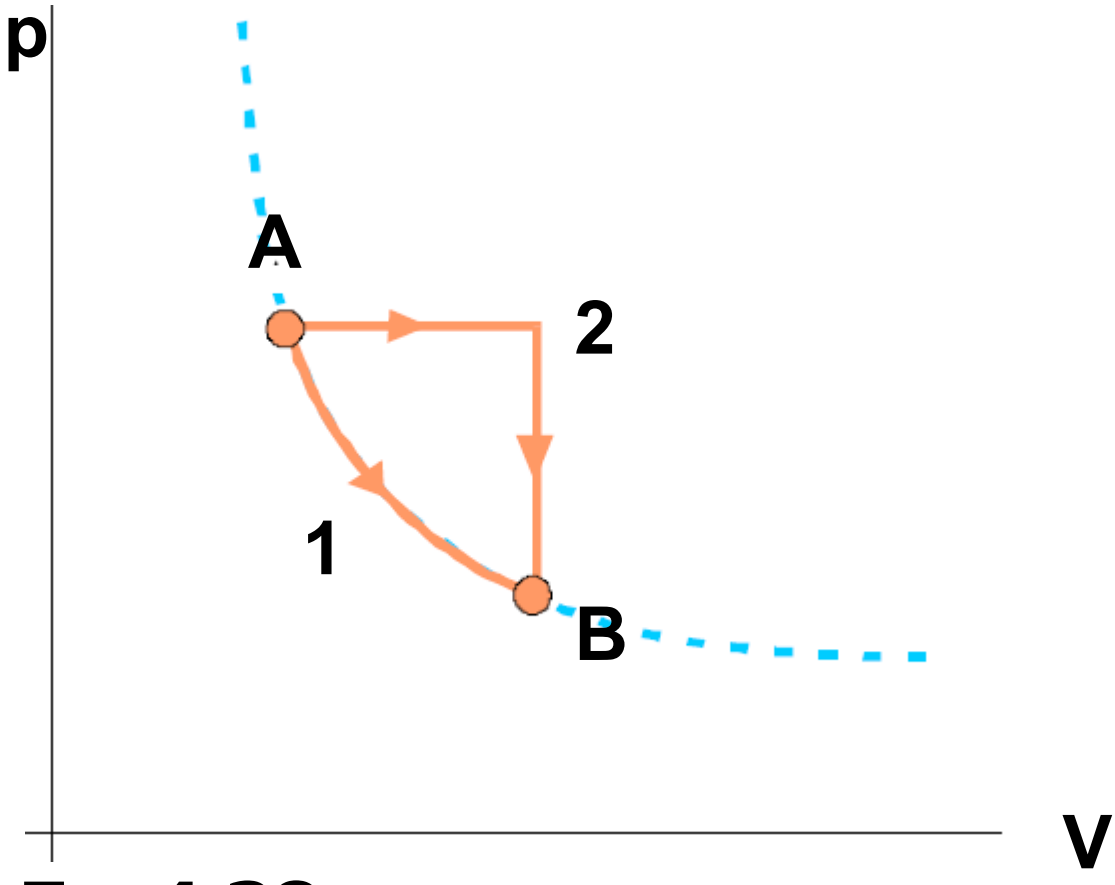
16΄Ένα αέριο, που αρχικά βρίσκεται στην κατάσταση p_A ,V_A , εκτονώνεται μέχρι ο όγκος του να γίνει V_B . Να παρασταθούν σε κοινούς άξονες p-V μια ισόθερμη και μια αδιαβατική που να οδηγούν

από την αρχική κατάσταση στις τελικές καταστάσεις όγκου V_B. Σε ποια από τις δύο μεταβολές το έργο που παράγει το αέριο είναι μεγαλύτερο;

17 Ένα αέριο μπορεί να μεταβεί από μια αρχική κατάσταση Α σε μια τελική κατάσταση Β, με δύο τρόπους.

α) Με μια ισόθερμη μεταβολή και

β) Με μια ισοβαρή εκτόνωση και μια ισόχωρη μεταβολή. Οι δύο τρόποι παριστάνονται στο σχήμα 4.38 με τους αριθμούς 1 και 2.



Σχ. 4.38

Το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο είναι:

α) Μεγαλύτερο κατά τη διαδρομή 1;

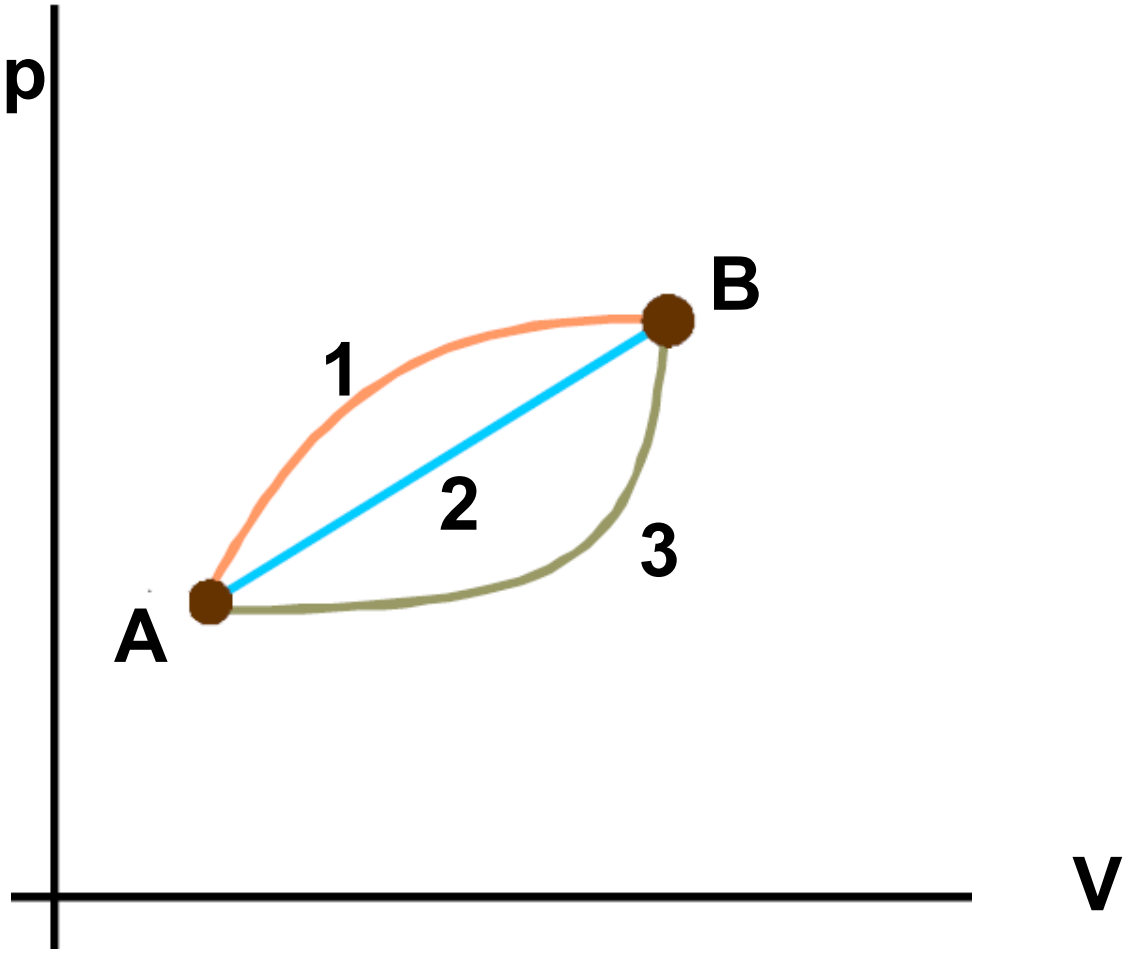
β) Ίδιο και στις δύο περιπτώσεις;

γ) Μεγαλύτερο κατά τη διαδρομή 2;

Ποια από τις προτάσεις αυτές είναι ορθή;

Αιτιολογήστε την απάντησή σας.

18



Σχ. 4.39

Ένα αέριο αρχικά βρίσκεται στην κατάσταση Α. Το αέριο μπορεί να μεταβεί στην κατάσταση Β με μία απο τις μεταβολές που παριστάνονται στο διάγραμμα (σχ.4.39). Να συγκρίνετε για τις τρεις διαδρομές

α) το έργο που παράγει το αέριο,

β) τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου,

γ) το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο.

