



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Σχολής Αγροτικής Ανάπτυξης, Διατροφής και Αειφορίας

ΓΕΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Δρ. Δήμητρα Παπαδάκη & Καθ. Μιχάλης Βραχόπουλος

ΨΑΧΝΑ 2021

ΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Σχολής Αγροτικής Ανάπτυξης, Διατροφής και Αειφορίας

**Τμήματος Αγροτικής Ανάπτυξης, Αγροδιατροφής και Διαχείρισης
Φυσικών Πόρων**

ΓΕΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Δρ. Δήμητρα Παπαδάκη & Καθ. Μιχάλης Βραχόπουλος

ΨΑΧΝΑ 2021

Πρόλογος

Table of Contents

| | | |
|------|---|----|
| 1. | Μονάδες Μέτρησης του Διεθνούς Συστήματος (S.I.) | 5 |
| 2. | Βασικές Έννοιες και ορισμοί της Φυσικής..... | 9 |
| 2.1 | Δύναμη (F) | 9 |
| 2.2 | Ορμή (p)..... | 10 |
| 2.3 | Ταχύτητα (u) | 10 |
| 2.4 | Επιτάχυνση (a) | 11 |
| 2.5 | Ενέργεια (E)..... | 11 |
| 2.6 | Πίεση (P)..... | 12 |
| 2.7 | Θερμοκρασία (T)..... | 15 |
| 2.8 | Θερμότητα (Q)..... | 15 |
| 2.9 | Πυκνότητα (ρ) | 16 |
| 2.10 | Ισχύς (I)..... | 16 |
| 2.11 | Έργο (W) | 16 |
| | Παραδείγματα | 20 |
| 3. | Κλασική Μηχανική | 24 |
| 3.1 | Νόμοι του Νεύτωνα..... | 24 |
| 3.2 | Αρχή διατήρησης ορμής | 25 |
| 4. | Θερμοδυναμικές Ιδιότητες των Αερίων | 27 |
| 4.1 | Πίεση Αερίου..... | 27 |
| 4.2 | Ιδανικό Αέριο -Καταστατική εξίσωση | 29 |
| 4.3 | Χαρακτηριστικές Θερμοδυναμικές Διεργασίες | 30 |
| 4.4 | Ισορροπία Θερμοδυναμικού Συστήματος..... | 35 |
| 4.5 | Έργο παραγόμενο από αέριο με μεταβολές όγκου..... | 36 |
| 4.6 | Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής..... | 38 |
| 4.7 | Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής..... | 39 |
| 4.8 | Η μηχανή του Carnot..... | 41 |
| | Παραδείγματα | 43 |
| | Βιβλιογραφία..... | 49 |

1. Μονάδες Μέτρησης του Διεθνούς Συστήματος (S.I.)

Το κεφάλαιο αυτό θα επικεντρωθεί στην κατανόηση των μονάδων του Διεθνούς Συστήματος (S.I.) που χρησιμοποιούνται σε υπολογισμούς θερμοδυναμικής αλλά και σε Γενικές Έννοιες Φυσικής, στην αναφορά και συσχέτιση με άλλες μονάδες μετρήσεων εκτός S.I. που έχουν όμως πρακτικές εφαρμογές στη Θερμοδυναμική.

Τρία είναι τα θεμελιώδη μηχανικά μεγέθη που θα αναφερθούμε, που αφορούν στο Διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.):

- Μήκος
- Μάζα
- Χρόνος

Για τον καθορισμό των θερμικών μεγεθών χρειαζόμαστε ακόμα την

- Απόλυτη Θερμοκρασία

Για τον καθορισμό των ηλεκτρικών μεγεθών χρειαζόμαστε ακόμα

- Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος

Το Διεθνές Σύστημα μονάδων S.I., αποτελεί το επίσημο σύστημα μονάδων στην Ε.Ε. και στην Ελλάδα. Τα βασικότερα **θεμελιώδη μεγέθη** που χρησιμοποιούνται σε υπολογισμούς παρατίθενται στον *Πίνακα 1*.

Πίνακας 1. Θεμελιώδη μεγέθη και μονάδες μέτρησης τους

| Μέγεθος | Μονάδα μέτρησης |
|--------------------------------|-----------------|
| Μήκος (L) | m |
| Μάζα (M) | kg |
| Χρόνος (t) | sec |
| Απόλυτη Θερμοκρασία(Τ) | K |
| Ένταση Ηλεκτρικού Ρεύματος (I) | A |
| Ποσότητα Ουσίας | mol |
| Ένταση Φωτεινότητας | cd |

Πίνακας 2. Σύμβολα, μεγέθη και αριθμοί των μονάδων μέτρησης

| Σύμβολο | Ονομασία | Εκθετικός Αριθμός | Αριθμός |
|---------|----------|-------------------|-------------------|
| T | Tera- | 10^{12} | 1.000.000.000.000 |
| G | Giga- | 10^9 | 1.000.000.000 |
| M | Mega- | 10^6 | 1.000.000 |
| k | kilo- | 10^3 | 1.000 |
| h | hecto- | 10^2 | 100 |
| da | deca- | 10^1 | 10 |
| d | deci- | 10^{-1} | 0.1 |
| c | centi- | 10^{-2} | 0.01 |
| m | mili- | 10^{-3} | 0.001 |
| μ | micro- | 10^{-6} | 0.000 001 |
| n | nano- | 10^{-9} | 0.000 000 001 |
| p | pico- | 10^{-12} | 0.000 000 000 001 |

Μονάδες μέτρησης Μάζας

Οι μονάδες μάζας στο S.I. είναι το χιλιόγραμμα (kg). Χρήσιμες μετατροπές μονάδων σε πρακτικές εφαρμογές είναι οι ακόλουθες:

- 1 gr= 0.001 kg
- 1 ton= 1000 kg
- 1 lb= 0.4536 kg

Μονάδες μέτρησης Μήκους

Οι μονάδες μήκους στο S.I. είναι το μέτρο (m). Χρήσιμες μετατροπές μονάδων σε πρακτικές εφαρμογές είναι οι ακόλουθες:

- 1cm=0.01 m
- 1mm= 0.001 m
- 1 km=1000 m
- 1 in = $2.54 \cdot 10^{-2}$ m= 2.54 cm= 25.4 mm
- 1ft= 0.3048 m

Μονάδες μέτρησης Επιφάνειας (A)

Οι μονάδες επιφάνειας στο S.I. είναι το τετραγωνικό μέτρο (m^2). Χρήσιμες μετατροπές μονάδων σε πρακτικές εφαρμογές είναι οι ακόλουθες:

- 1 $cm^2 = (0,01)^2 m^2 = 10^{-4} m^2$
- 1 $mm^2 = (0,001)^2 m^2 = 10^{-6} m^2$
- 1 $ft^2 = 0.0929 m^2$

Μονάδες Μέτρησης Όγκου (V)

Οι μονάδες μήκους στο S.I. είναι το κυβικό μέτρο (m^3). Χρήσιμες μετατροπές μονάδων σε πρακτικές εφαρμογές είναι οι ακόλουθες:

- 1 $cm^3 = (0,01)^3 m^3 = 10^{-6} m^3$
- 1 $mm^3 = (0,001)^3 m^3 = 10^{-9} m^3$

- $1 \text{ lt} = 1000 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$

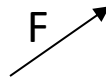
- $1 \text{ ft}^3 = 0.02832 \text{ m}^3$

2. Βασικές Έννοιες και ορισμοί της Φυσικής

2.1 Δύναμη (F)

Πρόκειται για το φυσικό διανυσματικό μέγεθος που όταν επιδράσει σε ένα υλικό σώμα, είτε το επιταχύνει είτε το παραμορφώνει ή και τα δύο. Είναι αίτιο που προκαλεί τη παραμόρφωση ενός σώματος ή τη μεταβολή της κινητικής του κατάστασης ή συγχρόνως και τα δύο. Η δύναμη είναι **διάνυσμα** και χαρακτηρίζεται πλήρως όταν δοθούν:

- Το σημείο εφαρμογής
- Η διεύθυνση
- Η φορά
- Το μέτρο της



Ο Θεμελιώδης νόμος, ή εξίσωση της μηχανικής είναι:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Μονάδα μέτρησης της δύναμης στο S.I. είναι το Newton (N). Έτσι το Newton (N) ορίζεται:

$$N = kg \cdot m / s^2$$

Το βάρος ενός σώματος είναι η δύναμη που έλκει η γη το σώμα αυτό προς το κέντρο της

$$B = m \cdot g$$

όπου $g = 9,807 \text{ m/sec}^2$ επιτάχυνση της βαρύτητας (η μέση τιμή, δεν είναι σταθερή σε όλη την επιφάνεια της Γης)

Το Πεδίο βαρύτητας της Γης δίνει Επιτάχυνση βαρύτητας $g(0^\circ) = 9,780 \text{ m/sec}^2$ στα σώματα που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος 0° (στον Ισημερινό), και Επιτάχυνση βαρύτητας $g(90^\circ) = 9,832 \text{ m/sec}^2$ στα σώματα που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος 90° (στους Πόλους).

Στην Κλασική Μηχανική, δύναμη είναι η αιτία που προκαλεί κάθε μεταβολή της κίνησης ή της γεωμετρίας των σωμάτων. Ένα σώμα μπορεί να δεχθεί ταυτόχρονα πολλές δυνάμεις το αποτέλεσμα των οποίων θα είναι σε κάθε σημείο μία συνισταμένη δύναμη και μία συνισταμένη ροπή. Όταν οι δυνάμεις αυτές εξουδετερώνονται μεταξύ τους τότε λέγεται ότι το σώμα βρίσκεται σε **κατάσταση ισορροπίας**.

Σε ότι αφορά στα ελεύθερα σώματα, η δύναμη είναι η αιτία μεταβολής της κινητικής τους κατάστασης, δηλαδή αυτή που τα επιταχύνει ή τα επιβραδύνει. Στην περίπτωση των μη ελεύθερων σωμάτων δύναμη είναι η αιτία που προκαλεί την κίνησή τους ή την κινητικότητά τους σε σχέση με τα σημεία στήριξης ή σύνδεσής τους, ή αυτή που προκαλεί την εντατική τους κατάσταση, την πίεση ή την παραμόρφωσή τους. Η αδράνεια ενός ελεύθερου σώματος επιτρέπει επίσης να προκαλείται στο σώμα εντατική κατάσταση, πίεση ή παραμόρφωση, όταν του εφαρμόζονται αντίστοιχες δυνάμεις.

