

Τεχνολογία κενού

Ο όρος τεχνολογία κενού χρησιμοποιείται για όλες τις διεργασίες και τις μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται υπό συνθήκες πίεσης μικρότερης της ατμοσφαιρικής.

Μια διεργασία ή μέτρηση εκτελείται συνήθως υπό κενό για ένα από τους εξής λόγους: (1) για την απομάκρυνση των συστατικών της ατμόσφαιρας τα οποία θα μπορούσαν να προκαλέσουν μια φυσική ή χημική αντίδραση κατά τη διάρκεια της διεργασίας· (2) για να διαταραχθεί η ισορροπία η οποία επικρατεί υπό κανονικές συνθήκες δωματίου, όπως η απομάκρυνση παγιδευμένου ή διαλυμένου αερίου ή πτητικού υγρού από την μάζα ενός υλικού (π.χ. απαέρωση ελαίων, ξήρανση υπό ψύξη) ή εκρόφηση αερίου από επιφάνειες (π.χ. καθαρισμός σωλήνων μικροκυμάτων ή γραμμικών επιταχυντών κατά την κατασκευή)· (3) για να αυξηθεί η διαδρομή την οποία διανύει ένα σωματίδιο πριν συγκρουστεί με άλλο, επιτρέποντας έτσι στα σωματίδια να μετακινηθούν χωρίς συγκρούσεις μεταξύ μιας πηγής και ενός στόχου – παραδείγματα τέτοιων χρήσεων είναι σε επιχρίσεις υπό κενό, σε επιταχυντές σωματιδίων και σε λυχνίες τηλεοράσεων· (4) για να μειωθεί ο αριθμός των μοριακών συγκρούσεων ανά δευτερόλεπτο, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες μόλυνσεως επιφανειών επεξεργασμένων στο κενό (χρήσιμο σε μελέτες καθαρών επιφανειών και την προετοιμασιών καθαρών λεπτών υμενίων).

Για οποιαδήποτε διεργασία κενού μπορεί να ορισθεί ένας καθοριστικός παράγοντας για την μέγιστη επιτρεπτή πίεση. Μπορεί να είναι ο αριθμός μορίων ανά μονάδα όγκου (λόγοι 1 και 2), η μέση ελεύθερη διαδρομή (λόγος 3) ή ο χρόνος για την απόθεση μιας μονομοριακής στοιβάδος (λόγος 4).

Σε θερμοκρασία δωματίου και κανονική ατμοσφαιρική πίεση, ένα λίτρο αέρα περιέχει περίπου 2×10^{22} μόρια που κινούνται σε τυχαίες διευθύνσεις και με ταχύτητες περίπου 1600 χιλιομέτρων την ώρα. Η ανταλλαγή ορμής με τα τοιχώματα του δοχείου ισούται με το βάρος ενός κιλού ανά τετραγωνικό εκατοστό. Η ατμοσφαιρική πίεση μπορεί να εκφρασθεί με διάφορες μονάδες (βλέπε πίνακα), αλλά μια συνήθης είναι το ύψος 760 χιλιοστών στήλης υδραργύρου. Μια κανονική ατμόσφαιρα ισούται με 760 mmHg, αλλά για να αποφευχθεί σύγχυση από την εξίσωση διαφορετικών μονάδων, ορίζεται το torr ίσο με την πίεση στήλης υδραργύρου ύψους 1 mm. Ο όρος αντικαταστάθηκε το 1971 από την μονάδα του διεθνούς συστήματος μονάδων η οποία είναι ένα newton ανά τετραγωνικό μέτρο (N/m^2) και ονομάζεται pascal ($1 \text{ pascal} = 7.5 \times 10^{-3} \text{ torr}$).

Κοινές μονάδες πίεσεως και τα ισοδύναμά τους		
Μονάδα	Ορισμός	Ισοδυναμία
atm	$1013250 \text{ dynes/cm}^2$	760 torr 14.7 psi (lb/in ²)
torr	1/760 atm	1 mmHg 133 N/m ²
pascal	N/m ²	10 dynes/cm ² $7.5 \times 10^{-3} \text{ torr}$

Η πρώτη σοβαρή χρήση της τεχνολογίας κενού στην βιομηχανία συνέβει το 1900 με την κατασκευή των ηλεκτρικών λαμπτήρων. Ακολούθησαν άλλες συσκευές που απαιτούσαν κενό για να λειτουργήσουν, όπως διάφοροι τύποι ηλεκτρονικών λυχνιών. Επιπλέον ανακαλύφθηκε ότι ορισμένες διεργασίες επιτύγχαναν υπό κενό πολύ καλύτερα αποτελέσματα ή ακόμη και ανέφικτα υπό ατμοσφαιρική πίεση. Τέτοιες εξελίξεις περιλαμβάνουν την λείανση των φακών για να αυξηθεί η διαπερατότητα, η κατεργασία πλάσματος αίματος για τράπεζες αίματος και η παραγωγή δραστικών μετάλλων όπως το τιτάνιο. Η εισαγωγή της πυρηνικής ενέργειας στη δεκαετία του 1950 προσέφερε έναυσμα για την εξέλιξη συσκευών κενού σε μεγάλη κλίμακα. Αυξανόμενες εφαρμογές διεργασιών κενού διαρκώς ανακαλύπτονται όπως στην προσομοίωση του διαστήματος και την μικροηλεκτρονική.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΚΕΝΟΥ.

