

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΕΝΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ (Α.Μ. 7025)  
ΠΑΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ (Α.Μ. 7023)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΖΙΡΤΖΙΛΑΚΗΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2022**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες βασικές αρχές των συστημάτων κενού. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου της άντλησης. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι διάφορες κατηγορίες αντλιών που χρησιμοποιούνται για την άντληση αερίων. Το τέταρτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στις τεχνικές προσομοίωσης της πίεσης σε συστήματα υψηλού κενού. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εφαρμογές του κενού στις τεχνολογίες επίστρωσης. Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθεται μια υπολογιστική εφαρμογή όπου υπολογίζεται ο χρόνος άντλησης, η απαιτούμενη ταχύτητα άντλησης και τα χαρακτηριστικά της αντλίας υποστήριξης. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b>	
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	1
<b>1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ</b>	
1.1 Γενικά.....	4
1.2 Κατηγορίες κενού.....	6
1.3 Κινητική θεωρία των αερίων.....	7
1.4 Μοριακή κίνηση.....	8
1.5 Πίεση.....	9
1.6 Μέση ελεύθερη διαδρομή.....	10
1.7 Ρυθμός συγκρούσεων με τα τοιχώματα.....	11
<b>2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ</b>	
2.1 Μαθηματική περιγραφή.....	13
2.2 Φύση της ροής αερίου.....	17
2.3 Γενική περιγραφή.....	17
2.4 Τυρβώδης ροή.....	20
2.5 Ιξώδης ή στρωτή ροή.....	21
2.6 Μοριακή ροή.....	22
2.7 Αγωγιμότητα.....	24
2.8 Παράλληλες αγωγιμότητες.....	25
2.9 Αγωγιμότητες σε σειρά.....	25
<b>3. ΑΝΤΛΙΕΣ ΚΕΝΟΥ</b>	
3.1 Γενικά.....	27
3.2 Αντλίες διαφράγματος.....	28
3.3 Περιστροφικές αντλίες πτερυγίων.....	32
3.4 Αντλίες Roots.....	35
3.5 Αντλίες διάχυσης.....	38

3.6 Στροβιλομοριακές αντλίες.....	40
3.7 Αντλίες απορρόφησης.....	44
3.8 Αντλίες προσρόφησης.....	45
3.9 Αντλίες ιόντων διασκορπισμού.....	48
3.10 Κρυοαντλίες.....	52
3.10.1 Η ψυχρή κεφαλή και η αρχή λειτουργίας της.....	55
3.11 Επιλογή αντλίας για εφαρμογές υπερ-υψηλού κενού.....	59
<b>4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΙΕΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΨΗΛΟΥ ΚΕΝΟΥ</b>	
4.1 Γενικά.....	64
4.2 Συμβατικός υπολογισμός των πιέσεων του συστήματος.....	64
4.3 Κυκλώματα κενού.....	65
4.4 Σχεδιασμός των κυκλωμάτων κενού.....	69
<b>5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΕΝΟΥ</b>	
5.1 Γενικά.....	73
5,2 Επίστρωση.....	74
5.3 Πηγές επίστρωσης.....	74
5.4 Θερμικοί εξατμιστές.....	75
5.5 Εξατμιστήρες δέσμης ηλεκτρονίων.....	76
5.6 Καθοδικός ψεκασμός.....	76
5.7 Χημική εναπόθεση ατμών.....	78
5.8 Επικάλυψη εξαρτημάτων.....	78
5.9 Επικάλυψη ιστού.....	81
5.10 Οπτικές επιστρώσεις.....	83
5.11 Επικάλυψη γυαλιού.....	85
5.12 Συστήματα για την παραγωγή δίσκων αποθήκευσης δεδομένων.....	87
<b>6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ</b>	
6.1 Εκκένωση θαλάμου κενού και προσδιορισμός μεγεθών Αντλιών.....	90
6.2 Εκκένωση θαλάμου κενού χωρίς πρόσθετες πηγές αερίου ή Ατμού.....	91
6.2.1 Εκκένωση θαλάμου στην περιοχή χαμηλού κενού.....	91
6.2.2 Εκκένωση θαλάμου στην περιοχή υψηλού κενού.....	94
6.2.3 Εκκένωση θαλάμου στην περιοχή μεσαίου κενού.....	96
6.3 Προσδιορισμός κατάλληλης αντλίας υποστήριξης.....	98
6.4 Εκκένωση θαλάμου με έκλυση αερίων και ατμών.....	102

<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	104
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	105

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

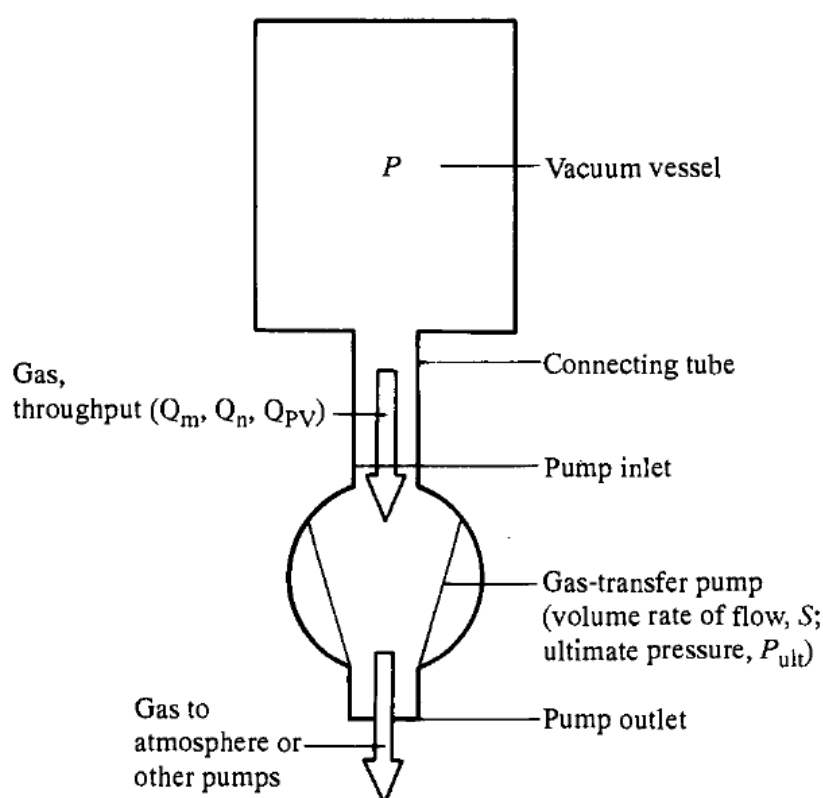
Η τεχνολογία κενού είναι απαραίτητη σε πολλούς κλάδους της σύγχρονης βιομηχανία και της επιστημονικής έρευνας και αναμένεται να διαδραματίσει και στο μέλλον ουσιαστικό ρόλο σε αυτές τις δραστηριότητες. Είναι σχεδόν αδύνατο να απαριθμήσουμε όλους τους τομείς στους οποίους η τεχνολογία κενού χρησιμοποιείται σήμερα. Από την αρχική της σχέση με την έρευνα στη φυσική, το εύρος των εφαρμογών της έχει επεκταθεί σε σημαντικούς τομείς της βιομηχανικής δραστηριότητας, μεταξύ των οποίων, η μεταλλουργία, η μηχανολογία, η ηλεκτρολογία και η χημική μηχανική, προσφέροντας μία ανυπολόγιστη συμβολή στην αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα πολλών διαδικασιών.