19 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;

α) Στην ισόχωρη μεταβολή το έργο είναι μηδέν.

β) Στην αδιαβατική εκτόνωση η τελική θερμοκρασία είναι μικρότερη της αρχικής.

γ) Στην αδιαβατική εκτόνωση το έργο που παράγει το αέριο είναι ίσο με την ελάττωση της εσωτερικής του ενέργειας.

δ) Στην ισόθερμη μεταβολή η θερμότητα του ανταλλάσσει το αέριο με το περιβάλλον είναι μηδέν.

ε) Στην κυκλική μεταβολή το έργο του αερίου είναι ίσο με το εμβαδόν που περικλείεται από τη γραμμή στο διάγραμμα p-V.

Γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες αερίων

20 Συμπληρώστε τα κενά:
Η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα εκφράζει το ποσό θερμότητας που πρέπει να προσφερθεί σε ένα mol αερίου ώστε να ανέβει η θερμοκρασία του κατά …… Στα αέρια, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο και η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα …….. ……. Η σχέση που συνδέει τις δύο ειδικές γραμμομοριακές θερμότητες είναι ……

21 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;

α) Στα στερεά και τα υγρά, η ειδική θερμότητα εξαρτάται μόνο από το υλικό τους. Στα αέρια η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα εξαρτάται κάθε φορά από τον τρόπο με τον οποίο θερμαίνεται το αέριο.

β) Ο λόγος C_p/C_V, των γραμμομοριακών ειδικών θερμοτήτων ενός αερίου είναι μεγαλύτερος ή ίσος με τη μονάδα.

γ) Στα ιδανικά αέρια

C_p-C_V =σταθερό

δ) Η σχέση $\Delta U=n\, C_V\, \Delta T$, δίνει τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ενός αερίου σε κάθε μεταβολή, αντιστρεπτή ή μη.

22 Η θερμοκρασία μιας ποσότητας αερίου αυξάνεται. Η εσωτερική ενέργεια του αερίου :

α) αυξάνεται;

β) μειώνεται;

γ) δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή στη θερμοκρασία;

δ) χρειάζονται και άλλα στοιχεία για να απαντήσουμε;

Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

23 Εξηγήστε ποιοτικά γιατί η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα των αερίων υπό σταθερή πίεση είναι μεγαλύτερη από τη γραμμομοριακή ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο.

24 Πού οφείλονται οι αποκλίσεις ανάμεσα στις θεωρητικές προβλέψεις των C_p και C_V για το μοντέλο

του ιδανικού αερίου και στις πειραματικές τιμές τους;

Δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος - Θερμικές μηχανές

25 Θερμική μηχανή είναι,

α) το τρόλεϊ;

β) ο φούρνος;

γ) το ποδήλατο;

δ) ο κινητήρας του αεροπλάνου;

Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

26 Με ποιον τρόπο αποβάλλεται θερμότητα κατά τη λειτουργία της μηχανής του αυτοκινήτου;

27 Ποια από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστή;

α) Κάθε θερμική μηχανή λειτουργεί ανάμεσα σε δύο θερμοκρασίες.

β) Ο συντελεστής απόδοσης μιας θερμικής μηχανής είναι το πηλίκο της ωφέλιμης ενέργειας που μας δίνει η μηχανή προς το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται από τη μηχανή κατά τη λειτουργία της.

γ) Εάν ήταν δυνατό να εξαλειφθούν οι τριβές ο συντελεστής απόδοσης των θερμικών μηχανών θα ήταν ίσος με τη μονάδα.

δ) Η απόδοση των θερμικών μηχανών κυμαίνεται συνήθως ανάμεσα στο 70 με 80%.

28 Οι παρακάτω προτάσεις αναφέρονται στο δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο. Ποιες είναι σωστές;

α) Δεν υπάρχουν περιορισμοί στη μετατροπή της ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη.

β) Η θερμότητα ποτέ δε μετασχηματίζεται πλήρως σε μηχανική ενέργεια.

γ) Κατά την ισόθερμη εκτόνωση, όλο το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο μετατρέπεται σε έργο. Η μεταβολή αυτή αποτελεί μια εξαίρεση στο δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο.

δ) Με τη σημερινή τεχνολογία δεν έχει επιτευχθεί η πλήρης μετατροπή της θερμότητας σε μηχανικό έργο. Ελπίζουμε ότι στο μέλλον θα το κατορθώσουμε.

ε) Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος αποκλείει την ύπαρξη μιας θερμικής μηχανής που έχει συντελεστή απόδοσης ίσο με 1.

στ) Το ψυγείο μεταφέρει θερμότητα από τα ψυχρά σώματα προς τα θερμότερα.

ζ) Η θερμότητα μεταφέρεται πάντα από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σώματα. Για το αντίστροφο απαιτείται δαπάνη ενέργειας.

29 Λέμε ότι κατά τη λειτουργία μιας θερμικής μηχανής το ωφέλιμο έργο είναι πάντα μικρότερο από την ενέργεια που δαπανάται για τη λειτουργία της (θερμότητα). Μήπως αυτό παραβιάζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.

30 Η θάλασσα έχει τεράστια εσωτερική ενέργεια. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή την ενέργεια για την κίνηση των

πλοίων; (Δικαιολογήστε την απάντησή σας).

31 Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις που αφορούν στη μηχανή Carnot είναι σωστές;

α) Η μηχανή που επινόησε και συναρμολόγησε ο Carnot φέρει σήμερα το όνομα του.

β) Ο κύκλος του Carnot αποτελείται από δύο ισόθερμες και δύο ισόχωρες μεταβολές.

γ) Η μηχανή Carnot έχει τη μεγαλύτερη απόδοση γιατί μετατρέπει εξ ολοκλήρου τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο.

δ) Η απόδοση της μηχανής Carnot εξαρτάται μόνο από τις θερμοκρασίες των δεξαμενών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας.

ε) Όταν μικραίνει ο λόγος της θερμοκρασίας της ψυχρής δεξαμενής προς τη θερμοκρασία της θερμής, σε μια μηχανή Carnot, ο συντελεστής απόδοσής της μεγαλώνει.

32 Η απόδοση μιας θερμικής μηχανής δε μπορεί να είναι ..... από την απόδοση μιας μηχανής Carnot που λειτουργεί ανάμεσα στις ίδιες θερμοκρασίες. Ο συντελεστής απόδοσης μιας μηχανής Carnot είναι ..... (Συμπληρώστε τα κενά).

Εντροπία

33 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;

α) Η σχέση $\Delta S=\frac{\Delta Q}{T}$, δίνει τη μεταβολή της εντροπίας μόνο

στις πολύ μικρές αντιστρεπτές διεργασίες.

β) Η μεταβολή της εντροπίας ενός θερμοδυναμικού συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση του συστήματος και όχι από τον τρόπο που έγινε η μεταβολή.

γ) Στη διάρκεια μιας πραγματικής (μη αντιστρεπτής) διεργασίας η εντροπία ενός μονωμένου θερμοδυναμικού συστήματος μειώνεται.

δ) Σε ένα μονωμένο σύστημα σε ισορροπία η εντροπία έχει τη μέγιστη τιμή της.

34 Ένα θερμοδυναμικό σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση Α στην κατάσταση Β. Η εντροπία του συστήματος στην κατάσταση Β

είναι μεγαλύτερη από την εντροπία του στην κατάσταση Α ($S_B > S_A$). Επιλέξτε τις σωστές απαντήσεις στα ερωτήματα Α, Β, Γ.

Α. Η αταξία των δομικών στοιχείων του συστήματος είναι
α) μεγαλύτερη στην κατάσταση Β.
β) μικρότερη στην κατάσταση Β.
γ) δεν έχουμε επαρκή στοιχεία για να απαντήσουμε.

Β. Η ικανότητα του συστήματος να παράγει ωφέλιμο έργο
α) αυξήθηκε με τη μετάβαση του συστήματος στην κατάσταση Β,
β) μειώθηκε,
γ) δεν έχουμε επαρκή στοιχεία για να απαντήσουμε.