Στη βιομηχανία. Εφαρμογές κενού στη βιομηχανία ποικίλουν από μηχανική κατεργασία όπως ο χειρισμός βαρέων και ελαφρών αντικειμένων με αναρρόφηση μέχρι οικοδόμηση ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε φύλλα πυριτίου. Φυσικά οι απαιτήσεις διαφέρουν ανάλογα με τις συγκεκριμένες χρήσεις. Στην περιοχή του πολύ χαμηλού κενού από 1 torr μέχρι σχεδόν 1 atm, συνήθεις εφαρμογές είναι ο μηχανικός χειρισμός, η συσκευασία και μορφοποίηση υπό κενό, χειρισμός αερίων, διήθηση, απαέρωση ελαίων, συμτύκνωση υδατικών διαλυμάτων, εισαγωγή ηλεκτρικών εξαρτημάτων, απόσταξη και απαέρωση χάλυβα.

Σε χαμηλότερες πιέσεις μέχρι 10^{-4} torr πολλές μεταλλουργικές κατεργασίες όπως τήξη, χύτευση, πυρωσυσσωμάτωση, θερμική επεξεργασία και συγκόλληση μπορούν να επωφεληθούν. Χημικές διεργασίες όπως απόσταξη υπό κενό και ξήρανση με ψύξη απαιτούν τέτοιες πιέσεις. Η ξήρανση με ψύξη εφαρμόζεται ευρέως στην φαρμακευτική βιομηχανία για την παραγωγή εμβολίων και αντιβιοτικών και για την αποθήκευση δέρματος και πλάσματος αίματος. Η βιομηχανία τροφίμων ξηραίνει με ψύξη κυρίως καφέ, αν και τα περισσότερα τρόφιμα μπορούν να φυλαχθούν χωρίς ψύξη ύστερα από ξήρανση με ψύξη και η τεχνική γίνεται αποδεκτή.

Η περιοχή πιέσεων μέχρι 10^{-6} torr χρησιμοποιείται για κρουσκοπικές εφαρμογές και ηλεκτρικές μονώσεις, για λαμπτήρες, για καθοδικούς σωλήνες τηλεόρασεως, για γεννήτριες ακτίνων X, για διακοσμητικές, οπτικές και ηλεκτρικές λεπτές επιστρώσεις και για ανιχνευτές διαρροών φασματογράφων μάζας.

Στις επιστρώσεις ένα μέταλλο ή μια ένωση εξαχνώνεται υπό κενό από μια πηγή πάνω σε ένα υπόστρωμα. Το υπόστρωμα είναι συνήθως πλαστικό για διακοσμητικά επιστρώματα, γυαλί, κεραμικό ή οξείδιο του πυριτίου για ηλεκτρικές επιστρώσεις. Το πάχος του στρώματος ποικίλει από το $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος του ορατού φωτός μέχρι 0.02 mm και μεγαλύτερο. Στην οπτική, αντανακλαστικά επιστρώματα αποτίθενται σε φακούς φωτογραφικών μηχανών, τηλεσκοπίων,

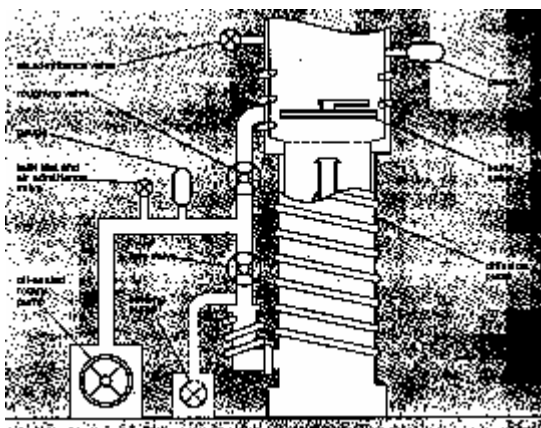
γυαλιών ή άλλων οπτικών συσκευών για να μειώνουν σημαντικά το ποσό του φωτός που ανακλάται από τους φακούς αυξάνοντας έτσι την ένταση της διερχόμενης ακτινοβολίας.

Κενό κατάλληλο για λεπτές επιστρώσεις και άλλες βιομηχανικές χρήσεις που απαιτούν πιέσεις μέχρι 10^{-6} torr επιτυγχάνεται με αντλητικά συστήματα όπως αυτό του σχήματος 1. Αποτελείται από μια περιστροφική αντλία στεγανοποιημένη με λάδι και μια αντλία διαχύσεως (που περιγράφεται παρακάτω). Η περιστροφική αντλία (που αποκαλείται συχνά προαντλία) αντλεί «πρόχειρα» τον θάλαμο μέχρι πιέσεις της τάξεως του 0.1 torr και μετά κλείνεται ο διακόπτης πρόχειρης αντλήσεως. Ο διακόπτης προαντλήσεως και ο διακόπτης του υψηλού κενού ανοίγονται ώστε να αντλείται ο θάλαμος από την αντλία διαχύσεως και την περιστροφική αντλία εν σειρά.

Στην έρευνα. Σχεδόν κάθε ερευνητικό εργαστήριο χρησιμοποιεί κενό απευθείας στα πειράματά του ή κάνει χρήση συσκευής η οποία εξαρτάται από κενό για την λειτουργία της. Οι χαμηλότερες πιέσεις επιτυγχάνονται στα ερευνητικά εργαστήρια όπου οι συσκευές είναι παρόμοιες αλλά μικρότερες από της βιομηχανίας.

Χαρακτηριστικές περιπτώσεις ερευνητικών συσκευών που χρησιμοποιούν κενό των 10^{-6} torr είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, επιταχυντής σωματιδίων και μεγάλος προσομοιωτής διαστήματος. Οι επιταχυντές ποικίλουν από μικρές μηχανές van de Graaff μέχρι μεγάλο σύγχροτρο πρωτονίων.