Τα τελευταία πενήντα χρόνια έχουν εμφανιστεί πολλές διαδικασίες παραγωγής που βασίζονται σε ένα περιβάλλον κενού, που εκτείνονται από την παραγωγή στρατηγικών μετάλλων και κραμάτων σε συσκευασίες κρέατος και καφέ. Διεργασίες κενού χρησιμοποιούνται για την παραγωγή γυαλιού ειδικής επίστρωσης για κτίρια και αυτοκίνητα και στην κατασκευή οπτικών συσκευών, ημιαγωγών και δίσκων αποθήκευσης πληροφοριών. Η αεροδιαστημική βιομηχανία χρειάζεται τεράστιους θαλάμους κενού για δορυφορικές δοκιμές ενώ η έρευνα στην πυρηνική σύντηξη και τη σωματιδιακή φυσική αύξησε τις απαιτήσεις για συστήματα κενού. Προβλέψεις για την εξέλιξη της τεχνολογίας δείχνουν ότι σημαντικές δραστηριότητες στις οποίες η τεχνολογία του κενού θα συμβάλλει σημαντικά θα πραγματοποιηθούν στους τομείς των προηγμένων υλικών (κεραμικά, πολυμερή, άμορφα μέταλλα, σύνθετα υλικά), της τεχνολογίας αισθητήρων, της τεχνολογίας πληροφοριών (συσκευές super LSI, 3D συσκευές μνήμης), των υπολογιστών, της τεχνολογίας λεπτών υμενίων και της ιατρικής.

Το αντικείμενο της τεχνολογίας κενού είναι η μείωση του αριθμού των σωματιδίων ενός αερίου μέσα σε ένα σύστημα. Σε σταθερή θερμοκρασία, αυτό αντιστοιχεί πάντα σε μείωση της πίεσης του αερίου. Για παράδειγμα, μια μείωση της πίεσης από την ατμοσφαιρική πίεση σε

$10^{-6}$  mbar αντιστοιχεί σε δισεκατομμύρια φορές μείωση του αριθμού των σωματιδίων σε ένα σύστημα. Επί του παρόντος, είναι δυνατό να επιτευχθούν  $10^{-13}$  mbar.

Ένα πολύ βασικό σύστημα κενού φαίνεται στο Σχήμα 1. Αποτελείται από ένα δοχείο που συνδέεται με μια αντλία μεταφοράς αερίου. Η αντλία αφαιρεί τα σωματίδια του αερίου από το δοχείο. Στις αντλίες μεταφοράς αερίου αυτό συνήθως περιλαμβάνει συμπίεση του αερίου σε πίεση που είναι κατάλληλη είτε για την έξοδό του στην ατμόσφαιρα είτε για την μεταφορά του σε αντλία υποστήριξης.



Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση ενός βασικού συστήματος κενού με μία αντλία μεταφοράς αερίου [4].

Είναι αδύνατο να εξαλειφθούν όλες οι πηγές αερίου σε ένα σύστημα κενού. Ακόμη και στα καλύτερα σχεδιασμένα και λειτουργικά στατικά συστήματα, μικρές διαρροές και ελαφρές εξαερώσεις συμβαίνουν και τα προκύπτοντα μόρια πρέπει να αντιμετωπιστούν από τις αντλίες. Επιπλέον, σε πολλά συστήματα, σημαντικές ποσότητες αερίου και ατμού πρέπει να αντλούνται συνεχώς είτε επειδή έχουν

εξελιχθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας είτε επειδή έχουν προστεθεί σκόπιμα για να διατηρηθούν οι συνθήκες αντίδρασης.

Προφανώς, για να ταιριάζουν οι αντλίες με τις απαιτήσεις της διαδικασίας, είναι απαραίτητο να μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η ποσότητα του υλικού ως συνάρτηση του χρόνου που εισέρχεται στο σύστημα κενού, καθώς και η ικανότητα των αντλιών να αντιμετωπίσουν αυτήν την ποσότητα.



# 1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο όρος κενό χρησιμοποιείται γενικά για να υποδηλώσει έναν όγκο ή μία περιοχή του χώρου στην οποία η πίεση είναι σημαντικά μικρότερη από 760 torr. Παραδοσιακά, η πίεση εκφράζεται σε χιλιοστά μιας στήλης υδραργύρου, και 760 χιλιοστά υδραργύρου είναι ίσα με 1 τυπική ατμόσφαιρα. Πολύ συχνά ως μονάδα πίεσης χρησιμοποιείται το torr, που ισούται περίπου με 1 χιλιοστό στήλης υδραργύρου.

Ένα τέλειο ή απόλυτο κενό, που συνεπάγεται έναν χώρο που στερείται εντελώς ύλης, είναι πρακτικά απραγματοποίητο. Για πρακτικούς λόγους όμως και σύμφωνα με τον ορισμό που προτείνει η American Vacuum Society, ο όρος κενό χρησιμοποιείται γενικά για να δηλώσει έναν χώρο γεμάτο με αέριο σε πίεση μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση.

Στο διεθνές σύστημα (SI), η μονάδα πίεσης είναι το Pa (πασκάλ). Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, το torr παραμένει μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μονάδες πίεσης. Ο Πίνακας 1.1 παραθέτει συντελεστές μετατροπής μεταξύ ορισμένων από τις πιο γνωστές μονάδες πίεσης.

Πίνακας 1.1 Συντελεστές μετατροπής των μονάδων πίεσης [1]

Unit	Torr	Pascal	Dyne cm <sup>-2</sup>	Bar	Atmosphere (standard)
1 torr (0°C)	1	1.333 × 10 <sup>2</sup>	1.333 × 10 <sup>3</sup>	1.333 × 10 <sup>-3</sup>	1.3158 × 10 <sup>-3</sup>
1 pascal (newton m <sup>-2</sup> )	7.5006 × 10 <sup>-3</sup>	1	10	1.0 × 10 <sup>-5</sup>	9.8692 × 10 <sup>-6</sup>
1 dyne cm <sup>-2</sup>	7.5006 × 10 <sup>-4</sup>	0.1	1	1	9.8692 × 10 <sup>-7</sup>
1 bar	7.5006 × 10 <sup>2</sup>	1.0 × 10 <sup>5</sup>	1.0 × 10 <sup>6</sup>	1.0 × 10 <sup>6</sup>	0.98692
1 atmosphere (standard)	760	1.0133 × 10 <sup>5</sup>	1.0133 × 10 <sup>6</sup>	1.0133	1
1 pound (force) inch <sup>-2</sup>	5.1715 × 10 <sup>1</sup>	6.8948 × 10 <sup>3</sup>	6.8948 × 10 <sup>3</sup>	6.8948 × 10 <sup>-2</sup>	6.8047 × 10 <sup>-2</sup>

Η μέτρηση της πίεσης ενός συστήματος είναι ο παραδοσιακός τρόπος ταξινόμησης του βαθμού του κενού. Στις μέρες μας, ο γενικός όρος κενό αναφέρεται σε μια περιοχή που αποτελείται από περίπου 19 τάξεις μεγέθους πίεσης κάτω από 1 ατμόσφαιρα. Για ευκολία, αυτό το ιδιαίτερα εκτεταμένο εύρος πίεσης γενικά χωρίζεται σε διάφορες περιοχές που δηλώνουν τον βαθμό του κενού. Αυτή η διαίρεση της κλίμακας πίεσης κάτω από την μία ατμόσφαιρα είναι κάπως αυθαίρετη, αλλά είναι μια βολική μέθοδος για την δήλωση των διαφορετικών φυσικών φαινομένων που εμφανίζονται εντός των ορίων πίεσης που καθορίζονται για κάθε κατηγορία.