Γ. Το σύστημα κατά τη διάρκεια της μεταβολής
α) απορρόφησε θερμότητα,

β) απέβαλε θερμότητα στο περιβάλλον,

γ) δεν έχουμε επαρκή στοιχεία για να απαντήσουμε.

35 Ένα βλήμα σφηνώνεται σε τοίχο.

α) Η κινητική ενέργεια του βλήματος μετατράπηκε σε δυναμική.

β) Μετά την κρούση η κινητική ενέργεια του βλήματος μηδενίστηκε. Η εσωτερική ενέργεια του βλήματος και της περιοχής του τοίχου όπου σφηνώθηκε αυξήθηκε.

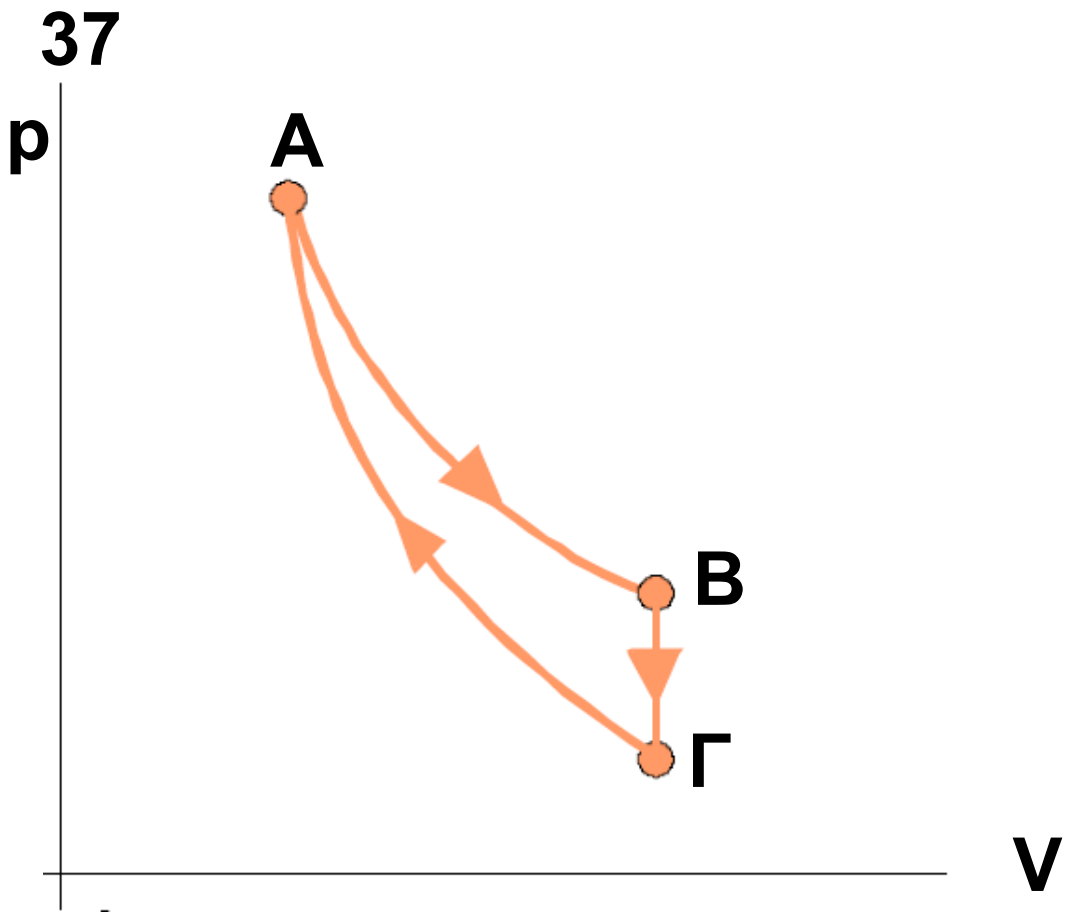
γ) Η εντροπία του συστήματος βλήμα - τοίχος μειώθηκε.

δ) Η ικανότητα του συστήματος για παραγωγή ωφέλιμου έργου μειώθηκε.

Ποιες από τις προηγούμενες προτάσεις είναι σωστές;

36 Αν βάλουμε ένα ποτήρι νερό στην κατάψυξη, το νερό θα παγώσει. Η αταξία των μορίων του νερού σ΄ αυτή την κατάσταση (πάγος) έχει μειωθεί σε σχέση με εκείνη που υπήρχε όταν το νερό βρισκόταν στην υγρή κατάσταση. Επομένως η εντροπία του νερού μειώθηκε. Μήπως αυτή η περίπτωση αποτελεί εξαίρεση στην γενικότερη τάση να αυξάνεται η εντροπία; Δικαιολογήστε την άποψή σας.

37



Σχ. 4.40

Στο σχήμα 4.40 παριστάνεται η κυκλική μεταβολή που υφίσταται ορισμένη ποσότητα αερίου. Η μεταβολή ΑΒ είναι ισόθερμη, η ΒΓ ισόχωρη και η ΓΑ αδιαβατική. Κατά τη μεταβολή ΒΓ, η εντροπία του αερίου

α) αυξάνεται;

β) μειώνεται;

γ) παραμένει σταθερή;
Αιτιολογήστε την απάντησή σας.

38 Να αντιστοιχίσετε τα μεγέθη που βρίσκονται στην αριστερή στη-λη με τις μονάδες μέτρησης στη δεξιά στήλη

1)	W	α)	J
2)	S	β)	m^3
3)	U	γ)	N
4)	p	δ)	N/m^2
5)	V	ε)	J/K

39 Να αποδοθεί ο κύκλος Carnot σε διάγραμμα με άξονες την εντροπία και την απόλυτη θερμοκρασία του αερίου (S-T).

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Έργο αερίου – πρώτος θερμοδυναμικός νόμος

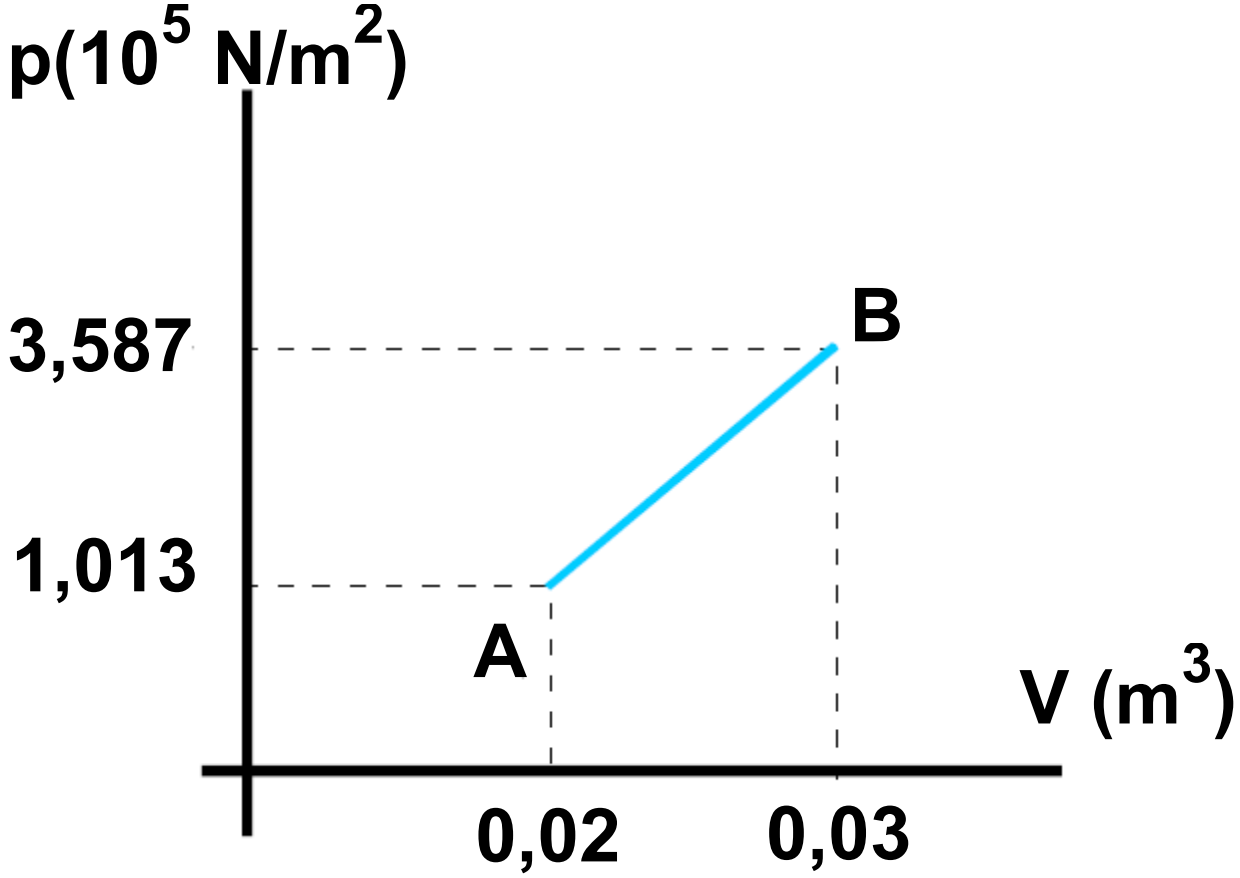
40 Αέριο με όγκο 0,004 m^3 θερμαίνεται με σταθερή πίεση p=1,2 atm μέχρι ο όγκος του να γίνει 0,006 m^3. Υπολογίστε το έργο που παράγει το αέριο. Δίνεται 1atm=1,013×10^5 N/m^2.
[Απ : 243,1 J]