Στην προσομοίωση του διαστήματος, μεγάλες μονάδες που προσομοιάζουν το διάστημα γύρω από ένα διαστημικό όχημα απαιτούν κενό του 10^{-6} torr ή χαμηλότερο. Τέτοια δοχεία συμπεριλαμβάνουν ένα πλήρες περίβλημα σε θερμοκρασία υγρού αζώτου και μια δίοδο μέσω της οποίας μπορεί να εισαχθεί δέσμη φωτός υψηλής εντάσεως για την προσομοίωση της ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 1. Σύστημα αντλίας διαχύσεως. Φαίνονται: Διακόπτης εισαγωγής αέρα, διακόπτης πρόχειρης αντλήσεως, μετρητές, αντλίες διαχύσεως και περιστροφική, διακόπτης προαντλίας και θέση συνδέσεως ελεγκτού διαρροής και εισαγωγής αέρα.

Στην περιοχή πιέσεων μέχρι και κάτω από 10^{-9} torr οι ερευνητικές εφαρμογές περιλαμβάνουν ηλεκτρική μόνωση, πειράματα μετατροπής θερμοηλεκτρικής ενέργειας, σωλήνες μικροκυμάτων, ιοντικά μικροσκόπια, μικροσκόπια εκπομπής πεδίου, δακτυλίους αποθηκεύσεως σωματιδίων για επιταχυντές, εξειδικευμένα πειράματα προσομοιωτού διαστήματος και μελέτες καθαρών επιφανειών. Σε αρκετά πειράματα δεν αρκεί να μειωθεί η πίεση στα 10^{-9} torr, αλλά απαιτείται να μειωθεί η τάση

ατμών των υδρογονανθράκων σε απόλυτο ελάχιστο. Ακόμη και ίχνη υδρογονανθράκων μπορούν να καταστήσουν τα αποτελέσματα αναξιόπιστα. Για να επιτευχθεί κενό τέτοια ποιότητας, το δοχείο και ο περιεχόμενος εξοπλισμός πρέπει να καθαριστούν από τα υπολειπόμενα αέρια (να απαερωθούν) στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Μια συνήθης λύση είναι να θερμάνει κανείς τον θάλαμο για ώρες στους 350° C διατηρώντας την πίεση στα 10⁻⁵ torr. Θέρμανση σε τέτοια θερμοκρασία απαιτεί τη χρήση μεταλλικών στεγανοτικών δακτυλίων. Για την απομάκρυνση των υδρογονανθράκων η μονάδα αντλείται μέχρι τα 10⁻³ torr με αντλίες ροφήσεως και μετά μειώνεται η πίεση μέχρι τα 10⁻⁹ torr με τη βοήθεια αντλιών ιόντων και εξαχνώσεως τιτανίου (βλέπε παρακάτω).

ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΕΝΟΥ

Περιστροφικές αντλίες. Διατίθενται αντλητικές ικανότητες από ¼ ως 500 l s⁻¹ με δυνατότητα λειτουργίας από ατμοσφαιρική πίεση μέχρι 2 x 10⁻² torr για αντλίες μιας βαθμίδας και μέχρι 5 x 10⁻³ torr για αντλίες δύο βαθμίδων. Οι αντλίες αναπτύσσουν τη μέγιστη ταχύτητα από μια ατμόσφαιρα μέχρι 1 torr η οποία μετά πέφτει στο μηδέν καθώς προσεγγίζουν την τελική πίεση. Υπάρχουν δυο ειδών σχεδιάσεις για αντλίες αυτού του τύπου που είναι κατάλληλες για άντληση υγρών και αερίων. Η μια σχεδίαση έχει δυο πτερύγια και ένα κύλινδρος περιστρέφεται έκκεντρα μέσα σε ένα άλλο αφήνοντας ένα χώρο με διατομή μηνίσκου ο οποίος σαρώνεται κατά την περιστροφή του εσωτερικού κυλίνδρου από τα πτερύγια προς τις βαλβίδες εξόδου. Η δεύτερη σχεδίαση, περιστροφική αντλία με έμβολα, είναι παρόμοια με αντλία ενός πτερυγίου, το οποίο όμως είναι μέρος του δακτυλίου ο οποίος εφαρμόζει γύρω από τον εσωτερικό κύλινδρο. Το πτερύγιο είναι κοίλο και λειτουργεί ως βαλβίδα εισαγωγής αποκόπτοντας την αντλία από το σύστημα όταν ο εσωτερικός κύλινδρος είναι στο ανώτερο σημείο.

Η τελική εφικτή πίεση καθορίζεται από την διαρροή μεταξύ των πλευρών υψηλής και χαμηλής πιέσεως (κυρίως λόγω μεταφοράς αερίων και ατμών διαλυμένων στο λάδι της στεγανοποίησης τα οποία εξατμίζονται όταν εκτίθενται στην χαμηλή πίεση) και από την αποσύνθεση του λαδιού το οποίο εκτίθεται σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας που δημιουργούνται λόγω τριβής.

Το αέριο έρμα παρατείνει την ζωή της αντλίας γιατί απομακρύνει την κυριότερη αιτία μόλυνσεως της αντλίας, τους συμπυκνώσιμους ατμούς. Το αέριο έρμα είναι μια έξοδος στην ατμόσφαιρα η οποία διοχετεύει μικρή ποσότητα αέρα στον χώρο συμπίεσεως της αντλίας επιτρέποντας έτσι την διόδο των ατμών μέσα από την αντλία χωρίς να συμπυκνωθούν.

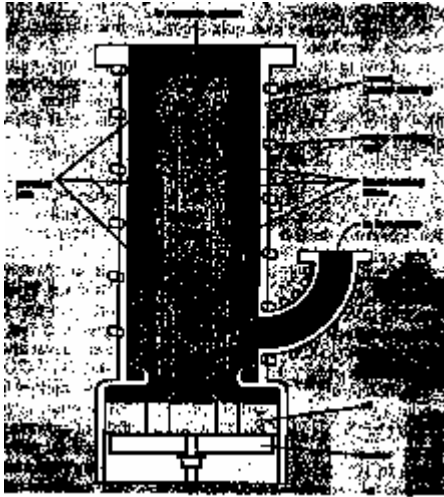
Χαρακτηριστικές εφαρμογές αυτής της αντλίας είναι στην συσκευασία τροφίμων, υπερφυγοκέντρους και φασματοφωτόμετρα υπεριώδους. Χρησιμοποιείται επίσης ευρέως ως προαντλία ή πρόχειρη αντλία ή και τα δύο για τις περισσότερες από τις άλλες αντλίες.