Πίνακας 1.2 Εφαρμογές των τεχνικών κενού [1]

Physical Situation	Objective	Applications
Low pressure	Achieve pressure difference.	Holding, lifting, transport pneumatic, cleaners, filtering, forming
Low molecular density	Remove active atmospheric constituents.	Lamps (incandescent, fluorescent, electric discharge tubes), melting, sintering, packaging, encapsulation, leak detection
	Remove occluded or dissolved gas.	Drying, dehydration, concentration, freeze-drying, degassing, lyophilization, impregnation
	Decrease energy transfer.	Thermal insulation, electrical insulation, vacuum microbalance, space simulation
Large mean free path	Avoid collision.	Electron tubes, cathode ray tubes, television tubes, photocells, photomultiplier, X-ray tubes, accelerators, storage rings, mass spectrometers, isotope separators, electron microscopes, electron beam welding, heating, coating (evaporation, sputtering), molecular distillation
Long monolayer formation time	Clean surfaces.	Fraction, adhesion, emission studies, materials testing for space

Πολλές βιομηχανικές εφαρμογές του κενού μπορούν επίσης να ταξινομηθούν χρησιμοποιώντας αυτές τις κατηγορίες. Ο Πίνακας 1.2 δείχνει τις αποδεκτές κατηγορίες και τα αντίστοιχα εύρη πίεσης. Αυτός ο πίνακας παραθέτει επίσης τον τύπο της αντλίας που χρησιμοποιείται

γενικά για την επίτευξη ενός καθορισμένου εύρους πίεσης, καθώς και το τυπικό μετρητή κενού που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση.

Για την μελέτη των διαφόρων φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τις διαφορετικές κατηγορίες κενού του Πίνακα 1.2, είναι χρήσιμο να οριστούν κάποιες έννοιες και ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το βαθμό του κενού, όπως μοριακή πυκνότητα, μέση ελεύθερη διαδρομή και χρόνος σχηματισμού μονοστρώματος. Αυτές οι έννοιες ορίζονται ως ακολούθως:

**Μοριακή πυκνότητα:** μέσος αριθμός μορίων ανά μονάδα όγκου

**Μέση ελεύθερη διαδρομή:** η μέση απόσταση που διανύει ένα μόριο ενός αερίου μεταξύ δύο διαδοχικών συγκρούσεων με άλλα μόρια του αερίου.

**Χρόνος σχηματισμού μονοστρώματος:** ο χρόνος που απαιτείται για να καλυφθεί μία καθαρή επιφάνεια από ένα στρώμα αερίου πάχους ενός μορίου. Αυτός ο χρόνος δίνεται από τον λόγο του αριθμού των μορίων που απαιτούνται για να σχηματιστεί το στρώμα (περίπου  $8 \cdot 10^{14}$  μόρια/cm<sup>2</sup>) προς τον ρυθμό πρόσπτωσης των μορίων.

## 1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΕΝΟΥ

Οι κατηγορίες κενού και τα χαρακτηριστικά τους είναι ως εξής:

### **Χαμηλό και μεσαίο κενό**

Στις περιοχές χαμηλού κενού (low vacuum) και μεσαίου κενού (medium vacuum), ο αριθμός των μορίων σε ένα δοχείο κενού στην αέρια φάση είναι μεγάλος σε σύγκριση με τον αριθμό των μορίων που καλύπτουν την επιφάνεια του δοχείου. Έτσι η άντληση του χώρου χρησιμεύει για την απομάκρυνση μορίων από την αέρια φάση. Αυτό το εύρος κενού εκτείνεται από την μία ατμόσφαιρα σε περίπου  $10^{-2}$  torr. Πολλές βιομηχανικές διεργασίες που πρέπει να εκκενώσουν ή να στεγνώσουν υλικά και εξαρτήματα χρησιμοποιούν αυτές τις περιοχές.

### **Υψηλό κενό**

Η περιοχή υψηλού κενού (high vacuum) αντιστοιχεί σε μια κατάσταση όπου τα μόρια του αερίου βρίσκονται κυρίως στις επιφάνειες του περιβλήματος και η μέση ελεύθερη διαδρομή ισούται ή υπερβαίνει τις διαστάσεις του δοχείου κενού. Τα σωματίδια ταξιδεύουν στο κενό

περίβλημα χωρίς σύγκρουση με άλλα μόρια. Έτσι, σε αυτή την περιοχή κενού, υπό αυτές τις συνθήκες, η άντληση συνίσταται στην εκκένωση ή τη σύλληψη μορίων. Τα μόρια φεύγουν από την επιφάνεια και μεμονωμένα φτάνουν στην αντλία. Αυτή η περιοχή χρησιμοποιείται ευρέως στην προετοιμασία και την εφαρμογή επικαλύψεων κενού, επιφανειακή επεξεργασία και τροποποίηση. Αυτή η περιοχή εκτείνεται από  $10^{-3}$  έως  $10^{-7}$  torr.

### **Υπερ-υψηλό κενό**

Υπό συνθήκες εξαιρετικά υψηλού κενού (ultra-high vacuum, UHV), ο χρόνος για να σχηματιστεί μια μονοστιβάδα είναι ίσος ή μεγαλύτερος από τον συνηθισμένο χρόνο για τις περισσότερες εργαστηριακές μετρήσεις. Έτσι, καθαρές επιφάνειες μπορούν να παρασκευαστούν και να προσδιοριστούν οι ιδιότητές τους πριν από τον σχηματισμό ενός στρώματος προσροφημένου αερίου. Αυτό το εύρος κενού εκτείνεται από περίπου  $10^{-7}$  έως  $10^{-16}$  torr.

Μια ένδειξη της εκτεταμένης εφαρμογής της τεχνολογίας κενού σε πολλές βασικές βιομηχανικές διεργασίες σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών απεικονίζεται στον Πίνακα 1.2, όπου οι κοινές βιομηχανικές διεργασίες που χρησιμοποιούν κενό ταξινομούνται ανάλογα με το βαθμό του κενού.

## **1.3 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ**

Η κινητική θεωρία είναι μια προσπάθεια εξήγησης της συμπεριφοράς των αερίων με βάση την συμπεριφορά των επιμέρους μορίων που συνθέτουν το αέριο. Τα αποτελέσματα της κινητικής θεωρίας συμφωνούν στενά με τους νόμους των αερίων.

Η θεωρία βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

1. Ένα αέριο αποτελείται από μεγάλο αριθμό μορίων. Όλα τα μόρια μιας δεδομένης χημικής ουσίας είναι ακριβώς όμοια.
2. Τα μόρια χωρίζονται με αποστάσεις που είναι μεγάλες σε σύγκριση με τις δικές τους διαστάσεις.
3. Τα μόρια βρίσκονται σε συνεχή κατάσταση τυχαίας και χαοτικής κίνησης. Αυτή η κίνηση σχετίζεται με τη θερμοκρασία του αερίου.

4. Τα μόρια δεν ασκούν καμία δύναμη το ένα στο άλλο ή στα τοιχώματα του δοχείου τους εκτός από την περίπτωση που συγκρούονται. Ο όγκος που καταλαμβάνουν τα μόρια είναι αμελητέος σε σύγκριση με τον όγκο που καταλαμβάνει το αέριο.
5. Τα μόρια συμπεριφέρονται ως τέλειες ελαστικές σφαίρες.

Αυτές οι υποθέσεις είναι σαφώς εξιδανικευμένες και κανένα γνωστό αέριο δεν συμπεριφέρεται ακριβώς σύμφωνα με αυτό το σύνολο υποθέσεων. Ωστόσο, η θεωρία που βασίζεται σε αυτές τις υποθέσεις εξηγεί τη συμπεριφορά των πραγματικών αερίων με πολύ ικανοποιητικό τρόπο.

Η θεωρία περιγράφει την κίνηση των μορίων που βρίσκονται σε συνεχή κίνηση. Τα μόρια είναι ελεύθερα να περιπλανηθούν σε οποιοδήποτε χώρο που τους είναι διαθέσιμος. Η θερμοκρασία ενός αερίου είναι ένα μέτρο της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων. Η πίεση στα τοιχώματα ενός δοχείου που περιέχει ένα αέριο προκαλείται από την πρόσκρουση των μορίων του αερίου. Εάν αφαιρεθεί μέρος του αερίου, τα υπόλοιπα μόρια εκτονώνονται για να γεμίσουν ολόκληρο τον όγκο αλλά καθώς υπάρχουν λιγότερες κρούσεις με τα τοιχώματα, η πίεση του αερίου μειώνεται.