41 Δύο mol αερίου θερμαίνονται από τους 27°C στους 127°C. Η θέρμανση του αερίου γίνεται με σταθερή πίεση. Υπολογίστε το έργο που παράγει το αέριο. Δίνεται R=8,314 J/(mol K). [Απ : 1663 J]

42 Δύο mol αερίου βρίσκονται σε θερμοκρασία 27°C. Διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία συμπιέ-

ζουμε το αέριο ώστε η πίεσή του να διπλασιαστεί. Να υπολογιστεί το έργο του αερίου.
Δίνονται R=8,314 J/(mol K), ln2=0,6931. [Απ : -3458 J]

43



Σχ. 4.41

Το διάγραμμα (σχ. 4.41) παριστάνει τη μεταβολή ενός αερίου από την κατάσταση Α στην κατάσταση Β.

Υπολογίστε το έργο του αερίου κατά τη μεταβολή αυτή.
[Απ : 4600 J]

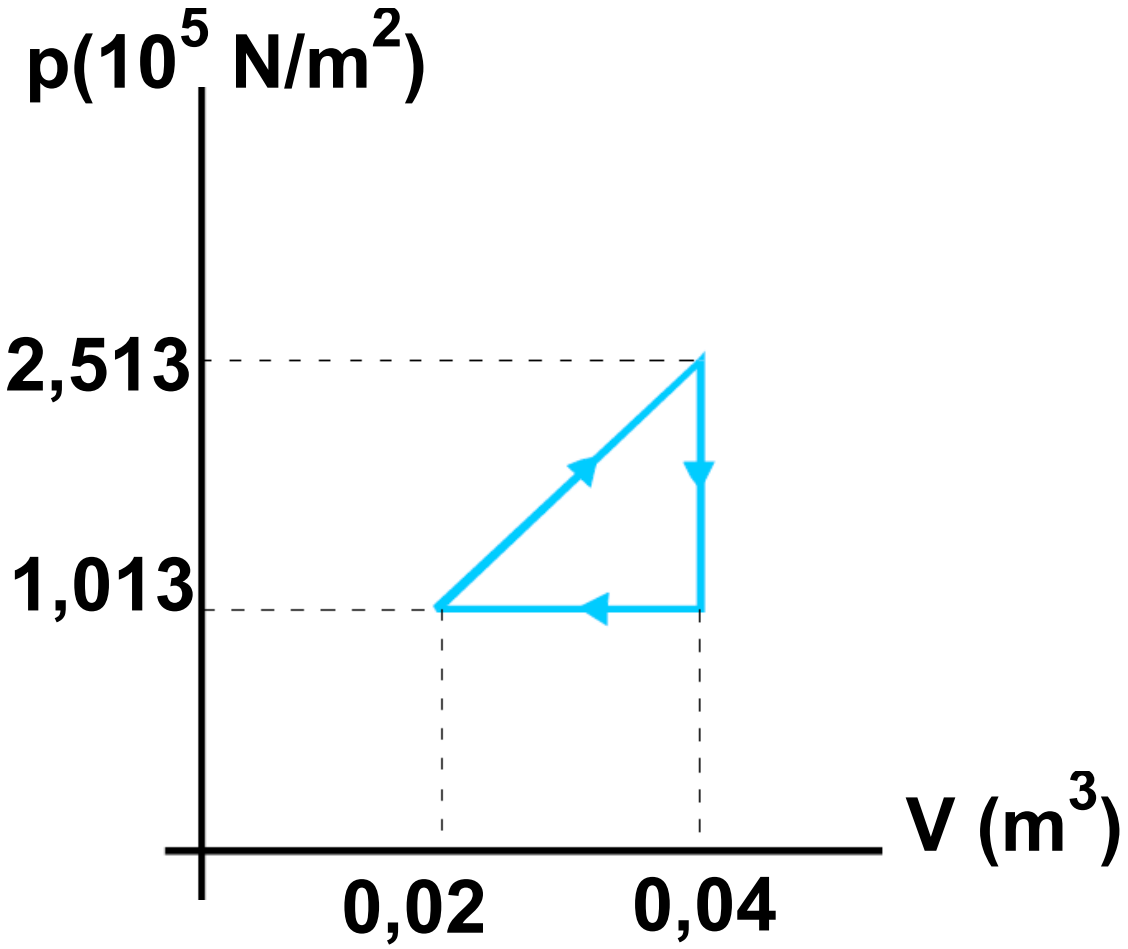
44 Ποσότητα αερίου καταλαμβά-νει όγκο 10 L και έχει πίεση 1 atm. Το αέριο θερμαίνεται ισόθερμα μέχρι να διπλασιαστεί ο όγκος του. Υπολογίστε το ποσό θερμότητας που απορρόφησε το αέριο. Δίνονται $1L=10^{-3}\,m^3$, $1atm=1{,}013\times10^5 N/m^2$, $\ln 2=0{,}6931$. [Απ : Q=702,1 J]

45 Αέριο βρίσκεται μέσα σε δο-χείο που κλείνεται με έμβολο. Το αέριο καταλαμβάνει όγκο $V_1=0{,}008\,m^3$, έχει θερμοκρασία $T_1=300$ K και πίεση $p_1=1{,}013\times10^5\ N/m^2$. Θερμαί-νουμε το αέριο υπό σταθερή πίεση, μέχρι η θερμοκρασία του να γίνει $T_2=375$ K.

α) Υπολογίστε το έργο του αερίου.
β) Αν κατά τη θέρμανσή του το αέριο απορρόφησε θερμότητα Q=709,1 J υπολογίστε τη μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας.
[Απ : W=202,6 J, ΔU=506,5 J]

46 0,2 mol αερίου συμπιέζονται ισόθερμα σε θερμοκρασία θ=27°C, ώστε ο όγκος του να ελαττωθεί στο μισό. Υπολογίστε το ποσό θερμότητας που αντάλλαξε το αέριο με το περιβάλλον.
Δίνονται R=8,314 J/(mol K), ln2=0,6931. [Απ : -345,8J]

47 Αέριο εκτελεί την κυκλική μεταβολή του σχήματος 4.42. Υπολογίστε το καθαρό ποσό θερμότητας που απορρόφησε.



Σχ. 4.42

[Απ : 1500J]

Γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες ιδανικού αερίου

48 Ιδανικό αέριο βρίσκεται σε δοχείο σταθερού όγκου 0,004 m^3. Το αέριο θερμαίνεται ώστε η πίεσή του από $1,013\times10^5 N/m^2$ να γίνει

$3,213\times10^5 N/m^2$. Να υπολογιστεί το ποσό θερμότητας που απορρόφησε το αέριο. Δίνεται ότι στα ιδανικά αέρια ισχύει $C_V=3/2\ R$.