Μηχανικός προωθητής. Διατίθενται αντλητικές ικανότητες από 50 ως 35000 l s⁻¹ με δυνατότητα λειτουργίας από 10 μέχρι 10⁻³ torr. Η μέγιστη ταχύτητα αναπτύσσεται σε πιέσεις από 1 μέχρι 10⁻² torr, όπου το χαμηλότερο άκρο εξαρτάται από τον τύπο της προαντλίας. Συνήθως ένα

προωθητής έχει δυο αντίρροπα πτερύγια με διατομή σε σχήμα 8. Το αέριο παγιδεύεται μεταξύ των πτερυγίων και του εξωτερικού κυλίνδρου και μεταφέρεται από τον χώρο του υψηλού κενού στην πλευρά του χαμηλού κενού. Τα γρανάζια συγχρονισμού της κινήσεως των πτερυγίων είναι καλά λιπασμένα, αλλά είναι εκτός του αντλούμενου χώρου ώστε αυτός να είναι καθαρός από λάδια. Τα περιθώρια μεταξύ των πτερυγίων και του δοχείου κυμαίνονται από ½ μέχρι 2.5 mm. Συνεπώς, η οπισθοδιάχυση αερίων εξαρτάται από την διαφορά πίεσεως μεταξύ της εισόδου και της εξόδου και του τύπου του αερίου που αντλείται. Συνήθως επιτυγχάνεται λόγος πιέσεων 1 προς 10. Ο μηχανικός προωθητής πρέπει να υποστηρίζεται από άλλη αντλία εν σειρά όταν λειτουργεί στην συνήθη της περιοχή πιέσεων. Η πιο συνηθισμένη προαντλία είναι η περιστροφική αντλία με στεγανοποίηση λαδιού. Συχνά, ο προωθητής χρησιμοποιείται σε φούρνους κενού, σε μονάδες εμβαπτίσεως ηλεκτρικών συσκευών και σε αεροδυναμικές σήραγγες χαμηλής πυκνότητας.

Μοριακή αντλία. Διατίθενται αντλητικές ικανότητες ως και 10000 l s^{-1} με δυνατότητα λειτουργίας από 10^{-1} μέχρι 10^{-10} torr, όταν υποστηρίζεται από περιστροφική αντλία με στεγανοποίηση λαδιού. Η μέγιστη ταχύτητα αναπτύσσεται σε πολύ ευρεία περιοχή πιέσεων, από 10^{-1} μέχρι 10^{-9} torr. Στην μοριακή αντλία ο ταχύτερος άξονας (μέχρι και 540 στροφές ανά δευτερόλεπτο) προσδίδει ορμή στα μόρια του αερίου ωθώντας τα κατά μήκος του στενού κενού μεταξύ του άξονα και του σώματος της αντλίας. Η μοριακή ωθητική αντλία χρησιμοποιεί την ίδια αρχή λειτουργίας, αλλά έχει υποκατασταθεί πλήρως από την ταχύτερη και απλούστερη τουρμπομοριακή αντλία, στην οποία ακτινωτές σχισμές στα πτερύγια του άξονα και του σταθερού τμήματος ενεργοποιούν την αντλία. Χρησιμοποιούνται πλήθος βαθμίδων συμπίεσεως, αλλά χάρη στην σχεδίαση επιτρέπονται μεγαλύτερα περιθώρια μεταξύ των τμημάτων απ' ό,τι ήταν δυνατό στις αντλίες παλαιότερης σχεδίασεως.

Αντλίες διαχύσεως ατμών. Αυτή η αντλία χρησιμοποιείται κυρίως στην μελέτη καθαρών επιφανειών και σε βομβαρδισμό ραδιοσυχνότητας. Διατίθενται αντλητικές ικανότητες ως 100000 l s^{-1} με δυνατότητα λειτουργίας από 10^{-2} μέχρι 10^{-9} torr όταν χρησιμοποιούνται ψυχόμενοι θήλακες. Η ταχύτητα αντλήσεως μιας αντλίας διαχύσεως παραμένει σταθερή από 10^{-3} torr μέχρι αρκετά χαμηλότερα από τα όρια της τελικής πίεσεως για το υγρό της αντλίας, δηλ. με τα καλύτερα υγρά χαμηλότερα από 10^{-9} torr. Μια ενδεικτική τομή αντλίας διαχύσεως φαίνεται στο σχήμα 2. Η αντλία διαχύσεως εκκενώνεται αρχικά με μια περιστροφική αντλία σε πίεση 0.1 torr ή λιγότερο. Όταν θερμανθεί το υγρό με το θερμαντικό στοιχείο, αναπτύσσεται πίεση μερικών torr μέσα στον πύργο. Δέσμες ατμού υψηλής ταχύτητας εξέρχονται από τον πύργο, προσκρούουν στα ψυχόμενα τοιχώματα και συμπυκνώνονται και επιστρέφουν στον πυθμένα. Κατά την ομαλή λειτουργία ένα μέρος κάθε αερίου στην περιοχή των εξόδων του πύργου παρασύρεται, συμπιέζεται και μεταφέρεται στην επόμενη βαθμίδα. Η διεργασία επαναλαμβάνεται μέχρι να οδηγηθεί το αέριο στην έξοδο της αντλίας προς την προαντλία.



Σχήμα 2: Αντλία διαχύσεως τριών βαθμίδων. Φαίνονται οι εκτοξευτές των ατμών, το εξωτερικό περίβλημα, οι σωλήνες ψύξεως με νερό, οι σωλήνες αποστάξεως των ατμών και η δίοδοι προς το σύστημα κενού και την προαντλία.

