

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### Η τεχνική του κενού

#### *Μέθοδοι παραγωγής και μέτρησης του κενού*

#### 9.1 Εισαγωγή

Η παραγωγή κενού (χώρου απαλλαγμένου από την παρουσία του ατμοσφαιρικού αέρα ή άλλων αερίων) ανήκει στην κατηγορία της υψηλής τεχνολογίας και τη συναντά κανείς σχεδόν παντού, στην έρευνα, στις εφαρμοσμένες επιστήμες, στη μεταλλουργία, στην παραγωγή φαρμάκων και χημικών προϊόντων, στην αεροναυπηγική, στην παραγωγή πυραύλων και δορυφόρων, στην παραγωγή φακών και κάθε είδους οπτικών συσκευών, στην ηλεκτρονική και μικροηλεκτρονική, στην παραγωγή οθονών τηλεοράσεων, παλμογράφων και υπολογιστών, στην παραγωγή ηλεκτρονικών μικροσκοπίων, ηλεκτρονικών συσκευών και ποικίλων μέσων τηλεπικοινωνίας κ.λπ.

Πολύ σημαντικός είναι ο ρόλος της τεχνικής κενού στην επιστημονική έρευνα και ειδικότερα στη Φυσική. Πολλοί κλάδοι της Φυσικής δε θα μπορούσαν να αναπτυχθούν εάν οι ερευνητές δεν διέθεταν τα κατάλληλα μέσα παραγωγής υψηλού κενού. Ενδεικτικά αναφέρουμε τη Φυσική Πλάσματος, την Ηλεκτρονική Φυσική, τη Φυσική Στερεάς Κατάστασης, και ειδικότερα τη Φυσική των Επιφανειών, τη Φυσική της Ηλεκτρικής Εκκένωσης στα Αέρια, τη Μοριακή Φυσική, την Ατομική Φυσική, την Πυρηνική Φυσική και τη Φυσική Υψηλών Ενεργειών (οι επιταχυντές των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται στους τελευταίους δύο κλάδους, μεταξύ άλλων, είναι και τεράστιες συσκευές υψηλού κενού). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η κινητική θεωρία των αερίων άρχισε να αναπτύσσεται μόνο όταν έγινε δυνατή η κατασκευή των πρώτων αντλιών κενού, έστω και ατελών. Η θεωρία αυτή σε μεγάλο βαθμό επιτάχυνε την ανάπτυξη της Ατομικής, της Μοριακής, της Πυρηνικής Φυσικής και της Φυσικής γενικότερα.

#### Α. Βασικές έννοιες

#### 9.2 Οι βασικές φυσικές αρχές της τεχνικής του κενού.

Βάση της Τεχνολογίας του Κενού αποτελεί η Φυσική των αραιών αερίων, οι βασικές ιδιότητες των οποίων, με καλή προσέγγιση, συνοψίζονται στη γνωστή *καταστατική εξίσωση των αερίων*

$$pV = \frac{Nm}{M}RT, \quad (9.1)$$

όπου  $p$  είναι η πίεση του αερίου,  $V$  είναι ο όγκος του,  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία του,  $N$  είναι το πλήθος των μορίων του,  $m$  είναι η μάζα του κάθε μορίου,  $M$  ο μοριακός αριθμός του αερίου και  $R$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων.

Στις εφαρμογές του κενού, ο όγκος του αερίου είναι σταθερός ενώ η θερμοκρασία του σπάνια διαφέρει από αυτήν του περιβάλλοντος. Συνεπώς, η Εξ. (9.1) μπορεί να γραφτεί ως:

$$p = C \times \rho, \quad (9.2)$$

όπου  $C$  είναι μια σταθερά και  $\rho = Nm/V$  είναι η πυκνότητα του αερίου.

Από την Εξ. (9.1) προκύπτει ακόμα μία χρήσιμη σχέση, η οποία ορίζει τη μάζα του αερίου το οποίο καταλαμβάνει όγκο  $V$  και έχει πίεση  $p$ ,

$$pV = C \times mN, \quad (9.3)$$

όπου  $mN$  είναι η μάζα του αερίου. Η σχέση (9.3) επιτρέπει τη μέτρηση της μάζας έμμεσα, μέσω της μέτρησης των εύκολα μετρούμενων μεγεθών  $p$  και  $V$ . Για τον λόγο αυτό, στην τεχνική του κενού η μάζα του αερίου δίνεται συχνά σε μονάδες (πίεση)  $\times$  (όγκος).

**Ο νόμος του Dalton.** Ένας στεγανά κλειστός χώρος, συνήθως περιέχει μίγμα αερίων τα οποία συμβάλλουν στη συνολική πίεση σύμφωνα με τη σχέση του Dalton,

$$p = \sum p_i, \quad (9.4)$$

δηλαδή, η πίεση του μίγματος ισούται με το άθροισμα των μερικών πιέσεων των συστατικών του. *Μερική πίεση* ενός αερίου είναι η πίεση που θα δημιουργούσε το αέριο αυτό εάν κατελάμβανε τον χώρο στον οποίο βρίσκεται μόνο του.

Μία από τις σημαντικότερες σχέσεις που χρησιμοποιείται στην τεχνική του κενού είναι αυτή που προκύπτει από την κινητική θεωρία των αερίων και συνδέει τη μέση ελεύθερη διαδρομή,  $\lambda$ , των μορίων, με την πίεση,

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \times N_1 \pi \sigma^2 \left(1 + \frac{C}{T}\right)}, \quad (9.5)$$

όπου  $N_1$  είναι η μοριακή συγκέντρωση,  $\sigma$  είναι η ενεργός διατομή του μορίου για σύγκρουση,  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία και  $C$  είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από το είδος του αερίου. Ο παράγοντας  $(1 + C/T)$  περιγράφει την εξάρτηση της  $\sigma$  από τη θερμοκρασία.

Επειδή η συγκέντρωση των μορίων,  $N_1$ , είναι ανάλογη της πίεσης, [Εξ. (9.3)], προκύπτει ότι για  $T = \text{σταθερή}$  η σχέση (9.5) μπορεί να γραφτεί ως

$$\lambda \times p = \lambda', \quad (9.6)$$

όπου  $\lambda'$  είναι μια σταθερά, η τιμή της οποίας ισούται με το μήκος της μέσης ελεύθερης διαδρομής όταν η πίεση είναι ίση με τη μονάδα. Στον Πίνακα 9.1 δίνονται μερικές τιμές του  $\lambda$  συναρτήσει του  $p$ , για τα μόρια του αέρα, όταν η θερμοκρασία του είναι  $25^\circ\text{C}$ .

**Πίνακας 9.1**

$p$ (Pa)	$p$ (Torr)	$\lambda$ (m)
$10^5$	750	$6,2 \cdot 10^{-8}$
$10^2$	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$
0,1	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$
$10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	62
$10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-10}$	62000 (62km!)

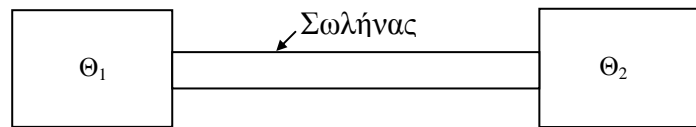
### 9.3 Η κλίμακα του κενού

Έστω δύο θάλαμοι κενού,  $\Theta_1$  και  $\Theta_2$ , οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός σωλήνα, η διάμετρος του οποίου είναι  $d$  και το μήκος του  $L$  (Σχ. 9.1). Έστω επίσης

ότι με κάποιον τρόπο διατηρείται μία σταθερή στο χρόνο διαφορά πιέσεων στους δύο θαλάμους και οι πιέσεις στους θαλάμους είναι  $p_1$  και  $p_2$  αντίστοιχα, όπου  $p_1 > p_2$ . Υπό τις συνθήκες αυτές, στον σωλήνα θα διατηρείται μία μόνιμη ροή αερίου, για την τιμή του οποίου μπορούμε να διατυπώσουμε έναν νόμο, όμοιο με τον νόμο του Ohm για το ηλεκτρικό ρεύμα,

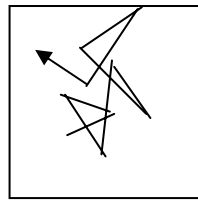
$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{p_1 - p_2}{R}, \quad (9.7)$$

όπου  $\Delta Q / \Delta t$  είναι η μάζα του αερίου που διασχίζει τον σωλήνα ανά μονάδα χρόνου και  $R$  ορίζεται ως η *αντίσταση του σωλήνα* στη ροή αυτή.

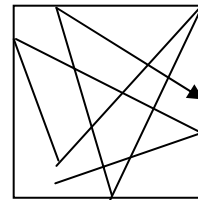


**Σχήμα 9.1.**

Η αντίσταση του συνδετικού σωλήνα προφανώς εξαρτάται από τις γεωμετρικές του διαστάσεις  $d$  και  $L$ , αλλά, όπως έδειξε η έρευνα, εξαρτάται και από την πίεση του αερίου, ή από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του.



(α)



(β)

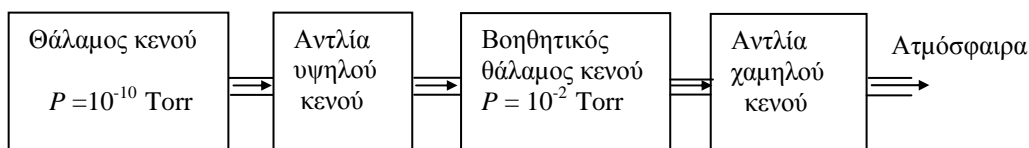
**Σχήμα 9.2.**

Στο Σχ. 9.2α, όπου φαίνεται η διαδρομή ενός μορίου, η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι πολύ μικρότερη από τις γραμμικές διαστάσεις του θαλάμου. Στην περίπτωση αυτή τα μόρια συγκρούονται μεταξύ τους πολύ πιο συχνά από ό,τι με τα τοιχώματα του δοχείου. Αντίθετα, στο Σχ. 9.2β, τα μόρια συγκρούονται κυρίως με τα τοιχώματα του θαλάμου. Αυτή η διαφορά στον χαρακτήρα κίνησης των μορίων επηρεάζει τους νόμους που περιγράφουν την αντίσταση του σωλήνα. Έτσι, όταν είναι  $\lambda / d \ll 1$  (χαμηλό κενό) η αντίσταση του σωλήνα είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του, ενώ στις πιέσεις για τις οποίες είναι  $\lambda / d \gg 1$  (υψηλό κενό) η αντίσταση του σωλήνα είναι αντιστρόφως ανάλογη του κύβου της διαμέτρου του. Για τον λόγο αυτό το κενό χωρίζεται σε τρεις περιοχές. Όταν είναι  $\lambda / d \ll 1$  το κενό θεωρείται *χαμηλό*. Αντιθέτως, το κενό θεωρείται *υψηλό* όταν  $\lambda / d \gg 1$ . Στις πιέσεις όπου είναι  $\lambda / d \sim 1$  το κενό θεωρείται *μέτριο*.

## B. Η παραγωγή του κενού

### 9.4 Αντλίες κενού

Οι σύγχρονες αντλίες παράγουν κενό που εκτείνεται από 760 Torr ( $10^5$  Pa) έως  $10^{-13}$  Torr ( $10^{-11}$  Pa). Παρά τη μεγάλη ποικιλία, καμία αντλία δεν μπορεί να καλύψει όλη την κλίμακα κενού που αναφέραμε. Η παραγωγή υψηλού κενού, συνήθως, επιτυγχάνεται με δύο μονάδες άντλησης, τη μονάδα χαμηλού κενού και τη μονάδα υψηλού κενού, συνδεδεμένες στη σειρά (Σχ. 9.3).



Σχήμα 9.3.

Έτσι, οι αντλίες κενού χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στις *αντλίες χαμηλού κενού* ( $10^{-3} - 10^{-1}$  Torr) και στις *αντλίες υψηλού κενού* ( $10^{-7} - 10^{-13}$  Torr). Σημειώνουμε ότι οι αντλίες υψηλού κενού αδυνατούν να λειτουργήσουν όταν στην έξοδό τους η πίεση είναι η ατμοσφαιρική. Για την ομαλή λειτουργία των αντλιών αυτών, στην έξοδό τους η πίεση πρέπει να είναι της τάξης του  $10^{-2}$  Torr. Το βοηθητικό αυτό κενό παράγεται από αντλίες χαμηλού κενού, οι οποίες είναι σχεδιασμένες για να λειτουργούν ενάντια στην ατμοσφαιρική πίεση.

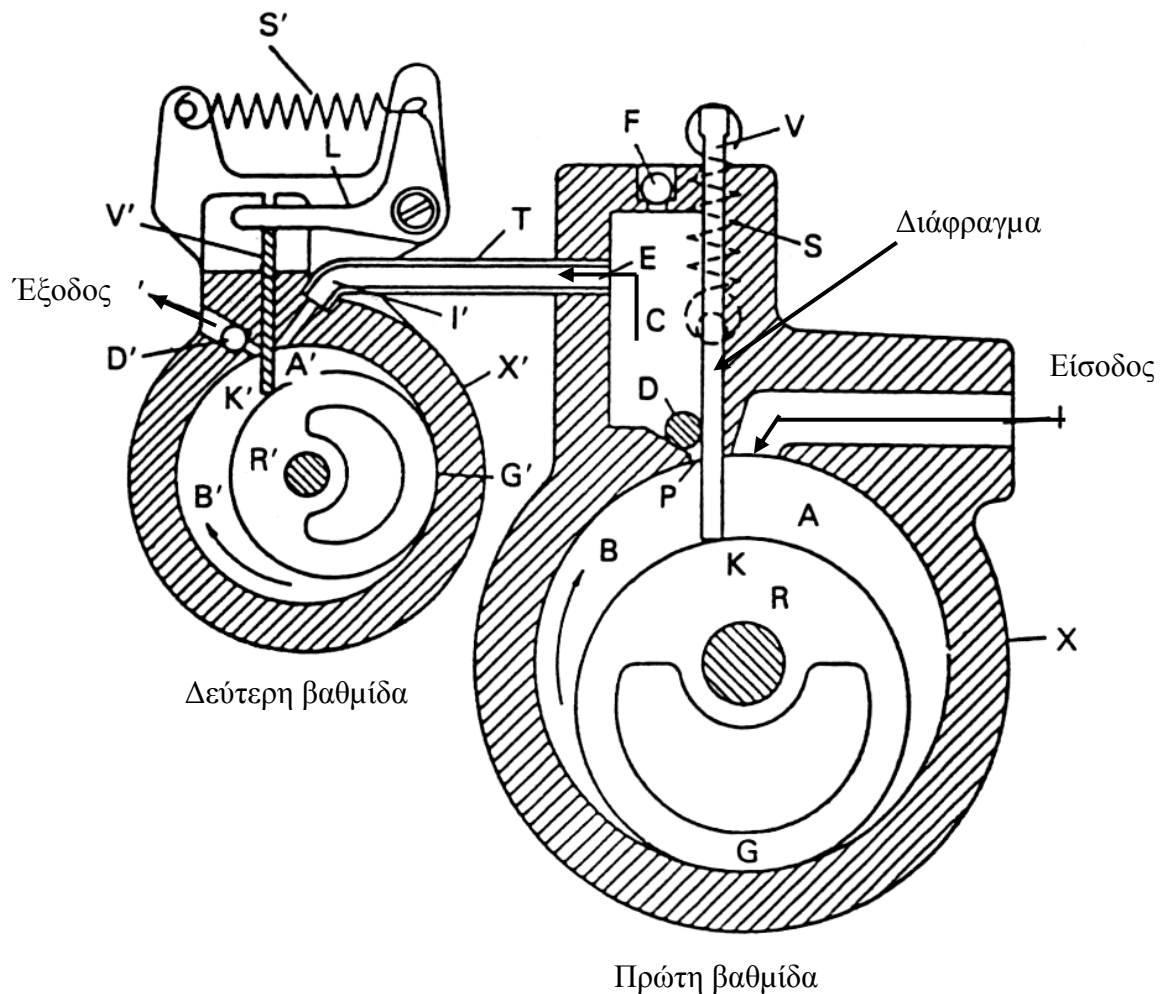
#### 9.4.1 Αντλίες χαμηλού κενού

Η σύγχρονη τεχνολογία παράγει και χρησιμοποιεί πολλούς τύπους αντλιών χαμηλού κενού. Εδώ θα εξετάσουμε μόνο δύο τύπους, τις *μηχανικές αντλίες κενού* και τις *ψυχόμενες αντλίες ρόφησης*. Και οι δύο τύποι βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην υψηλή τεχνολογία και την επιστημονική έρευνα.

##### 9.4.1.1 Μηχανικές αντλίες κενού.

Στην αντλία αυτού του τύπου, όπως και στις παραλλαγές της, ένας έκκεντρα περιστρεφόμενος κύλινδρος μαζί με ένα κινούμενο πλακίδιο (*διάφραγμα στεγανοποίησης*) δημιουργούν δύο θαλάμους στο εσωτερικό της αντλίας, τον θάλαμο (A) και τον θάλαμο (B) (Σχ. 9.4).