Μερικές πρόσθετες πτυχές της συμπεριφοράς του αερίου, σημαντικές για την κατανόηση ορισμένων χαρακτηριστικών του κενού, μπορούν να εξαχθούν από τις μαθηματικές εκφράσεις που αναπτύχθηκαν από την κινητική θεωρία. Μερικές από αυτές τις μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες προέρχονται από την κινητική θεωρία, παρουσιάζονται στη συνέχεια. Αυτές οι σχέσεις δείχνουν την εξάρτηση φυσικών ιδιοτήτων και διεργασιών από τα μοριακά μεγέθη.

## **1.4 ΜΟΡΙΑΚΗ ΚΙΝΗΣΗ**

Η κινητική θεωρία υποστηρίζει ότι τα μόρια αερίου βρίσκονται σε συνεχή κίνηση και ότι οι ταχύτητες των μορίων εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Η κατανομή των μοριακών ταχυτήτων δίνεται από την κατανομή Maxwell-Boltzmann. Από την κατανομή αυτή μπορούν να εξαχθούν οι παρακάτω πολύ σημαντικές ποσοτικές σχέσεις:

Πιθανότερη ταχύτητα:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (1.1)$$

όπου  $m$  είναι η μοριακή μάζα,  $k$  είναι η σταθερά του Boltzmann και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία.

Μέση ταχύτητα:

$$v_{av} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = 1,13v_{max} \quad (1.2)$$

Ενεργός ταχύτητα (μέση τετραγωνική ταχύτητα):

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = 1,22v_{max} \quad (1.3)$$

Μέση ενέργεια ενός μορίου:

$$E = \frac{3}{2}kT \quad (1.4)$$

Η μέση ταχύτητα χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της ροής του αερίου και η ταχύτητα rms χρησιμοποιείται όταν συζητάμε για την κινητική ενέργεια.

## 1.5 ΠΙΕΣΗ

Ακολουθεί μια απλοποιημένη παραγωγή της σχέσης που δίνει την πίεση που ασκεί ένα αέριο στα τοιχώματα του δοχείου του ως αποτέλεσμα των μοριακών κρούσεων. Επειδή οι μοριακές κρούσεις είναι απόλυτα ελαστικές, η ενέργεια και η ορμή διατηρούνται και κάθε μόριο εκτινάσσεται πίσω μετά την κρούση του με το τοίχωμα με την ίδια ταχύτητα με την ταχύτητα πρόσπτωσης.

Ας θεωρήσουμε ένα μόριο μάζας  $m$  που πλησιάζει το τοίχωμα του δοχείου με ταχύτητα  $v$  και ανακλάται με την ίδια ταχύτητα. Επομένως η μεταβολή της ορμής είναι ίση με  $2mv$ .

Αν  $n$  μόρια χτυπήσουν μια μονάδα επιφάνειας του τοιχώματος σε μία μονάδα του χρόνου, με μέση ταχύτητα  $v$ , τότε:

Συνολική ώθηση που ασκείται στη μονάδα επιφάνειας του τοίχου σε μία μονάδα του χρόνου =  $2mnv$

Επίσης, η πίεση είναι ίση με τον ρυθμό μεταβολής της ορμής ανά μονάδα επιφάνειας. Άρα:

$$P = 2mnv \quad (1.5)$$

Για να υπολογίσουμε την πίεση  $P$ , πρέπει να υπολογίσουμε τη συχνότητα της μοριακής πρόσκρουσης στη μονάδα της επιφάνειας του περιβλήματος.

Έστω  $n$  είναι ο αριθμός των μορίων σε έναν κύβο μοναδιαίου όγκου. Κάθε μόριο μπορεί να κινηθεί σε έξι πιθανές κατευθύνσεις. Η ταχύτητα κάθε μορίου είναι  $v$ . Κατά μέσο όρο το  $1/6$  του αριθμού των μορίων θα κινηθούν προς κάθε όψη του κύβου. Έτσι, για ένα αέριο με πυκνότητα μορίων  $n$ , τα  $(n/6)v$  μόρια θα διασχίσουν μια μονάδα επιφάνειας στη μονάδα του χρόνου.

Συνεπώς, αντίστοιχα με την (1.1), η πίεση θα δίνεται από την σχέση:

$$P = 2mv \frac{nv}{6} = \frac{1}{3} mnv^2 \quad (1.6)$$

## 1.6 ΜΕΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ

Η μέση απόσταση που κινείται ένα μόριο πριν συγκρουστεί με ένα άλλο μόριο (οι συγκρούσεις με τα τοιχώματα του δοχείου εξαιρούνται) ονομάζεται μέση ελεύθερη διαδρομή (mean free path, mfp) και δίνεται από την σχέση:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P} \quad (1.7)$$

όπου:

$d_0$  = μοριακή διάμετρος ( $\sim 10^{-8}$  cm)

$n$  = αριθμός μορίων ανά μονάδα όγκου

Παράδειγμα:

Στα 760 torr, mfp για αέρα στους  $20^\circ\text{C} = 6,4 \times 10^{-6}$  cm

Σε  $10^{-6}$  torr, mfp για αέρα στους  $20^\circ\text{C} = 49$  m

Είναι φανερό ότι η μέση ελεύθερη διαδρομή διαφέρει για διαφορετικά αέρια (λόγω της εξάρτησης από την διάμετρο του μορίου) και είναι αντιστρόφως ανάλογη της πίεσης. Η μέση ελεύθερη διαδρομή δεν πρέπει να συγγέεται με τη μέση απόσταση μεταξύ των μορίων, η οποία παραμένει πολύ μικρή ακόμη και σε υψηλό κενό, ενώ η μέση ελεύθερη διαδρομή γίνεται πολύ μεγάλη λόγω του μικρού μεγέθους των μορίων και της πολύ μικρής πιθανότητας να συμβεί σύγκρουση.

## 1.7 ΡΥΘΜΟΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

Η συχνότητα κρούσεων είναι μια ποσότητα που παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον στην τεχνολογία κενού. Εκφράζει τον αριθμό των μορίων που προσκρούουν σε μια επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου. Από την κινητική θεωρία, μπορεί να αποδειχθεί ότι ο ρυθμός βομβαρδισμού κάθε μονάδας επιφάνειας είναι ίσος με:

$$\Gamma = \frac{nv_{av}}{4} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{2kT}{\pi m}} \quad (1.8)$$

Αντικαθιστώντας την πυκνότητα μορίων και την μέση ταχύτητα από τις σχέσεις:

$$n = 9,656 \times 10^{18} \frac{P}{T} \quad (1.9)$$

και

$$v_{av} = 1,45 \times 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (1.10)$$

παίρνουμε την σχέση:



$$\Gamma = 3,5 \times 10^{22} \frac{P}{\sqrt{MT}} \text{ μόρια}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2) \quad (1.11)$$

όπου:

η πίεση P είναι σε torr

M είναι το μοριακό βάρος σε g

Να σημειωθεί ότι:  $M=N_A \cdot m$ , όπου  $N_A=6,023 \cdot 10^{23}$  είναι ο αριθμός του Avogadro.

Παράδειγμα

Σε πίεση 760 torr και στους 20°C, για τα μόρια αζώτου υπάρχουν  $2,93 \times 10^{23}$  κρούσεις ανά δευτερόλεπτο και ανά τετραγωνικό εκατοστό. Σε πίεση  $10^{-6}$  torr και στους 20°C, για τα μόρια αζώτου υπάρχουν  $3,87 \times 10^{14}$  κρούσεις/(s·cm<sup>2</sup>).