Η προωθητική αντλία ατμών λαδιού βασίζεται στην ίδια αρχή όπως η αντλία διαχύσεως, αλλά χρησιμοποιεί μεγαλύτερη πίεση στον πύργο· η περιοχή λειτουργίας της είναι από 1 μέχρι 10^{-4} torr. Όταν υποστηρίζεται από περιστροφική αντλία, αυτή η αντλία χρησιμοποιείται ευρέως για την επίτευξη υψηλού κενού σε μονάδες εξαχνώσεως λεπτών υμενίων, σε επιταχυντές και σε άντληση καθοδικών σωλήνων τηλεοράσεως.

Αντλία βομβαρδισμού ιόντων (ιοντική αντλία). Διατίθενται αντλητικές ικανότητες ως και 7000 l s^{-1} με δυνατότητα λειτουργίας από 10^{-2} μέχρι και χαμηλότερα από 10^{-11} torr. Η μέγιστη ταχύτητα αναπτύσσεται σε περιοχή πιέσεων από 10^{-6} μέχρι 10^{-8} torr, αν και η χαμηλότερη τιμή εξαρτάται από την σχεδίαση της αντλίας. Η αντλία αυτή εκμεταλλεύεται την αρχή του ιοντικού βομβαρδισμού, όπου ένα καθοδικό υλικό όπως το τιτάνιο εξαχνώνεται ή εκτινάσσεται με βομβαρδισμό ιόντων υψηλής ταχύτητας. Τα δραστικά αέρια αντλούνται με χημική αντίδραση με το εκτινασόμενο τιτάνιο, τα αδρανή αέρια αντλούνται με ιοντισμό και ταφή στην κάθοδο και τα ελαφρά αέρια με διάχυση μέσα στην κάθοδο.

Μια συνήθης αντλία αποτελείται από δυο επίπεδες ορθογώνιες καθόδους μεταξύ των οποίων βρίσκεται η άνοδος από ανοξειδωτο χάλυβα σε σχήμα πολλών παράλληλων ανοιχτών κουτιών. Η διάταξη τοποθετείται σε στενό κιβώτιο συνδεδεμένο με τη διάταξη του κενού και περιβάλλεται από μόνιμο μαγνήτη. Η άνοδος λειτουργεί σε τάση περίπου 7 kV, ενώ οι κάθοδοι είναι γειωμένες.

Η ιοντική αντλία έχει χαμηλές ταχύτητες και καμιά φορά αστάθεια όταν αντλεί αδρανή αέρια. Για να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά της έχουν αναπτυχθεί άλλοι τύποι αντλίων: με σχιστές καθόδους, με τρίοδο, διαφορική αντλία και μάγνητρον.

Για την έναρξη μιας ιοντικής αντλίας είναι απαραίτητο να μειωθεί πρώτα η πίεση μέχρι τουλάχιστον 2×10^{-3} torr και κατά προτίμηση πολύ χαμηλότερα με πρόχειρη αντλία. Οι ιοντικές αντλίες μπορούν να λειτουργήσουν σε οποιαδήποτε θέση και δεν χρειάζονται παροχή νερού ή υγρού αζώτου. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και παρέχουν υπερυψηλό κενό, χωρίς μόλυνση οργανικών

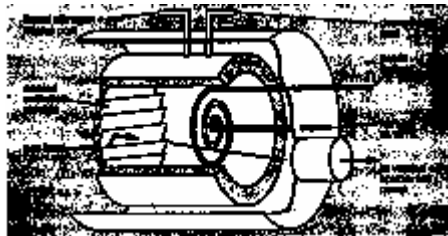
ουσιών ή δονήσεις. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε μελέτες καθαρών επιφανειών και σε εφαρμογές όπου η μόλυνση με οργανικές ουσίες προκαλεί μη ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Αντλία εξαχνώσεως τιτανίου. Διατίθενται αντλητικές ικανότητες ως και χιλιάδες 1 s^{-1} με δυνατότητα λειτουργίας από 10^{-3} μέχρι και χαμηλότερα από 10^{-11} torr. Η μέγιστη ταχύτητα της αντλίας, η οποία αντλεί μόνο χημικώς δραστικά αέρια, αναπτύσσεται σε πιέσεις χαμηλότερες από 10^{-5} torr. Σε αυτό τον τύπο αντλίας, το τιτάνιο εξαχνώνεται στα τοιχώματα της αντλίας από πηγή η οποία θερμαίνεται είτε με ηλεκτρική αντίσταση είτε με δέσμη ηλεκτρονίων. Τα δραστικά αέρια αντλούνται με σημική αντίδραση, αλλά τα αδρανή δεν αντλούνται. Συνεπώς, πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με αντλία διαχύσεως ή ιοντική αντλία. Σε πιέσεις χαμηλότερες από 10^{-5} torr το στρώμα αποτίθεται ταχύτερα απ' ό,τι καταναλώνεται επιτρέποντας την περιοδική απόθεση αντί της συνεχούς αποθέσεως. Γενικά, η ταχύτητα αντλήσεως περιορίζεται από την πρόσβαση του δραστικού αερίου στο ενεργό στρώμα, γι' αυτό συχνά η αντλία κατασκευάζεται ως μέρος του θαλάμου κενού. Οι αντλίες εξαχνώσεως δεν έχουν οργανική μόλυνση και επιτυγχάνουν ταχύτητες άνω των 100000 l s^{-1} . Χρησιμοποιούνται συνήθως σε συνδυασμό με ιοντικές αντλίες σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη ταχύτητα και η απουσία οργανικών ουσιών είναι απαραίτητη, όπως στην εξάχνωση υλικών σε καθαρές επιφάνειες.