2.2 Ορμή (p)

Ως ορμή ορίζεται ως το γινόμενο της μάζας και της ταχύτητας ενός σώματος. Η ορμή είναι διάνυσμα ορίζεται από τη σχέση $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

Ο ρυθμός μεταβολής της ορμής δίνει τη δύναμη:

$$\Sigma \vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

2.3 Ταχύτητα (u)

Η βασική ιδιότητα ενός κινούμενου σώματος είναι η ταχύτητα. Το σώμα λόγω της κίνησής του διανύει ορισμένη απόσταση σε συγκεκριμένο χρόνο. Η ταχύτητα (u) ορίζει το πόσο γρήγορα ή αργά γίνεται η κίνηση ενός σώματος, δηλαδή η ταχύτητα είναι ο ρυθμός μεταβολής της

απόστασης ενός σώματος και ορίζεται από το λόγο της απόστασης που διανύει το σώμα διά το χρόνο που έκανε αυτήν την απόσταση.

Ορίζεται ως:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \text{με μονάδα μέτρησης το m/sec}$$

2.4 Επιτάχυνση (a)

Η κινητική κατάσταση ενός σώματος μπορεί να αλλαχθεί όταν αλλάξει η ταχύτητά του, ή το μέτρο, ή τη διεύθυνση ή και τα τρία. Ορίζεται ως επιτάχυνση (a) ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας, δηλαδή: Επιτάχυνση = μεταβολή διανυσματικής ταχύτητας/χρόνο

$$a = \frac{dv}{dt}$$

με μονάδα μέτρησης το m/sec²

2.5 Ενέργεια (E)

Είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να αποδώσει έργο. Η μηχανική ενέργεια διακρίνεται σε κινητική και δυναμική. Οι μονάδες ενέργειας (Joule) είναι ίδιες με τις μονάδες μέτρησης του έργου και ισχύει για την Κινητική και την Δυναμική ενέργεια:

$$E_{\text{κιν}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u^2 \left[= \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{Joule} \right]$$

$$E_{\text{δυν}} = m \cdot g \cdot h \left[= \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{Joule} \right]$$

Στην Κλασική Μηχανική, η ενέργεια εμφανίζεται με δυο διαφορετικές μορφές, τη δυναμική και την κινητική. Η δυναμική ενέργεια ενός σώματος εκφράζει τη δυναμική του κατάσταση που

ορίζεται στην ελάχιστη θέση του στο χώρο από την αλληλεπίδρασή του με το υφιστάμενο πεδίο δυναμικού. Στην αρχική της θεώρηση η δυναμική ενέργεια ήταν αντιληπτή ως λανθάνουσα ενέργεια ισχύος εξαρτώμενη από τη θέση του σώματος στο χώρο. Η κινητική ενέργεια ενός σώματος είναι ενεργό χαρακτηριστικό της κίνησής του στο χώρο και στην αρχική της θεώρηση ήταν αντιληπτή ως δρώσα ενέργεια κίνησης (Ιωάννου, Αποστολάτος, 2016).

2.6 Πίεση (P)

Ονομάζεται η δύναμη ανά μονάδα επιφανείας που εξασκούν τα ρευστά ομοιόμορφα και κάθετα στα τοιχώματα των δοχείων στα οποία βρίσκονται και ορίζεται ως:

$$P = \frac{\vec{F}}{\vec{A}}$$

με μονάδας μέτρησης:

$$1 \text{ Pascal} = \frac{N}{m^2} = \frac{kg \cdot m}{m^2 \cdot s^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2}$$

Συνήθως χρησιμοποιείται και το *bar* σαν μονάδα μέτρησης πίεσης και ισούται:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pascal}$$

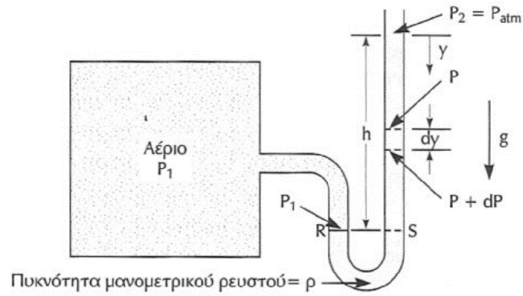
Επίσης χρησιμοποιείται η ατμόσφαιρα (atm) και το psi που δεν ανήκουν στο S.I., αλλά αποτελούν συνήθεις μονάδες μέτρησης σε πρακτικές εφαρμογές.

$$1 \text{ atm} = 1.0133 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 101325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 14,7 \text{ psi} = 14,7 \text{ lb/in}^2$$

Πίεση 1 atm ασκείται στη βάση στήλης υδραργύρου ύψους 760 mm ή στη βάση στήλης νερού 10,33 m. Τα όργανα με τα οποία μετράται η πίεση ονομάζονται μανόμετρα.

Τα όργανα αυτά δεν δείχνουν τη πραγματική πίεση που ονομάζεται απόλυτη αλλά τη διαφορά μεταξύ απόλυτης και ατμοσφαιρικής πίεσης.



Εικόνα 1. Μανόμετρο

Ισχύει η ισορροπία των δυνάμεων στο ρευστό του μανόμετρου που ορίζεται ως εξής:

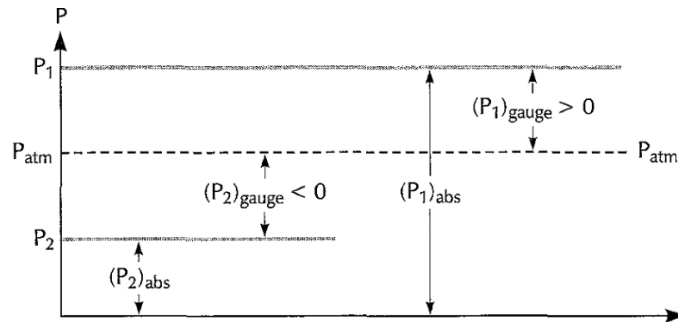
$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow P \cdot A - (P + dP) \cdot A + \rho \cdot g \cdot A \cdot dy = 0 \Rightarrow dP = \rho \cdot g \cdot dy$$

Ολοκληρώνοντας για όλο το ύψος της στήλης h , έχουμε:

$$\int_{P_1}^{P_2} dP = \int_0^h \rho \cdot g \cdot dy \Rightarrow P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h$$

Η απόλυτη πίεση είναι το άθροισμα της ατμοσφαιρικής πίεσης και της υπερπίεσης

$$P_{abs} = P_{gauge} + P_{atm}$$



Εικόνα 2. Πίεση και υπερπίεση

Το ειδικό βάρος ορίζεται ως:

$$\gamma = \rho \cdot g$$

Η ειδική βαρύτητα ορίζεται σαν ο λόγος του ειδικού βάρους μίας ουσίας προς το ειδικό βάρος του νερού

$$\text{Ειδική βαρύτητα ως: } \varepsilon = \frac{\gamma}{\gamma_{H_2O}}$$

Η πίεση σχετίζεται με την ειδική βαρύτητα με:

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h = \varepsilon \cdot \gamma_{H_2O} \cdot h$$

Η πυκνότητα του νερού σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία 24 °C είναι:

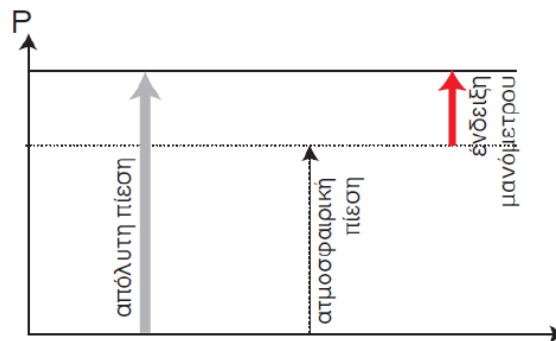
$$\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg / m}^3$$

Στη φυσική με τον όρο πίεση (σύμβολο p ή P) αποκαλείται το χαρακτηριστικό, ενός συστήματος, φυσικό μέγεθος το οποίο ισοδυναμεί με την πυκνότητα ενέργειας την οποία διαθέτει αυτό το σύστημα. Οποσδήποτε, η πίεση δεν προϋποθέτει επιφάνεια για να είναι καλά ορισμένη, αλλά η διαδικασία μέτρησής της ανάγεται στη μέτρηση μιας δύναμης η οποία ασκείται κάθετα σε συγκεκριμένη επιφάνεια.

Μονάδα της πίεσης στο S.I. είναι το Pascal και ισούται με $\text{Pa} = \text{Nt/m}^2$ (Newton/m²), μονάδα η οποία έχει τις ίδιες διαστάσεις με $\text{Pa} = \text{Joule/m}^3$.

Η τελευταία προέρχεται από τον εναλλακτικό ορισμό της πίεσης ως πυκνότητας ενέργειας. Η πίεση χωρίζεται σε απόλυτη και σχετική:

- **Απόλυτη πίεση** χαρακτηρίζεται εκείνη που αρχή μέτρησης έχει το τέλειο ή απόλυτο κενό.
- **Σχετική πίεση** χαρακτηρίζεται εκείνη που ως αρχή μέτρησης λαμβάνεται η ατμοσφαιρική



Εικόνα 3. Απόλυτη και Σχετική (ατμοσφαιρική) Πίεση

2.7 Θερμοκρασία (T)

Είναι το μέτρο με το οποίο μετράται κατά πόσο ένα σώμα είναι θερμότερο ή ψυχρότερο από κάποιο άλλο. Είναι επίσης το φυσικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τη θερμική κατάσταση των σωμάτων. Ισχύει ότι:

1 βαθμός Fahrenheit είναι ίσος με: $^{\circ}\text{F} = 1,8\ ^{\circ}\text{C} + 32$

1 βαθμός Celsius είναι ίσος με: $^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$

1 βαθμός Kelvin είναι ίσος με: $\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$

1 βαθμός Rankine είναι ίσος με: $\text{R} = 5/9 \text{ K}$

Απόλυτο Μηδέν

Η θερμοκρασία $- 273\ ^{\circ}\text{C}$ ονομάζεται απόλυτο μηδέν και είναι η αρχή της κλιμακίας θερμοκρασιών που ονομάζεται *απόλυτη κλίμακα* ή *κλίμακα Κέλβιν* με μονάδα το K.

2.8 Θερμότητα (Q)

Είναι μία μορφή ενέργειας που εκδηλώνεται συνήθως με την αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας του σώματος που την προσλαμβάνει ή την αποβάλλει.