Ο αριθμός των μοριακών κρούσεων ανά δευτερόλεπτο θεωρείται μια ποσότητα που είναι δύσκολο να κατανοηθεί. Μπορεί να εκφραστεί με πιο χρήσιμο και πρακτικό τρόπο ως ο χρόνος που απαιτείται να καλυφθεί μία επιφάνεια από ένα μονό στρώμα μορίων, όπως για παράδειγμα στην φυσική των επιφανειών, όπου μια καθαρή επιφάνεια προετοιμάζεται υπό υψηλό κενό.

Σε πίεση 760 torr και θερμοκρασία 20°C, ο χρόνος για να σχηματιστεί μια μονοστοιβάδα από μόρια αζώτου είναι  $3 \cdot 10^{-9}$  δευτερόλεπτα. Σε πίεση  $10^{-9}$  torr και στους 20°C, ο χρόνος για να σχηματιστεί μια μονοστοιβάδα μορίων αζώτου είναι περίπου 2000 δευτερόλεπτα. Αυτές οι τιμές έχουν υπολογιστεί υποθέτοντας συντελεστή φιλοξενίας 1, δηλαδή υποθέτοντας ότι ένα προσπίπτον μόριο κολλάει στην επιφάνεια κατά την πρώτη κιάλας κρούση.

## 2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

### 2.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Ο ρυθμός ροής αερίου είναι μια σημαντική πτυχή της συμπεριφοράς των αερίων σε ένα σύστημα κενού. Καθορίζει τον χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη της πίεσης λειτουργίας. Μπορεί επίσης να καθορίσει το μέγεθος των διαρροών αερίου (διαρροή αερίου στο σύστημα από το εξωτερικό) και εξαγωγή αερίων (αέριο που παράγεται κάπου μέσα στο σύστημα) που μπορεί να γίνει ανεκτή χωρίς η πίεση στο δοχείο να υπερβαίνει την επιθυμητή πίεση λειτουργίας.

Ο ρυθμός με τον οποίο το αέριο ρέει μέσα από ένα σύστημα μπορεί να εκφραστεί με δύο τρόπους: ως ογκομετρικός ρυθμός ροής και ως ρυθμός ροής μάζας. Ο ογκομετρικός ρυθμός ροής συνήθως ονομάζεται  $S$  και είναι ο όγκος του αερίου που ρέει πέρα από ένα δεδομένο σημείο ενός συστήματος ανά μονάδα χρόνου. Ο ογκομετρικός ρυθμός που μετράται στην είσοδο της αντλίας ονομάζεται ταχύτητα αντλίας,  $S_p$ . Η παροχή  $Q$  σχετίζεται με τον ρυθμό ροής μάζας. Είναι ανάλογη με τον αριθμό των γραμμομορίων και επομένως με τη μάζα του αερίου που ρέει πέρα από το ένα δεδομένο σημείο ανά μονάδα χρόνου.

Η διαδικασία της εκκένωσης είναι στην πραγματικότητα η αφαίρεση της μάζας του αερίου από το κενό δοχείο. Έτσι ο ρυθμός απομάκρυνσης μάζας (ή αλλιώς η ροή μάζας) καθορίζει τον ρυθμό με τον οποί μειώνεται η πίεση. Η σχέση μεταξύ της παροχής αερίου,  $Q$  και της αντίστοιχης ογκομετρικής παροχής,  $S$ , σχετίζεται με την πίεση του αερίου ως εξής:

Εάν το δοχείο περιέχει αρχικά  $N$  μόρια μάζας  $m_i$ , ο ρυθμός μεταβολής της συνολικής μάζας  $m$  δίνεται από την σχέση:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(Nm_i)}{dt} \quad (2.1)$$

Αντικαθιστώντας τον αριθμό των μορίων,  $N$ , από την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων:

$$PV=NkT \quad (2.2)$$

παίρνουμε:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_i PV}{kT} \right) \quad (2.3)$$

Στην πράξη, ο τύπος του αερίου και η θερμοκρασία μπορούν να θεωρηθούν σταθερά κατά την διάρκεια της εκκένωσης. Συνεπώς, η (2.3) γίνεται:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{m_i}{kT} \frac{d(PV)}{dt} \quad (2.4)$$

Και η πίεση και ο όγκος είναι εύκολα μετρήσιμες ποσότητες στις διατάξεις κενού. Έτσι, είναι βολικό να ορίσουμε τον ρυθμό ροής αερίου ή αλλιώς παροχή αερίου (gas throughput),  $Q$ , ως:

$$Q = \frac{d(PV)}{dt} \quad (2.5)$$

Το  $Q$  μπορεί να μετρηθεί σε όλες τις περιπτώσεις και σχετίζεται με τον ρυθμό ροής μάζας με την σχέση:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{m_i}{kT} Q \quad (2.6)$$

με την προϋπόθεση πάντα ότι τα  $m_i$  και  $T$  είναι σταθερά. Το  $Q$  εκφράζεται σε μονάδες  $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  και συχνά αναφέρεται ως παροχή αερίου. Ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου είναι ανάλογος της πίεσης και του ογκομετρικού ρυθμού ροής και συνήθως ορίζεται ως το γινόμενο:

$$Q = SP \quad (2.7)$$

Αυτή η εξίσωση είναι μια από τις θεμελιώδεις εξισώσεις της φυσικής του κενού.

Εξ ορισμού, η παροχή,  $Q$ , είναι σταθερή για όλα τα σημεία ενός συστήματος κενού που βρίσκεται σε ισορροπία. Ο ρυθμός ροής μάζας μετράται σε γραμμάρια ανά δευτερόλεπτο ή σε αριθμό των μορίων ανά δευτερόλεπτο. Δεδομένου ότι η πίεση (torr) είναι ένα μέτρο της μοριακής συγκέντρωσης (αριθμός μορίων ανά λίτρο) και ο ογκομετρικός ρυθμός ροής είναι δίνεται ως  $L/s$  τότε το γινόμενο  $\text{torr}\cdot L/s$  είναι ανάλογο με τον αριθμό των μορίων που περνούν από οποιοδήποτε σημείο σε ένα σύστημα κενού ανά δευτερόλεπτο και ως εκ τούτου το γινόμενο αυτό εκφράζει την παροχή  $Q$ .

Ο ρυθμός με τον οποίο το αέριο ρέει μέσω του συστήματος κενού εξαρτάται από την ταχύτητα της αντλίας, το γεωμετρικό σχήμα και τις διαστάσεις των διόδων, και το είδος της ροής. Έτσι ένας ογκομετρικός ρυθμός ροής  $1000 L/s$  σε πίεση  $10^{-3}$  torr δίνει παροχή  $1,0 \text{ torr}\cdot L/s$ . Ισχύει ότι  $1,0 \text{ torr}\cdot L/s = (1,0/760) \text{ atm}\cdot L/s$ .

**Ταχύτητα άντλησης (pumping speed):** Η ταχύτητα μιας αντλίας ορίζεται ως ο ογκομετρικός ρυθμός ροής στην αντλία ( $Ls^{-1}$ ) όπου ο όγκος μετράται στην πίεση στην είσοδο της αντλίας. Για να είμαστε ακριβείς, επομένως, μια ταχύτητα άντλησης θα πρέπει να αναφέρεται ως π.χ.  $500 L/s$  σε  $10^{-5}$  torr. Είναι κοινή πρακτική, ωστόσο, να αναφερόμαστε σε  $L/s$  σε αντλίες διάχυσης και αντλίες ιόντων διασκορπισμού και σε  $L/min$  στην περίπτωση μηχανικών αντλιών. Έστω ότι μία αντλία διάχυσης έχει ταχύτητα άντλησης  $500 L/s$  στα  $10^{-5}$  torr και έχει την ίδια ταχύτητα  $500 L/s$  στα  $10^{-8}$  torr. Στην δεύτερη περίπτωση ο αριθμός μορίων του αερίου στον ίδιο όγκο είναι 1000 φορές μικρότερος. Συνεπώς, στη δεύτερη περίπτωση η ποσότητα του αερίου που αντλείται (το  $Q$ ) έχει μειωθεί κατά έναν παράγοντα 1000, αλλά η ταχύτητα άντλησης και ο ογκομετρικός ρυθμός ροής (το  $S$ ) παραμένουν ίδια.