Αντλία ροφήσεως. Συνήθως οι αντλίες αυτές περιέχουν 1 kg υλικού ροφήσεως το οποίο κατακρατεί μόρια αερίου στην επιφάνειά του. Είναι σε θέση να αντλούν από ατμοσφαιρική πίεση μέχρι 10^{-2} torr ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν εν σειρά μέχρι πίεση 10^{-5} torr. Η ταχύτητα αντλήσεως φαίνεται από τις καμπύλες αντλήσεως για δεδομένο όγκο. Στις περισσότερες περιπτώσεις το υλικό ροφήσεως είναι ένας μοριακός ηθμός, δηλ. ένα υλικό το οποίο έχει υποστεί κατεργασία ώστε να είναι πορώδες με μέγεθος πόρων παρόμοιο με αυτό των μορίων, αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ενεργός άνθρακας. Το υλικό τοποθετείται σε ένα κυλινδρικό δοχείο συνδεδεμένο με το σύστημα κενού το οποίο μπορεί να εμβλαπτισθεί σε υγρό άζωτο για υπέρψυξη που διευκολύνει την ρόφηση. Συνήθως 1 kg ροφητή αντλεί 10 ως 100 l μέχρι πίεση 10^{-2} torr. Το αέριο εκλύεται όταν επανέλθει ο ροφητής σε θερμοκρασία δωματίου. Η αντλία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για πρόχειρη άντληση συστημάτων όπου η απουσία οργανικών ουσιών εξασφαλίζεται με μια ιοντική αντλία ή αντλία εξαχνώσεως τιτανίου.

Κρυοαντλία. Αυτός ο τύπος αντλίας αξιοποιεί πολύ χαμηλές θερμοκρασίες για να συμπυκνώσει αέρια και έτσι τα απομακρύνει από το σύστημα. Είναι δυνατές ταχύτητες αντλήσεως μέχρι και εκατομμύρια 1 s^{-1} με κρυοαντλίες σε πιέσεις από 10^{-3} μέχρι 10^{-10} torr. Αυτός ο τύπος αντλίας αναπτύσσει την μέγιστη ταχύτητά του σε όλες τις πιέσεις λειτουργίας του. Οι περισσότερες κρυοαντλίες χρησιμοποιούν ήλιο για να ψύχουν την ψυχρή επιφάνειά τους· το ήλιο μπορεί να είναι αέριο σε 19 K ή υγρό σε 4.2 K . Μια συστοιχία κρυοαντλιών φαίνεται στο σχήμα 3. Το θερμικό φορτίο στην ψυχρή επιφάνεια σε πιέσεις χαμηλότερες από 10^{-6} torr οφείλεται κυρίως σε ακτινοβολία. Για αυτό το λόγο η ψυχρή επιφάνεια κανονικά περιβάλλεται με πετάσματα που ψύχονται με υγρό

άζωτο. Μια κρυοαντλία η οποία εξαρτάται από την συμπύκνωση του αερίου για την ταχύτητα αντλήσεώς της δεν μπορεί να αντλήσει αποτελεσματικά αέρια όπως υδρογόνο και ήλιο τα οποία έχουν μεγάλη τάση ατμών στην ψυχρή επιφάνεια. Συνεπώς, σε ένα σύστημα κενού με κρυοαντλία είναι αναγκαία η συμπληρωματική χρήση αντλίας διαχύσεως ή ιοντικής αντλίας. Τέτοιες αντλίες χρησιμοποιούνται σε προσομοιώσεις μεγάλου υψομέτρου ή του διαστήματος.



Σχήμα 3: Συστοιχία κρυοαντλιών. Φαίνονται: σημεία παροχής και απαγωγής υγρού και αερίου αζώτου, ψυχρά πετάσματα, κύκλωμα υγρού ηλίου, δίοδος προς την επόμενη αντλία.

Παγίδες, εμπόδια, διακόπτες και στεγανοποίηση. Παγίδες και εμπόδια τοποθετούνται πάνω από αντλίες διαχύσεως και προωθητές για να εμποδίζουν το λάδι να μεταφερθεί στο σύστημα και να προκαλέσει μόλυνση. Οι παγίδες συνήθως ψύχονται με υγρό άζωτο. Τα εμπόδια είναι είτε υδρόψυκτα είτε ψύχονται σε θερμοκρασία μεταξύ 0 και $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

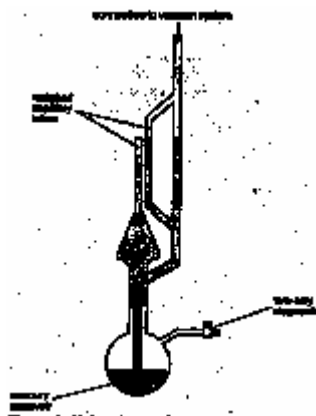
Οι διακόπτες των συστημάτων κενού είναι ειδικά σχεδιασμένοι για χρήση σε κενό. Χαρακτηριστικά είναι τα εμπόδια υψηλού κενού και οι διακόπτες απομονώσεως που τοποθετούνται πάνω από αντλίες διαχύσεως ή προωθητές. Έχουν σχεδιασθεί έτσι ώστε να προβάλλουν τα μικρότερη δυνατή αεροδυναμική αντίσταση και ταυτόχρονα να λειτουργούν ικανοποιητικά ως εμπόδια στην πορεία των ατμών λαδιού προς το σύστημα κενού. Οι διακόπτες σωλήνων έχουν διάφραγμα ή πώμα και μπορούν να λειτουργήσουν χειροκίνητα, ηλεκτρικά, υδραυλικά ή με πεπιεσμένο αέρα.