[Απ : 1320J]

49 Αέριο θερμαίνεται με σταθερή πίεση $1,013\times10^5 N/m^2$, ώστε ο όγκος του από $0,005\ m^3$ να γίνει $0,007\ m^3$. Να υπολογιστεί το ποσό θερμότητας που απορρόφησε το αέριο. Δίνεται $C_V=3/2\ R$. [Απ : 506,5 J]

50 Να υπολογιστεί η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας ορισμένης ποσότητας αερίου όταν το θερμάνουμε με σταθερή πίεση προσφέροντάς του θερμότητα Q=10cal. Για το αέριο ισχύει γ = 1.41.
Δίνεται 1cal=4,18J.

[Απ : 29,64 J]

Θερμικές μηχανές - Κύκλος Carnot

51 Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ένα εργοστάσιο χρησιμοποιεί λιγνίτη. Από την καύση του λιγνίτη το εργοστάσιο τροφοδοτείται με θερμότητα με ρυθμό 900 MW και παράγει 300 MW μηχανικής ισχύος που, στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ. Υπολογίστε την απόδοση του εργοστασίου κατά τη μετατροπή της θερμότητας σε μηχανική ενέργεια. [Απ : 33,3 %]

52 Θερμική μηχανή παράγει σε κάθε κύκλο λειτουργίας της μηχανι-κό έργο 200 J. Η απόδοση της μηχανής είναι 25%. Υπολογίστε το ποσό θερμότητας που απορροφά, καθώς και το ποσό θερμότητας που αποβάλλει η μηχανή σε κάθε κύκλο της. [Απ : 800 J, 600 J]

53 Οι βενζινομηχανές στα αυτοκίνητα χρησιμοποιούν τη θερμότητα που παράγεται από την καύση της βενζίνης. Μέρος της θερμότητας αυτής τη μετατρέπουν σε μηχανικό έργο και την υπόλοιπη την αποβάλλουν στην ατμόσφαιρα. Η απόδοση μιας τέτοιας μηχανής είναι περίπου 20%. Η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται με την καύση της βενζίνης είναι περίπου 2100 ^{o}C. Αν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι 23^{o}C, υπολογίστε τη θεωρητικά μέγιστη απόδοση που μπορεί να έχει μία τέτοια μηχανή. (Θα θεωρήσετε ότι τα καυσαέρια αποβάλλονται στη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας).

[Απ : 87%]

54 Μια μηχανή Carnot υποβάλλει σε κυκλική μεταβολή 5 mol ιδανικού αερίου. Η θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής είναι 500 K και της ψυχρής 300 K. Κατά την ισόθερμη εκτόνωσή του ο όγκος του αερίου από $V_A=3\times10^{-2}m^3$ γίνεται $V_B=6\times10^{-2}$ m^3. Υπολογίστε:

α) Το συντελεστή απόδοσης της μηχανής.

β) Το έργο που παράγει η μηχανή σε κάθε κύκλο.

Δίνονται R=8,314 J/(mol K), ln2=0,693. [Απ : 0,4, 5762 J]

Εντροπία

55 Ποσότητα αερίου καταλαμβάνει όγκο 4L, με πίεση 2atm, και θερμοκρασία 400 K. Το αέριο ψύχεται με σταθερό όγκο μέχρι η πίεσή του να γίνει 0,8 atm και στη συνέχεια θερμαίνεται με σταθερή πίεση μέχρι ο όγκος του να γίνει 10 L.

α) Να αποδοθούν οι μεταβολές αυτές σε διάγραμμα p-V.

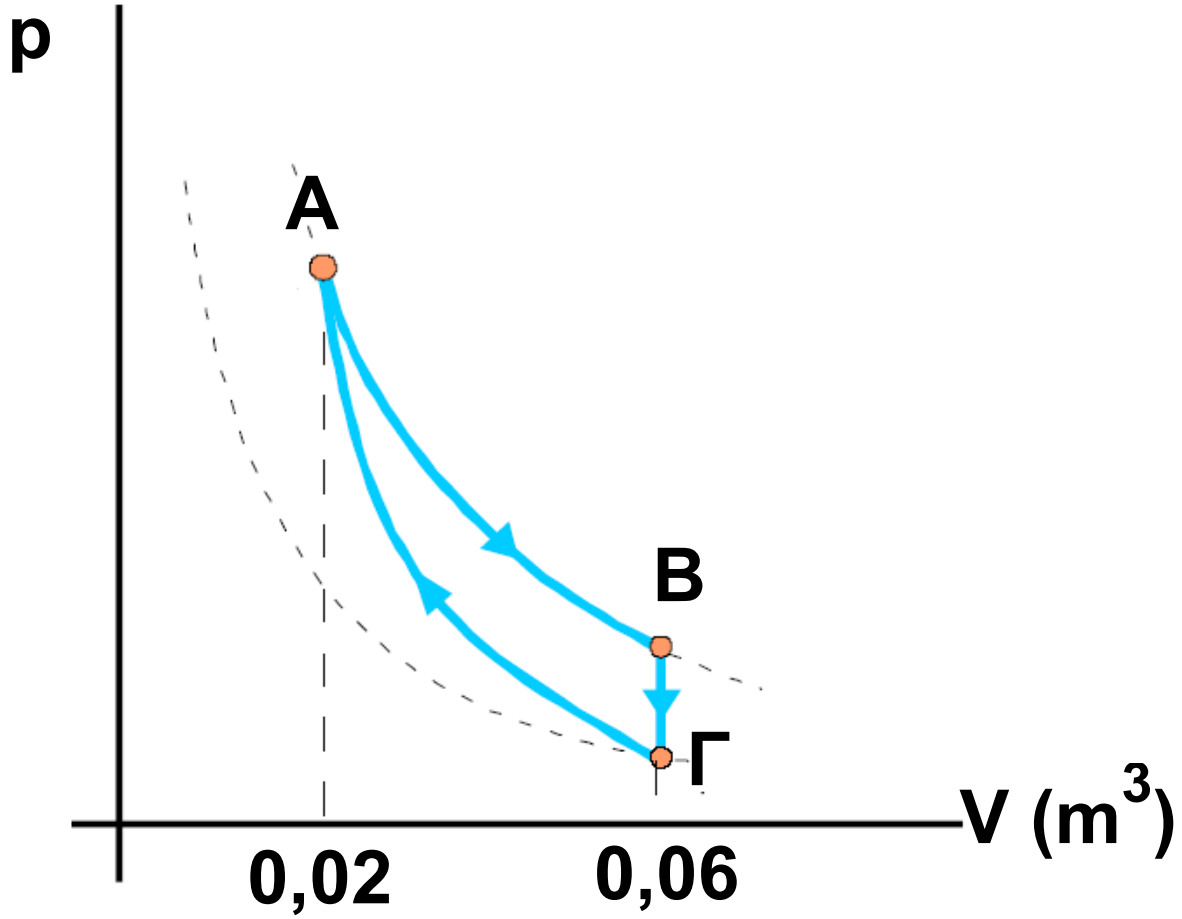
β) Να υπολογιστεί η τελική θερμοκρασία του αερίου.

γ) Να υπολογιστεί η μεταβολή της εντροπίας του.

Δίνονται 1L = 10^{-3} m^3 και 1atm = $1{,}013\times10^5 N/m^2$, ln2,5=0,9163.

[Απ : 400 K, ΔS=1,86 J/K]

56



Σχ. 4.43

Ποσότητα αερίου n=0,2 mol υφίσταται την κυκλική μεταβολή του σχήματος 4.43, όπου ΑΒ ισόθερμη εκτόνωση, ΒΓ ισόχωρη ψύξη, ΓΑ αδιαβατική συμπίεση. Να υπολογιστεί η μεταβολή της εντροπίας του

αερίου στις επιμέρους μεταβολές ΑΒ, ΒΓ και ΓΑ.
Δίνεται R=8,314 J/(mol K), ln3=1,0986.

[Απ : $\Delta S_{AB} = 1,83$ J/ K, $\Delta S_{B\Gamma} = -1,83$ J/ K, $\Delta S_{\Gamma A}=0$]

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

57 Ποσότητα αερίου βρίσκεται μέσα σε κύλινδρο και καταλαμβάνει όγκο V. Το αέριο εκτονώνεται μέχρι να διπλασιαστεί ο όγκος του. Η εκτόνωση του αερίου μπορεί να γίνει με ισόθερμη ή με αδιαβατική ή με ισοβαρή μεταβολή.