Ως μονάδα μέτρησης σε τεχνικές εφαρμογές χρησιμοποιείται η χλιοθερμίδα (kcal). Η χλιοθερμίδα είναι το ποσό της θερμότητας που πρέπει να δοθεί σε 1 kg καθαρού νερού ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του από τους $14,5\ ^{\circ}\text{C}$ στους $15,5\ ^{\circ}\text{C}$ με την προϋπόθεση ότι η πίεση στην επιφάνεια του νερού είναι ίση με την ατμοσφαιρική.

Ισχύει ότι $1\ \text{kcal} = 4,186\ \text{kJ}$

Στο αγγλοσαξονικό σύστημα χρησιμοποιείται το BTU. Για το οποίο ισχύει:

$1\ \text{BTU} = 0,252\ \text{kcal}$

$1\ \text{kcal} = 4\ \text{BTU}$

2.9 Πυκνότητα (ρ)

Η πυκνότητα ορίζεται από την παρακάτω σχέση ως:

$$P = \rho \cdot R \cdot T$$

Είναι το μέγεθος που χαρακτηρίζει τη μάζα ενός σώματος (αερίου, υγρού ή στερεού) σε ένα δεδομένο όγκο. Στο S.I. μονάδα μέτρησης της πυκνότητας είναι το kg/m^3 .

Τυπική τιμή της πυκνότητας του αέρα σε ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι:

$$\rho_{\text{αέρα}} = 1,2 \text{ kg} / \text{m}^3$$

2.10 Ισχύς (I)

Είναι το πηλίκο του έργου W που παράγει μια δύναμη στη μονάδα του χρόνου t .

$$I = \frac{W}{t}$$

$$1 \text{ Watt} = \frac{\text{Joule}}{\text{s}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$$

Ευρέως χρησιμοποιούμενη μονάδα μέτρησης ισχύος είναι ο ίππος (PS ή HP)

$$1 \text{ PS} = 735,48 \text{ W}$$

$$1 \text{ HP} = 745,7 \text{ W}$$

$$1 \text{ PS} = 0,736 \text{ kW}$$

$$1 \text{ HP} = 0,746 \text{ kW}$$

2.11 Έργο (W)

Μία δύναμη F παράγει έργο W όταν η δύναμη αυτή μετακινεί το σημείο εφαρμογής της κατά τη διεύθυνση της σε απόσταση S .

$$W = \vec{F} \cdot \vec{S}$$

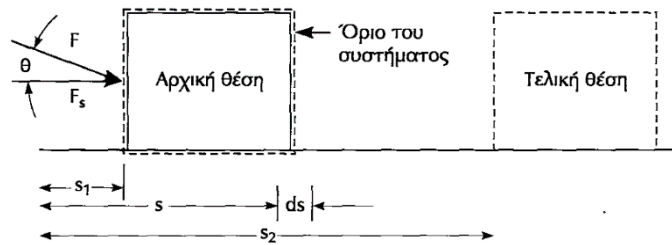
$$1 \text{ Joule} = N \cdot m = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot m = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$1 \text{Btu} = 1,055 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$1 \text{kcal} = 4,186 \text{ kJ} = 4,186 \cdot 10^3 \text{ J}$$

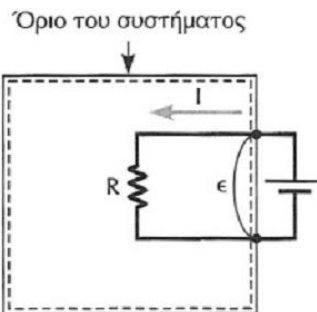
$$1 \text{kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Έργο μετατόπισης



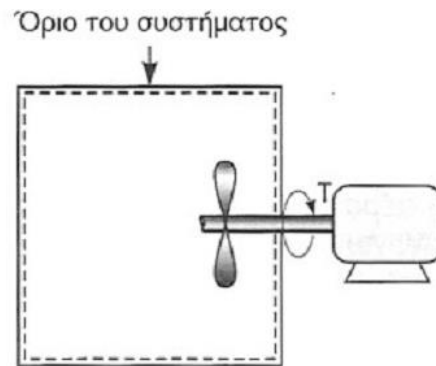
$$W_{12} = \int_1^2 \vec{F} \cdot ds = \int_1^2 F \cdot \cos \theta \cdot ds$$

Ηλεκτρικό έργο



$$W_{12} = \int_1^2 I \cdot V \cdot dt = I \cdot V \cdot (t_2 - t_1)$$

Μηχανικό έργο



$$W_{12} = \int_1^2 T \cdot d\theta = T \cdot (\theta_2 - \theta_1)$$

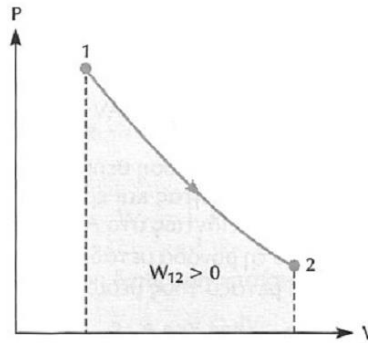
Έργο από έμβολο σε αέρα



$$W_{12} = \int_1^2 P \cdot dV$$

Ημιστατική ή Εσωτερικά αντιστρεπτή διεργασία

Αντιστρεπτό έργο- Μη αντιστρεπτό έργο



Αντιστρεπτές είναι οι θερμοδυναμικές διεργασίες, στις οποίες η πορεία μπορεί να αντιστραφεί, ώστε τόσο το σύστημα, όσο και το περιβάλλον να επιστρέψουν στην αρχική κατάστασή τους, χωρίς να απομένει κανένα ενεργειακό υπόλοιπο μεταξύ τους. Οποιαδήποτε άλλη διεργασία ονομάζεται μη αντιστρεπτή.

Η αντιστρεψιμότητα μιας θερμοδυναμικής διεργασίας συνδέεται με απουσία τριβών, διαδοχικές θέσεις ισορροπίας (απειρώς αργές μεταβολές), απειροστές διαφορές θερμοκρασίας και πίεσης. Όσο περισσότερο πλησιάζει μια διεργασία αυτά τα χαρακτηριστικά, τόσο προσεγγίζει την αντιστρεπτή διεργασία. Κατ' αντιστοιχία αναφέρεται και το αντιστρεπτό ή μη αντιστρεπτό έργο.

Στην φύση όλες οι μεταβολές όταν γίνονται αυθόρμητα εξελίσσονται προς μία κατεύθυνση, αλλά όχι προς την αντίθετη, δηλ. δεν είναι αντιστρεπτές, π.χ.: θερμότητα ρέει πάντα από θερμό σε ψυχρό σώμα. Ένα αέριο καταλαμβάνει πάντα όλο το χώρο που του διατίθεται. Αν είναι κλεισμένο στον ένα από δύο χώρους δοχείου και απομακρυνθεί το χωρίσμα θα εκτονωθεί σε όλο το δοχείο. Το ανάποδο, δηλ. να μαζευτεί από μόνο του σε ένα τμήμα του δοχείου, παρόλο που δεν απαγορεύεται από το ΑΘΑ, δεν συμβαίνει. Όταν αφήσουμε μία πέτρα να πέσει στο έδαφος, η δυναμική της ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα. Δεν μπορεί να πάρει θερμότητα από το έδαφος και να ξαναφτάσει στην αρχική της θέση! Αν εισαχθεί ζάχαρη στο νερό διαλύεται. Ποτέ όμως δεν παρατηρήθηκε να χωρίζεται ένα διάλυμα στα συστατικά του αυθόρμητα!

Παραδείγματα

Παράδειγμα 2.1: Ένα αντικείμενο έχει μάζα 10 kg. Υπολογίστε τις ακόλουθες ποσότητες:

(α) Το βάρος του αντικειμένου σε Nt στο επίπεδο της θάλασσας

(β) Το βάρος του αντικειμένου σε Nt σε μια θέση όπου $g = 9,4 \text{ m/s}^2$

Λύση

(α) Στην επιφάνεια της θάλασσας, η επιτάχυνση της βαρύτητας έχει τη τιμή

$$g = 9,807 \text{ m/s}^2$$

Το βάρος του σώματος είναι:

$$B = m \cdot g = 10 \cdot 9,807 = 98,07 \text{ Nt}$$

(β) Στη θέση όπου η επιτάχυνση της βαρύτητας έχει τη τιμή

$$g = 9,4 \text{ m/s}^2$$

Το βάρος του σώματος είναι:

$$B = m \cdot g = 10 \cdot 9,4 = 94 \text{ Nt}$$

Παρατηρούμε ότι η μάζα του σώματος παραμένει σταθερή, το βάρος του όμως αλλάζει με τη θέση.

Παράδειγμα 2.2: Μανόμετρο είναι προσαρμοσμένο σε πιεστικό δοχείο. Το ένα άκρο του μανόμετρου είναι ανοικτό στην ατμόσφαιρα και η τοπική ατμοσφαιρική πίεση είναι 760 mm Hg. Να υπολογίσετε την απόλυτη πίεση στην εσωτερική επιφάνεια του δοχείου αν:

(α) Το ύψος του υγρού στο μανόμετρο είναι 420 mm και το υγρό έχει ειδική βαρύτητα 1,6.

(β) Το ύψος του υγρού του μανόμετρου είναι 850 mm και το υγρό έχει πυκνότητα 1100 kg/m³.

Λύση

(α) Το μανόμετρο μετρά τη διαφορική πίεση (ή υπερπίεση) του αερίου P_{gauge} σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση.

$$P_{gauge} = \rho \cdot g \cdot h = \varepsilon \cdot \gamma_{H_2O} \cdot h = \varepsilon \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h \Rightarrow$$

$$P_{gauge} = 1,6 \cdot 1000 \cdot 9,807 \cdot (420/1000) = 6590 \text{ N/m}^2$$

Η απόλυτη πίεση είναι

$$P_{abs} = P_{gauge} + P_{atm} = 6590 + 101300 = 107,890 \text{ N/m}^2$$

(β) Χρησιμοποιώντας την εξίσωση που δίνει τη μέτρηση του οργάνου, προκύπτει ότι:

$$P_{gauge} = \rho \cdot g \cdot h \Rightarrow$$

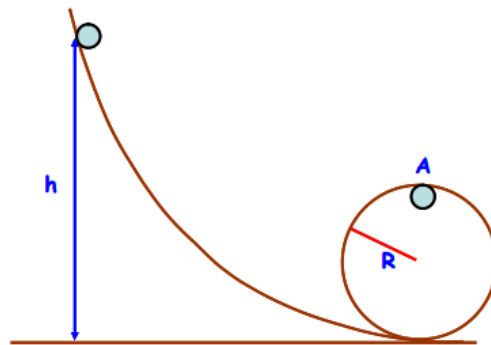
$$P_{gauge} = 1100 \cdot 9,807 \cdot (850/1000) = 9170 \text{ N/m}^2$$

Η απόλυτη πίεση του αερίου είναι:

$$P_{abs} = P_{gauge} + P_{atm} = 9170 + 101300 = 110,470 \text{ N/m}^2$$

Παράδειγμα 2.3: Σώμα μάζας m βρίσκεται πάνω στη λεία τροχιά του σχήματος. Να βρεθούν:

α) η ταχύτητα στο Α και β) η κάθετη αντίδραση στο Α.