Με αναφορά στο Σχ. 9.4, παρατηρούμε ότι καθώς ο κύλινδρος περιστρέφεται, σε κάποιο στάδιο ο όγκος του δεξιού θαλάμου (A) αυξάνεται και έτσι επιτυγχάνεται η ρόφηση του αερίου σε αυτόν. Αντίθετα, ο όγκος του αριστερού θαλάμου (B) μειώνεται, με επακόλουθο τη συμπίεση του αερίου που είχε εγκλωβιστεί σε αυτόν κατά την προηγούμενη φάση του κύκλου. Μεσώ της βαλβίδας εξόδου, το συμπιεσμένο αέριο θα εξαχθεί από τον αριστερό θάλαμο όταν η πίεση του αερίου γίνει μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Το εσωτερικό της αντλίας είναι εμβαπτισμένο σε ειδικό λάδι το οποίο δρα σαν ψυκτικό μέσο, σαν λιπαντικό και σαν στεγανοποιητής μεταξύ των διαφόρων τμημάτων και εξαρτημάτων της αντλίας.



**Σχήμα 9.4**

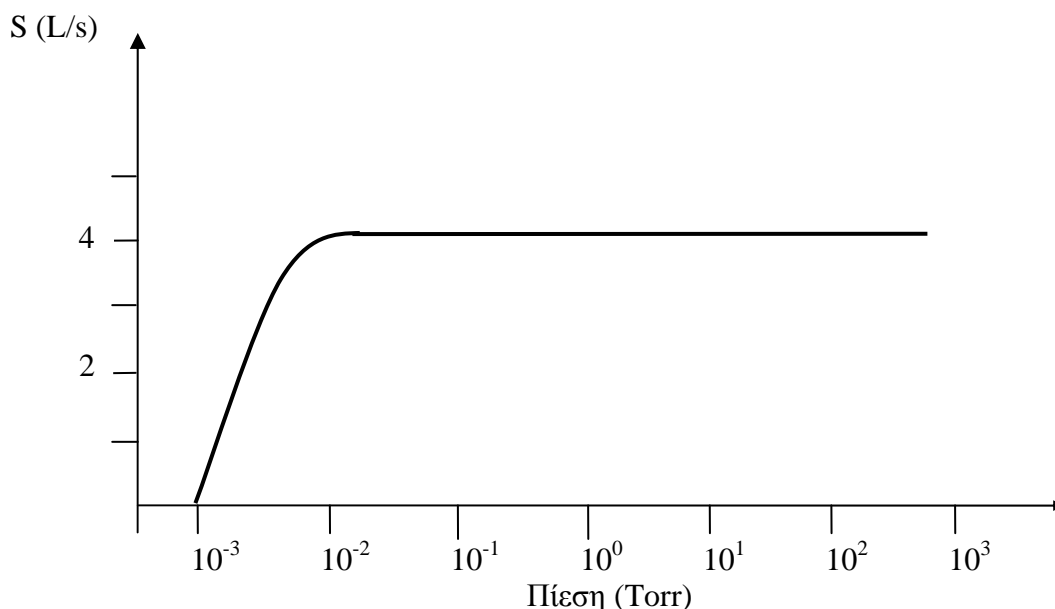
Στην έξοδο της αντλίας τοποθετείται ένα φίλτρο που συγκρατεί τα σταγονίδια του λαδιού καθώς αυτά παρασύρονται προς την έξοδο υπό μορφή «καπνού». Στην έρευνα και στις εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας προτιμούνται οι αντλίες στις οποίες ο λειτουργικός κύκλος επαναλαμβάνεται σε μία ακόμα βαθμίδα που χρησιμοποιεί τον ίδιο άξονα, οπότε η αντλία γίνεται δύο βαθμίδων Σχ. 9.4.

*Παράμετροι της μηχανικής αντλίας κενού.*

Οι σπουδαιότερες παράμετροι της μηχανικής αντλίας κενού είναι η *ταχύτητα άντλησης* και η *ελάχιστη πίεση* που μπορεί αυτή να παραγάγει. Η τελευταία δίνεται υπό την ευνοϊκότερη για την αντλία συνθήκη, όταν αυτή αντλεί τον εαυτό της, δηλαδή απουσιάζουν οι διαρροές και πηγές αερίων που συνήθως υπάρχουν στους θαλάμους κενού. Η τιμή της ελάχιστης πίεσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, αλλά οι σπουδαιότεροι από αυτούς είναι η αριθμός των βαθμίδων που έχει η αντλία και η κατάσταση του λαδιού. Στις μηχανικές αντλίες, η πίεση ατμών του λαδιού είναι της τάξης  $10^{-4} - 10^{-5}$  Torr. Η μερική πίεση των αερίων που είναι διαλυμένα στο λάδι είναι μεταξύ  $2$  και  $5 \times 10^{-3}$  Torr, ενώ η ολική πίεση που δημιουργείται στην είσοδο της

αντλίας μίας βαθμίδας είναι τις τάξεις των  $2 - 5 \times 10^{-2}$  Torr. Όπως βλέπουμε, η μεγάλη τιμή της ελάχιστης πίεσης που παράγει η αντλία δεν μπορεί να αποδοθεί στα διαλυμένα στο λάδι αέρια ή στην πίεση των ατμών του λαδιού. Η σχετική έρευνα του φαινομένου έδειξε ότι η υψηλή πίεση δημιουργείται από προϊόντα διύλισης του λαδιού, τα οποία παράγονται στα σημεία τριβής, όπου πρόσκαιρα αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες. Τα προϊόντα διύλισης του λαδιού έχουν πίεση ατμών που είναι πολύ υψηλότερη από αυτήν του καθαρού λαδιού. Υψηλή πίεση ατμών έχουν διάφοροι διαλύτες όπως και το νερό. Έτσι, το λάδι της αντλίας πρέπει να είναι καθαρό και ελεύθερο από ουσίες και υγρά που έχουν υψηλή πίεση ατμών. Λάδι στο οποίο συγκεντρώθηκε μεγάλη ποσότητα νερού πρέπει να αντικατασταθεί. Στις αντλίες δύο βαθμίδων η ελάχιστη πίεση είναι περίπου 10 φορές μικρότερη και είναι σχεδόν ίση με τη μερική πίεση του αέρα που είναι διαλυμένος στο λάδι.

Στο Σχ. 9.5 δίνεται η γραφική παράσταση της ταχύτητας άντλησης συναρτήσει της πίεσης στην είσοδο της αντλίας δύο βαθμίδων. Όπως βλέπουμε, στις μικρές πιέσεις η ταχύτητα άντλησης μειώνεται, και μηδενίζεται όταν η τιμή της πίεσης γίνεται ίση με την ελάχιστη.

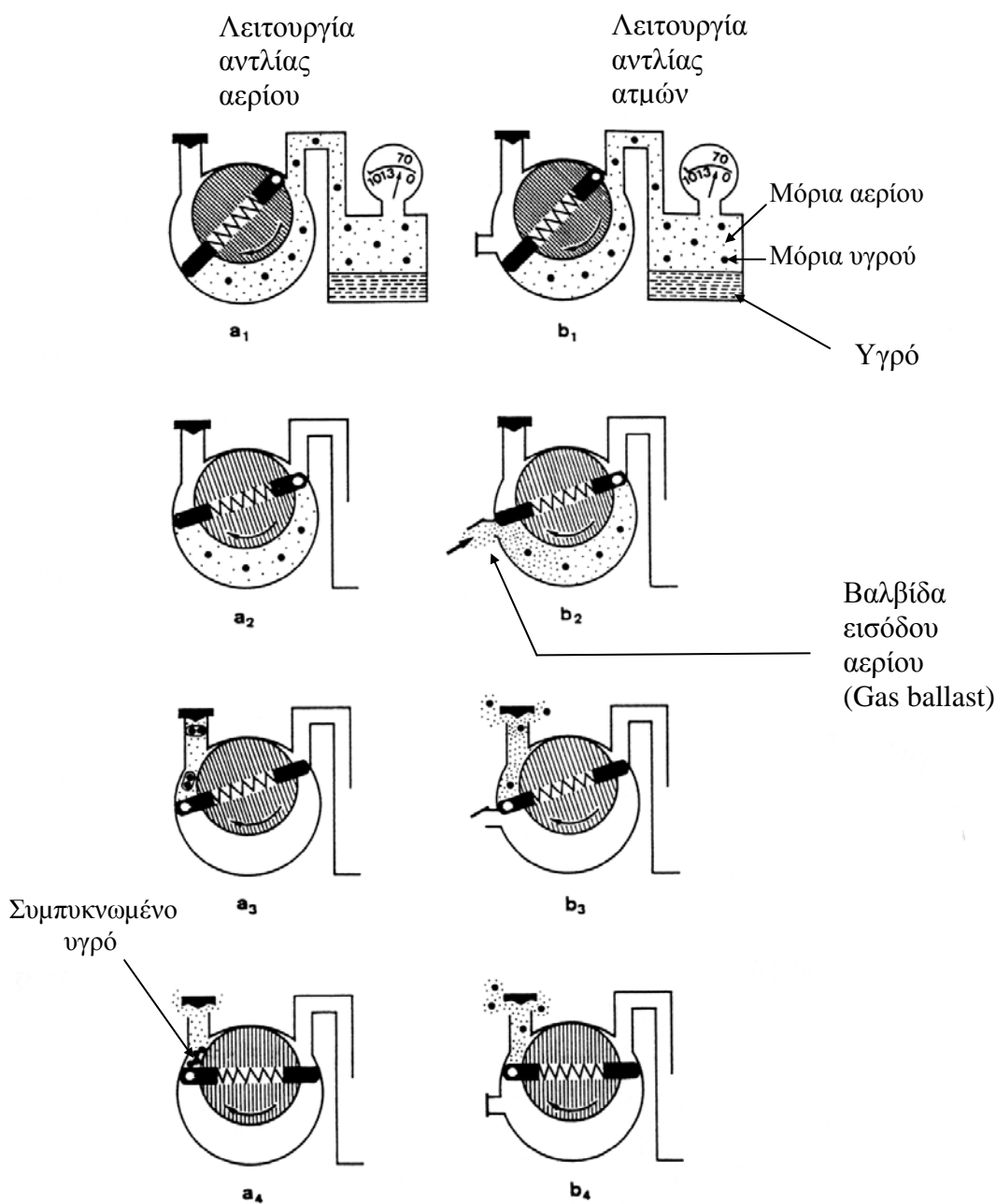


**Σχήμα 9.5**

#### *Μηχανικές αντλίες ατμών.*

Οι μηχανικές αντλίες κενού αδυνατούν να αντλήσουν τους ατμούς υγρών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συμπίεση των ατμών στον αριστερό θάλαμο της αντλίας (Σχ. 9.4, θάλαμος Β) δεν μπορεί να υπερβεί μια ορισμένη τιμή. Η τιμή αυτή είναι ίση με την πίεση που έχει ο ατμός όταν αυτός βρίσκεται σε ισορροπία με το υγρό του (π.χ. 50 mTorr στο νερό). Από ένα σημείο και πέρα, η περαιτέρω μείωση του όγκου του αριστερού θαλάμου [(Β) στο Σχ. 9.4] δεν συνοδεύεται από την αντίστοιχη αύξηση της πίεσης, αλλά απλώς προκαλεί υγροποίηση μεγαλύτερων ποσοτήτων ατμού. Αυτό δεν επιτρέπει την αύξηση της πίεσης στον θάλαμο έως την ατμοσφαιρική για να γίνει δυνατή η εξαγωγή του περιεχομένου του στην ατμόσφαιρα (Σχ. 9.6a). Έτσι, σιγά -

σιγά, στον αριστερό θάλαμο αρχίζει να συσσωρεύεται υγρό. Συχνά όμως οι αντλίες προορίζονται για άντληση ατμών, όπως π.χ. στους αποξηραντήρες.



Σχήμα 9.6.

Η άντληση ατμών στα πρώτα της βήματα γινόταν με μεγάλη δυσκολία, έως ότου οι μηχανικοί σκέφτηκαν να εισαγάγουν μια μικρή ποσότητα ατμοσφαιρικού αέρα στον αριστερό θάλαμο της αντλίας, στη φάση κατά την οποία ο όγκος της είναι μέγιστος (Σχ. 9.6b). Έτσι, τώρα, το μίγμα ατμού - αερίου μπορεί να συμπιεστεί και να εξαχθεί από τον θάλαμο, αν και υπό τις συνθήκες αυτές η ελάχιστη πίεση που μπορεί να παραγάγει η αντλία είναι κάπως υψηλότερη. Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι ο εισαγόμενος αέρας «ξεπλένει» το περιεχόμενο τον αριστερού θαλάμου από τους ατμούς του υγρού.

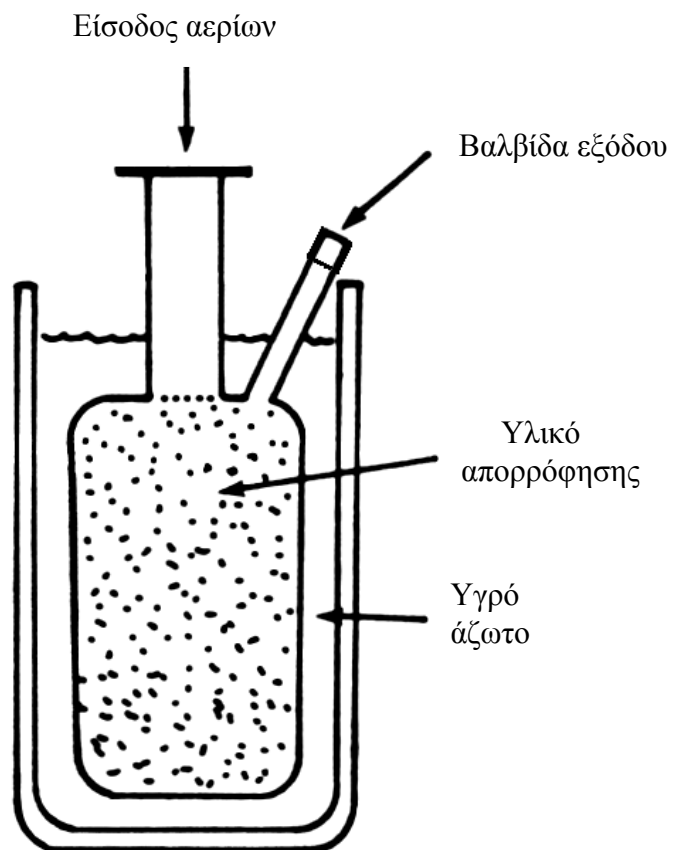
Η μηχανικές αντλίες κενού συνήθως προορίζονται για την άντληση ατμοσφαιρικού αέρα. Η αντλίες που αντλούν ατμούς αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία. Αλλά υπάρχει προτίμηση στις *υβριδικές αντλίες*, οι οποίες μπορούν να αντλούν και τους ατμούς και τον αέρα. Στις αντλίες αυτές η εισαγωγή του ατμοσφαιρικού αέρα γίνεται διαμέσου μίας ειδικής βαλβίδας (*Gas ballast*), η οποία ενεργοποιείται από τον χρήστη όταν ο αντλούμενος χώρος είναι πλούσιος σε υδρατμούς ή σε ατμούς κάποιου διαλύτη. Όμοια κατάσταση δημιουργείται όταν ο αντλούμενος χώρος περιέχει σταγόνες κάποιου υγρού. Τότε, στα πρώτα στάδια της άντλησης ουσιαστικά αντλούνται μόνο οι ατμοί του υγρού ώσπου η σταγόνες να εξαερωθούν πλήρως. Μετά από αυτό, η βαλβίδα *Gas ballast* μπορεί να κλείσει. Από το σημείο αυτό η αντλία αντλεί μόνο αέρια και έτσι μπορεί να δημιουργήσει την ελάχιστη πίεση που δημιουργούν οι αντλίες αυτής της κατηγορίας.

#### 9.4.1.2 Ψυχόμενες αντλίες ρόφησης.

Η αρχή λειτουργίας της αντλίας ρόφησης στηρίζεται στη γνωστή ικανότητα μερικών υλικών να απορροφούν μεγάλες ποσότητες αερίων και ατμών όταν αυτά ψύχονται. Η δέσμευση των μορίων στους πόρους του υλικού δεν είναι χημική, το αέριο αρχίζει να απελευθερώνεται και πάλι όταν η θερμοκρασία του υλικού αρχίζει να ανεβαίνει. Η αντλία αποτελείται από ένα μεταλλικό δοχείο (Σχ. 9.7) το οποίο περιέχει την πορώδη ουσία υπό μορφή λεπτών σωληναρίων με διάμετρο περίπου 1 mm και μήκος 3 – 5 mm. Τα τοιχώματα του δοχείου με κάποιον τρόπο ψύχονται έως τη θερμοκρασία του υγρού αζώτου, προκαλώντας με τον τρόπο αυτό τη ψύξη του υλικού. Οι αντλίες αυτές συνήθως χρησιμοποιούνται για την παραγωγή χαμηλού κενού ( $10^{-2} - 10^{-4}$  Torr), απαλλαγμένου από την παρουσία υδατανθράκων. Αυτό άλλωστε είναι το μεγάλο πλεονέκτημα της αντλίας αυτής. Επιπλέον, η αντλία λειτουργεί αθόρυβα και δίχως κραδασμούς. Ως πορώδες υλικό συνήθως χρησιμοποιείται *alumosilicate* ενός αλκαλικού μετάλλου το οποίο περιέχει μικρή ποσότητα κρυσταλλωμένου νερού.