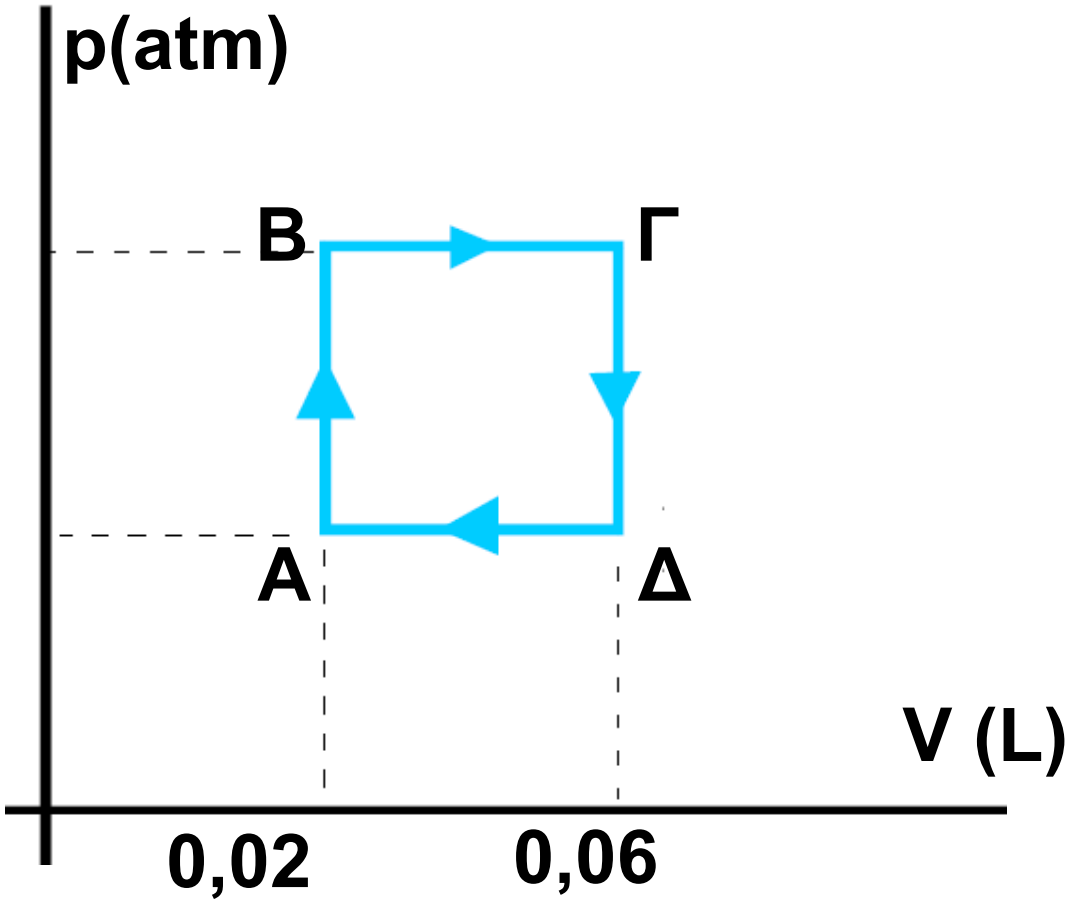
α) Να παρασταθούν γραφικά σε διάγραμμα p-V οι τρεις μεταβολές που μπορούν να οδηγήσουν το αέριο από την αρχική του κατάσταση στην τελική.

β) Σε ποια από τις τρεις μεταβολές :

i) Το αέριο παράγει περισσότερο έργο;

ii) Το αέριο απορροφά το μικρότερο ποσό θερμότητας;

58



Σχ. 4.44

Το σχήμα 4.44 δείχνει τη γραφική παράσταση της σχέσης p=f(V), όπου p, V η πίεση και ο όγκος ενός mol ιδανικού αερίου. Να γίνει για την ίδια κυκλική μεταβολή η γραφική παράσταση των σχέσεων p=f(T) και V=f(T), όπου T η απόλυτη θερ-

μοκρασία, και να υπολογιστεί το έργο που παράγεται από το αέριο κατά την κυκλική μεταβολή ΑΒΓΔ. Δίνονται $1atm=1,013\times10^5\ N/m^2$, $1\ L=10^{-3}\ m^3$.

[Απ : 2269 J]

59 Κυλινδρικό δοχείο έχει τον άξονά του κατακόρυφο και κλείνε-ται, στο επάνω μέρος του, με έμβολο βάρους w και εμβαδού Α, έτσι ώστε το αέριο που περιέχει να έχει όγκο V. Το αέριο θερμαίνεται έτσι ώστε η θερμοκρασία του, από θ, να γίνει θ΄. Να υπολογιστεί το έργο που παράγεται από το αέριο. Η θέρ-μανση γίνεται σε χώρο όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι $p_{ατ}$.

[Απ : $W=V\left(p_{ατ}+\frac{w}{A}\right)\times\left(\frac{\theta'-\theta}{273+\theta}\right)$]

60 Κυλινδρικό δοχείο με αδιαβατικά τοιχώματα έχει τον άξονά του κατακόρυφο και κλείνεται με έμβολο πάνω στο οποίο βρίσκονται διάφορα σταθμά. Στο δοχείο περιέχεται $V_1=1m^3$ υδρογόνου, σε θερμοκρασία $\theta_1=27^oC$ και πίεση $p_1=125\times10^5\ N/m^2$. Αφαιρώντας σταθμά κάνουμε την πίεση ίση με $p_2=10^5 N/m^2$ (ατμοσφαιρική πίεση). Να υπολογιστούν :

α) Ο όγκος και η θερμοκρασία του αερίου στην τελική κατάσταση.

β) Το έργο που παράχθηκε κατά την εκτόνωσή του.

Θεωρήστε κατά προσέγγιση $\gamma=3/2$.

[Απ : α) $25m^3$, $T=60K$,

β) $W=2\times10^7 J$]

61 Μια ποσότητα ιδανικού αερίου που αποτελείται από $N=1,5\times10^{24}$ μόρια, βρίσκεται σε θερμοκρασία $\theta_A=27^oC$. Θερμαίνουμε το αέριο μέχρι η θερμοκρασία του να γίνει $\theta_B=127^oC$ i)με σταθερό όγκο και ii) με σταθερή πίεση. Να υπολογιστούν σε κάθε περίπτωση:

α) Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου.
β) Το έργο που παράγει το αέριο.
γ) Η θερμότητα που προσφέρουμε στο αέριο.

Δίνονται: $R=8,314$ J/(mol K), $N_A=6,023\times10^{23}$ μόρια/mol.

[Απ : i) 3106,2 J, 0, 3106,2 J
ii) 3106,2 J, 2070,8 J, 5177 J]

62 Η θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής σε μια μηχανή Carnot