Η στεγανοποίηση επιτυγχάνεται σε απλά συστήματα κενού με δακτυλίους ελαστικού σε αυλάκι. Τα συνήθη υλικά για τους δακτυλίους είναι νιτρίλιο, viton, σιλοκόνη, νεοπρένιο ή βουτύλιο, ανάλογα με τις απαιτούμενες ιδιότητες. Σε υπερυψηλό κενό χρησιμοποιούνται δυο ειδών μεταλλικές τσιμούχες είτε σύρμα χρυσού ή αργιλίου που συμπιέζεται μεταξύ δυο επίπεδων επιφανειών είτε επίπεδος δακτύλιος χαλκού που συμπιέζεται μεταξύ επιφανειών που έχουν κατάλληλη αιχμηρή ακμή.

Μετρητής McLeod. Ο μετρητής πίεσεως McLeod αξιοποιεί τον νόμο του Boyle (σε σταθερή θερμοκρασία το γινόμενο πίεσεως και όγκου ορισμένης ποσότητας αερίου είναι σταθερό) για να προσδιορίσει την πίεση αερίου στην περιοχή από 10 μέχρι 10^{-6} torr. Ανυψώνοντας τη στάθμη του υδραργύρου απομονώνουμε το αέριο από το σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένη η συσκευή (Σχήμα 4). Όταν η στάθμη του υδραργύρου ανυψωθεί περαιτέρω το αέριο συμπιέζεται. Η διαφορά των σταθμών του υδραργύρου μεταξύ του παγιδευμένου αερίου και του μετρούμενου συστήματος αντιστοιχεί στην πίεση σε torr του παγιδευμένου όγκου. Δοθέντος ότι ο μετρητής εξαρτάται μόνο από τον αρχικό όγκο του παγιδευμένου αερίου, τον τελικό του όγκο και την τελική πίεση, που όλα μετριοούνται άμεσα, ο μετρητής αυτός θεωρείται απόλυτος μετρητής και χρησιμοποιείται κυρίως ως πρότυπο για την βαθμονόμηση άλλων μετρητών.

Μετρητές θερμικής αγωγιμότητας. Δυο τύποι μετρητών θερμικής αγωγιμότητας, ο τύπος Pirani και το θερμοζεύγος, προσδιορίζουν την πίεση από τον ρυθμό απαγωγής της θερμότητας από ένα θερμό νήμα. Ο μετρητής Pirani είναι κατά βάση μια γέφυρα Wheatstone όπου το ένα σκέλος είναι ένα θερμαινόμενο νήμα μέσα στο κενό. Η αντίσταση του νήματος εξαρτάται από την θερμοκρασία του η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τον ρυθμό απαγωγής της θερμότητας μέσω των αερίων. Ο ρυθμός απαγωγής της θερμότητας επηρεάζεται από την πίεση και την θερμική αγωγιμότητα των αερίων. Η γέφυρα τροφοδοτείται από πηγή σταθερής τάσης και η διαφορά των εντάσεων ρεύματος στα σκέλη του κυκλώματος καταγράφεται απ' ευθείας σε torr. Στον μετρητή θερμοζεύγους, η θερμή διμεταλλική επαφή συνδέεται σε ένα θερμό νήμα μέσα στο σύστημα του κενού το οποίο τροφοδοτείται από πηγή σταθερής τάσης. Ο τρόπος λειτουργίας είναι ίδιος όπως στον μετρητή Pirani με τη διαφορά ότι εδώ η πίεση προκύπτει από την θερμοκρασία του νήματος. Οι μετρητές αυτοί είναι ανθεκτικοί και απλοί στη λειτουργία τους και καλύπτουν την περιοχή από 100 μέχρι 10^{-4} torr.

Μετρητές ιοντισμού ψυχρής καθόδου. Αυτός ο μετρητής εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι ο ρυθμός παραγωγής ιόντων από ρεύμα ηλεκτρονίων εξαρτάται από την πίεση και την πιθανότητα ιοντισμού ενός αερίου. Ονομάζεται και μετρητής Penning και αποτελείται από δυο αντικείμενες καθόδους με μια άνοδο ανάμεσά τους μέσα σε ένα μεταλλικό ή γυάλινο περίβλημα. Έξω από το περίβλημα ένας μόνιμος μαγνήτης δημιουργεί μαγνητικό πεδίο το οποίο επιμηκύνει την διαδρομή των ηλεκτρονίων καθώς κινούνται από την κάθοδο στην άνοδο αυξάνοντας έτσι τον ιοντισμό που λαμβάνει χώρα μέσα στον μετρητή. Συνήθως η άνοδος βρίσκεται στα 2 kV παράγοντας συνεχές ρεύμα το οποίο οφείλεται στα θετικά ιόντα που φτάνουν στην κάθοδο. Η πίεση δίνεται απ' ευθείας από το ρεύμα που παράγεται. Η περιοχή λειτουργίας του μετρητή φτάνει μέχρι και 10^{-7} torr. Χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικά συστήματα γιατί είναι ανθεκτικός και εύχρηστος.

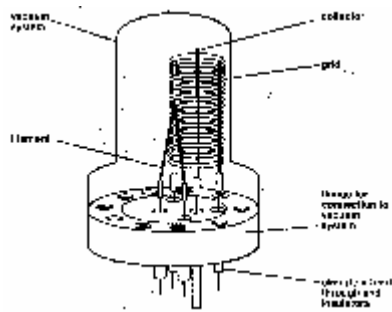


Σχήμα 4: Μετρητής McLeod. Φαίνονται οι συγκερασμένοι τριχοειδείς σωλήνες, η αποθήκη υδραργύρου, η σύνδεση με το σύστημα κενού και ένας διακόπτης δυο κατευθύνσεων

Μετρητής ιοντισμού θερμής καθόδου. Η αρχή λειτουργίας είναι όμοια με του μετρητή Penning με τη διαφορά ότι τα ηλεκτρόνια παράγονται από θερμό νήμα και επιταχύνονται προς ένα πλέγμα. Οι πιέσεις που καλύπτονται είναι ή 1 μέχρι 10^{-5} torr ή 10^{-2} μέχρι 10^{-7} torr ανάλογα με την δομή των ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από το νήμα ιοντίζουν τα μόρια του αερίου·