Οι πόροι δημιουργούνται στο υλικό μετά την πύρωσή του σε μία ορισμένη θερμοκρασία. Στη θερμοκρασία αυτή η κρυσταλλική δομή του υλικού παραμένει αμετάβλητη ενώ το κρυσταλλωμένο νερό αφαιρείται πλήρως. Έτσι δημιουργούνται στο υλικό πόροι της τάξης των 0,5 nm με μεγάλη ομοιομορφία στη διάμετρό τους. Σημειώνουμε ότι οι διαστάσεις των μορίων του ατμοσφαιρικού αέρα, δηλαδή του οξυγόνου, του αζώτου και του διοξειδίου του άνθρακα, είναι της τάξης 0,3 nm. Ο μεγάλος αριθμός των πόρων δημιουργεί μεγάλη επιφάνεια ρόφησης. Έτσι, σε υλικό με πόρους 0,5 nm, η συνολική επιφάνεια ρόφησης είναι της τάξης 600 m<sup>2</sup>/g, ενώ ο ειδικός όγκος του υλικού είναι μόλις 0,75 cm<sup>3</sup>/g. Στα μειονεκτήματα της αντλίας ρόφησης πρέπει να αναφέρουμε την αναποτελεσματική ρόφηση του αργού, η συγκέντρωση του οποίου στον αέρα είναι 1 %. Το ίδιο παρατηρείται και με τα αέρια που έχουν πολύ χαμηλή θερμοκρασία βρασμού, όπως το ήλιο, το υδρογόνο κ.λπ. Για παράδειγμα, το αργό απορροφάται 20 και το υδρογόνο 70 φορές λιγότερο από το άζωτο. Η ικανότητα ρόφησης της αντλίας μειώνεται σημαντικά όταν στους πόρους του υλικού συσσωρεύεται νερό. Η αποκατάσταση της αντλίας γίνεται μέσω θέρμανσής της στους 200 - 300 °C. Πάντως, η αντλία είναι αρκετά παραγωγική. Σε 30 λεπτά, απορροφά 50 L αέρα που ήταν υπό ατμοσφαιρική πίεση και μειώνει την πίεση στα επίπεδα των 3 – 5 mTorr. Η πίεση αυτή είναι αρκετά χαμηλή για να κάνει δυνατή τη λειτουργία μιας αντλίας υψηλού κενού.





**Σχήμα 9.7.** Ψυχόμενη αντλία ρόφησης.

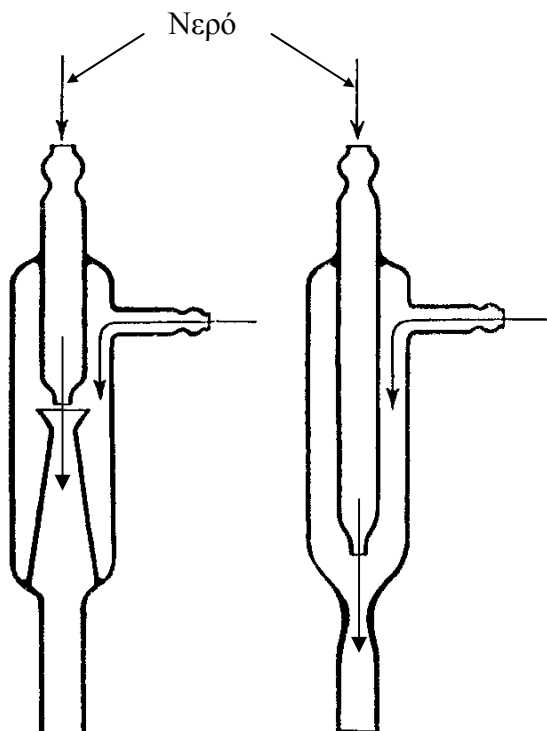
### 9.4.2 Αντλίες υψηλού κενού

#### 9.4.2.1 Αντλίες διάχυσης ή μοριακές αντλίες κενού

Οι αντλίες αυτού του τύπου έχουν τη μεγαλύτερη διάδοση τόσο στην υψηλή τεχνολογία όσο και στην επιστημονική έρευνα, λειτουργούν αθόρυβα και έχουν υψηλή ταχύτητα άντλησης. Η είσοδος της αντλίας συνδέεται με τον αντλούμενο χώρο ενώ στην έξοδό της η πίεση πρέπει να είναι της τάξης 10 mTorr και δεν πρέπει να ξεπερνά τα 100 mTorr. Έτσι, οι αντλίες αυτές πάντοτε λειτουργούν σε συνδυασμό με μία μηχανική αντλία χαμηλού κενού.

#### Η αρχή λειτουργίας της αντλίας διάχυσης

Πριν εξετάσουμε την αρχή λειτουργίας της αντλίας διάχυσης, είναι σκόπιμο να σταθούμε στην αντλία υδρορροής, η οποία λόγω της απλής της κατασκευής και του μικρού της κόστους χρησιμοποιείται ευρύτατα εκεί όπου οι απαιτήσεις για το κενό δεν είναι μεγάλες. Το μόνο που χρειάζεται για τη λειτουργία της είναι μία βρύση νερού (Σχ. 9.8).



#### Σχήμα 9.8.

Δύο είδη αντλίας υδρορροής.

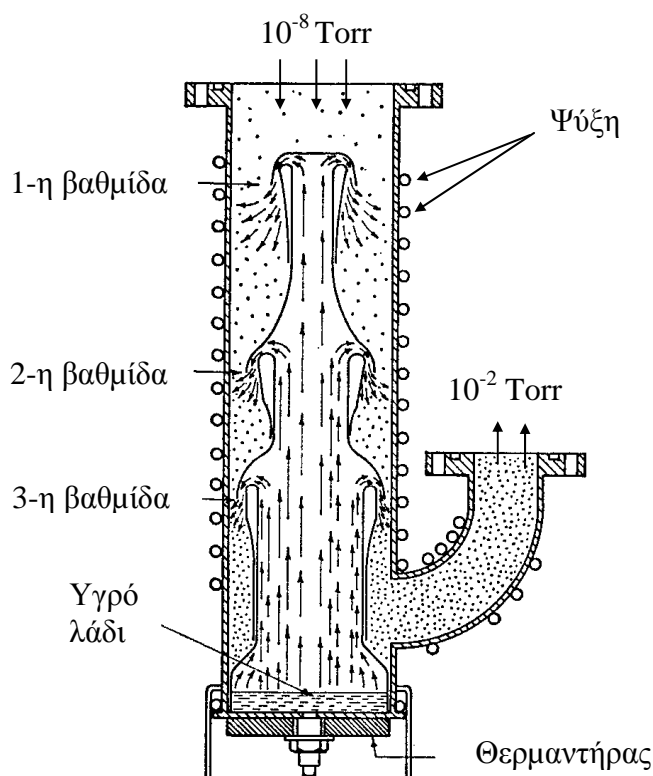
Στις αντλίες αυτού του τύπου, η άντληση γίνεται από μια υδάτινη κυλινδρική επιφάνεια η οποία κινείται με μεγάλη ταχύτητα προς το στόμιο εξόδου της αντλίας. Όσο μεγαλύτερη είναι ταχύτητα και το εμβαδόν της υδάτινης στήλης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα άντλησης. Για την κατανόηση της λειτουργίας της, πρέπει να φανταστούμε τον αέρα σαν συνεχές μέσο που χαρακτηρίζεται από ιξώδες, όπως π.χ. το μέλι. Αν βυθίσουμε στο μέλι μία λεπτή πλάκα και τη σύρουμε, τότε εύκολα παρατηρεί κανείς ότι οι πλευρικές επιφάνειες της πλάκας παρασύρουν μαζί τους και το μέλι, και μάλιστα σε αρκετή απόσταση από αυτές. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και εδώ, μόνο που τον ρόλο της κινούμενης πλάκας τον παίζει η υδάτινη στήλη, ενώ του μελιού ο αέρας. Λόγοι που σχετίζονται με την οικονομία του νερού περιορίζουν την εγκάρσια διατομή της υδάτινης στήλης και έτσι η ταχύτητα άντλησης είναι περίπου 1 L/s.

Στη βαριά βιομηχανία όπου αφθονεί ο τεχνητός ατμός, παρόμοια συστήματα χρησιμοποιούνται στα ψυκτικά συστήματα μεγάλης ισχύος. Στα συστήματα αυτά, αντί της υδάτινης στήλης, χρησιμοποιείται ατμός υψηλής πίεσης ο οποίος εξέρχεται από ένα

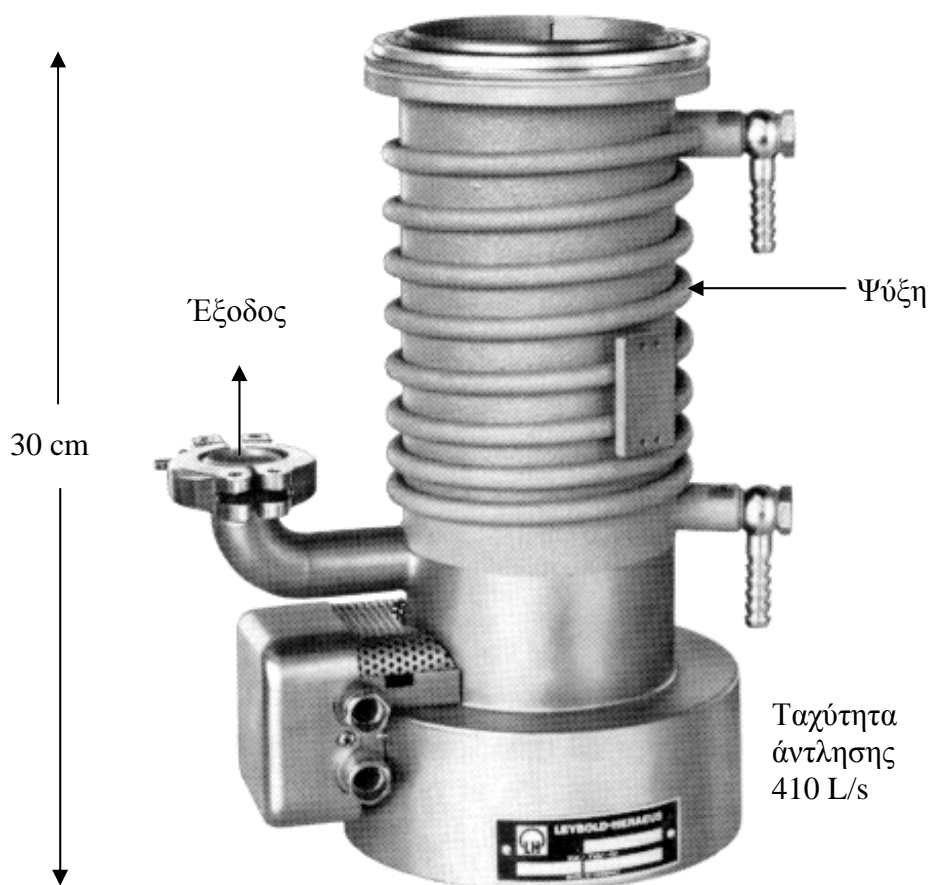
στένωμα με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Στον μηχανισμό άντλησης που εξετάσαμε στην αντλία υδρορροής προστίθενται εδώ και μυριάδες μικροστρόβιλοι ατμού, που παγιδεύουν και παρασύρουν το αντλούμενο αέριο προς την έξοδο. Το σύστημα αυτό αντλεί τους υδρατμούς από μία δεξαμενή με νερό, το οποίο αρχίζει να βράζει όταν η πίεση στη δεξαμενή μειωθεί αρκετά. Λόγω της μεγάλης λανθάνουσας θερμότητας των υδρατμών, το νερό στη δεξαμενή ψύχεται.

Η αρχή λειτουργίας των αντλιών διάχυσης είναι όμοια, μόνο που σε αυτές, αντί του ατμού υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται ατμός λαδιού. Στους μηχανισμούς άντλησης που ήδη εξετάσαμε, εδώ προστίθεται και ο μηχανισμός διάχυσης. Ο μηχανισμός αυτός παίζει κυρίαρχο ρόλο λόγω του ότι η αντλία λειτουργεί σε χαμηλή πίεση όπου η μέση ελεύθερη διαδρομή των ατόμων είναι μεγάλη, και έτσι διευκολύνεται η διείσδυση των ατόμων του αερίου στους ατμούς του λαδιού. Στην έξοδο των αντλιών αυτών η πίεση δεν πρέπει να ξεπερνά το 1 Torr και για τον λόγο αυτό λειτουργούν πάντοτε σε συνδυασμό με μία αντλία χαμηλού κενού, συνήθως μηχανική.

Ας δούμε τώρα πώς λειτουργούν οι αντλίες αυτού του τύπου. Η αντλία αποτελείται από δύο κατάλληλα συναρμολογημένους ομόκεντρους κυλίνδρους, τον εσωτερικό και τον εξωτερικό (Σχ. 9.9). Ο εσωτερικός κύλινδρος έχει περίπλοκο σχήμα και κατευθύνει τη ροή του ατμού προς τα κάτω και λοξά, προς τα τοιχώματα του εξωτερικού κυλίνδρου ο οποίος συνεχώς ψύχεται.



**Σχήμα 9.9.** Αντλία διάχυσης.



**Σχήμα 9.10.** Αντλία διάχυσης.

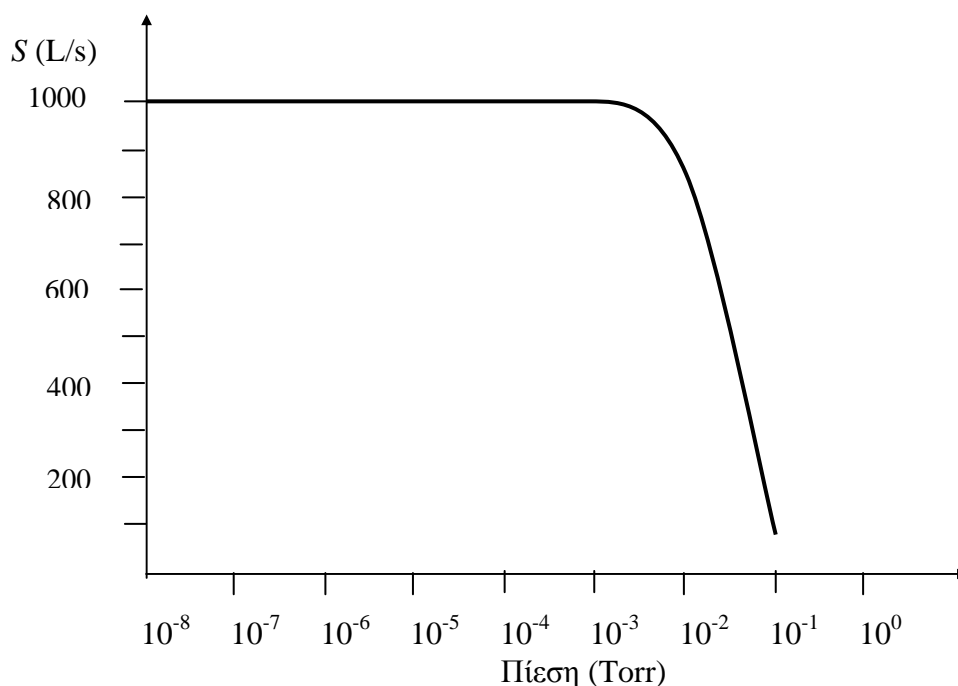
Στον πυθμένα του εσωτερικού κυλίνδρου υπάρχει ποσότητα λαδιού το οποίο θερμαίνεται εξωτερικά. Οι ατμοί του λαδιού, κινούνται προς το πάνω μέρος του εσωτερικού κυλίνδρου και εν συνεχεία κατευθύνονται προς το εσωτερικό τοίχωμα του εξωτερικού κυλίνδρου όπου και υγροποιούνται. Οι σταγόνες του λαδιού, ολισθαίνοντας προς τα κάτω, επιστρέφουν στο δοχείο λαδιού και έτσι ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Ο λόγος των πιέσεων που παράγει μία τέτοια μονάδα είναι περίπου 100. Μεγαλύτερο λόγο παράγουν αντλίες που περιέχουν τρεις τέτοιες μονάδες συνδεδεμένες σε σειρά, και με τρόπο ώστε η αντλία να αποτελεί ενιαία κατασκευή. Στις αντλίες τριών βαθμίδων ο λόγος των πιέσεων φθάνει σε τιμές  $10^6$  έως  $10^7$ .