**Ρυθμοί διαρροής (leak rates):** Ένας ρυθμός διαρροής είναι η παροχή εισροής μιας μικρής τρύπας από την ατμοσφαιρική πίεση στον χώρο κενού και μετριέται εύκολα σε  $\text{torr}\cdot L/s$ .

**Ρυθμοί εξαγωγής αερίων (outgassing rates):** Ένας ρυθμός εξαγωγής αερίων ενός συστήματος είναι ο ρυθμός με τον οποίο το αέριο εκροφάται από τα τοιχώματα του συστήματος για να αντληθεί μακριά από την αντλία κενού και εκφράζεται ως παροχή ( $Q$ ). Εξαρτάται από την επιφάνεια του συστήματος από το οποίο λαμβάνει χώρα εκρόφηση.

Επομένως, ο ρυθμός εξαγωγής μιας επιφάνειας εκφράζεται ως παροχή ανά μονάδα επιφάνειας και συνεπώς μετράται σε  $\text{torr} \cdot \text{Ls}^{-1} \text{cm}^{-2}$ . Τυπικά, μια καθαρή επιφάνεια από ανοξείδωτο χάλυβα έχει ρυθμό εξαγωγής, μετά από μία έως δύο ώρες άντλησης, από  $10^{-8}$  έως  $10^{-9} \text{torr} \cdot \text{Ls}^{-1} \text{cm}^{-2}$ . Οι ρυθμοί εξαγωγής αερίων επηρεάζονται ιδιαίτερα από το ιστορικό της επιφάνειας, όπως η έκθεση σε υγρή ατμόσφαιρα, θέρμανση κ.τ.λ.

**Διαπερατότητα** (permeability): Τα δομικά υλικά, ιδιαίτερα τα γυαλιά και τα ελαστομερή, είναι διαπερατά στα ελαφρά συστατικά της ατμόσφαιρας. Οι ρυθμοί διαπερατότητας εκφράζονται με τους ίδιους όρους με τους συντελεστές εξαγωγής.

**Ρυθμός εκκένωσης** (evacuation rate): Η πίεση σε ένα σύστημα κενού πέφτει καθώς αφαιρείται το αέριο και ο ρυθμός απομάκρυνσης του αερίου είναι η απόδοση των αντλιών κενού. Υποθέτοντας ότι η ταχύτητα άντλησης παραμένει σταθερή, η παροχή μειώνεται καθώς μειώνεται η πίεση. Η μείωση της πίεσης με τον χρόνο είναι στην πραγματικότητα εκθετική και περιγράφεται από την σχέση:

$$P_2 = P_1 \exp\left(-\frac{St}{V}\right) \quad (2.8)$$

όπου  $P_2$  είναι η πίεση (torr) τη χρονική στιγμή  $t$  (δευτερόλεπτα).  $P_1$  είναι η πίεση (torr) τη χρονική στιγμή  $t = 0$ ,  $V$  είναι ο όγκος του συστήματος (λίτρα) και  $S$  είναι η ταχύτητα άντλησης (L/s).

Βλέπουμε ότι η σταθερά χρόνου του φαινομένου είναι  $V/S$ . Έτσι η πίεση πέφτει στο μισό της αρχικής της τιμής σε  $0,69 V/S$  δευτερόλεπτα, στο ένα τέταρτο της αρχικής τιμής σε διπλάσιο χρόνο από τον προηγούμενο, στο  $1/8$  της αρχικής τιμής στο διπλάσιο χρόνο από τον προηγούμενο και ούτω καθεξής. Στις χαμηλές πιέσεις ο ρυθμός εκκένωσης μειώνεται ως αποτέλεσμα διαρροής και εκροής αερίων από τα τοιχώματα του συστήματος. Οι χρόνοι άντλησης σε πιέσεις χαμηλότερες από  $10^{-3}$  torr σπάνια υπολογίζονται αλλά αναφέρονται ως αποτέλεσμα εμπειρίας με παρόμοια συστήματα ή από την προεκβολή πειραματικών δεδομένων σε μικρότερα συστήματα.

## 2.2 ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

Η παραγωγή και η συντήρηση του κενού περιλαμβάνει τη ροή αερίου από το κενό δοχείο μέσω αγωγών και αντλιών προς την ατμόσφαιρα. Έτσι, οι μηχανισμοί που ελέγχουν και ασκούν επίδραση στη φύση της ροής του αερίου έχουν μεγάλη σημασία. Τυπικά, η ροή αερίου σε συστήματα κενού μπορεί να χωριστεί σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- ❖ Τυρβώδης ροή
- ❖ Ιξώδης ή στρωτή ροή
- ❖ Μοριακή ροή

Πολλοί παράγοντες είναι υπεύθυνοι για τον προσδιορισμό του καθεστώτος ροής αερίου, μεταξύ των οποίων:

- Μέγεθος των ρυθμών ροής
- Η πτώση πίεσης στα δύο άκρα του σωλήνα ή του αγωγού
- Οι επιφανειακές και γεωμετρικές ιδιότητες του σωλήνα ή του αγωγού
- Η φύση και τα χαρακτηριστικά των αερίων που αντλούνται

Ποσοτικές εκφράσεις που συσχετίζουν παράγοντες όπως η γεωμετρία του αγωγού και η φύση του αερίου είναι συχνά πολύπλοκες. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί τύποι και εκφράσεις για πολλές γεωμετρικές διαμορφώσεις που συναντώνται συχνά, και επιτρέπουν τον υπολογισμό της ροής αερίου με ικανοποιητική ακρίβεια και ευκολία. Υπολογισμοί των ρυθμών ροής αερίου κάτω για διάφορες γεωμετρίες και διαφορετικές συνθήκες παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες. Για να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί, οι τρεις κατηγορίες ροής που αναφέρθηκαν παραπάνω συνήθως εξετάζονται ανεξάρτητα. Και οι τρεις κατηγορίες ροής αερίου συναντώνται όταν ένα σύστημα κενού, που συνδέεται με σωλήνες σε μια αντλία κενού, αντλείται από την ατμόσφαιρα σε κατάσταση υψηλού κενού.

## 2.3 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

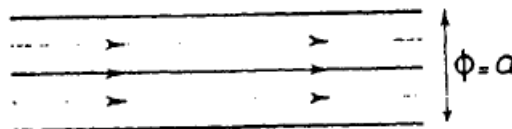
Σε υψηλές πιέσεις και σε πολύ υψηλούς ρυθμούς ροής, η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με τις διαστάσεις του σωλήνα ή του δοχείου κενού έτσι ώστε η ροή του αερίου να περιορίζεται από το ιξώδες του αερίου. Ροή αερίου υπό αυτές τις

συνθήκες ονομάζεται ιξώδης και η ροή μπορεί να είναι τυρβώδης ή στρωτή. Όταν η ταχύτητα του αερίου υπερβαίνει ορισμένες τιμές, η ροή είναι τυρβώδης, τα στρώματα αερίου που ρέουν δεν είναι παράλληλα και η κατεύθυνσή τους επηρεάζεται από οποιοδήποτε εμπόδιο στο δρόμο.

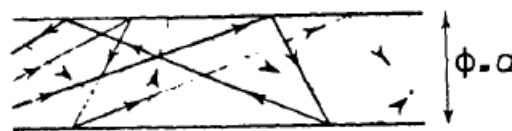
Τυρβώδης, στρωτή και μοριακή ροή  
 Ιξώδης ροή:  $\lambda < d/100$



Τυρβώδης ροή:  $Re > 2200$



Στρωτή ροή:  $Re < 1200$



Μοριακή ροή:  $\lambda \gg d$

Σχήμα 2.1 Τύποι ροής σε κυλινδρικούς σωλήνες.