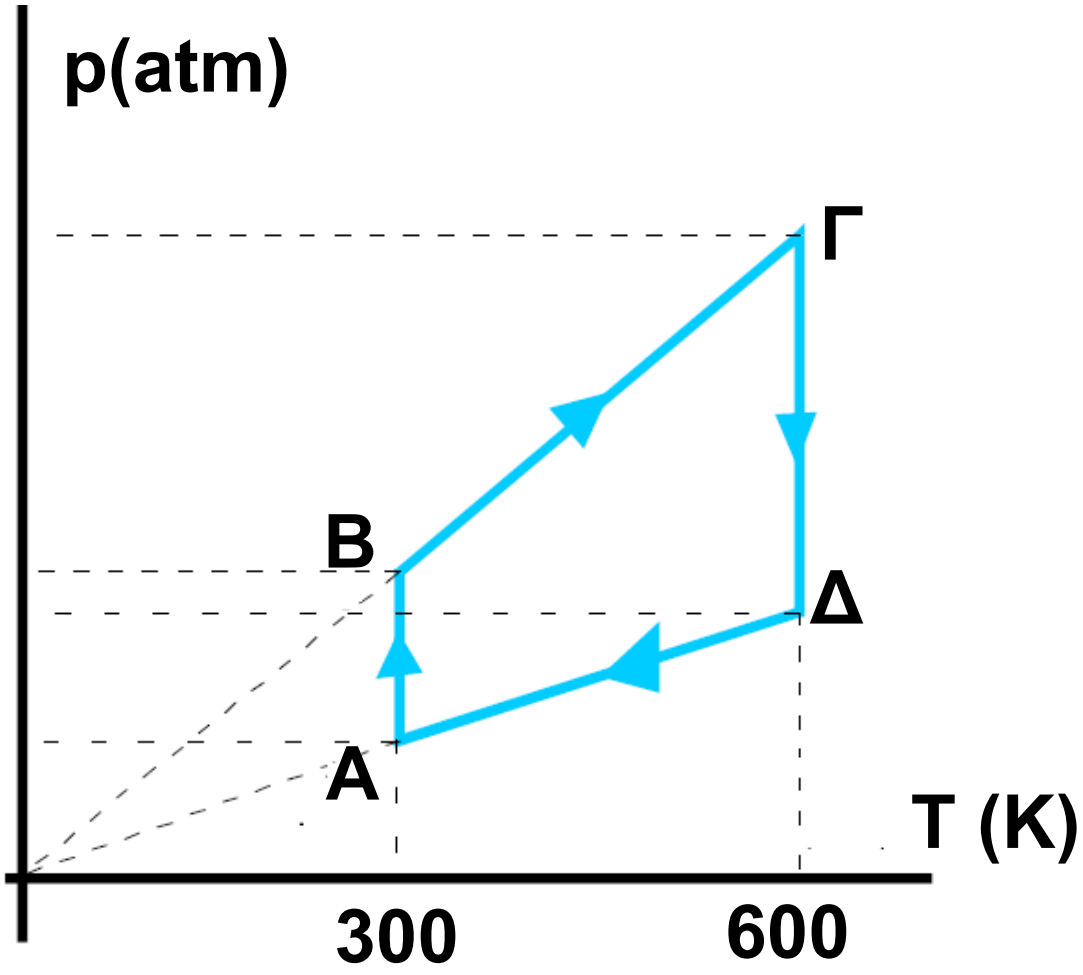
είναι $\theta_1=127^oC$ και της ψυχρής $\theta_2=27^oC$.

α) Να υπολογιστεί ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής.

β) Αν η μηχανή αποδίδει ισχύ P=10HP να υπολογιστεί το ποσό της θερμότητας που απορροφά από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας σε χρόνο t=1h. Δίνεται 1HP=745,7W.

[Απ : 0,25, 29,828 kWh]

63



Σχ. 4.45

Ιδανική θερμική μηχανή λειτουργεί με τον αντιστρεπτό κύκλο του σχήματος 4.45.

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 $n=0,975mol$, $C_V=3R/2$, $R=8,314J/(mol\ K)=0,082\ L\ atm/(mol\ K)$, $\ln 2,5=0,9163$.

[Απ : β) 2228,3J, γ) 0,275]

64΄Ένα ιδανικό αέριο εκτελεί την κυκλική μεταβολή ΑΒΓΔΑ όπου ΑΒ ισόθερμη εκτόνωση, ΒΓ ισόχωρη ψύξη, ΓΔ ισοβαρή ψύξη, ΔΑ ισόχωρη θέρμανση. Αν είναι $p_A=6atm$, $V_A=22,4L$, $T_A=546K$, $V_B=3V_A$, $T_Γ = 273K$.

α) Να αποδοθεί γραφικά η παραπάνω μεταβολή σε άξονες p-V, p-T, V-T.

β) Να υπολογιστεί το έργο που παράγεται από το αέριο κατά τη διάρκεια αυτής της μεταβολής.

Δίνονται ln3=1,1 1L atm = 101J.

[Απ : 10407 J]

65΄Ενα mol ιδανικού αερίου φέρεται από την κατάσταση Α (p_0 V_0) στην κατάσταση Β($2p_0$, $2V_0$) με δυο τρόπους:

α) Με μια ισόθερμη και μια ισοβαρή μεταβολή.

β) Με μια ισόθερμη και με μια ισόχωρη μεταβολή.

Να υπολογιστούν τα Q και W σε κάθε περίπτωση. Δίνονται τα p_0, V_0, ln2=0,6931, C_V=3R/2.

[Απ : α) $6,8p_0V_0$, $2,3\ p_0V_0$

β) $5,2p_0V_0$, $0,7p_0V_0$]

66 Η κυκλική μεταβολή του ιδα-

νικού αερίου μιας θερμικής μηχανής αποτελείται από:
α) μια ισόχωρη θέρμανση μέχρι να τριπλασιαστεί η πίεσή του.
β) μια ισοβαρή εκτόνωση μέχρι να τριπλασιαστεί ο όγκος του,
γ) μια ισόχωρη ψύξη μέχρι να αποκτήσει την αρχική πίεση και,
δ) μια ισοβαρή συμπίεση μέχρι την αρχική του κατάσταση. Να υπολογιστεί ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής. Δίνεται γ=5/3. [Απ : 2/9]

67΄Ενα mol ιδανικού αερίου, που βρίσκεται σε s.t.p θερμαίνεται με σταθερή πίεση μέχρι να διπλασιαστεί ο όγκος του και μετά ψύχεται με σταθερό όγκο μέχρι να υποδιπλασιαστεί η πίεσή του. Να υπολογιστούν:
α) Το έργο που παράχθηκε.

β) Η θερμότητα που ανταλλάχθηκε με το περιβάλλον.
γ) Η μεταβολή της εντροπίας του αερίου.
Δίνονται: R=8,314 J/(mol K), ln2=0,693, 1Latm=101,4 J.
[Απ : α) 2271 J β) 2271 J
γ) 5,76 J/K]

68΄Ενα mol ιδανικού αερίου, που βρίσκεται σε s.t.p. συμπιέζεται αδιαβατικά μέχρι η πίεσή του να γίνει 8atm και μετά ψύχεται με σταθερό όγκο μέχρι η πίεσή του να γίνει 4 atm. Να υπολογιστούν για κάθε μεταβολή του αερίου και για τη συνολική μεταβολή του:
α) Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας, του αερίου.
β) Η μεταβολή της εντροπίας του.

Δίνονται: R=8,314 J/(mol K) και ln2=0,6931. Θεωρήστε ότι για το αέριο γ=3/2 και C_V =16,628 J/(mol K).

[Απ : α) 4539,5 J, -4539,5 J, 0, β) 0, -11,52 J/K, -11,52 J/K]

69 Ιδανικό αέριο έχει όγκο $V_A=0,04m^3$, πίεση $p_A=3\times10^5 N/m^2$ και θερμοκρασία $T_A=600K$. Το αέριο εκτονώνεται ισόθερμα μέχρι ο όγκος του να γίνει $V_B=0,16m^3$, ύστερα ψύχεται με σταθερό όγκο ώσπου να αποκτήσει την κατάλληλη πίεση από όπου μια αδιαβατική συμπίεση θα το φέρει στην αρχική του κατάσταση. Να υπολογιστούν :

α) Η εσωτερική ενέργεια του αερίου στην αρχική του κατάσταση, καθώς και στο τέλος της ισόθερμης και της ισόχωρης μεταβολής.

β) Το έργο που παράγεται κατά την κυκλική μεταβολή

γ) Η μεταβολή της εντροπίας στις επιμέρους μεταβολές.

Δίνονται: R=8,314 J/(mol K), γ=5/3, ln4=1,386 $(0,25)^{\gamma}=0,0992$.

[Απ : 18000J, 18000J, 7200J, 5832J, 27,72J/K, 0, -27,72J/K]

70 Κυλινδρικό δοχείο, με αδιαβατικά τοιχώματα, έχει τον άξονά του κατακόρυφο, και κλείνεται στο επάνω μέρος του με αδιαβατικό έμβολο εμβαδού $A=10cm^2$ και μάζας m=10 kg. Ο κύλινδρος περιέχει ιδανικό αέριο και βρίσκεται σε χώρο όπου η εξωτερική πίεση είναι $p_{at}=1,013\times10^5 N/m^2$. Μέσω μιας αντίστασης R που βρίσκεται μέσα στο δοχείο το αέριο θερμαίνεται αργά. Αν το ποσό θερμότητας που προσφέ-

ρεται μέσω της αντίστασης είναι Q=50J να υπολογιστεί:

α) Η μετατόπιση του εμβόλου.

β) Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου.

Δίνονται: $g=10m/s^2$, $C_V=3R/2$.