Σε όλες τις αντλίες αυτού του τύπου πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα που να αποτρέπουν την είσοδο των ατμών στον θάλαμο κενού. Συνήθως αυτό επιτυγχάνεται με μία παγίδα ατμών η οποία ψύχεται με υγρό άζωτο. Η παγίδα αυτή τοποθετείται ανάμεσα στην αντλία και στον αντλούμενο χώρο. Η χρήση παγίδας υγρού αζώτου στις αντλίες διάχυσης δεν είναι επιβεβλημένη, αλλά συνιστάται σε κάθε περίπτωση διότι η παγίδα αυτή λειτουργεί και ως βοηθητική αντλία κενού. Η ψυχρή επιφάνεια της παγίδας δεσμεύει πολύ αποτελεσματικά τους υδρατμούς, το χλώριο, το οξείδιο του θείου, το διοξείδιο του άνθρακα και όλους τους άλλους ατμούς και αέρια που υγροποιούνται ή στερεοποιούνται στη θερμοκρασία του υγρού αζώτου. Η ταχύτητα

άντλησης των αντλιών διάχυσης δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από την πίεση (Σχ. 9.11)

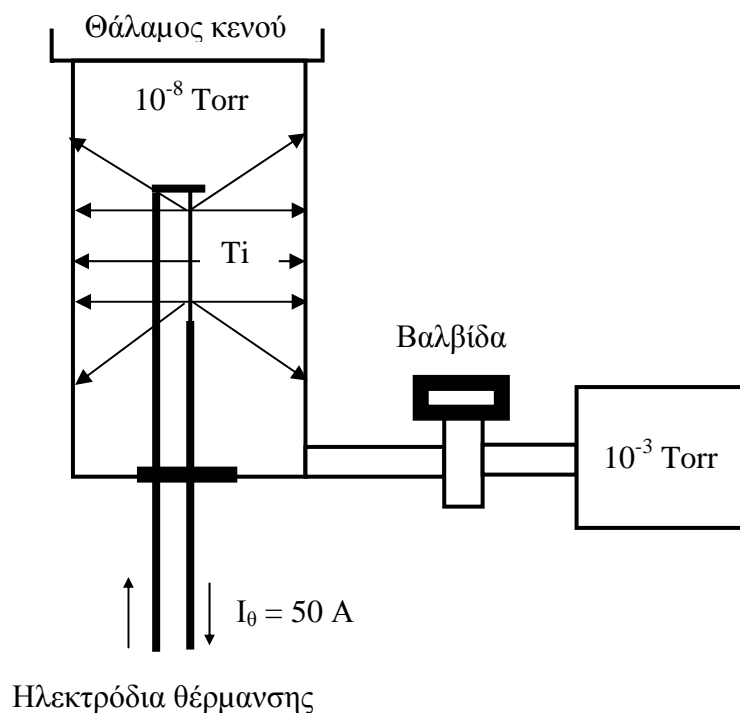
Σήμερα, η βιομηχανία παράγει πολλούς τύπους αντλιών αυτής της κατηγορίας, οι ταχύτητες των οποίων κυμαίνονται από 50 έως 10000 L/s. Οι εταιρείες, για λόγους διαφήμισης, συνήθως αναγράφουν και δηλώνουν τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας άντλησης που δίνεται στο Σχ. 9.11. Οι αντλίες αυτές έχουν μικρό κόστος [το μικρότερο ανά μονάδα ταχύτητας άντλησης (Σχ.9.10)] και η ελάχιστη πίεση που παράγουν είναι της τάξης  $10^{-8}$  Torr. Οι αντλίες αυτές χρησιμοποιούνται εκεί όπου η παρουσία ίχνους ατμών λαδιού στον αντλούμενο χώρο δεν αποτελεί σοβαρό εμπόδιο για την έρευνα ή τη συγκεκριμένη εργασία.



**Σχήμα 9.11.**

#### 9.4.2.2 Αντλίες τιτανίου

Οι αντλίες αυτές ανήκουν στην κατηγορία των αντλιών υψηλού κενού και η εκκίνησή τους γίνεται μόνο όταν η πίεση στο σύστημα είναι μικρότερη από 0,001 Torr. Για τον λόγο αυτό, οι αντλίες αυτές πάντα συνοδεύονται από μία αντλία χαμηλού κενού. Η άντληση στηρίζεται στην ιδιότητα του τιτανίου να αντιδρά χημικώς σχεδόν με όλα τα αέρια και να δημιουργεί με αυτά στερεές ενώσεις. Η κατασκευή της αντλίας είναι πάρα πολύ απλή και ουσιαστικά αυτή αποτελείται από έναν μεταλλικό (ή, τώρα πια σπάνια, γυάλινο) κύλινδρο, στον άξονα του οποίου βρίσκεται ένα θερμαινόμενο σύρμα που περιέχει τιτάνιο (Σχ. 9.12).



**Σχήμα 9.12.** Αντλία τιτανίου.

Το σύρμα αυτό θερμαίνεται με ηλεκτρικό ρεύμα ( $\sim 50 \text{ A}$ ) και όταν η θερμοκρασία του γίνει περίπου  $1400^\circ\text{C}$  το τιτάνιο αρχίζει να εξαχνώνεται και να επικάθεται στα εσωτερικά τοιχώματα του κυλίνδρου όπου και γίνονται τότε χημικές αντιδράσεις. Εδώ, δύο είναι οι μηχανισμοί άντλησης, η χημική δέσμευση των αερίων στα εσωτερικά τοιχώματα της αντλίας, και το «θάψιμο» εκείνων των μορίων με τα οποία το τιτάνιο δεν αντιδρά. Τέτοια είναι τα αδρανή αέρια. Το θάψιμο των μορίων επιτυγχάνεται λόγω του πεπερασμένου χρόνου παραμονής τους στην επιφάνεια όταν αυτά συγκρούονται με αυτήν. Για να γίνεται το θάψιμο αποτελεσματικά, ο ρυθμός εναπόθεσης του τιτανίου θα πρέπει να ξεπερνά μία κρίσιμη τιμή. Η ταχύτητα άντλησης των αντλιών αυτών κυμαίνεται από  $100$  έως  $10000 \text{ L/s}$ , και εξαρτάται από την επιφάνεια στην οποία γίνεται η εναπόθεση του τιτανίου, καθώς επίσης και από τον ρυθμό εξάχνωσής του. Οι αντλίες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως στην επιστημονική έρευνα γιατί το κενό που παράγουν είναι καθαρό, δηλαδή απαλλαγμένο από την ανεπιθύμητη παρουσία μορίων υδατανθράκων.

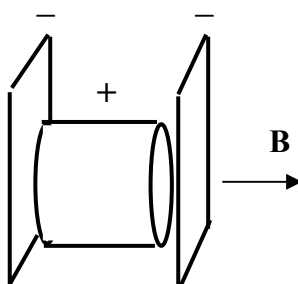
#### 9.4.2.3 Ιοντικές αντλίες

Στα πρώτα χρόνια χρήσης των ηλεκτρονικών διατάξεων ηλεκτρικής εκκένωσης, όπως π.χ. στους λαμπτήρες φθορισμού, παρατηρήθηκε ότι στις διατάξεις αυτές είναι πολύ δύσκολο να διατηρηθεί η πίεση σταθερή. Η ηλεκτρική εκκένωση προκαλούσε συνεχή μείωση της πίεσης. Διαπιστώθηκε ότι για τη μείωση της πίεσης ευθύνονται τα θετικά ιόντα του πλάσματος, τα οποία βομβαρδίζουν την κάθοδο της συσκευής με σχετικά μεγάλες ενέργειες, διεισδύουν βαθιά σε αυτήν και εκεί παγιδεύονται. Το φαινόμενο αυτό αμέσως αξιοποιήθηκε στις ιοντικές αντλίες κενού. Έπρεπε όμως πρώτα να βρεθεί τρόπος να διατηρείται η ηλεκτρική εκκένωση και στις χαμηλές πιέσεις. Η κοινή

εκκένωση μεταξύ δύο ηλεκτροδίων σβήνει όταν η πίεση γίνεται μικρότερη από 0,1 Torr. Αν όμως η συσκευή τοποθετηθεί μέσα σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο και προσανατολιστεί κατάλληλα, τότε η ελάχιστη πίεση στην οποία ακόμα διατηρείται η εκκένωση μπορεί να μειωθεί δεκάδες ή και εκατοντάδες χιλιάδες φορές.

### *Η κυψελίδα Penning*

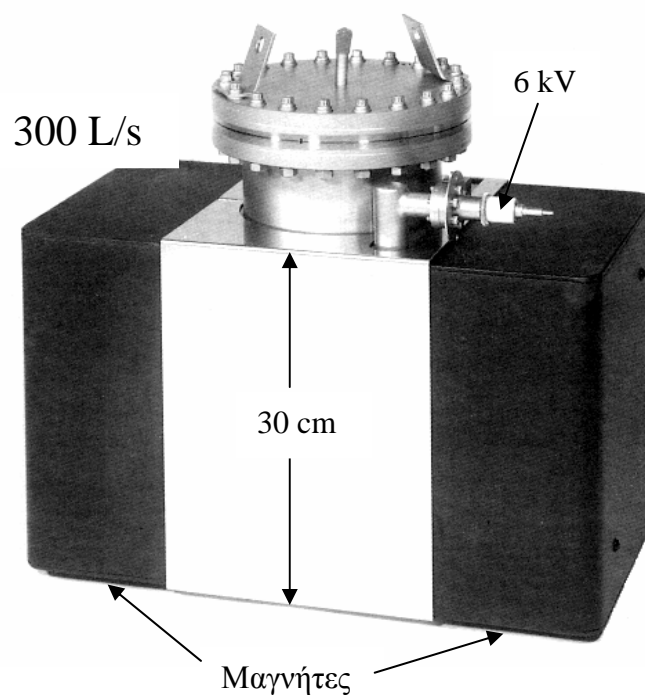
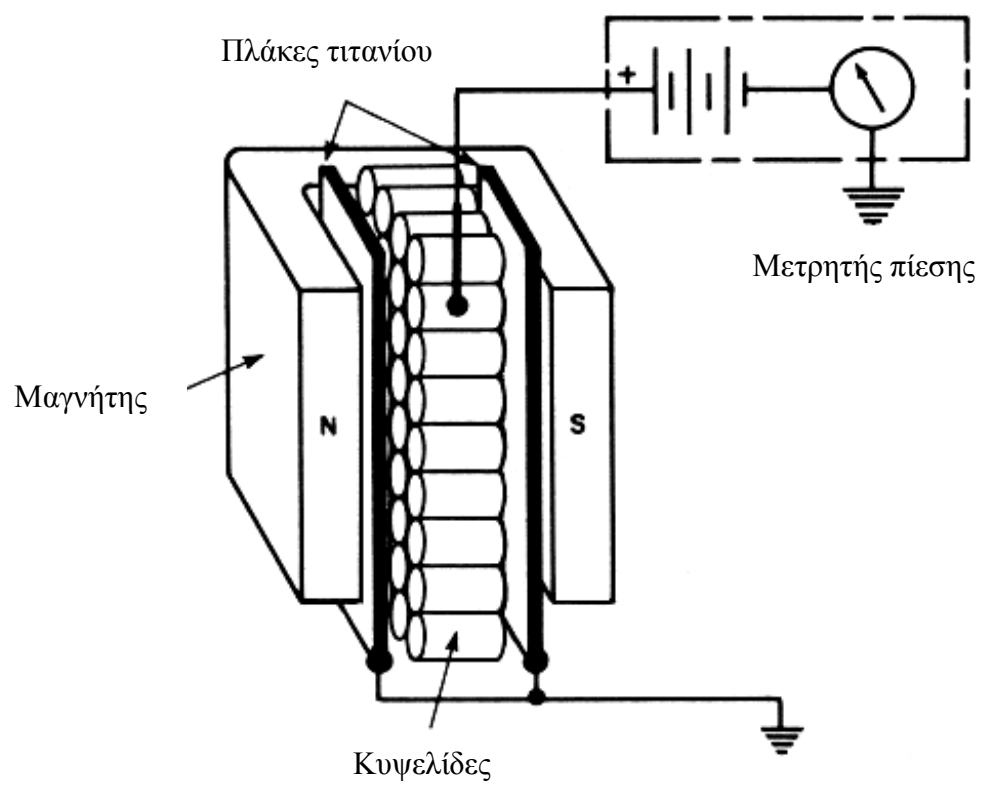
Η κυψελίδα αυτή αποτελείται από δύο μεταλλικά δίσκια και έναν κύλινδρο που βρίσκεται ανάμεσά τους (Σχ. 9.13). Οι διαστάσεις της κυψελίδας είναι περίπου 3 cm και η διάμετρος του κυλίνδρου είναι περίπου ίση με το ύψος του. Οι δίσκοι συνδέονται με τον αρνητικό πόλο μιας πηγής υψηλής τάσης και έτσι συγκροτούν τη λεγόμενη *κάθοδο* της συσκευής. Ο κύλινδρος συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής, και, όπως



**Σχήμα 9.13.**

έχει καθιερωθεί, το ηλεκτρόδιο αυτό ονομάζεται *άνοδος* της συσκευής. Ο κύλινδρος απέχει από τους δίσκους περίπου 3 mm. Η διάταξη αυτή τοποθετείται εντός σταθερού μαγνητικού πεδίου που το δημιουργεί ένας μόνιμος μαγνήτης. Η έντασή του είναι της τάξης του 0,2 – 0,3 T, και η κατεύθυνσή του συμπίπτει με τον άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου. Αν στα ηλεκτρόδια της κυψελίδας εφαρμοστεί τάση 5 – 6 kV, εντός του κυλίνδρου θα αρχίσει σχεδόν αμέσως η ηλεκτρική εκκένωση, ακόμα και όταν η πίεση είναι της τάξης  $10^{-12}$  Torr. Η εκκένωση διατηρείται και σε τόσο χαμηλές πιέσεις λόγω της μεγάλης διαδρομής που κάνουν τα ηλεκτρόνια του πλάσματος πριν αυτά καταλήξουν στην άνοδο. Η τροχιά τους θυμίζει σπείρα με πολύ μικρό βήμα. Έτσι αυξάνεται η πιθανότητα ιονισμού των μορίων ακόμα και όταν η συγκέντρωσή τους είναι πολύ μικρή. Σε χαμηλές πιέσεις, η διαδρομή των ηλεκτρονίων φτάνει τις εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες μέτρα, παρά το ότι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτρονίων είναι μόνο μερικά εκατοστά. Τα θετικά ιόντα του πλάσματος, λόγω της μεγάλης τους μάζας, επηρεάζονται λιγότερο από το μαγνητικό πεδίο. Συνεπώς, η διαδρομή τους προς την κάθοδο είναι σχεδόν ευθύγραμμη και ο χρόνος παραμονής τους στο πλάσμα πολύ πιο μικρός. Έτσι ο ρόλος των ιόντων στη διατήρηση της ηλεκτρικής εκκένωσης είναι περιορισμένος. Ο μεγάλος χρόνος παραμονής των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό της κυψελίδας εξηγεί και το αρνητικό πρόσημο του φορτίου που έχει το πλάσμα.

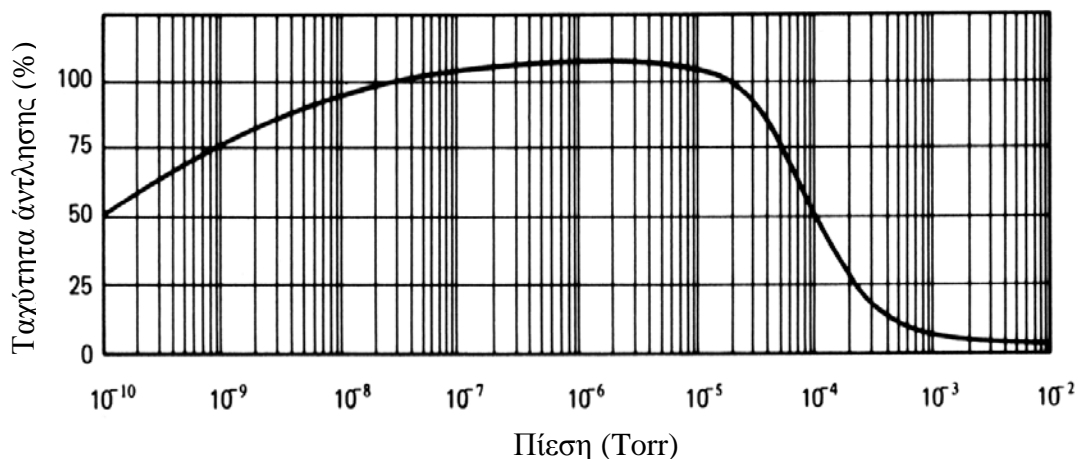
Η ικανότητα άντλησης της κυψελίδας Penning αυξάνεται κατά δεκάδες και εκατοντάδες φορές όταν οι δίσκοι της είναι από τιτάνιο. Μία ιοντική αντλία αποτελείται από έναν μαγνήτη, δύο φύλλα από τιτάνιο και δεκάδες κυλίνδρους μηχανικά και ηλεκτρικά συνδεδεμένους μεταξύ τους (Σχ. 9.14). Τα φύλλα τιτανίου συγκροτούν την