ΑΠΑΝΤΗΣΗ: Ορίζεται ως επίπεδο μηδενικής δυναμικής ενέργειας το δάπεδο, άρα εκεί ισχύει $U=0$. Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης μηχανικής ενέργειας (ΑΔΜΕ) προκύπτει: (Ο είναι το αρχικό σημείο που βρίσκεται το σώμα)

$$E_o = m \cdot g \cdot h$$

και

$$E_A = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot 2 \cdot R$$

Από ΑΔΜΕ $E_o = E_A$ ισχύει:

$$m g h = m g 2 R m g h = \frac{1}{2} m v^2 + m g 2 R \Rightarrow v = \sqrt{2g(h - 2R)}$$

1

Για την κάθετη αντίδραση, N, στο σημείο A το άθροισμα N και βάρους, mg, θα ισούται με την κεντρομόλο δύναμη, συνεπώς:

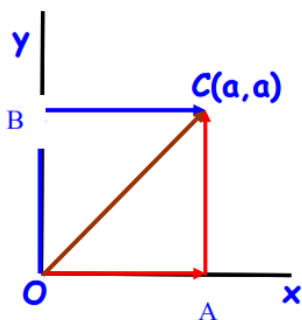
$$N + mg = \frac{m v^2}{R} \Rightarrow N = \frac{m v^2}{R} - mg$$

2

$$N = 2mg \frac{h}{R} - 5mg$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1) και (2):

Παράδειγμα 2.4: Σώμα κινείται από το O στο C ακολουθώντας τις 3 διαφορετικές χρωματιστές διαδρομές. Πόσο είναι το έργο του βάρους; Τι συμπέρασμα βγάζετε; Τι διαφοροποιείται αν αντί για βάρους έχουμε μόνο τριβή;



ΑΠΑΝΤΗΣΗ:

Γαλάζια διαδρομή: για να κινηθεί το σώμα κατακόρυφα, και να μεταφερθεί από το O στο B το έργο του βάρους είναι $W_{OB} = amg$. Για να κινηθεί από το B στο C το έργο του βάρους είναι $W_{BC} = 0$. Επομένως, το έργο του βάρους είναι $W = amg$.

Κόκκινη διαδρομή: Για να κινηθεί το σώμα από το Ο στο Α το έργο του βάρους είναι $W_{OA} = 0$, ενώ για να κινηθεί το σώμα κατακόρυφα, και να πάει από το Α στο C το έργο του βάρους είναι $W_{AC} = amg$. Επομένως, το έργο του βάρους είναι $W = amg$.

Το ίδιο αποτέλεσμα ισχύει και για την καφέ διαδρομή.

Συμπέρασμα: το έργο του βάρους μεταξύ δύο σημείων είναι ανεξάρτητο από τη διαδρομή που ακολουθείται διότι το βάρος είναι δύναμη συντηρητική.

Αν αντί για βάρος υφίσταται μόνο τριβή, $Tα$, τότε:

$$\begin{aligned}W_{OB \rightarrow BC} &= -2 a T \\W_{OA \rightarrow AC} &= -2 a T \\W_{OC} &= -\sqrt{2} a T\alpha\end{aligned}$$

συνεπώς στην περίπτωση της τριβής το έργο μεταξύ δύο σημείων εξαρτάται από τη διαδρομή που ακολουθείται διότι η τριβή είναι δύναμη μη-συντηρητική

3. Κλασική Μηχανική

Τα βασικά θεμέλια της κλασικής μηχανικής τέθηκαν για πρώτη φορά στις αρχές του 17ου αιώνα από τον Γαλιλαίο Γαλιλέι και κατά τα τέλη του ίδιου αιώνα από τον Ισαάκ Νεύτωνα. Ειδικότερα, η παρουσίαση της μηχανικής από τον Νεύτωνα στο έργο του *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας) αποτελεί την πρώτη συστηματική διατύπωση των θεμελιωδών φυσικών νόμων οι οποίοι διέπουν τις κινήσεις όλων των υλικών σωμάτων (Ιωάννου, Αποστολάτος, 2016).

3.1 Νόμοι του Νεύτωνα

Το 1687 ο Νεύτωνας δημοσίευσε τελικά το μνημειώδες έργο του *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, στο οποίο διατυπώνονται οι 3 περιφημοί νόμοι της δυναμικής:

ΠΡΩΤΟΣ ΝΟΜΟΣ: Κάθε σώμα παραμένει στην κατάσταση ηρεμίας ή ομαλής κίνησης, στην οποία βρισκόταν αρχικά, εκτός εάν αναγκαστεί να μεταβάλει την κατάσταση αυτή εξαιτίας των δυνάμεων που ασκούνται πάνω του.

ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΝΟΜΟΣ: Η μεταβολή της κίνησης (κάτι που ο Νεύτωνας είχε καθορίσει πρωτύτερα ως την ποσότητα της ύλης επί την ταχύτητα, αυτό δηλαδή που σήμερα αποκαλούμε ορμή) είναι ανάλογη της ασκούμενης δύναμης και συντελείται στη διεύθυνση της ευθείας κατά την οποία εφαρμόζεται αυτή η δύναμη.

ΤΡΙΤΟΣ ΝΟΜΟΣ: Σε κάθε δράση αντιτίθεται πάντα μια ίση αντίδραση, ή με άλλα λόγια, οι αμοιβαίες δράσεις που ασκούν δύο σώματα, το ένα στο άλλο, είναι πάντα ίσες και αντίθετες.

Ο Νεύτωνας χρησιμοποίησε τους τρεις αυτούς νόμους, μαζί με ένα σύνολο ορισμών, για να επιλύσει προβλήματα κίνησης μηχανικών συστημάτων υπό την επενέργεια συγκεκριμένων δυνάμεων.

3.2 Αρχή διατήρησης ορμής

Με τη βοήθεια της έννοιας της ορμής οι επιστήμονες απλοποίησαν τη μελέτη των πολύπλοκων φαινομένων της κρούσης και κατέληξαν στο ακόλουθο συμπέρασμα:

Η συνολική ορμή ενός μονωμένου συστήματος σωμάτων διατηρείται σταθερή.

Η πρόταση αυτή είναι άμεση συνέπεια του τρίτου νόμου του Νεύτωνα σύμφωνα με τον οποίο η δράση είναι ίση με την αντίδραση.

Ας θεωρήσουμε δύο σώματα που αλληλεπιδρούν. Εφ' όσον οι δυνάμεις που ασκούνται σ' αυτά είναι αντίθετες, θα ισχύει

$$F_1 = -F_2$$

ή αλλιώς

$$m_1 \cdot \Delta v_1 \Delta t = - m_2 \cdot \Delta v_2 \Delta t$$

Όμως ο χρόνος αλληλεπίδρασης Δt είναι ίδιος και για τα δύο σώματα και κατά συνέπεια

$$m_1 \cdot \Delta v_1 = - m_2 \cdot \Delta v_2$$

Συνεπώς για τις μεταβολές της ορμής θα ισχύει:

$$\Delta p_1 = - \Delta p_2$$

ή

$$\Delta p_1 + \Delta p_2 = 0$$

Εφ' όσον όμως το άθροισμα των μεταβολών των ορμών είναι μηδέν, το άθροισμα των ορμών των σωμάτων του συστήματος δεν μεταβάλλεται, διότι από την προηγούμενη σχέση προκύπτει:

$$p_{1(\tau\epsilon\lambda)} + p_{2(\tau\epsilon\lambda)} = p_{1(\alpha\epsilon\chi)} + p_{2(\alpha\epsilon\chi)}$$

ή

$$p_{ολ(\tau\epsilon\lambda)} = p_{ολ(\alpha\epsilon\chi)}$$

Δηλαδή η ορμή του συστήματος είναι σταθερή.

Η **αρχή διατήρησης της ορμής** εφαρμόζεται σε κάθε σύστημα σωμάτων το οποίο είναι μονωμένο. Ο όρος μονωμένο πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα διότι οι εσωτερικές δυνάμεις ενός συστήματος αντιπροσωπεύουν εξωτερικές δυνάμεις για κάθε σώμα που αποτελεί το σύστημα. Γενικά η αρχή διατήρηση της ορμής χρησιμοποιείται:

A. Όταν εμφανίζεται μεταβολή στις ταχύτητες των σωμάτων ενός συστήματος και στο σύστημα ενεργούν μόνο εσωτερικές δυνάμεις και

B. Εάν στο σύστημα ενεργούν εξωτερικές δυνάμεις αλλά η διάρκειά τους είναι απειροελάχιστη. Έτσι οι ωθήσεις τους μπορεί να παραληφθούν σαν μηδαμινές.