[Απ : 0,1m, 30 J]

71 Η κυκλική μεταβολή του ιδανικού αερίου μιας θερμικής μηχανής αποτελείται από μια ισόχωρη ψύξη ΑΒ, μια ισοβαρή ψύξη ΒΓ και τέλος τη μεταβολή ΓΑ, κατά τη διάρκεια της οποίας η πίεση και ο όγκος συνδέονται με τη σχέση p=600+400V (SI). Όλες οι μεταβολές θεωρούνται αντιστρεπτές. Αν στις καταστάσεις Α και Γ το αέριο έχει όγκο $V_A=2m^3$ και $V_Γ=1m^3$, αντίστοιχα,

α) Να υπολογιστεί το έργο που παράγεται σε ένα κύκλο.
β) Να υπολογιστεί ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής.
γ) Να καθοριστεί αν αυξάνεται η ελαττώνεται η εντροπία του αερίου για κάθε μια από τις επιμέρους μεταβολές.

Υπενθυμίζεται ότι στα ιδανικά αέρια ισχύει $C_V/R=3/2$. [Απ: 200 J,0,051]

72 Η κυκλική μεταβολή n=2/R mol ιδανικού αερίου σε μια θερμική μηχανή αποτελείται από τη μεταβολή ΑΒ, κατά τη διάρκεια της οποίας η πίεση και ο όγκος συνδέονται με τη σχέση $p=-\frac{2}{3}\times10^8V+6\times 10^5$ (SI), τη ΒΓ, που είναι ισοβαρής, και τέλος τη ΓΑ, που είναι ισόχωρη. Το αέριο στις καταστάσεις Α και Β έχει όγκο

$V_A=6\times10^{-3}m^3$ και $V_B=3\times10^{-3}m^3$, αντίστοιχα. Να υπολογιστεί:

α) Ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής.

β) Η μεταβολή της εντροπίας στις μεταβολές ΑΒ και ΓΑ.

Δίνονται: $C_V=3R/2$, $\Delta S_{B\Gamma}=2,3$ J/K και ln2=0,7.

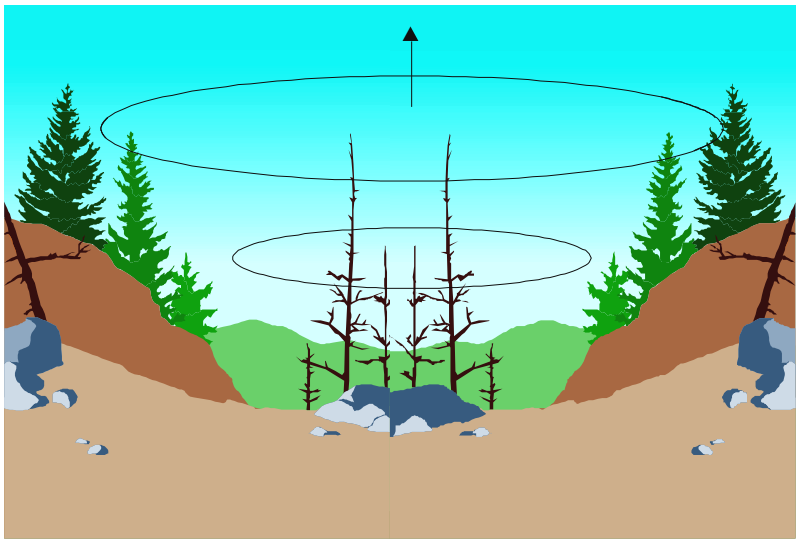
[Απ : 0,1 , -1,4 J/K, -0,9 J/K]

ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ

Στις αδιαβατικές μεταβολές δε γίνεται ανταλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο σύστημα και το περιβάλλον. Πρακτικά, για να θεωρηθεί αδιαβατική η μεταβολή κάποιου αερίου που περιέχεται σε δοχείο θα πρέπει ή το δοχείο να είναι μονωμένο ή η μεταβολή να πραγματοποιείται ταχύτατα ώστε το αέριο να μην προλάβει να ανταλλάξει θερμότητα με το περιβάλλον.

Αδιαβατικές μεταβολές συμβαίνουν και στον ατμοσφαιρικό αέρα, δημιουργώντας αυξομειώσεις στη θερμοκρασία του. Πρόκειται για ένα από τα φαινόμενα που λαμβάνουν υπόψη τους οι μετεωρολόγοι όταν

μελετούν τις μεταβολές στην ατμόσφαιρα.



Σχ. 4.46 Ποσότητα θερμού αέρα ανεβαίνοντας υφίσταται αδιαβατική εκτόνωση.

Ας θεωρήσουμε την ποσότητα θερμού αέρα έκτασης πολλών τετραγωνικών χιλιομέτρων που βρίσκεται πάνω από μια κοιλάδα (σχ. 4.46). Η ποσότητα αυτή δεν περικλείεται από αδιαβατικά τοιχώματα αλλά, λόγω του μεγάλου όγκου της, παρά το γεγονός ότι τα περιφερειακά στρώματα αναμιγνύονται με

αέρα διαφορετικής θερμοκρασίας και πίεσης, το σύνολο της ποσότητας παραμένει ανεπηρέαστο από το περιβάλλον. Η συνολική ποσότητα, δηλαδή, συμπεριφέρεται σα να περικλείεται από σάκο με αδιαβατικά τοιχώματα.

Έστω ότι ο αέρας αυτός αρχίζει να ανεβαίνει. Αυτό μπορεί να συμβεί αν βρεθεί σε ψηλότερη θερμοκρασία από τα υπερκείμενα στρώματα οπότε η πυκνότητά του θα είναι μικρότερη από αυτή των υπερκειμένων στρωμάτων.

Η πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα ελαττώνεται με το ύψος από την επιφάνεια της Γης. Αυτό σημαίνει ότι ο όγκος της ποσότητας στην οποία αναφερόμαστε αυξάνεται και επειδή δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον, η εκτόνωση μπο-

ρεί να θεωρηθεί αδιαβατική. Σε μια αδιαβατική εκτόνωση η θερμοκρασία του αερίου μειώνεται.

Έχει διαπιστωθεί ότι όταν τέτοιες μάζες αέρα ανεβαίνουν κατά 1 km η θερμοκρασία τους ελαττώνεται κατά 10 ^{o}C. Άρα, αν μια θερμή μάζα αέρα του θεσσαλικού κάμπου, θερμοκρασίας 30^{o} C, ανέβει κατά 3 km, όσο είναι περίπου το ύψος του παρακείμενου Ολύμπου, στην κορυφή του θα έχει θερμοκρασία 0^{o} C. Έτσι εξηγείται γιατί στα βουνά η θερμοκρασία είναι χαμηλή σε αντίθεση με τη θερμοκρασία στις πεδιάδες.

Εικ. 4.15 Οι κορυφές του Ολύμπου μένουν χιονισμένες συνήθως σ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ 4ου τόμου

4. Θερμοδυναμική.....
4-1 Εισαγωγή 6
4-2 Θερμοδυναμικό σύστημα 8
4-3 Ισορροπία Θερμοδυνα-
μικού συστήματος.....10
4-4 Αντιστρεπτές μεταβολές.....14
4-5 Έργο παραγόμενο από αέριο
κατά τη διάρκεια μεταβολών
όγκου.....22
4-6 Θερμότητα.....27
4-7 Εσωτερική ενέργεια 28
4-8 Πρώτος θερμοδυναμικός
Νόμος 34
4-9 Εφαρμογή του Πρώτου
Θερμοδυναμικού Νόμου σε
ειδικές περιπτώσεις.....39
4-10 Γραμμομοριακές Ειδικές
Θερμότητες αερίων 54

4-11 Θερμικές μηχανές 67
4-12 Δεύτερος θερμοδυναμικός Νόμος 91
4-13 Η μηχανή του CARNOT 96
4-14 Εντροπία 105
4-15 Υπολογισμός της μεταβολής της εντροπίας σε μερικές περιπτώσεις 122
Σύνοψη 134
Δραστηριότητες 145
Ερωτήσεις 149
Ασκήσεις 182
Προβλήματα 194
Ένθετο. Αδιαβατικές μεταβολές του ατμοσφαιρικού αέρα.....210

Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του νόμου 1129 της 15/21 Μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946,108, Α΄).

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας, Θρησκευμάτων και Αθλητισμού / ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.