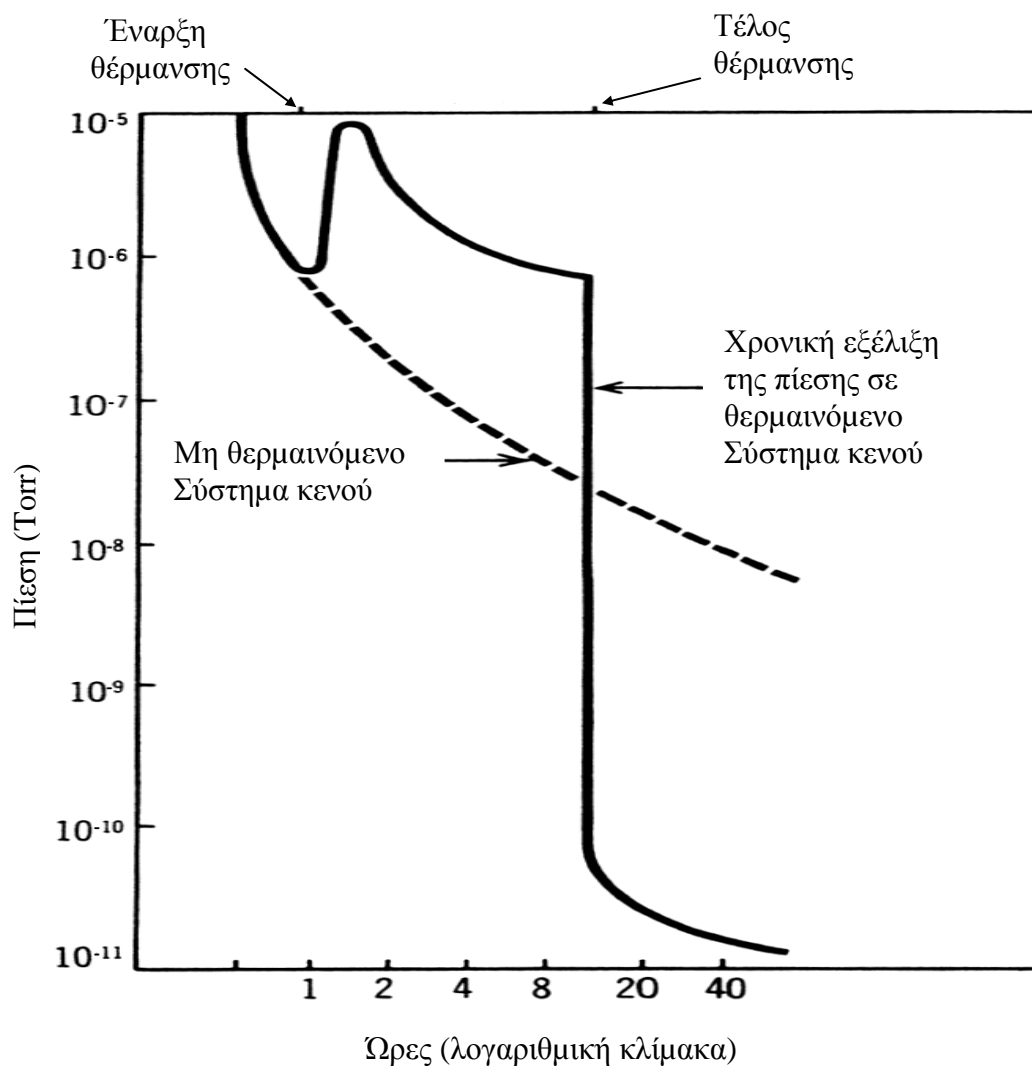
Σχήμα 9.14.



την κάθοδο και, μέσω του μετρητή του ιοντικού ρεύματος, συνδέονται με τον αρνητικό πόλο της πηγής υψηλής τάσης. Οι κύλινδροι συγκροτούν την άνοδο της αντλίας και συνδέονται με τον θετικό πόλο της πηγής. Ο μαγνήτης κατά κανόνα βρίσκεται εκτός της αντλίας και την περιβάλλει. Στο Σχ. 9.15 δίνεται η ταχύτητα άντλησης της ιοντικής αντλίας συναρτήσει της πίεσης, ενώ στο Σχ. 9.16 φαίνεται πόσο σπουδαίος είναι ο ρόλος της θέρμανσης του όλου συστήματος για τη γρήγορη επίτευξη της ελάχιστης πίεσης στο σύστημα. Οι ιοντικές αντλίες, ανάλογα με τον αριθμό των κυψελίδων, έχουν ταχύτητες άντλησης που κυμαίνονται από 20 έως 1500 L/s, λειτουργούν αθόρυβα και παράγουν καθαρό κενό. Στα πλεονεκτήματά τους πρέπει να προσθέσουμε και το γεγονός ότι η αντλία ταυτόχρονα είναι και μετρητής κενού, αφού το ιοντικό ρεύμα της αντλίας είναι ανάλογο της πίεσης. Τα μειονεκτήματα της ιοντικής αντλίας είναι το μαγνητικό πεδίο διάχυσης που παράγει ο μαγνήτης, το μεγάλο βάρος του μαγνήτη, ο μεγάλος όγκος της (30 L για μια αντλία που έχει ταχύτητα 300 L/s) και, για τις διαστάσεις της, η σχετικά μικρή ταχύτητα άντλησης.



**Σχήμα 9.15.**



Σχήμα 9.16.

## Γ. Η μέτρηση του κενού

### *Μετρητές κενού. Μανόμετρα*

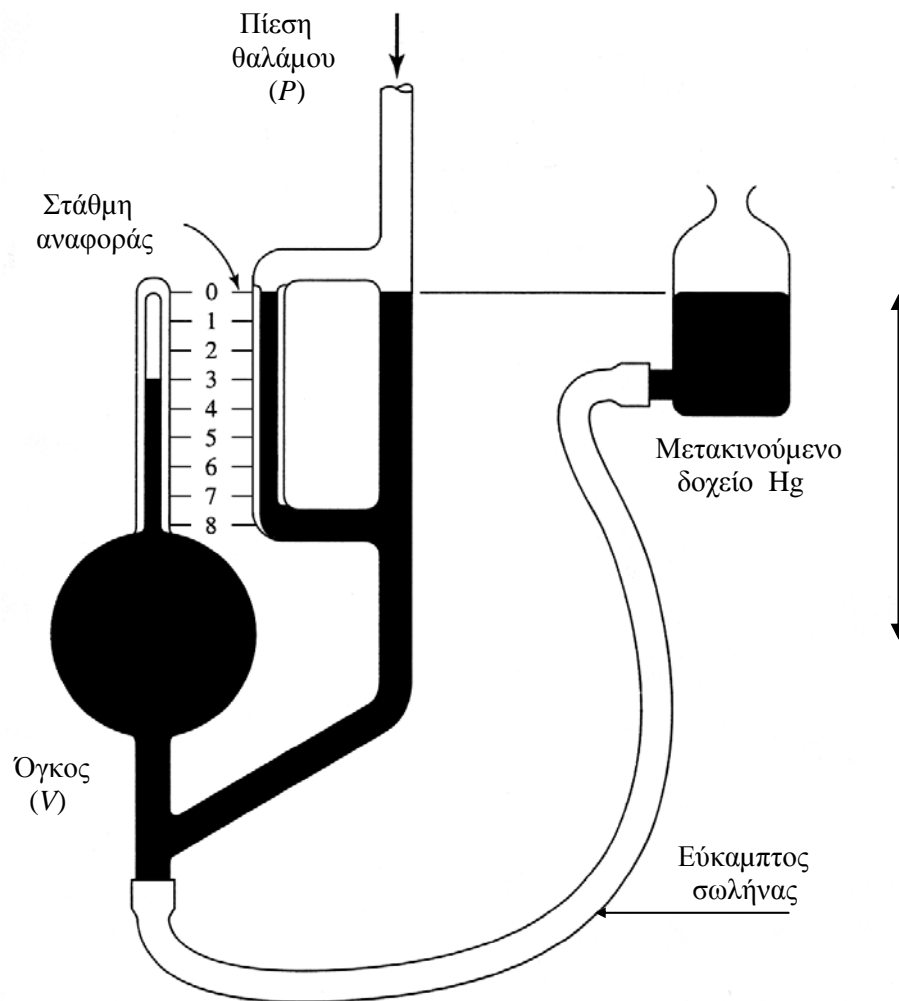
Η ελάχιστη πίεση που παράγουν τα σύγχρονα μέσα άντλησης είναι της τάξης  $10^{-12}$  Torr. Επειδή κανένας μετρητής κενού δε μπορεί να καλύψει την κλίμακα που εκτείνεται από 760 έως  $10^{-12}$  Torr, σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν διάφοροι τύποι μετρητών που καλύπτουν τμήματα της κλίμακας αυτής. Από τη μεγάλη ποικιλία μετρητών που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία κενού εδώ θα εξετάσουμε μόνο τους τέσσερις οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα, το κοινό και γνωστό σε όλους *βαρόμετρο*, τον *θερμοηλεκτρικό μετρητή χαμηλού κενού*, τον *ιοντικό μετρητή υψηλού κενού* και τον *μετρητή μαγνητοηλεκτρικής εκκένωσης υψηλού κενού*.

### 9.5 Μετρητές χαμηλού κενού

#### 9.5.1 Το μανόμετρο McLeod

Το βαρόμετρο ήταν το πρώτο όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του κενού. Το όργανο αυτό καλύπτει την κλίμακα από 1 έως 760 Torr και ανήκει στην κατηγορία των μετρητών υψηλής πίεσης. Η διακριτική ικανότητα, ή η ευαισθησία του, είναι 0,5 Torr και ασφαλώς δεν επαρκεί για να μετρηθεί μια πίεση όπως π.χ. 0,017 Torr. Για τις περιπτώσεις αυτές, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε το μανόμετρο McLeod (Σχ. 9.17), στο οποίο η μέτρηση του κενού γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μια ποσότητα του αερίου, του οποίου η πίεση θα μετρηθεί, απομονώνεται, και μέσω μείωσης του όγκου του, συμπιέζεται 1000 φορές. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται μέτρηση της πίεσης του συμπιεσμένου τώρα αέρα με ένα κοινό βαρόμετρο. Ο μετρητής είναι σχεδιασμένος κατά τέτοιο τρόπο ώστε η όλη διαδικασία να γίνεται αυτόματα, σε μία κίνηση του δοχείου που περιέχει τον υδράργυρο. Η διακριτική ικανότητα του μανόμετρου είναι 0,5 mTorr, δηλαδή 1000 φορές μεγαλύτερη από αυτήν ενός κοινού βαρομέτρου, ενώ σε μερικές παραλλαγές του οργάνου αυτού η διακριτική ικανότητα είναι 0,1 mTorr.

Όπως είναι γνωστό, στο βαρόμετρο χρησιμοποιείται μεγάλη ποσότητα υδραργύρου. Η τοξικότητα του υλικού αυτού και οι μεγάλες διαστάσεις του μετρητή, είναι οι κύριοι λόγοι για τους οποίους ο μετρητής αυτός αντικαταστάθηκε από άλλους. Τα όργανα αυτά χρησιμοποιούνται ακόμα εκεί όπου η αξιοπιστία της μέτρησης είναι ζωτικής σημασίας, όπως π.χ. στα αεροδρόμια, στην ιατρική κ.λπ. Τα βαρόμετρα υδραργύρου, όλων των κατηγοριών, θεωρούνται αναντικατάστατα στις βιομηχανίες παραγωγής μετρητών κενού όπου τα όργανα αυτά, λόγω της μεγάλης τους αξιοπιστίας, χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση όλων των άλλων τύπων μετρητών.



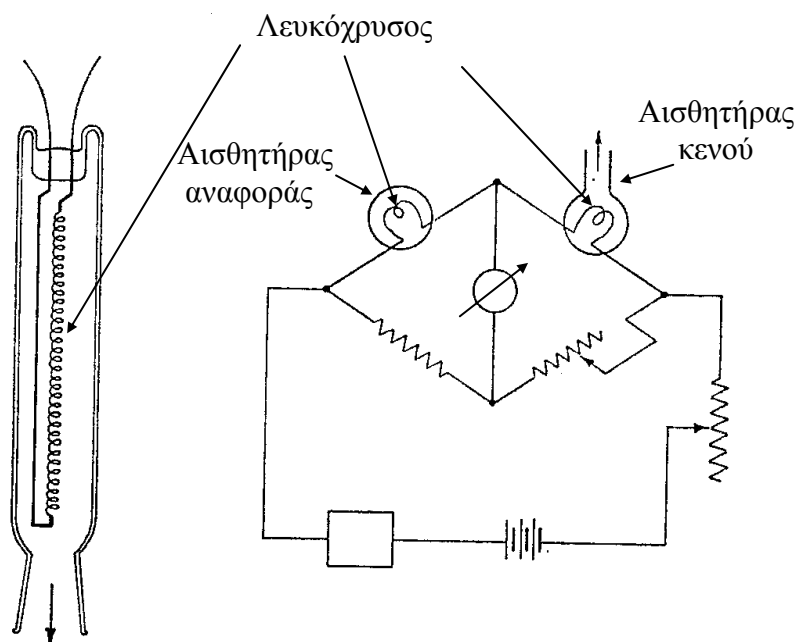
Σχήμα 9.17.

## 9.5.2 Το θερμοηλεκτρικό μανόμετρο

### 9.5.2.1 Το μανόμετρο Pirani

Όταν το 1906 προέκυψε η ανάγκη μέτρησης της πίεσης στις λυχνίες πυρακτώσεως, ο Pirani πρώτος χρησιμοποίησε για τον σκοπό αυτό τη συμβολή της θερμικής αγωγιμότητας των αερίων στις θερμικές απώλειες ενός θερμού σύρματος. Η αρχή λειτουργίας των μετρητών αυτής της κατηγορίας στηρίζεται στην εξάρτηση από την πίεση των θερμικών απωλειών ενός λεπτού θερμού νήματος. Το νήμα αυτό, συνήθως είναι από λευκόχρυσο, έχει διάμετρο 10 – 20  $\mu\text{m}$ , μήκος 5 – 10 cm και τεντώνεται στον άξονα ενός σωλήνα, η διάμετρος του οποίου είναι 3 – 5 cm (Σχ. 9.18).

Το άκρα του νήματος στηρίζονται σε δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια, η διάμετρος των οποίων είναι της τάξης του 1 mm, και για τον λόγο αυτό είναι πάντα ψυχρά. Όταν το όργανο βρίσκεται σε λειτουργία, το νήμα θερμαίνεται με σταθερό ρεύμα και έτσι διαμορφώνεται κατά μήκος του μία χαρακτηριστική κατανομή θερμοκρασίας με ελάχιστη τιμή στα δύο της άκρα και μέγιστη, στο κέντρο.



**Σχήμα 9.18.** Μανόμετρο Pirani.

Τρεις είναι οι μηχανισμοί θερμικών απωλειών του νήματος, η θερμική αγωγιμότητα προς τα ψυχρά άκρα των στηριγμάτων, η ακτινοβολία μέλανος σώματος, και η θερμική αγωγιμότητα του αερίου που περιβάλλει το νήμα. Μόνο ο τελευταίος μηχανισμός προκαλεί μεταβολή της θερμοκρασίας του νήματος συναρτήσει της πίεσης. Η επίδραση των δύο άλλων μηχανισμών μειώνεται όσο είναι δυνατό. Ο πρώτος μέσω της μείωσης του λόγου της διαμέτρου προς το μήκος του νήματος, και ο δεύτερος μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας του νήματος. Έτσι, στα θερμοηλεκτρικά μανόμετρα το νήμα γίνεται όσο το δυνατό λεπτότερο, ενώ η θερμοκρασία του νήματος δεν ξεπερνά τους 300 °C.

Οι θερμικές απώλειες μειώνονται στο ελάχιστο όταν η πίεση στο σύστημα πρακτικά είναι μηδέν. Η πίεση μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μηδέν όταν η τιμή της είναι τουλάχιστον 10 φορές μικρότερη από τη διακριτική ικανότητα του μετρητή. Στη μηδενική πίεση η μέση θερμοκρασία του νήματος είναι μέγιστη. Καθώς η πίεση αυξάνεται, η θερμοκρασία του νήματος μειώνεται. Έτσι, σε έναν βαθμονομημένο μετρητή η πίεση μετράται μέσω των μεταβολών της θερμοκρασίας του νήματος. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του νήματος συνήθως μετριέται μέσω της μέτρησης της μεταβολής της αντίστασής του. Αυτό γίνεται συνήθως με τη βοήθεια μιας γέφυρας Wheatstone (Σχ. 9.18), και τότε το όργανο αυτό ονομάζεται μανόμετρο *Pirani*.

Μεγαλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων επιτυγχάνεται όταν οι μετρήσεις γίνονται υπό συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας του νήματος. Στη μέθοδο αυτή, το σήμα εξόδου του μετρητή είναι η πρόσθετη τάση τροφοδοσίας του νήματος. Η πρόσθετη αυτή τάση, αντισταθμίζει τις θερμικές απώλειες του νήματος που προκλήθηκαν από την άνοδο της

πίεσης. Η διαδικασία μέτρησης είναι ακόλουθη. Στο σύστημα δημιουργείται πρακτικά μηδενική πίεση και στη γέφυρα εφαρμόζεται μία αρχική τάση  $V_0$  η οποία υποδεικνύεται από τον κατασκευαστή. Το νήμα θερμαίνεται με το ρεύμα που ρέει σε έναν από τους δύο κλάδους της γέφυρας και με κατάλληλη ρύθμιση των βοηθητικών αντιστάσεων η γέφυρα ισορροπείται. Η διαδικασία αυτή ισοδυναμεί με τη ρύθμιση του μηδενός του μετρητή. Όταν η πίεση γίνεται  $p$ , η ισορροπία της γέφυρας διαταράσσεται λόγω μείωσης της θερμοκρασίας του νήματος. Για να επανέλθει η θερμοκρασία στα ίδια επίπεδα, η τάση τροφοδοσίας της γέφυρας αυξάνεται και από  $V_0$  γίνεται  $V_p$ . Στη μέθοδο αυτή, η διαφορά  $\delta V = V_p - V_0$  αντιπροσωπεύει το μέτρο μεταβολής της πίεσης  $p$  και αξιοποιείται για τη μέτρησή της.