το συνεχές ρεύμα των ιόντων που φτάνουν στον συλλέκτη είναι ανάλογο της πίεσεως και της πιθανότητας ιοντισμού του αερίου. Πρόκειται για ένα καθαρό και ακριβή μετρητή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και πιέσεις των 10^{-6} torr· σε χαμηλότερες πιέσεις η ακρίβεια μειώνεται λόγω των χαμηλής ενέργειας ακτίνων X που παράγονται από τα ηλεκτρόνια τα οποία προσπίπτουν στο πλέγμα. Αυτές οι ακτίνες X δημιουργούν ένα ρεύμα προς τον συλλέκτη ανεξάρτητο από την πίεση.

Μετρητής ιοντισμού θερμής καθόδου τύπου Bayard-Alpert. Σε αυτό τον τύπο μετρητή ιοντισμού, η διατομή του συλλέκτη έχει ελαχιστοποιηθεί για να μειωθεί το φαινόμενο των ακτίνων X. Αυτό επιτυγχάνεται με αντιστροφή του μετρητή, δηλ. ο συλλέκτης (ένα λεπτό σύρμα) περιβάλλεται από το πλέγμα. Καλύπτει πιέσεις από 10^{-3} μέχρι 10^{-9} torr ή και 10^{-11} torr, αν χρησιμοποιηθεί διαμορφωμένο όργανο. Ένας συνήθης μετρητής αυτού του τύπου φαίνεται στο σχήμα 5. Η αρχή λειτουργίας του είναι ίδια με των άλλων μετρητών ιοντισμού που προαναφέρθησαν.



Σχήμα 5: Μετρητής ιοντισμού τύπου Bayart-Alpert. Φαίνονται το νήμα, ο συλλέκτης, το πλέγμα και η βάση με τις ηλεκτρικές συνδέσεις

Αναλυτές αερίων και μετρητές μερικών πιέσεων. Ο όρος αναλυτής αερίων χρησιμοποιείται για πιο περίπλοκες συσκευές, ιδιαίτερα όσον αφορά την διακριτική ικανότητα. Αυτές οι διατάξεις είναι ουσιαστικά φασματογράφοι μάζας, αλλά ο όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει ακριβή αναλυτικά όργανα με υψηλή διακριτική ικανότητα τα οποία μπορούν να ανιχνεύσουν σωματίδια μεγάλης μάζας.

Οι διαθέσιμοι τύποι αυτών των οργάνων είναι μαγνητικής αποκλίσεως, χρόνου πτήσεως, γραμμικής ραδιοσυχνότητας, κυκλοειδούς, ωμεγάτρου, τετραπόλου και μονοπόλου.

Ανίχνευση διαρροών. Η ανίχνευση διαρροών είναι αναγκαία, αλλά χρονοβόρα διαδικασία κατά την κατασκευή συσκευών κενού. Μια συνήθης και ευαίσθητη μέθοδος βασίζεται στη χρήση φασματογράφου μάζας ο οποίος είναι ρυθμισμένος για ανίχνευση ηλίου και είναι συνδεδεμένος στο σύστημα του κενού. Μια μικρή ποσότητα ηλίου διοχετεύεται κοντά στην περιοχή όπου πιθανόν να υπάρχει διαρροή και, αν όντως υπάρχει, το ήλιο εισχωρεί στην συσκευή και ανιχνεύεται με τον φασματογράφο μάζας. Έτσι είναι δυνατός ο εντοπισμός διαρροών τόσο μικρών που θα απαιτούσαν εκατομμύρια χρόνια πριν χαθεί το κενό από ένα δοχείο ενός λίτρου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ. S. DUSHMAN, *Scientific Foundations of Vacuum Techniques*, 2nd ed. (1962) και C. M. VAN ATTA, *Vacuum Science and Engineering* (1965), δυο διδακτικά βιβλία που καλύπτουν διεξοδικά τις περισσότερες πτυχές του θέματος με παραπομπές στο τέλος κάθε κεφαλαίου· A. S. D. BARRETT (ed.), *Progress in Vacuum Science and Technology* (1959), μια

σειρά από άρθρα για διάφορες τάσεις στην τεχνολογία του κενού· N. M T. DENNIS and T. A. HEPPELL, *Vacuum System Design* (1968), ένα διδακτικό βιβλίο που καλύπτει σχεδιαστικές πτυχές των συσκευών κενού για να βοηθήσει στην επιλογή των κατάλληλων τύπων αντλιών και μετρητών. Περισσότερο εξειδικευμένα βιβλία, τα πιο πολλά με εκτενή βιβλιογραφία, περιλαμβάνουν: B. D. POWER, *High Vacuum Pumping Equipment* (1966)· A. ROTH, *Vacuum Sealing Techniques* (1966)· P. A. READHEAD, J. P. HOBSON, and E. V. KORNELSEN, *The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum* (1968)· L. HOLLAND (ed.), *Thin Film Microelectronics* (1965)· J. A. BELK, *Vacuum Techniques in Metallurgy* (1963)· και D. J. SANTELER et al., *Vacuum Tecnology and Space Simulation* (1966).

(N.T.M.D.)

[Το πρωτότυπο του άρθρου δημοσιεύθηκε στην Encyclopaedia Britannica, Macropaedia, **19**, 14-17 (1971). Μετάφραση: Θάνος Τσεκούρας, Αύγουστος 2000. Ακολουθήθηκε πιστά το πρωτότυπο κείμενο εκτός από τις μονάδες ταχύτητας αντλήσεως όπου χρησιμοποιήθηκαν 1 s^{-1} αντί ft^3/min ($=0.472 \text{ l s}^{-1}$).]