4. Θερμοδυναμικές Ιδιότητες των Αερίων

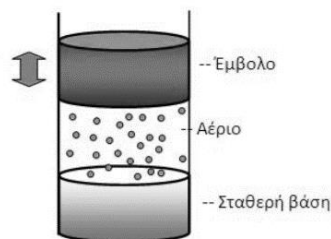
Ο όγκος των αερίων μπορεί να μεταβληθεί σε μεγάλα ποσοστά, σε αντίθεση με τα υγρά και τα στερεά (ασυμπίεστα). Τα αέρια είναι αρκετά ομοιόμορφα και μπορούν τα περισσότερα από αυτά να περιγραφούν από ένα απλό μοντέλο, το λεγόμενο «ιδανικό αέριο»

4.1 Πίεση Αερίου

Τα αέρια γενικώς μπορούν να συμπιεστούν και να εκτονωθούν. Τα αέρια από την φύση τους έχουν την τάση να εκτομώνονται, καταλαμβάνοντας όλο τον διαθέσιμο όγκο που τους παρέχεται. Αυτός είναι ο λόγος που μια ποσότητα καπνού, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα διαλύεται, επειδή προσπαθεί να καταλάβει όλη την ατμόσφαιρα. Για να επιτύχουμε ένα πεπερασμένο όγκο ενός αερίου, πρέπει να το περιορίσουμε σε ένα ερμητικά κλειστό χώρο όπως π.χ. μια φιάλη. Μια συσκευή που επιτρέπει την ελεγχόμενη μεταβολή του όγκου ενός αερίου είναι το σύστημα κυλίνδρου - εμβόλου που φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 4. Ο εσωτερικός κυλινδρικός χώρος περιέχει αέριο. Τα πλαϊνά τοιχώματα του εμβόλου εφάπτονται πολύ σφιχτά στα πλαϊνά κυλινδρικά τοιχώματα ώστε το αέριο να μη μπορεί να διαφύγει. Ο διαθέσιμος όγκος του αερίου είναι :

$$V = Ah$$

όπου A είναι το εμβαδό της κυκλικής βάσης και h η απόσταση των δυο βάσεων. Μετακινώντας το έμβολο μπορούμε να μεταβάλλουμε πολύ εύκολα το h και άρα και τον όγκο V (Δ. Κουζούδης, 2011).



Εικόνα 4. Σχηματική Αναπαράσταση κυλίνδρου και εμβόλου (Δ. Κουζούδης, 2011)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, το αέριο μπορεί να συμπιεστεί εφαρμόζοντας μια δύναμη στο έμβολο (π.χ. τοποθετώντας ένα βάρος B επάνω του). Το έμβολο αρχικά θα συμπιεστεί από την δύναμη αυτή αλλά μέχρι ενός σημείου γιατί το αέριο αντιστέκεται. Αυτό σημαίνει ότι το αέριο ασκεί μια δύναμη αντίδρασης F στο έμβολο. Η φυσική προέλευση αυτής της δύναμης είναι εξαιτίας της ταχύτητας των μορίων τα οποία προσπίπτουν και αναπηδούν συνεχώς στο έμβολο μεταφέροντας του ορμή .

Απουσία τριβών στις πλαϊνές επιφάνειες του εμβόλου, θα ισχύει

$$F = B \text{ στην ισορροπία.}$$

Ο λόγος

$$P = F/A$$

ονομάζεται πίεση του αερίου. Η πίεση είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του εμβόλου και εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία και τον όγκο του

Από τον ορισμό της πίεσης, προκύπτει ότι οι μονάδες της στο σύστημα SI είναι το Pascal = N/m^2 το οποίο γράφεται εν συντομία ως Pa. Στα αέρια οι πιέσεις φτάνουν τα $10^5 - 10^7$ Pa.

Η ατμόσφαιρα που μας περιβάλλει αποτελείται περίπου κατά 79% από άζωτο N_2 , 20% οξυγόνο O_2 και κατά ένα μικρό ποσοστό από άλλα αέρια όπως ήλιο He και διοξείδιο του άνθρακα CO_2 . Η ατμόσφαιρα ασκεί μια πίεση σε όλα τα αντικείμενα που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης. Αυτή η πίεση είναι περίπου $101.000 \text{ Pa} = 101 \text{ kPa}$. Για προφανείς λόγους, αυτή η πίεση ονομάζεται “1 ατμόσφαιρα” και συμβολίζεται ως 1 atm. Ισχύει ότι

$$1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

το οποίο για πρακτικούς λόγους ισούται με μια ατμόσφαιρα, δηλαδή

$$1 \text{ bar} \approx 1 \text{ atm.}$$

Όταν μια διεργασία λαμβάνει χώρα ανοιχτή στο περιβάλλον, όπως π.χ. η θέρμανση του νερού με ανοικτή κατσαρόλα χωρίς καπάκι, ή η εξαγωγή καυσαερίου από την εξάτμιση, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η πίεση του αερίου είναι σταθερή και ίση με 1 ατμόσφαιρα (Δ. Κουζούδης, 2011).

4.2 Ιδανικό Αέριο -Καταστατική εξίσωση

Αέρια όπως το άζωτο, το οξυγόνο, το ήλιο, το μεθάνιο κ.ά. σε όχι πολύ υψηλές πιέσεις ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, συμπεριφέρονται θερμοδυναμικώς σχεδόν παρόμοια και ικανοποιούν την λεγόμενη “καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου” η οποία είναι η

$$PV = NkT$$

όπου P, V, T και N οι τέσσερις θερμοδυναμικές μεταβλητές και $k=1,38 \times 10^{-23}$ J/K η λεγόμενη σταθερά του Boltzmann.

Το ιδανικό αέριο είναι ένα αέριο του οποίου τα μόρια βρίσκονται μακριά το ένα από το άλλο και έτσι μπορούμε να δεχτούμε με πολύ μεγάλη προσέγγιση ότι δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, εκτός από πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα όπου συγκρούονται ελαστικώς μεταξύ τους και ανταλλάσσουν ταχύτητες. Επομένως τα μόρια έχουν μόνο κινητική ενέργεια και όχι δυναμική ενέργεια. Η δυναμική ενέργεια της βαρύτητας είναι σχεδόν μηδενική λόγω της πολύ μικρής μάζας των μορίων (η μικρή μάζα δεν επηρεάζει τόσο πολύ την κινητική ενέργεια επειδή οι ταχύτητες των μορίων είναι πολύ μεγάλες σε συνήθεις θερμοκρασίες).

Αντί για τον αριθμό των μορίων N μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αριθμός των γραμμομορίων

$$n = N/N_A \text{ της ουσίας}$$

όπου $N_A = 6,023 \times 10^{23}$ ο αριθμός Avogadro. Εξ' ορισμού το γραμμομόριο ενός στοιχείου είναι ποσότητα του στοιχείου τόση ώστε να ζυγίζει σε γραμμάρια ακριβώς όσο το ατομικό βάρος AB του στοιχείου και περιέχει ακριβώς N_A άτομα του στοιχείου.

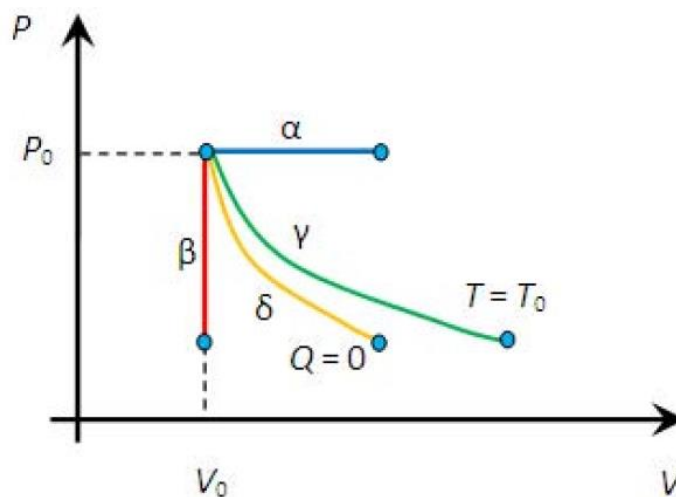
Σε αυτή την περίπτωση η καταστατική εξίσωση μπορεί να γραφεί ως

$$PV = nRT$$

όπου $R=kN_A = 8,31$ J/ (mole K) είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων (Δ. Κουζούδης, 2011).

4.3 Χαρακτηριστικές Θερμοδυναμικές Διεργασίες

Στη θερμοδυναμική υπάρχουν τέσσερις βασικές διεργασίες. Αυτές οι διεργασίες είναι η ισοβαρής, η ισόχωρη, η ισόθερμη και η αδιαβατική διεργασία και αναπαρίστανται στο παρακάτω διάγραμμα $P - V$ της Εικόνας 5. με τα γράμματα α , β , γ και δ αντίστοιχα. Πολλές τυχαίες διεργασίες μπορούν να προσεγγισθούν σε ικανοποιητικό βαθμό από μια από αυτές τις βασικές διεργασίες. Η κάθε μια από αυτές εξετάζεται ξεχωριστά παρακάτω.



Εικόνα 5. Τέσσερις θερμοδυναμικές διαδικασίες α) ισοβαρής, β) ισόχωρη, γ) ισόθερμη, δ) αδιαβατική

(πηγή: Δ. Κουζούδης, 2011).

Ισοβαρής Διεργασία

Κατά την ισοβαρή διεργασία, η πίεση διατηρείται σταθερή. Πιο αναλυτικά η ισοβαρής μεταβολή είναι η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, όπου η θερμοκρασία T και ο όγκος V μεταβάλλονται ενώ η πίεση P του παραμένει σταθερή.

Εκφράζεται από τον Νόμο του Gay Lussac (Γκέι-Λουσσάκ, 1778-1850):

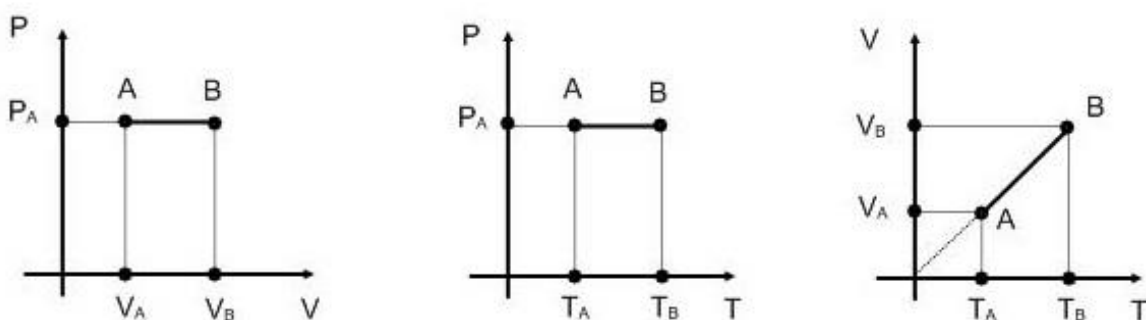
Ο όγκος ορισμένης ποσότητας αερίου, όταν η πίεσή του διατηρείται σταθερή, είναι ανάλογος με την απόλυτη θερμοκρασία του.

$$V / T = \text{σταθερό για } P = \text{σταθερό}$$

Μεταξύ δύο καταστάσεων ισορροπίας α και β ισχύει: $V_\alpha / T_\alpha = V_\beta / T_\beta$.

Παρατηρούμε ότι ο όγκος αυξηθεί και η θερμοκρασία θα αυξηθεί και αντίστροφα, συνεπώς για σταθερή πίεση, ο όγκος V και η θερμοκρασία T είναι μεγέθη ανάλογα.