Η σχέση μεταξύ των μεγεθών  $p$  και  $\delta V$ , δεν είναι γραμμική. Πράγματι, οι θερμικές απώλειες του νήματος, και συνεπώς και η μεταβολή της θερμοκρασίας του, είναι ανάλογη της πίεσης. Έτσι,  $\delta T \propto p$ . Από την άλλη πλευρά, για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του νήματος κατά  $\delta T$ , και έτσι να επανέλθει στην αρχική της τιμή, θα πρέπει να της καταβληθεί ανάλογη θερμική ισχύς. Όμως, η θερμική αυτή ισχύς είναι ανάλογη προς το τετραγώνου της τάσης τροφοδοσίας του νήματος, ή ισοδύναμα, της μεταβολής της τάσης τροφοδοσίας  $\delta V$ . Συνεπώς,  $p \propto (V_p - V_0)^2$ . Έτσι η κλίμακα του οργάνου είναι της μορφής

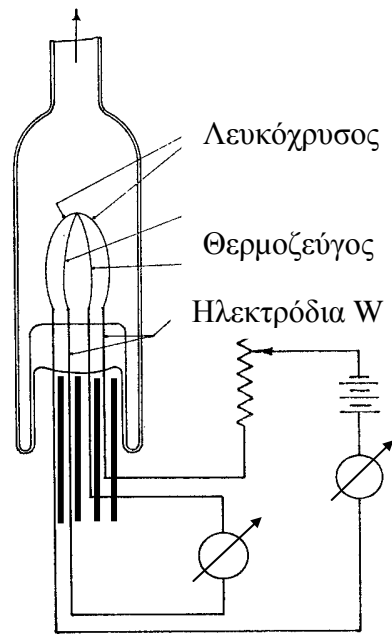
$$\delta V = k\sqrt{p}, \quad (9.8)$$

όπου  $k$  είναι η σταθερά του οργάνου.

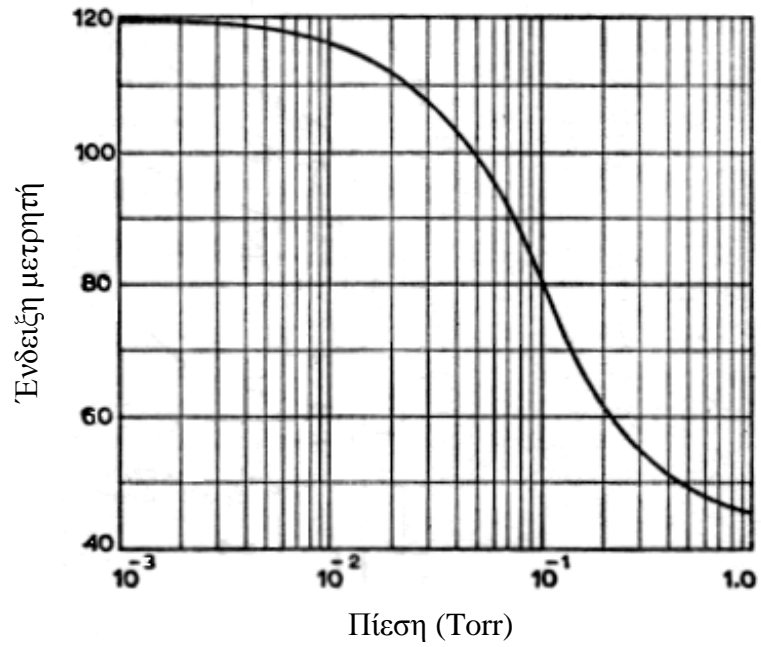
Στην περιοχή των υψηλών πιέσεων, ο θερμοηλεκτρικός μετρητής παρουσιάζει μία πρόσθετη μη γραμμικότητα. Στις υψηλές πιέσεις, δηλαδή στις πιέσεις στις οποίες η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων είναι πολύ μικρότερη των γεωμετρικών διαστάσεων του δοχείου, η θερμική αγωγιμότητα των αερίων είναι σχεδόν ανεξάρτητη της πίεσης. Έτσι, σε πιέσεις πλησίον της ατμοσφαιρικής, η ευαισθησία του θερμοηλεκτρικού μετρητή είναι πάρα πολύ μικρή και οι μετρήσεις έχουν μόνο ποιοτικό χαρακτήρα

#### 9.5.2.2 Ο θερμοηλεκτρικός μετρητής θερμοζεύγους

Η θερμοκρασία του νήματος μπορεί να μετρηθεί και με ένα θερμοζεύγος. Τα όργανα αυτά έχουν μικρότερη ευαισθησία και είναι πιο περίπλοκα στην κατασκευή τους, πλην όμως λειτουργούν σε μικρότερη θερμοκρασία ( $100^\circ\text{C}$ ), είναι αξιόπιστα και έχουν μεγαλύτερο εύρος του γραμμικού μέρους της κλίμακάς τους (υψηλότερο άνω όριο). Το θερμοζεύγος επικολλάται στο κέντρο του νήματος, όπως φαίνεται στο Σχ. 9.19. Επειδή το θερμοζεύγος αποτελεί πρόσθετη οδό διαφυγής της θερμότητας, δεν έχει νόημα το μήκος του νήματος να γίνεται μεγάλο. Για τον ίδιο λόγο, τα νήματα του θερμοζεύγους έχουν την ίδια διάμετρο με αυτή του νήματος. Στα μειονεκτήματα των οργάνων αυτών θα πρέπει να σημειωθούν η ολίσθηση του μηδενός τους, λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, και εξ αιτίας αυτού, τα κάπως πιο περίπλοκα ηλεκτρονικά κυκλώματα που τα υποστηρίζουν. Στο Σχ.920 δίνεται μία τυπική καμπύλη απόκρισης των μετρητών αυτών όπου διακρίνει κανείς τον έντονα μη γραμμικό χαρακτήρα της καμπύλης.



Σχήμα 9.19.



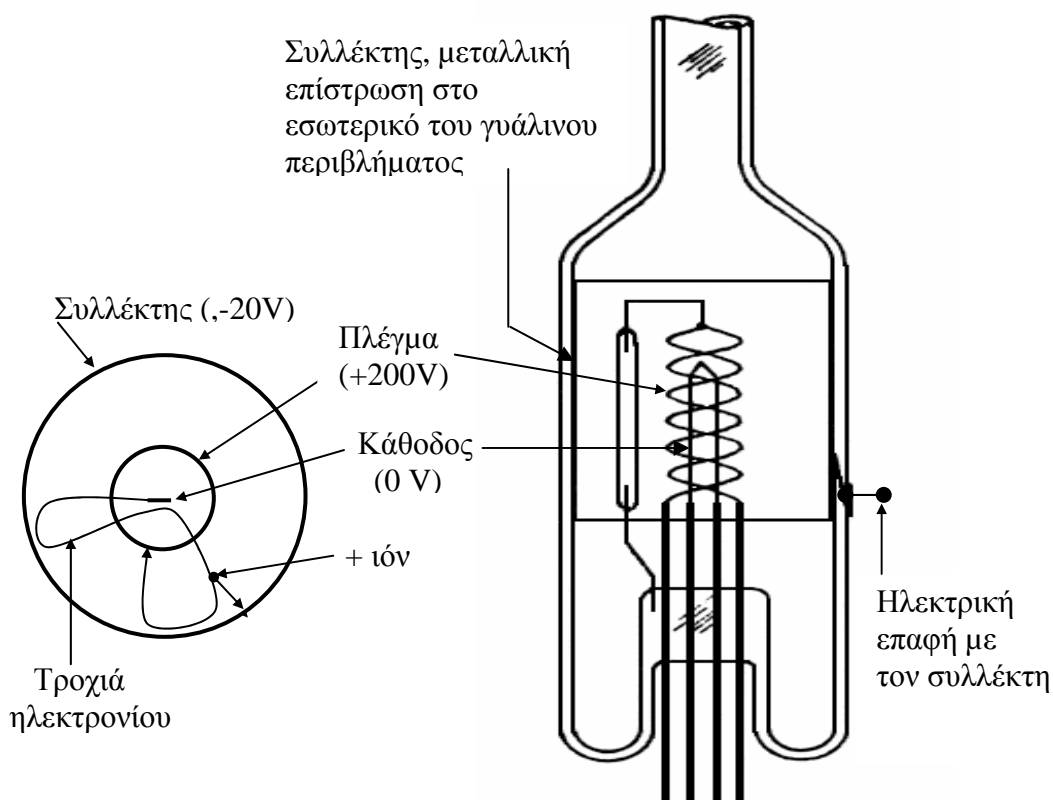
Σχήμα 9.20

## 9.6 Μετρητές υψηλού κενού

### 9.6.1 Τα μανόμετρα ιονισμού πρώτης γενιάς

Στα μανόμετρα ιονισμού, τα μόρια του αερίου ιονίζονται και εν συνεχεία μετράται το ρεύμα τους οποίο είναι ανάλογο της πίεσης. Τα όργανα αυτά ανήκουν στην κατηγορία μετρητών υψηλού κενού και καλύπτουν την περιοχή  $10^{-11} - 10^{-4}$  Torr. Σε μία ιδική κατηγορία μετρητών, το άνω όριο εκτείνεται έως  $10^{-1}$  Torr.

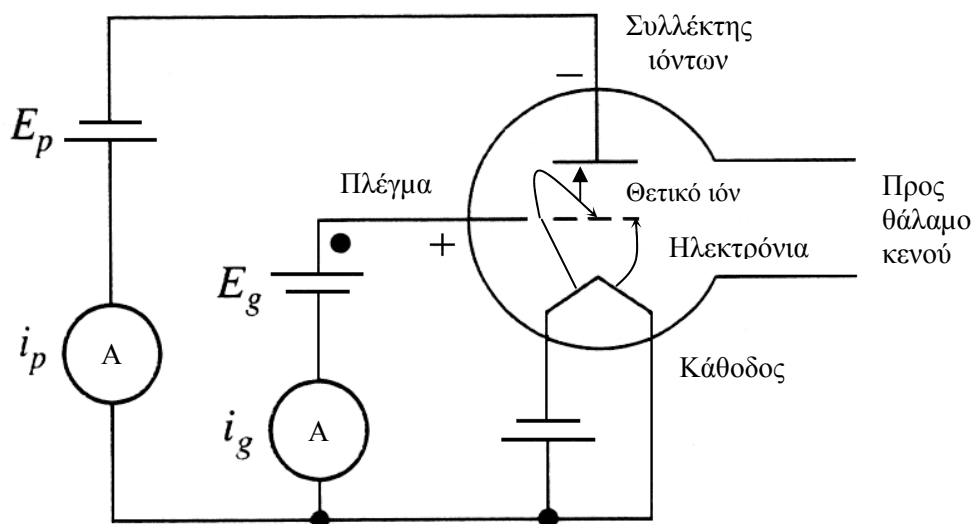
Ο μετρητής αποτελείται από τρία ηλεκτρόδια, την κάθοδο που εκπέμπει θερμιονικά τα ηλεκτρόνια, την άνοδο που τα συλλέγει και τον συλλέκτη των θετικών ιόντων (Σχ. 9.21). Στην κατασκευή αυτή, τα μόρια του αερίου ιονίζονται από τα ηλεκτρόνια που κινούνται προς την θετικά φορτισμένη άνοδο και τελικά συλλέγονται από αυτήν. Τα θετικά ιόντα με τη σειρά τους, συλλέγονται από τον αρνητικά φορτισμένο συλλέκτη των ιόντων το ρεύμα του οποίου μετράται με έναν ευαίσθητο μετρητή ρεύματος. Εδώ, όλα τα δυναμικά αναφέρονται ως προς την κάθοδο, το δυναμικό της οποίας θεωρείται μηδέν.



Σχήμα 9.21.

Η κάθοδος βρίσκεται στο κέντρο του μετρητή και αποτελείται από λεπτό ( $50 \mu\text{m}$ ) σύρμα βολφραμίου το μήκος του οποίου είναι περίπου  $5 \text{ cm}$ . Η θερμοκρασία της καθόδου είναι της τάξης  $2300 - 2500 \text{ K}$  και έτσι διασφαλίζεται θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων  $1 - 10 \text{ mA}$ . Η άνοδος, ή ο συλλέκτης των ηλεκτρονίων, κατασκευάζεται από λεπτό ( $0,2 \text{ mm}$ ) σύρμα μολυβδαινίου και έχει τη μορφή ενός σπειρώματος που περιβάλλει την κάθοδο. Το σπείρωμα σκόπιμα κατασκευάζεται με μεγάλα κενά.





Σχήμα 9.22.

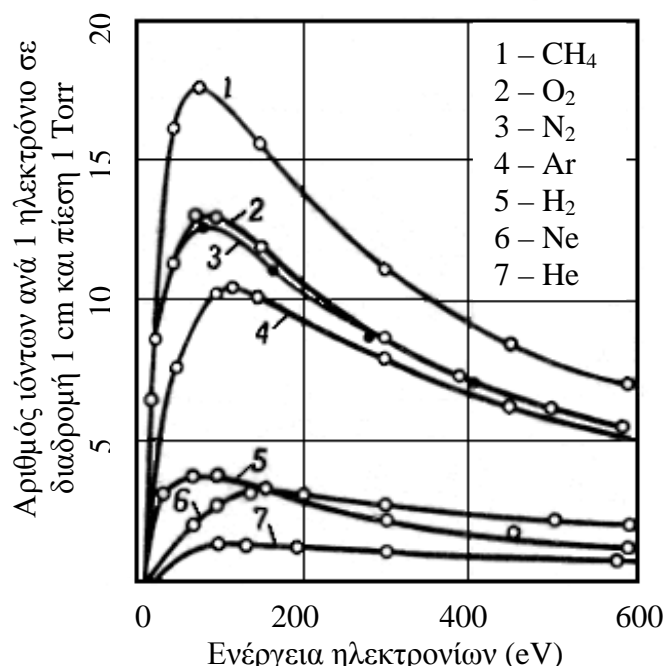
Τα κενά αυτά είναι 20 – 30 φορές μεγαλύτερα από τη διάμετρο του σύρματος. Η κατασκευή επιτρέπει τον καθαρισμό της ανόδου από τα αέρια μέσω ηλεκτρικής θέρμανσης του σπειρώματος στους 800 °C. Ανάλογα με τον τύπο του μετρητή, στην άνοδο εφαρμόζεται θετικό δυναμικό 150 – 200 V. Το θερμοϊονικό ρεύμα ρυθμίζεται μέσω θερμοκρασίας της καθόδου ενώ το αρνητικό δυναμικό του συλλέκτη είναι περίπου – 20 V.

Ας δούμε τώρα πώς λειτουργεί ο μετρητής. Ένα μέρος των ηλεκτρονίων που κινούνται προς το θετικό πλέγμα, αμέσως θα καταλήξουν σε αυτό. Τα θετικά ιόντα που θα δημιουργηθούν στο διάστημα μεταξύ καθόδου και πλέγματος, θα κινηθούν προς την κάθοδο η οποία θα τα συλλέξει. Αυτά τα ιόντα δεν θα τα συλλέξει ο συλλέκτης ιόντων και δε θα λάβουν μέρος στη δημιουργία του ιοντικού ρεύματος που ρέει στο κύκλωμα του συλλέκτη. Έτσι, τα ιόντα αυτά ουσιαστικά είναι χαμένα. Όμως, επειδή το πλέγμα περιέχει κενά, ένα μέρος των ηλεκτρονίων θα περάσει από τα κενά αυτά και θα βρεθεί στον χώρο μεταξύ της ανόδου και τον συλλέκτη ιόντων. Τα ιόντα που δημιουργούνται στον χώρο αυτό συλλέγονται από τον συλλέκτη ιόντων και έτσι συμμετέχουν στο ρεύμα που μετράται από τον μετρητή. Τα ηλεκτρόνια που διασχίζουν το πλέγμα, κινούμενα στο επιβραδυντικό πεδίο, θα σταματήσουν σε κάποια απόσταση από τον συλλέκτη λόγω του ότι το δυναμικό του είναι χαμηλότερο από αυτό της καθόδου. Μετά την επιβράδυνσή τους, αυτά και πάλι θα κινηθούν προς το πλέγμα. Έτσι, ένα μέρος των ηλεκτρονίων θα κάνει πολλές ταλαντώσεις γύρω από το πλέγμα πριν τελικά, καταλήξουν σε αυτό. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ταλαντώσεων, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ιόντων που δημιουργεί ένα ηλεκτρόνιο και τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία του μετρητή.