- Σε υψηλές πιέσεις, η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι πολύ μικρότερη από τη διάμετρο του σωλήνα ( $\lambda < 0,015d$ ). Σε αυτή την περιοχή, το ιξώδες του αερίου παίζει σημαντικό ρόλο και η ροή ονομάζεται ιξώδης.
- Η ιξώδης ροή χωρίζεται σε δύο περιοχές: τυρβώδη ροή και στρωτή ροή [1].

Σε χώρους μεταξύ των στρωμάτων εμφανίζονται χώροι χαμηλότερων πιέσεων (κοιλότητες). Στις χαμηλότερες ταχύτητες αερίου, η ιξώδης ροή γίνεται στρωτή, δηλαδή τα στρώματα της ροής του αερίου είναι παράλληλα και η ταχύτητά τους αυξάνεται από τα τοιχώματα προς τον άξονα του σωλήνα.

Καθώς η πίεση μειώνεται, η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων γίνεται παρόμοια με τις διαστάσεις του δοχείου και η ροή διέπεται από

έναν συνδυασμό του ιξώδους του αερίου και από μοριακά φαινόμενα. Αυτές οι συνθήκες δημιουργούν έναν τύπο ροής γνωστή ως ενδιάμεση ροή.

Καθώς η πίεση συνεχίζει να μειώνεται, η μέση ελεύθερη διαδρομή γίνεται μεγαλύτερη από τις διαστάσεις του δοχείου και η ροή εξαρτάται μόνο από τις μοριακές συγκρούσεις με τα τοιχώματα του δοχείου. Για αυτό το λόγο, η ροή υπό αυτές τις συνθήκες αναφέρεται ως μοριακή. Η μοριακή κίνηση στα διάφορα καθεστώτα ροής απεικονίζεται στο σχήμα 2.1.

Η φύση της ροής αερίου (εάν είναι τυρβώδης, στρωτή, ενδιάμεση, ή μοριακή) καθορίζεται από τις τιμές δύο αδιάστατων παραμέτρων, δηλαδή, των αριθμών Reynolds και Knudsen. Το όριο μεταξύ της τυρβώδους και της στρωτής ή ιξώδους ροής ορίζεται από τον αριθμό Reynolds, ενώ τα όρια μεταξύ στρωτής, ενδιάμεσης και μοριακής ροής καθορίζονται από τον αριθμό Knudsen.

Ο αριθμός Reynolds είναι μια αδιάστατη ποσότητα που εκφράζεται ως:

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} \quad (2.9)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αερίου,  $v$  είναι η ταχύτητα,  $\eta$  είναι το ιξώδες του αερίου και  $D$  είναι η διάμετρος του σωλήνα.

Για  $Re > 2100$ , η ροή είναι εντελώς τυρβώδης.

Για  $Re < 1100$ , η ροή είναι εντελώς στρωτή.

Στην περιοχή  $1200 < Re < 2200$ , η ροή μπορεί να είναι τυρβώδης ή ιξώδης ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας του σωλήνα και γεωμετρικούς παράγοντες του σωλήνα. Καθώς η ταχύτητα ροής αυξάνεται, ο αριθμός Reynolds αυξάνεται σε υψηλές πιέσεις, και το αέριο, αντί να ρέει ομαλά, αναπτύσσει δίνες και ταλαντώσεις.

Η ιξώδης ροή εμφανίζεται στην περιοχή που οριοθετείται από έναν αριθμό Reynolds μικρότερο από 1200 και έναν αριθμό Knudsen μικρότερο από 0,001.

Ο αριθμός Knudsen,  $K_n$  είναι επίσης μια αδιάστατη ποσότητα, που δίνεται από την σχέση:

$$K_n = \frac{\lambda}{D} \quad (2.10)$$



όπου  $\lambda$  είναι η μέση ελεύθερη διαδρομή.

Όταν η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο και συνεπώς ο αριθμός Knudsen είναι ίσος ή μεγαλύτερος από τη μονάδα,  $K_n > 1$ , οι ιδιότητες ροής καθορίζονται από τις συγκρούσεις τοιχώματος-αερίου και η ροή είναι μοριακή. Λεπτομερέστερες περιγραφές των τριών κύριων καθεστώτων ροής δίνεται στη συνέχεια.

## 2.4 ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ

Η τυρβώδης ροή αερίου εμφανίζεται σε βαθμίδες υψηλής πίεσης, χαρακτηρίζεται από δίνες και στροβιλισμούς στο ρεύμα του αερίου, και σπάνια συναντάται στις περισσότερες εφαρμογές κενού. Συμβαίνει για λίγο, ωστόσο, κατά την έναρξη της άντλησης όπου η πίεση του αερίου και η ταχύτητα είναι αρκετά υψηλή και η ροή αερίου στο δοχείο κενού και στους σωλήνες σύνδεσης είναι πολύ χαοτική. Το μοτίβο ροής στερείται τάξης και χαρακτηρίζεται από δίνες που εμφανίζονται και εξαφανίζονται. Η κίνηση των μορίων του αερίου κάτω από συνθήκες τυρβώδους ροής είναι πολύπλοκη και στερείται τάξης. Το αέριο στροβιλίζεται και τα μεμονωμένα σωματίδια του αερίου μπορεί να έχουν ταχύτητες και κατευθύνσεις που είναι αρκετά διαφορετικές από τη μέση ταχύτητα και τη συνολική κατεύθυνση ροής.

Κατά τη διάρκεια της τυρβώδους ροής η πίεση του αερίου και η ταχύτητα ροής σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος κυμαίνονται γύρω από έναν μέσο όρο. Εκτός από πολύ ειδικές περιπτώσεις (για παράδειγμα, σε πολύ μεγάλα συστήματα κενού), η διάρκεια της τυρβώδους ροής είναι μικρή σε σύγκριση με την ιξώδη ροή και τη μοριακή ροή. Στα περισσότερα συστήματα παραγωγής επιστρώσεων σε λεπτές μεμβράνες χρησιμοποιούνται ειδικές διαδικασίες "soft rumpdown" για τη μείωση της αρχικής ταχύτητας άντλησης, για τη μείωση των αναταράξεων στον θάλαμο και έτσι ελαχιστοποίηση της μόλυνσης των υποστρωμάτων με σκόνη ή άλλα σωματίδια. Αν και είναι ακανόνιστη, η τυρβώδης ροή μπορεί παρόλα αυτά να περιγραφεί από τους νόμους της θεωρίας πιθανοτήτων.

Η ύπαρξη τυρβώδους ροής καθορίζεται από την τιμή του αδιάστατου αριθμού Reynolds. Εάν ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος από 2100, η ροή θα είναι πάντα εντελώς τυρβώδης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση αέρα σε θερμοκρασία δωματίου, που ρέει μέσω ενός κυκλικού σωλήνα, η ροή είναι τυρβώδης αν:

$$\frac{PF}{d} > 5 \times 10^5 \quad (2.11)$$

όπου F είναι ο ρυθμός ροής μέσω του σωλήνα σε L/sec. P είναι η μέση πίεση αέρα σε millitorr και d είναι η διάμετρος του σωλήνα σε ίντσες.

Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, η τυρβώδης ροή μπορεί συνήθως να παραμεληθεί καθώς συνήθως εμφανίζεται μόνο για λίγο (στον σωλήνα μεταξύ της μηχανικής αντλίας και του συστήματος κενού), κατά το αρχικό στάδιο της άντλησης από την ατμόσφαιρα.