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω είναι τα $P-V$, $P-T$ και $V-T$. Όπως φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα, η ευθεία $A \rightarrow B$ αντιστοιχεί στην ισοβαρή θέρμανση ή εκτόνωση ενώ η $B \rightarrow A$ είναι η ισοβαρής ψύξη ή συμπίεση. Τέλος στο διάγραμμα $V-T$ παρατηρούμε ότι τα V και T είναι μεγέθη ανάλογα.



Εικόνα 6. Διαγράμματα $P-V$, $P-T$ και $V-T$ στην ισοβαρή διεργασία.

Ισόχωρη Διεργασία

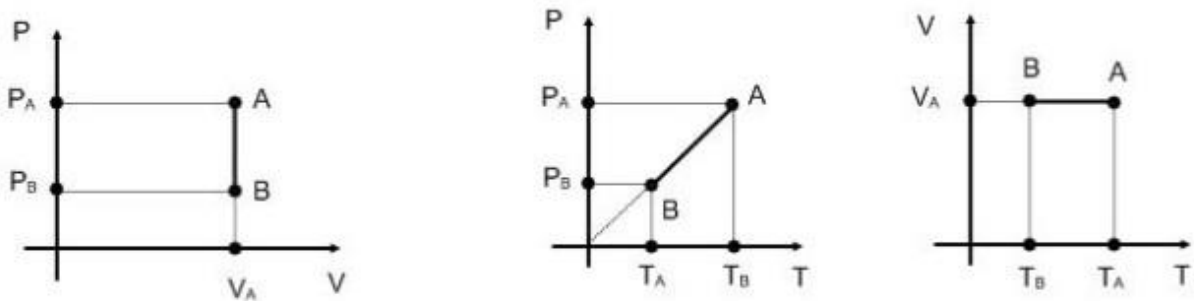
Κατά την ισόχωρη διεργασία, ο όγκος διατηρείται σταθερός. Πιο συγκεκριμένα η ισόχωρη μεταβολή είναι η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, όπου η πίεση P και η θερμοκρασία T μεταβάλλονται ενώ ο όγκος του V παραμένει σταθερός.

Εκφράζεται από τον πειραματικό νόμο του Charles (Σαρλ, 1746-1823):

Η πίεση ορισμένης ποσότητας αερίου του οποίου ο όγκος διατηρείται σταθερός είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία του αερίου.

$$P / T = \text{σταθερό για } V = \text{σταθερό}$$

Ενώ μεταξύ δύο καταστάσεων ισορροπίας α και β ισχύει: $P_\alpha / T_\alpha = P_\beta / T_\beta$. Παρατηρούμε ότι για σταθερό όγκο η πίεση P και η θερμοκρασία T είναι μεγέθη ανάλογα. Δηλαδή αν η πίεση αυξηθεί η θερμοκρασία θα αυξηθεί και αντίστροφα. Η πειραματική διαδικασία της ισόχωρης πραγματοποιείται όταν έχουμε ένα κυλινδρικό δοχείο με ακλόνητα τοιχώματα π.χ. σε μια χύτρα τα τοιχώματα της είναι σταθερά.



Εικόνα 7. Διαγράμματα $P - V$, $P - T$ και $V - T$ στην ισόχωρη διεργασία.

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παραπάνω είναι τα $P - V$, $P - T$ και $V - T$. Όπως φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα, η ευθεία $A \rightarrow B$ αντιστοιχεί στην ισόχωρη ψύξη ενώ η $B \rightarrow A$ είναι η ισόχωρη θέρμανση. Τέλος στο διάγραμμα $P - T$ παρατηρούμε ότι τα P και T είναι μεγέθη ανάλογα. Επίσης όλα τα διαγράμματα αλλά και οι νόμοι δεν ισχύουν για χαμηλές θερμοκρασίες (κοντά στο απόλυτο μηδέν).

Ισόθερμη Διεργασία

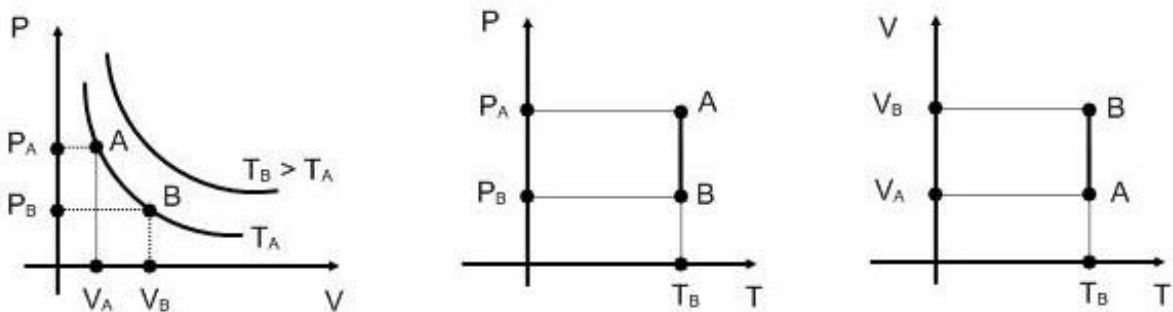
Κατά την ισόθερμη διεργασία, η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή. Πιο αναλυτικά η ισόθερμη μεταβολή είναι η μεταβολή της κατάστασης μιας ποσότητας ιδανικού αερίου, όπου η πίεση P και ο όγκος V μεταβάλλονται ενώ η θερμοκρασία του T παραμένει σταθερή.

Εκφράζεται από τον πειραματικό νόμο του Boyle (Μπόιλ, 1627-1691):

Η πίεση ορισμένης ποσότητας αερίου του οποίου η θερμοκρασία παραμένει σταθερή είναι αντίστροφα ανάλογη με τον όγκο του.

$$P \cdot V = \text{σταθερό για } T = \text{σταθερό}$$

Μεταξύ δύο καταστάσεων ισορροπίας α και β ισχύει: $P_\alpha \cdot V_\alpha = P_\beta \cdot V_\beta$. Παρατηρούμε ότι για σταθερή θερμοκρασία η πίεση P και ο όγκος V είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα. Δηλαδή αν η πίεση αυξηθεί ο όγκος θα μειωθεί και αντίστροφα.



Εικόνα 8. Διαγράμματα $P - V$, $P - T$ και $V - T$ στην ισόθερμη διεργασία.

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παραπάνω είναι τα $P - V$, $P - T$ και $V - T$. Όπως φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα, η ευθεία $A \rightarrow B$ αντιστοιχεί στην ισόθερμη εκτόνωση ενώ η $B \rightarrow A$ είναι η ισόθερμη συμπίεση. Τέλος στο διάγραμμα $P - V$ παρατηρούμε ότι όσο η θερμοκρασία αυξάνει η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα πάνω

Αδιαβατική Διεργασία

Αδιαβατική είναι η μεταβολή μιας ποσότητας ιδανικού αερίου που δεν παρουσιάζει ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον του. Άρα στην αδιαβατική:

$$Q = 0$$

Ο νόμος που ισχύει στην αδιαβατική μεταβολή είναι ο νόμος του Poisson:

$$P \cdot V^\gamma = \text{σταθερό}$$

και μεταξύ δύο καταστάσεων ισορροπίας α και β γράφεται:

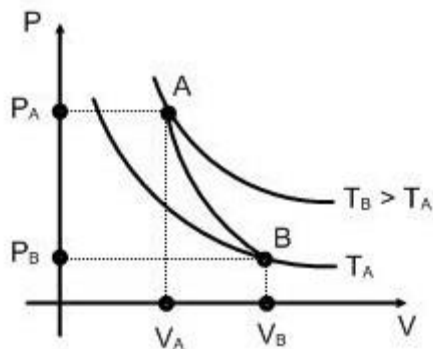
$$P_\alpha \cdot V_\alpha^\gamma = P_\beta \cdot V_\beta^\gamma$$

όπου

$$\gamma = C_P / C_V = 5 / 3.$$

Τα C_P , C_V είναι οι γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες.

Υπάρχουν δύο ακόμα μορφές του που αποδεικνύονται με την καταστατική εξίσωση και τον νόμο του Poisson η $V - T$ μορφή: $T_A \cdot V_A^{\gamma-1} = T_B \cdot V_B^{\gamma-1}$ και η $P - T$ μορφή: $P_A^{1-\gamma} \cdot T_A^\gamma = P_B^{1-\gamma} \cdot T_B^\gamma$.



Εικόνα 9. Διάγραμμα $P - V$ στην αδιαβατική διεργασία.

Η γραφική παράσταση της αδιαβατικής μεταβολής στο $P - V$ διάγραμμα δίνεται στο παραπάνω διάγραμμα και η $A \rightarrow B$ λέγεται αδιαβατική εκτόνωση ενώ η $B \rightarrow A$ λέγεται αδιαβατική συμπίεση.

Παρατηρούμε ότι οι αδιαβατική καμπύλη τέμνει τις ισόθερμες γιατί έχει μεγαλύτερη κλίση από αυτές.

4.4 Ισορροπία Θερμοδυναμικού Συστήματος

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:

$$PV = nRT$$

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.

Συνεπώς μια ποσότητα αερίου βρίσκεται σε κατάσταση **θερμοδυναμικής ισορροπίας - ή απλά ισορροπίας - όταν η πίεση (P), η πυκνότητα (ρ) η θερμοκρασία του (T) έχουν την ίδια τιμή σε όλη την έκταση 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.

4.5 Έργο παραγόμενο από αέριο με μεταβολές όγκου

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:

$$\Delta W = F \Delta x$$

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 γίνεται

$$\Delta W = p A \Delta x$$

Όμως

$$A \Delta x = \Delta V$$

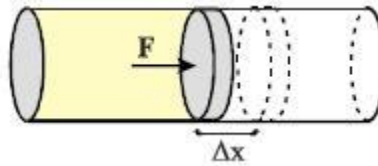
όπου ΔV η πολύ μικρή μεταβολή του όγκου του αερίου. Έτσι μπορούμε να εκφράσουμε το έργο που παράγει το αέριο

$$\Delta W = p \Delta V$$

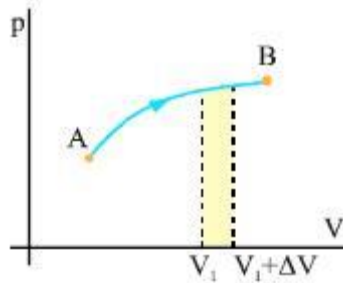
Συνεπώς το έργο είναι θετικό αν το αέριο εκτονώνεται (αυξάνει ο όγκος του) και αρνητικό αν το αέριο συμπιέζεται.