Το ιοντικό ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα του συλλέκτη είναι ανάλογο προς τον αριθμό των ηλεκτρονίων που λαμβάνουν μέρος στον ιονισμό, καθώς επίσης και προς την πίεση του αερίου. Συνεπώς

$$I_i = S \times I_e \times p, \quad (9.9)$$

όπου  $I_i$  είναι το ιοντικό ρεύμα,  $I_e$  είναι το θερμοϊονικό ρεύμα της ανόδου και  $S$  είναι η σταθερά αναλογίας. Η σταθερά αυτή ονομάζεται ευαισθησία του μετρητή και εξαρτάται



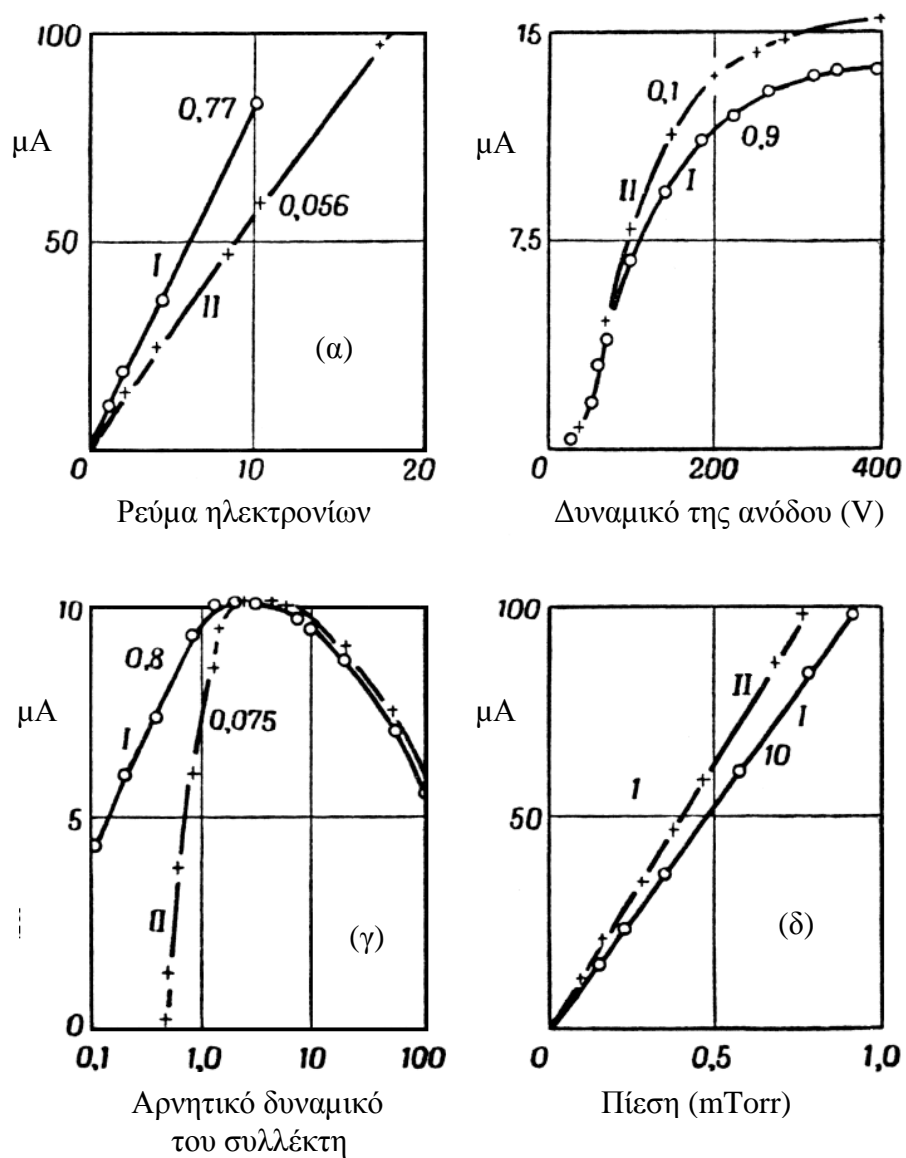
**Σχήμα 9.23.**

από το είδος του αερίου, τη γεωμετρία του μετρητή όπως επίσης και από τις τάσεις στα ηλεκτρόδια.

Στο Σχ. 9.23 δίνονται οι καμπύλες που παριστάνουν τον αριθμού ιόντων που δημιουργεί ένα ηλεκτρόνιο μέσα στο αέριο σε διαδρομή 1 cm και πίεση 1 Torr. Όπως βλέπουμε, ο αριθμός αυτός εξαρτάται από την ενέργεια του ηλεκτρονίων. Ο ιονισμός των αερίων έχει την μέγιστη τιμή όταν η ενέργειες των ηλεκτρονίων είναι περίπου 100 eV.

Το ρεύμα που μετράται στο κύκλωμα του συλλέκτη είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, εξαρτάται από τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων και τις μεταξύ τους αποστάσεις, από το αρνητικό δυναμικό του συλλέκτη, από την τάση του πλέγματος ή όπως αλλιώς ονομάζεται, της ανόδου, όπως επίσης και από την τιμή του ρεύματος των ηλεκτρονίων που κινούνται προς την άνοδο. Όλοι αυτοί οι παράμετροι επηρεάζουν την σταθερά του μετρητή  $S$ . Για τη βελτιστοποίηση της  $S$  σκόπιμο είναι να μελετηθεί η εξάρτηση του ιοντικού ρεύματος από τους παράγοντες που προαναφέραμε. Στο Σχ. 9.24, δίνονται τυπικά γραφήματα ενός ιοντικού μετρητή πίεσης που μετρήθηκαν στο άζωτο. Στα γραφήματα αυτά αποτυπώνεται η εξάρτηση του ρεύματος των θετικών ιόντων από το ρεύμα των ηλεκτρονίων (α), το θετικό δυναμικό της ανόδου (β), το αρνητικό δυναμικό του συλλέκτη (γ), και την πίεση του αερίου (δ). Στις μετρήσεις αυτές η σταθερά του μετρητή  $S$  ήταν  $5 \text{ Torr}^{-1}$ .

Στο Σχ. 9.24, στα γραφήματα (α), (γ) και (δ) το θετικό δυναμικό του πλέγματος ήταν 170 V, στα γραφήματα (α), (β) και (δ) το αρνητικό δυναμικό του συλλέκτη ήταν 10 V, στα γραφήματα (β) και (γ) το ρεύμα ηλεκτρονίων ήταν 1mA. Στα γραφήματα (α), (β) και (δ) αναφέρονται οι τιμές της πίεσης σε μονάδες mTorr, ενώ στο γράφημα (δ) αναφέρονται οι τιμές του ρεύματος των ηλεκτρονίων σε mA. Στις καμπύλες I το ιοντικό ρεύμα του συλλέκτη είναι σε  $\mu\text{A}$ , ενώ στις καμπύλες II οι αναφερόμενες τιμές πρέπει να πολλαπλασιαστούν στο 0,1. Στον Πίνακα 9.2 δίνονται οι συγκριτικές ως προς το άζωτο τιμές της σταθεράς του μετρητή όπως αυτή μετρήθηκε σε μερικά αέρια.



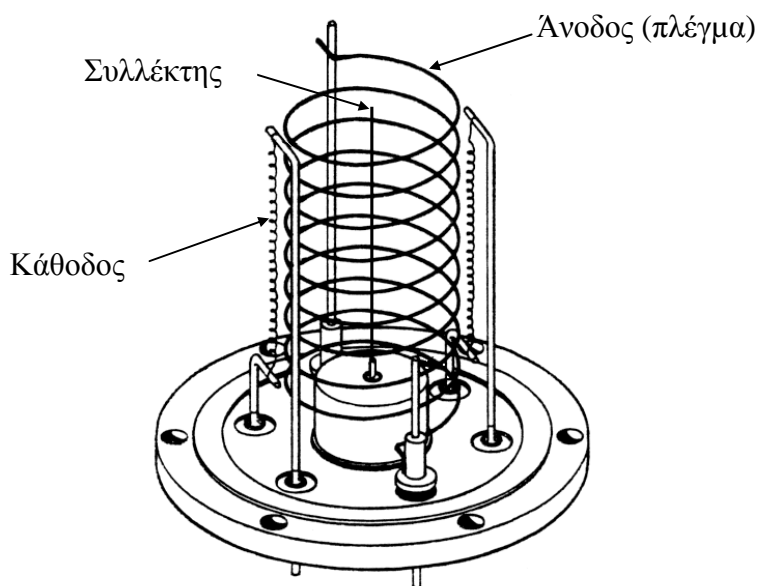
Σχ.9.24

Πίνακας 9.2

Αέριο	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Αέρας	Hg	He	Ar	Ne
$S$ (Torr) <sup>-1</sup>	1,0	0,8	0,4	1,05	1,37	2,0	2,7	0,14	0,25	1,35	

### 9.6.2 Τα μανόμετρα ιονισμού δεύτερης γενιάς.

Το μανόμετρο πρώτης γενιάς στη μορφή που το εξετάσαμε, κάλυπτε το διάστημα  $10^{-4} - 10^{-7}$  Torr. Μόλις προέκυψε η ανάγκη μέτρησης κενού υψηλότερου από  $10^{-7}$  Torr, το μανόμετρο μονίμως έδειχνε την τιμή  $10^{-8}$  Torr ακόμα και όταν οι ερευνητές ήταν σίγουροι ότι η πίεση ήταν μικρότερη από  $10^{-10}$  Torr. Έτσι, παρά το ότι η πίεση στο σύστημα μειωνόταν, για κάποιο λόγο, το ιοντικό ρεύμα δεν μειωνόταν. Μελετώντας το φαινόμενο διαπιστώθηκε ότι, στις μικρές πιέσεις, η μεγάλη τιμή του ρεύματος που ρέει στο κύκλωμα του συλλέκτη οφείλεται στα φωτοηλεκτρόνια που εκπέμπονται από τον συλλέκτη, υπό την επίδραση των μαλακών ακτίνων X που δημιουργούνται στην άνοδο



Σχήμα 9.25.

του μετρητή. Τα φωτοηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο και η φόρα του ρεύματος που δημιουργείται συμπίπτει με αυτή του ιοντικού. Συνεπώς, το ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα του συλλέκτη έχει δύο συνιστώσες, το ιοντικό ρεύμα, το οποίο εξαρτάται από την πίεση, και το ρεύμα των φωτοηλεκτρονίων το οποίο ουσιαστικά παραμένει σταθερό αφού αυτό εξαρτάται μόνο από την ένταση των ακτίνων X η οποία παραμένει σταθερή εξαρτάται μόνο από την ενέργεια των ηλεκτρονίων με την οποία αυτά βομβαρδίζουν την άνοδο και το ρεύμα που αυτή συλλέγει. Έτσι

$$I_{\Sigma} = I_i + I_{\Phi} . \quad (9.10)$$

Στις μικρές πιέσεις, όπου το ιοντικό ρεύμα είναι πολύ μικρότερο του φωτοηλεκτρικού, ο μετρητής ρεύματος ουσιαστικά μετρά μόνο το φωτοηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι έγινε σαφές ότι για να γίνει δυνατή η μέτρηση του κενού στις μικρές πιέσεις, το φωτοηλεκτρικό ρεύμα πρέπει να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο. Αυτό μπορεί να το πετύχει κανείς αν μειώσει το εμβαδόν του συλλέκτη. Ριζική αντιμετώπιση του προβλήματος έγινε από τους Bayard και Alpert οι οποίοι κατόρθωσαν να μειώσουν το φωτοηλεκτρικό ρεύμα πάνω από 1000 φορές. Όπως βλέπουμε, στο μανόμετρο Bayard-

Alpert, ο συλλέκτης και η κάθοδος άλλαξαν θέσεις (Σχ. 9.25). Ο συλλέκτης κατασκευάζεται από ένα λεπτό σύρμα βολφραμίου η διάμετρος του οποίου είναι της τάξης 0,1 mm και έτσι επιτυγχάνεται δραστική μείωση του εμβαδού του κατά έναν παράγοντα που ξεπερνά τις 10000. Οι μετρητές αυτού του τύπου, στη μορφή που πρωτοπροτάθηκαν, μειονεκτούσαν μόνο σε ένα σημείο, είχαν περίπου 10 φορές μικρότερη ευαισθησία. Γρήγορα βρέθηκε το αίτιο. Η μικρή ευαισθησία οφειλόταν στις απώλειες των ιόντων από τις δύο βάσεις της σπειροειδούς ανόδου. Όταν στις δύο αυτές βάσεις τοποθετήθηκαν δύο μεταλλικοί δίσκοι, ηλεκτρόδια – τάπες, και εφαρμόστηκε σε αυτά το δυναμικό της ανόδου που είναι αποθετικό για τα ιόντα, η ευαισθησία του μετρητή αμέσως επανήλθε στα επίπεδα που είχε ο μετρητής πρώτης γενεάς. Έκτοτε, ο μετρητής της πρώτης γενεάς εκτοπίστηκε από τον μετρητή Bayard-Alpert.

Η κλίμακα κενού του μανόμετρου Bayard-Alpert εκτείνεται από  $10^{-4}$  έως  $10^{-12}$  Torr. Όμως, η μέτρηση κενού όπως  $10^{-11}$  Torr εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις δυνατότητες του ηλεκτρομέτρου με το οποίο γίνεται η μέτρηση του ιοντικού ρεύματος. Πράγματι, έστω ότι ο μετρητής έχει ευαισθησία  $2 \text{ Torr}^{-1}$  και το θερμιονικό ρεύμα που προκαλεί τον ιονισμό των αερίων είναι 5 mA. Τότε, όταν η πίεση είναι  $10^{-11}$  Torr, το ιοντικό ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα του συλλέκτη είναι

$$I_i = S \times I_e \times p = \frac{2}{\text{Torr}} \times 5 \times 10^{-3} \text{ A} \times 10^{-11} \text{ Torr} = 10^{-13} \text{ A}. \quad (9.11)$$

Το ρεύμα αυτό είναι πολύ μικρό και μπορεί να μετρηθεί μόνο με ειδικά ηλεκτρόμετρα και υπό την προϋπόθεση ότι ο συλλέκτης είναι προστατευμένος από κάθε είδους παρεμβολές.

## Δ. Διατήρηση του κενού στις διατάξεις

### 9.7 Η διατήρηση υψηλού κενού στις ηλεκτρονικές συσκευές

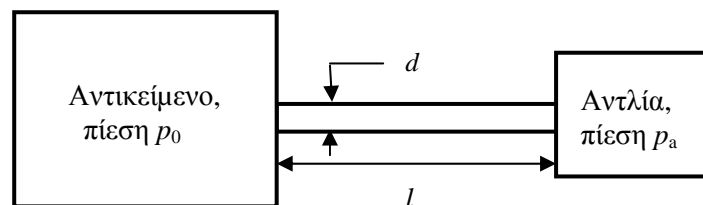
Πολλά τμήματα ή εξαρτήματα σύγχρονων ηλεκτρονικών συσκευών, όπως οι οθόνες παλμογράφων, τηλεοράσεων και υπολογιστών, τα κλείστρα των ραντάρ, οι ηλεκτρονικές λυχνίες κ.λπ., για την ομαλή τους λειτουργία απαιτούν υψηλό κενό στο εσωτερικό τους. Το επίπεδο του κενού στο εσωτερικό μιας συσκευής καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον χρόνο ζωής της και για τον λόγο αυτό ακολουθείται ειδική διαδικασία για την παραγωγή και διατήρηση του υψηλού κενού. Έτσι, στο στάδιο της άντλησης, η συσκευή θερμαίνεται για πολλές ώρες στους 200 – 400 °C. Η θέρμανση αυτή αποσκοπεί στην αποβολή των αερίων που βρίσκονται στην εσωτερική επιφάνεια και στον όγκο των τοιχωμάτων της συσκευής όπως επίσης και στα διάφορα εξαρτήματα που βρίσκονται στο εσωτερικό της. Εκεί όπου αυτό μπορεί να γίνει, π.χ. στις οθόνες όλων των ειδών, ακολουθεί θέρμανση των εσωτερικών μεταλλικών εξαρτημάτων στους 800 °C. Στο στάδιο αυτό, τα μέταλλα αποβάλλουν μεγάλες ποσότητες αερίων που είχαν ενσωματωθεί σε αυτά στο στάδιο της μεταλλουργικής τους κατεργασίας. Αλλά ακόμα και μετά την πολύωρη θέρμανση, ένα μέρος των αερίων παραμένει εγκλωβισμένο στα τοιχώματα της συσκευής και αργά η γρήγορα εμφανίζεται στο εσωτερικό της. Ο αέρας εισέρχεται στη συσκευή και από τις μικροδιαρροές που αναπόφευκτα δημιουργούνται στο στάδιο κατασκευής της. Αλλά ακόμα και όταν δεν υπάρχουν διαρροές, τα αέρια εισέρχονται στο εσωτερικό από τα εσωτερικά τοιχώματα της συσκευής λόγω του ότι η θερμοκρασία των 400 °C δεν επαρκεί για την αποβολή όλων των αερίων που είναι

διαλυμένα στο εσωτερικό των τοιχωμάτων. Υψηλότερες θερμοκρασίες θέρμανσης αποφεύγονται γιατί η ατμοσφαιρική πίεση μπορεί να συνθλίψει την συσκευή. Συνέπεια αυτών των παραγόντων είναι η αργή αλλά σταθερή άνοδος της πίεσης στη συσκευή μετά την αποσύνδεσή της από την αντλία. Αν δεν ληφθούν ειδικά μέτρα, σε ένα ή το πολύ σε ενάμιση χρόνο, η άνοδος της πίεσης θα θέσει εκτός λειτουργίας τη συσκευή. Ιδιαίτερα επικίνδυνη είναι η άνοδος της πίεσης στις συσκευές που λειτουργούν με υψηλές τάσεις τον 15 – 30 kV όπως π.χ. στις έγχρωμες οθόνες των τηλεοράσεων. Στις συσκευές αυτές, έστω και σύντομη άνοδος της πίεσης οδηγεί στη δημιουργία ηλεκτρικών εκκενώσεων που καταστρέφουν τη συσκευή. Για τον λόγο αυτό, οι προδιαγραφές κενού στις συσκευές υψηλής τάσης είναι πολύ πιο αυστηρές.