Έστω μια τυχαία αντιστρεπτή μεταβολή κατά την οποία το αέριο μεταβαίνει από την αρχική κατάσταση Α στην τελική κατάσταση Β (Εικόνα 10). Αν η βάση (ΔV) της επιφάνειας με το κίτρινο χρώμα είναι πολύ μικρή, η επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί παραλληλόγραμμο. Το εμβαδόν της, που ισούται με το γινόμενο βάση x ύψος $= \Delta V \cdot p = \Delta W$, δίνει το έργο του αερίου κατά την εκτόνωσή του, από όγκο V_1 σε όγκο $V_1 + \Delta V$.

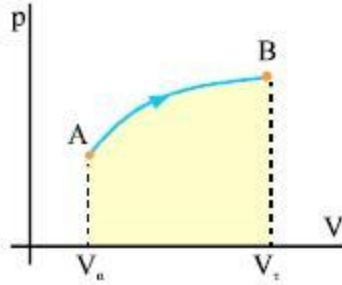
Το έργο ενός αερίου σε μια αντιστρεπτή μεταβολή είναι αριθμητικά ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας από την γραμμή του διαγράμματος μέχρι τον άξονα V , στο διάγραμμα p - V .



Εικόνα 10. Το αέριο εκτονώνεται και το έμβολο μετατοπίζεται κατά Δx . Η δύναμη F που ασκεί το αέριο στο έμβολο παράγει έργο ΔW . (Βιβλίο Φυσικής Β' Λυκείου, Θετικής Κατεύθυνσης)



Εικόνα 11. Σε μια τυχαία αντιστρεπτή μεταβολή το έργο κατά την εκτόνωση του αερίου από όγκο V_1 σε όγκο $V_1 + \Delta V$ είναι ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας με το κίτρινο χρώμα. (Βιβλίο Φυσικής Β' Λυκείου, Θετικής Κατεύθυνσης)



Εικόνα 12. Σε μια τυχαία αντιστρεπτή μεταβολή το έργο του αερίου κατά τη μεταβολή του από το A στο B είναι ίσο με το εμβαδόν κάτω από την γραμμή του διαγράμματος. (Βιβλίο Φυσικής Β' Λυκείου, Θετικής Κατεύθυνσης)

4.6 Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής

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.

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

$$Q = \Delta U + W$$

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 στην αδιαβατική μεταβολή είναι:

$$Q = \Delta U + W \Rightarrow 0 = \Delta U + W \Rightarrow W = -\Delta U,$$

άρα στην αδιαβατική εκτόνωση $A \rightarrow B$ έχουμε ψύξη του αερίου (από το σχήμα βλέπουμε ότι $T_A < T_B$) ενώ στην αδιαβατική συμπίεση $B \rightarrow A$ έχουμε θέρμανση του αερίου.

Το έργο στην αδιαβατική μεταβολή δίνεται από την σχέση:

$$W_{AB} = (P_B V_B - P_A V_A) / (1 - \gamma)$$

Οι αδιαβατικές μεταβολές παίζουν σημαντικό ρόλο στον κύκλο Carnot .

4.7 Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής

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. Ο συντελεστής απόδοσης μιας θερμικής μηχανής είναι μικρότερος από ένα, καθώς δεν μετατρέπει όλο το ποσό της θερμότητας σε ωφέλιμο έργο.

Όλες οι μηχανές εκμεταλλεύονται μόνο ένα μέρος της θερμότητας και αποβάλλουν σημαντικά ποσά θερμότητας στο περιβάλλον. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στη διατύπωση του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, από τους Kelvin και Planck (Κέλβιν και Πλανκ), συμπεραίνοντας ότι **«Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί θερμική μηχανή που να μετατρέπει εξ ολοκλήρου τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο»**.

Η θερμότητα 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. Όμως για τη λειτουργία αυτών των μηχανών δαπανούμε ενέργεια. Αυτή η διαπίστωση οδήγησε σε μια άλλη διατύπωση του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου από τον Clausius (Κλαούζιους), συμπεραίνοντας ότι **«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. (Φυσική, Γενικού Λυκείου)

Η πρώτη διατύπωση του Νόμου, κατά Kelvin, λέει ότι είναι *αδύνατον για οποιοδήποτε σύστημα που εργάζεται με κυκλικές μεταβολές, να δίνει έργο στο περιβάλλον του, ευρισκόμενο σε επαφή αποκλειστικά με μία μόνον θερμική δεξαμενή.*

Η δεύτερη διατύπωση που οφείλεται στον Clausius, λέει ότι είναι *αδύνατον για οποιοδήποτε σύστημα που εργάζεται με κυκλικές μεταβολές, να μεταφέρει θερμότητα από μια ψυχρή δεξαμενή σε μια θερμή δεξαμενή, χωρίς συγχρόνως να προσφέρουμε έργο.*

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 μετασχηματιστεί 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.

Σύμφωνα με το 2ο Θερμοδυναμικό αξίωμα, η εντροπία, δηλαδή η αταξία ενός συστήματος τείνει, αν αφεθεί μόνο του, να αυξηθεί. Δηλαδή, δεν μπορεί αυθόρμητα, ένα σύστημα να μεταβεί σε κατάσταση μεγαλύτερης τάξης, αλλά τείνει σε κατάσταση μεγαλύτερης αταξίας. Με άλλα λόγια, ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής απαγορεύει (μεταξύ των άλλων) σε δύο σώματα ίσης θερμοκρασίας, που είναι σε επαφή μεταξύ τους και απομονωμένα από το περιβάλλον, από το να εξελιχθούν σε μια κατάσταση στην οποία το ένα από τα δύο να έχει μια σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία από το άλλο.

Ο δεύτερος νόμος εκφράζεται επίσης και ως εξής: **σε ένα απομονωμένο σύστημα, η εντροπία δεν μειώνεται ποτέ.**

4.8 Η μηχανή του Carnot

Σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, μια θερμική μηχανή δε μπορεί να έχει απόδοση 100%. Ο μεγαλύτερος συντελεστής απόδοσης που μπορεί να έχει μια μηχανή, όταν δίνονται οι θερμοκρασίες T_h και T_c , των δεξαμενών θερμότητας της μηχανής απαντήθηκε το 1824 από το Γάλλο μηχανικό Carnot. Ο Carnot περιέγραψε μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή, που ονομάστηκε κύκλος Carnot, και απέδειξε ότι μια θερμική μηχανή που θα ακολουθούσε αυτόν τον αντιστρεπτό 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. (Φυσική, Γενικού Λυκείου).

Κύκλος του Carnot

Ο κύκλος Carnot αποτελείται από τέσσερις μεταβολές, δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές.

1. Κατά τη μεταβολή $A \rightarrow B$, το αέριο βρίσκεται σε επαφή με τη θερμή δεξαμενή και εκτονώνεται ισόθερμα σε θερμοκρασία T_h , απορροφώντας θερμότητα Q_h .
2. Κατά τη μεταβολή $B \rightarrow \Gamma$, το αέριο είναι θερμικά μονωμένο και εκτονώνεται αδιαβατικά μέχρι η θερμοκρασία του να πάρει την τιμή T_c .
3. Κατά τη μεταβολή $\Gamma \rightarrow \Delta$, 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 $\Delta \rightarrow A$, το αέριο είναι θερμικά μονωμένο και συμπιέζεται αδιαβατικά ώστε να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση.

Ο συντελεστής απόδοσης μιας θερμικής μηχανής είναι

$$e = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_b}$$

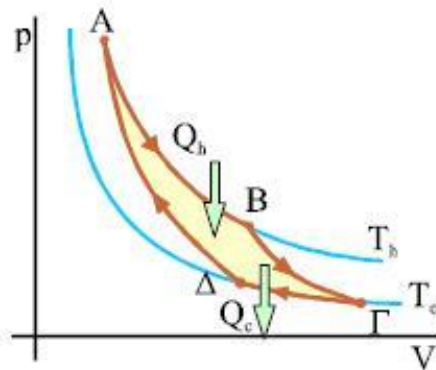
Αποδεικνύεται ότι για τον κύκλο Carnot ισχύει

$$\frac{|Q_c|}{Q_b} = \frac{T_c}{T_b}$$

Αντικαθιστώντας βρίσκουμε ότι ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής Carnot είναι

$$\epsilon_{carnot} = 1 - \frac{T_c}{T_b}$$

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.



Εικόνα 13. Διάγραμμα p-V για τον κύκλο Carnot. Το παραγόμενο έργο W, ισούται με την θερμότητα, $Q_b - |Q_c|$, που απορροφά το μέσον σε ένα κύκλο. (Βιβλίο Φυσικής Β' Λυκείου, Θετικής Κατεύθυνσης).

Παραδείγματα

Παράδειγμα 4.1 :

Να βρεθεί η πυκνότητα ιδανικού αερίου που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 21 °C και πίεση 0,98 bar. Δίνεται ότι $R=287 \text{ J/kg K}$

Λύση

Βήμα 1^ο: Μετατροπή μονάδων στο S.I.

Για τη θερμοκρασία: $21^\circ\text{C}=21+273=294 \text{ K}$

Για τη πίεση: $0,98 \text{ bar}=0,98 \cdot 10^5=98000 \text{ Pa}$

Βήμα 2^ο: Εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης και εύρεση της πυκνότητας

$$P = \rho \cdot R \cdot T \Rightarrow \rho = \frac{P}{R \cdot T} = \frac{98000}{287 \cdot 294} = 1,161 \text{ kg / m}^3$$

Παράδειγμα 4.2:

Φιάλη οξυγόνου είναι συμπιεσμένη στις 200 ατμόσφαιρες και έχει θερμοκρασία 20 °C. Ξαφνικά λόγω μιας διαρροής, χάνεται ένα μέρος του οξυγόνου και παράλληλα η πίεση αλλά και η θερμοκρασία πέφτουν στις 60 ατμόσφαιρες και 2 °C αντίστοιχα. Να βρεθεί το ποσοστό της ποσότητας του οξυγόνου που χάθηκε.