Το πρόβλημα διατήρησης του υψηλού κενού στις συσκευές αντιμετωπίστηκε με λεπτά υμένια μετάλλων τα οποία εξαχνώνονται στο εσωτερικό τους, σε κάποια γωνιά, για να μη προκαλεί ανεπιθύμητα βραχυκυκλώματα μεταξύ των ηλεκτροδίων της συσκευής. Η εξαχνωση του υμενίου γίνεται στο τελευταίο στάδιο της θερμικής κατεργασίας. Τα υμένια αυτά λειτουργούν σαν μικρές αντλίες στο εσωτερικό της συσκευής και δεσμεύουν τα αέρια όπως αυτό γίνεται στο τιτάνιο. Ο καλύτερος απορροφητής (*getter*) των αερίων που βρήκε ευρεία εφαρμογή είναι το βάριο. Το βάριο είναι πολύ πιο δραστικό από το τιτάνιο και επιπλέον δεν απαιτεί συνεχείς ανανεώσεις της επιφάνειάς του όπως το τιτάνιο. Οι στερεές ενώσεις που δημιουργεί με τα αέρια, είναι διαπερατές για αυτά και έτσι αξιοποιούνται και τα βαθύτερα στρώματα του υμενίου. Έτσι, εάν η συσκευή είναι αεροστεγής, το βάριο μπορεί να διατηρήσει το υψηλό κενό στο εσωτερικό της για περισσότερα από 40 χρόνια. Στις γυάλινες συσκευές, όπως οι οθόνες όλων των τύπων, το υμέναιο του βαρίου διακρίνεται ως μία μαύρη επίστρωση και σκόπιμα εξαχνώνεται σε σημείο που να είναι ορατό. Το χρώμα του βαρίου επιτρέπει τη ποιοτική εκτίμηση του κενού στη συσκευή. Αν το χρώμα του είναι μαύρο τότε το κενό στη συσκευή είναι καλό. Αν όμως ο λεγόμενος *μαύρος καθρέφτης του βαρίου* αρχίζει να λευκαίνει και να γίνεται διαφανής, ιδιότητες που έχει το οξείδιό του, τότε το κενό στη συσκευή είναι προβληματικό.

## 9.8 Η βασική εξίσωση της τεχνικής του κενού

Το πιο απλό σύστημα κενού αποτελείται από τον αντλούμενο χώρο ή το αντικείμενο, μία αντλία κενού και έναν συνδετικό σωλήνα (Σχ. 9.26). Ο συνδετικός σωλήνας, αν δεν επιλεγεί σωστά, μπορεί να προκαλέσει δραστική μείωση της ταχύτητας άντλησης του αντικειμένου και έτσι να αχρηστέψει τις επιδόσεις της αντλίας ακόμα και αν αυτές είναι μεγάλες. Αυτή η μείωση μπορεί να υπολογιστεί. Πράγματι, η ταχύτητα άντλησης



Σχήμα 9.26

του αντικειμένου ορίζεται όπως και αυτή της αντλίας, δηλαδή ως ο όγκος του αερίου που εξέρχεται από αυτόν, ανά μονάδα χρόνου:

$$A = \frac{dV}{dt}. \quad (9.12)$$

Όπως γνωρίζουμε, το μέγεθος  $pV$  είναι ανάλογο προς τη μάζα του αερίου που καταλαμβάνει χώρο  $V$  και η πίεσή του είναι  $p$ . Συνεπώς, το γινόμενο  $pA$  είναι ανάλογο προς τη ποσότητα αερίου που εισέρχεται στον σωλήνα ανά μονάδα χρόνου. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται *ροή*. Συνεπώς, στη μόνιμη κατάσταση, κατά μήκος του σωλήνα, το μέγεθος  $pA$  διατηρείται. Έτσι, για τα δύο άκρα του σωλήνα μπορούμε να γράψουμε:

$$Q = A_0 \times p_0 = A_a \times p_a, \quad (9.13)$$

όπου  $Q$  είναι η ροή,  $A_0$  και  $p_0$  είναι η ταχύτητα άντλησης και η πίεση του αντικειμένου και  $A_a$  και  $p_a$  είναι τα αντίστοιχα μεγέθη στην είσοδο της αντλίας. Τη ροή  $Q$  μπορούμε να την εκφράσουμε και μέσω της αγωγιμότητας του σωλήνα

$$Q = U \times (p_0 - p_a), \quad (9.14)$$

όπου  $U$  είναι η αγωγιμότητα του σωλήνα, μέγεθος όμοιο με την ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός καλωδίου. Έτσι, στην είσοδο του σωλήνα έχουμε

$$A_0 p_0 = U(p_0 - p_a) \quad \text{ή} \quad \frac{1}{A_0} = \frac{1}{U} \times \frac{p_0}{p_0 - p_a}. \quad (9.15)$$

Ομοίως, στην έξοδο του σωλήνα έχουμε

$$A_a p_a = U(p_0 - p_a) \quad \text{ή} \quad \frac{1}{A_a} = \frac{1}{U} \times \frac{p_a}{p_0 - p_a}. \quad (9.16)$$

Αφαιρώντας τις (9.15) και (9.16), έχουμε

$$\frac{1}{A_0} - \frac{1}{A_a} = \frac{1}{U} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{A_0} = \frac{1}{A_a} + \frac{1}{U}, \quad (9.17)$$

Έτσι, για την ταχύτητα άντλησης του αντικειμένου προκύπτει η σχέση

$$A_0 = \frac{A_a U}{A_a + U}. \quad (9.18)$$

Η τελευταία σχέση συνδέει τα βασικότερα μεγέθη μιας διάταξης κενού και για τον λόγο αυτό ονομάζεται *βασική εξίσωση της τεχνικής κενού*. Όπως βλέπουμε, ακόμα και όταν η ταχύτητα άντλησης της αντλίας είναι άπειρη, η άντληση του αντικείμενου δε ξεπερνά την αγωγιμότητα του συνδετικού σωλήνα.

Όταν το κενό είναι υψηλό και ισχύει η συνθήκη  $\lambda \gg d$ , τότε η αγωγιμότητα ενός σωλήνα που έχει κυκλική διατομή δίνεται από τη σχέση

$$U = 38,2 \sqrt{\frac{T}{M}} \times \frac{d^3}{l} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (9.19)$$

όπου  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία του αερίου,  $M$  είναι η μοριακή του μάζα,  $d$  είναι η διάμετρος του σωλήνα και  $l$ , το μήκος του. Όταν ο όγκος μετράται σε λίτρα (L) και οι διαστάσεις σε cm, η σχέση (9.19) γίνεται

$$U = 3,82 \sqrt{\frac{T}{M}} \times \frac{d^3}{l} \quad (\text{L/s}). \quad (9.20)$$

Για τον αέρα, στους  $20^\circ\text{C}$ , η σχέση (9.20) παίρνει τη μορφή

$$U = 1,21 \times \frac{d^3}{l} \quad (\text{L/s}). \quad (9.21)$$

Όπως βλέπουμε, η αγωγιμότητα του σωλήνα εξαρτάται πολύ έντονα από τη διάμετρό του.

Ας εξετάσουμε ένα παράδειγμα. Έστω ότι μία αντλία που έχει ταχύτητα άντλησης 300 L/s συνδέεται με το αντικείμενο μέσω ενός σωλήνα η διάμετρος του οποίου είναι 4 cm και το μήκος του, 40 cm. Η αγωγιμότητα του σωλήνα είναι

$$U = 1,21 \times \frac{4^3}{40} = 1,9 \quad (\text{L/s}). \quad (9.22)$$

Συνεπώς, η ταχύτητα άντλησης του αντικειμένου αντί των 300 L/s θα είναι:

$$A_a = \frac{300 \times 1,9}{300 + 1,9} = 1,89 \quad (\text{L/s}). \quad (9.23)$$

Συνέπεια αυτού είναι το γεγονός ότι η πίεση στο αντικείμενο θα είναι  $300/1,89$  ή 159 φορές υψηλότερη από αυτή που δημιουργεί η αντλία στο δεξιό άκρο του σωλήνα. Έτσι, αν λόγω διαρροών, η πίεση που παράγει η αντλία στο δεξί άκρο του σωλήνα είναι  $10^{-7}$  Torr τότε στο αριστερό άκρο, δηλαδή στο αντικείμενο, η πίεση θα είναι  $159 \times 10^{-7} \sim 1.6 \times 10^{-5}$  Torr. Όπως βλέπουμε, ο συνδετικός σωλήνας δεν μας επιτρέπει να αξιοποιήσουμε τη μεγάλη ταχύτητα άντλησης που έχει η αντλία. Εδώ λένε ότι ο συνδετικός σωλήνας δεν είναι σωστά προσαρμοσμένος στις δυνατότητες της αντλίας. Η προσαρμογή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Έστω πως για κάποιο λόγο, οι διαστάσεις του συνδετικού σωλήνα δε μπορούν να αλλάξουν. Τότε, ταχύτητα άντλησης που είναι λίγο μικρότερη από την αγωγιμότητα του σωλήνα άνετα μπορεί να διασφαλισθεί με μία αντλία των 10 L/s η οποία άλλωστε είναι πολύ φθηνότερη. Πράγματι, στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα άντλησης του αντικειμένου είναι

$$A_a = \frac{10 \times 1,9}{10 + 1,9} = 1,6 \quad (\text{L/s}). \quad (9.24)$$

δηλαδή, λίγο μικρότερη από την αγωγιμότητα του συνδετικού σωλήνα. Αν τώρα υπάρχει δυνατότητα να αυξηθεί η διάμετρος του σωλήνα, τότε ένας τετραπλασιασμός της θα κάνει την αγωγιμότητα του σωλήνα

$$U = 1,21 \times \frac{16^3}{40} = 124 \quad (\text{L/s}). \quad (9.25)$$

Συνεπώς, με συνδετικό σωλήνα που έχει διάμετρο 16 cm, η ταχύτητα άντλησης του αντικειμένου θα είναι



$$A_a = \frac{300 \times 124}{300 + 124} = 88 \text{ (L/s)}. \quad (9.26)$$

Η ταχύτητα αυτή είναι περίπου 3,5 φορές μικρότερη από αυτή της αντλίας και συνεπώς, σε αντίθεση με την πρώτη περίπτωση που εξετάσαμε, η μείωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ανεκτή. Όπως βλέπουμε, η προσαρμογή του συνδετικού σωλήνα στις δυνατότητες της αντλίας, στα τελευταία δύο παραδείγματα είναι πολύ καλύτερη. Από τα παραδείγματα αυτά γίνονται κατανοητοί οι λόγοι για τους οποίους, μία ιοντική αντλία με ταχύτητα 20 L/s έχει στόμιο σύνδεσης με διάμετρο 4 cm, ενώ το στόμιο της αντλίας των 300 L/s, είναι 15 cm.

## 9.9 Ο εντοπισμός του σημείου διαρροής σε ένα σύστημα κενού

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία κάθε συσκευής κενού είναι η στεγανότητά της. Ο εντοπισμός της διαρροής είναι ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα της τεχνικής υψηλού κενού. Ο εντοπισμός της, συχνά διαρκεί εβδομάδες ή ακόμα και μήνες. Έτσι, αναπτύχθηκαν μια σειρά μεθόδων και τεχνικών που αποσκοπούν στον γρήγορο εντοπισμό του σημείου διαρροής. Μερικές φορές, ο εξοπλισμός για τον εντοπισμό της διαρροής ξεπερνά κατά πολύ το κόστος της διάταξης κενού. Για τον λόγο αυτό, εδώ θα σταθούμε μόνο σε δύο μεθόδους που ουσιαστικά δεν κοστίζουν τίποτα αλλά έχουν μεγάλη ευαισθησία και χρησιμοποιούνται ευρύτατα.

**Πρώτη μέθοδος.** Ένα βαμβάκι εμβαπτίζεται σε οινόπνευμα ή σε απεσταγμένο νερό. Με το βαμβάκι αυτό διαβρέχονται διαδοχικά όλα τα ύποπτα σημεία και παράλληλα γίνεται παρακολούθηση του δείκτη του μετρητή κενού. Όταν το βαμβάκι βρεθεί πάνω από τη διαρροή, το υγρό θα στομάσει για ένα χρονικό διάστημα τη διαρροή και ο δείκτης του μανόμετρου αμέσως θα αρχίσει να ολισθαίνει προς τις μικρότερες τιμές, καταγράφοντας έτσι μία προσωρινή βελτίωση του κενού. Μετά από λίγο καιρό, το κανάλι της διαρροής θα απελευθερωθεί και πάλι και το κενό θα επανέλθει στα ίδια επίπεδα. Η διαρροή έχει εντοπιστεί.

**Δεύτερη μέθοδος.** Η δεύτερη μέθοδος είναι γνωστή ως *μανομετρική μέθοδος*. Η ουσία της μεθόδου συνίσταται στο φύσημα των ύποπτων σημείων με ειδικό αέριο που εξέρχεται από ένα λεπτό φουσητήρα. Επειδή η ευαισθησία του μανομέτρου για διάφορα αέρια διαφέρει από αυτή του αέρα, μόλις το αέριο εισχωρήσει στο σύστημα, η ένδειξη του μανόμετρου αμέσως θα αρχίσει να μεταβάλλεται προς μεγαλύτερες ή προς μικρότερες τιμές, ανάλογα με το δοκιμαστικό αέριο που χρησιμοποιείται. Στο θερμοηλεκτρικό μανόμετρο, η είσοδος του υδρογόνου θα προκαλέσει ολίσθηση του δείκτη προς υψηλότερες τιμές πίεσης λόγω του ότι η θερμική του αγωγιμότητα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Στο ιοντικό μανόμετρο το ιοντικό ρεύμα θα αυξηθεί αν στον θάλαμο κενού εισέλθει υδρογόνο, ακετόνη ή αιθέρας. Αντίθετα, το ρεύμα θα μειωθεί αν εισέλθει ήλιο ή αργό. Η μέθοδος του ιοντικού μανομέτρου είναι πολύ ευαίσθητη και επιτρέπει τον εντοπισμό μίας διαρροής που είναι της τάξης  $10^{-6}$  Torr L/s. Τέτοια διαρροή ισορροπεί το σύστημα στην πίεση  $10^{-8}$  Torr όταν ο χώρος αντλείται με ταχύτητα 100 L/s ( $Q = pS$ ).

Στις ιοντικές αντλίες οι οποίες λειτουργούν και ως μετρητές κενού, τις μεγαλύτερες μεταβολές του ιοντικού ρεύματος προκαλούν το αργό, το ήλιο, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα. Το αργό και το ήλιο προκαλούν μεταβολές προς τις υψηλότερες τιμές πίεσης, ενώ το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα, προς τις μικρότερες τιμές. Με την ιοντική αντλία μπορούν να εντοπισθούν διαρροές οι οποίες ισορροπούν το

σύστημα σε πίεση που εκτείνεται από  $10^{-4}$  έως  $10^{-10}$  Torr. Η μέγιστη ευαισθησία είναι της τάξης  $10^{-10}$  Torr L/s και είναι η μεγαλύτερη από όλα τα ειδικά όργανα και συστήματα που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό της διαρροής.

**Μεγάλες διαρροές.** Άλλη μέθοδος ακολουθείται όταν οι διαρροές είναι μεγάλες. Στις πολύ μεγάλες διαρροές, στο σημείο διαρροής ακούγεται ένας χαρακτηριστικός ήχος ο οποίος θυμίζει φύσημα. Στις περιπτώσεις αυτές είναι σωστότερο να γίνεται λόγος για τρύπα και όχι για διαρροή. Όταν η διαρροή είναι κάπως μικρότερη, στη διάταξη κενού εισάγεται κάποιο αέριο, υπό πίεση, ελαφρώς μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική ( $\sim 1,2$  atm) και στη συνέχεια, τα ύποπτα σημεία διαβρέχονται με σαπουνόνερο ή με αφρό ξυρίσματος. Στο σημείο διαρροής θα αρχίσει να μεγαλώνει μία φυσαλίδα.

### 9.11 Κακό κενό

Κακό κενό στο σύστημα δεν συνδέεται πάντοτε με την ύπαρξη διαρροής. Συχνά για αυτό ευθύνεται η μη ομαλή λειτουργία της ίδιας της αντλίας. Ένας απλός τρόπος διαχωρισμού των δύο αυτών βασικών καταστάσεων συνίσταται στην απότομη παύση της άντλησης, είτε μέσω παύσης της λειτουργίας της αντλίας είτε μέσω ειδικής βαλβίδας. Ταυτόχρονα, γίνεται παρακολούθηση του ρυθμού ανόδου της πίεσης στο σύστημα. Ένας ασυνήθιστα μεγάλος ρυθμός ανόδου της πίεσης σαφώς υποδηλώνει την ύπαρξη διαρροής. Όταν η πίεση παραμένει σταθερή ή σχεδόν σταθερή, τότε για το κακό κενό ευθύνεται ή η αντλία ή η κακή της προσαρμογή στο σύστημα.