Λύση Αρχικά έχουμε $P_1 = 200 \text{ atm}$, $T_1 = 20 + 273 = 293 \text{ K}$ και η καταστατική εξίσωση (2) δίνει

$$P_1 V = N_1 k T_1 \quad (\alpha)$$

όπου V ο όγκος της φιάλης ενώ τελικά $P_2 = 60 \text{ atm}$, $T_2 = 2 + 273 = 275 \text{ K}$ και

$$P_2 V = N_2 k T_2 \quad (\beta)$$

Διαιρώντας κατά μέλη έχουμε

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2} = \frac{60 \cdot 293}{200 \cdot 275} = 0,32$$

Επομένως το κλάσμα του οξυγόνου που διέφυγε στην ατμόσφαιρα είναι

$$\frac{N_1 - N_2}{N_1} = 1 - \frac{N_2}{N_1} = 1 - 0,32 = 0,68$$

ή 68% της αρχικής ποσότητας.

Παράδειγμα 4.3:

Εάν στο παραπάνω παράδειγμα η φιάλη του οξυγόνου ήταν χωρητικότητας 5 λίτρων, να βρεθεί ο αρχικός αριθμός των μορίων του οξυγόνου μέσα στην φιάλη. Σε πόσα γραμμομόρια αντιστοιχεί αυτή η ποσότητα οξυγόνου; Πόσο ζυγίζει αυτή η ποσότητα οξυγόνου;

Λύση: Σύμφωνα με τα αρχικά δεδομένα έχουμε

$$P_1 = 200 \text{ atm} = 200 \times 101 \text{ kPa} = 20200 \text{ kPa},$$

$$V_1 = 5 \text{ λίτρα} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3,$$

$$T_1 = 20 + 273 = 293 \text{ K}.$$

Όλα στο σύστημα SI γιατί η σταθερά k στην καταστατική εξίσωση $P_1 V_1 = N_1 k T_1$ δίνεται σε αυτό το σύστημα ως $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

Το γινόμενο PV εκφράζει έργο και επομένως οι μονάδες του στο SI είναι σε J.

$$\text{Έτσι } PV = 20200 \text{ kPa} \times 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ ή } PV = 101 \text{ kJ}.$$

$$\text{Επιπλέον } kT_1 = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 293 \text{ K} = 4,04 \times 10^{-21} \text{ J}$$

Από την καταστατική εξίσωση έχουμε

$$N_1 = 2,5 \times 10^{25} \text{ μόρια οξυγόνου}.$$

Διαιρώντας αυτόν τον αριθμό με τον αριθμό του Avogadro $N_A = 6,023 \times 10^{23}$ παίρνουμε για τον αριθμό των γραμμομορίων $n = 41,5$.

Εξ' ορισμού το βάρος του γραμμομορίου σε γραμμάρια ισούται με το μοριακό βάρος της ουσίας υπό εξέταση. Το μόριο του οξυγόνου είναι O_2 και επομένως το γραμμομόριο ζυγίζει

$$2 \times 16 = 32 \text{ g}$$

και άρα τα 41,5 γραμμομόρια οξυγόνου ζυγίζουν 1330 g.

Παράδειγμα 4.4:

Να βρεθεί η πυκνότητα του αέρα μια καλοκαιρινή μέρα που η θερμοκρασία είναι 27°C . Υποθέτουμε ότι η ατμοσφαιρική πίεση είναι $1\text{atm}=(1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2)$ και ότι ο αέρας συμπεριφέρεται σαν ιδανικό αέριο με γραμμομοριακή μάζα $29 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$.

Λύση:

Η καταστατική εξίσωση γράφεται με τη μορφή:

$$p = \frac{\rho}{M} R T \quad \begin{array}{l} \text{από την οποία} \\ \text{προκύπτει} \end{array} \quad p = \frac{\rho M}{RT}$$

Αντιαθιστώντας στο SI έχουμε

$$p = \frac{1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \cdot 29 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}}{8,314 \text{ J/(mol K)} \cdot 300 \text{ K}} = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

Παράδειγμα 4.5:

0,2 mol H₂ βρίσκονται σε δοχείο με κινητό έμβολο σε θερμοκρασία T₁=300 K και πίεση 2 atm (κατάσταση Α). Διατηρώντας σταθερή την πίεσή του θερμαίνουμε το αέριο μέχρις ότου η θερμοκρασία του γίνει T₂=400 K (κατάσταση Β). Στη συνέχεια το αέριο εκτονώνεται ισόθερμα μέχρις ότου η πίεσή του γίνει ίση με 1,5 atm (κατάσταση Γ) και μετά ψύχεται με σταθερό όγκο μέχρι η θερμοκρασία του να γίνει T₁=300K (κατάσταση Δ). Τέλος, το αέριο συμπιέζεται ισόθερμα μέχρι να φτάσει στην αρχική του κατάσταση. Να βρείτε τις τιμές του όγκου της πίεσης, και της θερμοκρασίας που αντιστοιχούν στις καταστάσεις Α, Β, Γ και Δ και να αποδώσετε την παραπάνω διαδικασία σε διαγράμματα με άξονες P-V, P-T, και V-T. Δίνεται η τιμή της σταθεράς R = 0,082 L · atm / mol · K

Λύση

Α. Στην κατάσταση Α, το αέριο έχει πίεση p_A=2 atm και T_A=300 K. Τον όγκο του αερίου μπορούμε να τον υπολογίσουμε από την καταστατική εξίσωση.

$$p_A V_A = nRT_A \quad \text{ή} \quad V_A = \frac{nRT_A}{p_A} = \frac{0,2 \text{ mol} \cdot 0,082 \text{ L} \cdot \text{atm} / (\text{mol} \cdot \text{K}) \cdot 300 \text{ K}}{2 \text{ atm}}$$

από όπου προκύπτει $V_A = 2,46 \text{ L}$.

Β. Στην κατάσταση Β, το αέριο έχει πίεση p_B=p_A=2 atm και θερμοκρασία T_B=400 K. Ο όγκος του υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_B}{T_B} \quad \text{ή} \quad V_B = \frac{T_B}{T_A} V_A = \frac{400 \text{ K}}{300 \text{ K}} \cdot 2,46 \text{ L},$$

από όπου προκύπτει $V_B = 3,28 \text{ L}$.

Γ. Στην κατάσταση Γ, το αέριο έχει θερμοκρασία $T_{\Gamma}=400\text{ K}$ και πίεση $p_{\Gamma}=1,5\text{ atm}$. Ο όγκος του υπολογίζεται από τη σχέση

$$p_B V_B = p_{\Gamma} V_{\Gamma} \quad \text{ή} \quad V_{\Gamma} = \frac{p_B}{p_{\Gamma}} V_B = \frac{2\text{ atm}}{1,5\text{ atm}} \cdot 3,28\text{ L},$$

από όπου προκύπτει $V_{\Gamma} = 4,37\text{ L}$.

Δ. Στην κατάσταση Δ, το αέριο έχει $T_{\Delta}=300\text{ K}$ και όγκο $V_{\Delta}=V_{\Gamma}=4,37\text{ L}$ και θερμοκρασία. Η πίεσή του υπολογίζεται από τη σχέση

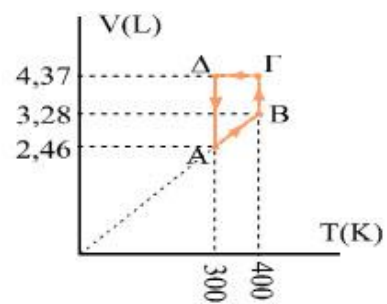
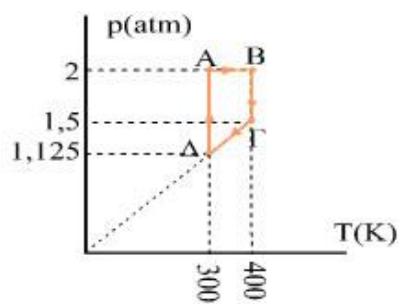
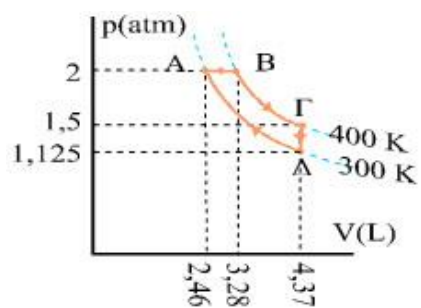
$$\frac{p_{\Delta}}{T_{\Delta}} = \frac{p_{\Gamma}}{T_{\Gamma}} \quad \text{ή} \quad p_{\Delta} = \frac{T_{\Delta}}{T_{\Gamma}} p_{\Gamma} = \frac{300\text{ K}}{400\text{ K}} \cdot 1,5\text{ atm}$$

από όπου προκύπτει $p_{\Delta} = 1,125\text{ atm}$.

Οι τιμές που βρήκαμε φαίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα

| | p(atm) | V(L) | T(K) |
|----------|---------------|-------------|-------------|
| A | 2 | 2,46 | 300 |
| B | 2 | 3,28 | 400 |
| Γ | 1,5 | 4,37 | 400 |
| Δ | 1,125 | 4,37 | 300 |

Με βάση τις τιμές του πίνακα μπορούμε να κατασκευάσουμε τα διαγράμματα:



Βιβλιογραφία

1. Δ. Κουζούδης, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, Γενικό Τμήμα Πολυτεχνικής σχολής, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011.
2. Π. Κασσωμένος, Φυσική Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Κλειδαριθμός, Αθήνα, 2017
3. Π. Ιωάννου, Τ. Αποστολάτος, 2016. Νευτώνεια Μηχανική. Athens:Hellenic Academic Libraries Link. Available Online at: <http://hdl.handle.net/11419/6479>
4. Σ. Ν. Πνευματικός, Κεφάλαιο Β' : Πεδία Δυνάμεων της Κλασικής Μηχανικής. Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μαθηματικών, Κλασική Μηχανική
5. Α. Ιωάννου, Γ. Ντάνος, Α. Πήττας, Σ. Ράπτης, Ι.Α. Βλάχος, Ι.Γ. Γραμματικάκης, Β.Α. Καραπαναγιώτης, Π.Ε. Περιστερόπουλος, Γ.Β. Τιμοθέου, Φυσική (Β Λυκείου Θετικών Σπουδών), Υπουργείο Παιδείας Έρευνας και Θρησκευμάτων, 2013
6. Θέρμανση - Ψύξη-Κλιματισμός. Κατσαπρακάκης, Δημήτριος, Μονιάκης, Μύρων, Κάλλιππος 2015
7. Fermi Enrico, ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ, Μετάφραση: Φέρτης Απόστολος, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, 2002.
9. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ, Κων. Ζ. Παγωνάρη, Ισρυμα Εεγενίδου, Βιβλιοθήκη του Ναυτικού, 2020.