## 2.5 ΙΞΩΔΗΣ Η ΣΤΡΩΤΗ ΡΟΗ

Αυτός ο τύπος ροής είναι πολύ απλούστερος από την τυρβώδη ροή και εμφανίζεται σε μέτριες κλίσεις πίεσης όταν  $\lambda < (d/100)$  (όπου  $\lambda$  είναι η μέση ελεύθερη διαδρομή και d η διάμετρος του σωλήνα). Η ιξώδης ροή είναι ομαλή και τακτική. Κάθε σωματίδιο που περνά από ένα σημείο ακολουθεί την ίδια διαδρομή με το προηγούμενο σωματίδιο που πέρασε από αυτό το σημείο. Οι ρυθμοί ροής είναι ανάλογοι με τη βαθμίδα πίεσης και το ιξώδες του αερίου. Οι γραμμές ροής είναι ευθείες γραμμές ή βαθμιαίες καμπύλες σε αντίθεση με την περίπτωση της τυρβώδους ροής.

Αυτό σημαίνει ότι η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων είναι μικρή σε σύγκριση με τις διαστάσεις του αγωγού κατά τη διάρκεια αυτού του τύπου ροής, έτσι ώστε οι συγκρούσεις να κυριαρχούν στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της ροής και οι ρυθμοί ροής επηρεάζονται από το ιξώδες του αερίου. Ιξώδης ή στρωτή ροή εμφανίζεται συχνά στις γραμμές υποστήριξης προς τις αντλίες διάχυσης.

Ιξώδης ροή επιτυγχάνεται συνθήκες καθώς η συνεχής άντληση μειώνει την πίεση και ο αριθμός Reynolds μειώνεται κάτω από 2200. Οι δίνες παύουν να εμφανίζονται και η ενέργεια που προκύπτει από την κλίση της πίεσης χρησιμοποιείται για τη διατήρηση μιας σταθερής ροής.

Η ταχύτητα του αερίου και η πίεση γίνεται ομοιόμορφη με το χρόνο και η ροή εξορθολογίζεται. δηλαδή οι γραμμές ροής είναι ομαλές και συνεχείς και καμπυλώνουν απαλά στη γειτονιά των γωνιών και άλλων ανωμαλιών του σωλήνα. Κοντά στον τοίχο το αέριο είναι σχεδόν σε ηρεμία, αλλά προχωρώντας προς το κέντρο τα στρώματα του αερίου ολισθαίνουν περισσότερο γρήγορα το ένα πάνω στο άλλο έως ότου η ταχύτητα φτάσει στο μέγιστο στο κέντρο. Το ιξώδες είναι σημαντικό για τον προσδιορισμό της ποσότητας αερίου που διέρχεται ανά δευτερόλεπτο μέσα από τον σωλήνα υπό αυτές τις συνθήκες. Αυτός ο τύπος ροής που αναφέρεται είτε ως 'ιξώδης ροή είτε ως στρωτή ροή. Διέπεται από το νόμο του Poiseuille, ο οποίος αναφέρει ότι:

$$\frac{Q}{P_1 - P_2} = K \frac{d^4 P}{\eta L} \quad (2.12)$$

όπου:

L = μήκος του σωλήνα διαμέτρου d

Q = γινόμενο της ροής όγκου και της αντίστοιχης πίεσης

$\eta$  = ιξώδες αερίου

K = αριθμητική σταθερά

Η κλίση της πίεσης αναγκάζει τα παρακείμενα στρώματα του αερίου να ασκούν πίεση μεταξύ τους προς την κατεύθυνση της αρνητικής κλίσης πίεσης, θέτοντας το αέριο σε κίνηση ως σύνολο. Η ιξώδης ροή μπορεί να συμβεί μόνο όταν η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι μικρή σε σύγκριση με τη διάμετρο του σωλήνα. Μόνο εκείνα τα μόρια κοντά στα τοιχώματα του σωλήνα συγκρούονται με τα τοιχώματα, και αφού αυτά θα αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό κλάσμα του συνολικού αριθμού μορίων που υπάρχουν, η φύση των τοιχωμάτων δεν έχει σημαντική επίδραση στον ρυθμό ροής.

## 2.6 ΜΟΡΙΑΚΗ ΡΟΗ

Εάν η πίεση του αερίου μειωθεί ακόμη περισσότερο (διατηρώντας παράλληλα μια κλίση πίεσης κατά μήκος του σωλήνα), η μέση ελεύθερη

διαδρομή των μορίων του αερίου αυξάνεται και πλησιάζει τη διάμετρο του σωλήνα και η φύση της ροής αλλάζει. Η στρωτή φύση της ροής εξαφανίζεται επειδή τα μόρια πλέον συγκρούονται με τα τοιχώματα του σωλήνα μάλλον παρά μεταξύ τους. Όταν η πίεση είναι αρκετά χαμηλή, τα μόρια κινούνται μέσα στο σωλήνα ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και η ροή λέγεται ότι είναι «μοριακή».

Η πίεση κατά μήκος του σωλήνα δεν λειτουργεί πλέον ως κινητήρια δύναμη που ωθεί το αέριο κατά μήκος του σωλήνα σε ένα ρεύμα. Σε αυτές τις χαμηλές πιέσεις τα μόρια κινούνται σε τυχαίες κατευθύνσεις, και υπάρχει καθαρή μεταφορά αερίου από την περιοχή υψηλής στην περιοχή χαμηλής πίεσης απλά επειδή υπάρχουν περισσότερα μόρια ανά μονάδα όγκου.

Η μοριακή ροή χαρακτηρίζεται από μοριακές συγκρούσεις με τα τοιχώματα του σωλήνα παρά με άλλα μόρια αερίου. Οι ρυθμοί ροής είναι ανάλογοι της διαφοράς πίεσης κατά μήκος του σωλήνα και του αντιστρόφου της τετραγωνικής ρίζας του μοριακού βάρους του αερίου. Η εξάρτηση του ρυθμού ροής από το ιξώδες αρχίζει να μειώνεται, γιατί οι διαμοριακές συγκρούσεις είναι λιγότερο συχνές. Σε αρκετά χαμηλές πιέσεις ώστε η μέση ελεύθερη διαδρομή να είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο του δοχείου ή του αγωγού, τα μόρια μετακινούνται μέσω του συστήματος ελεύθερα και ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Αυτή η ροή ονομάζεται ροή ελεύθερου μορίου ή απλά μοριακή ροή, και οι ρυθμοί ροής του αερίου επηρεάζονται κυρίως από τις συγκρούσεις των μορίων με τα τοιχώματα του σωλήνα.

Η μοριακή ροή εμφανίζεται σε υψηλό κενό όταν  $\lambda > (d/3)$ . Καθώς η μηχανική αντλία αφαιρεί το αέριο από τον αγωγό μεταξύ της αντλίας και του θαλάμου κενού, το αέριο ωθείται προς την αντλία μέσω συγκρούσεων από τους ανάντη γείτονές της. Αυτό περιγράφει το φαινόμενο της ιξώδους ροής και υποδεικνύει την σχέση του με την κλίση πίεσης. Όταν μια αντλία υψηλού κενού μετακινεί απευθείας το αέριο από έναν θάλαμο, η αντλία περιμένει τα μόρια να περάσουν στην είσοδο της αντλίας και μόλις μπουν, αποτρέπει την επιστροφή τους. Τυπικές αποδόσεις από αυτή την άποψη για τις αντλίες υψηλού κενού είναι περίπου 40%. Κατά τη μοριακή ροή, όπου οι διαμοριακές συγκρούσεις είναι σπάνιες, τα μόρια μπορούν να απομακρυνθούν από την αντλία ανεξάρτητα από τα μόρια που κινούνται προς την αντλία.

## 2.7 ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Οποιοσδήποτε σωλήνας ή αγωγός προσφέρει μια ορισμένη αντίσταση στη ροή αερίου οποιουδήποτε τύπου. Αυτή η αντίσταση προκαλεί πτώση πίεσης κατά μήκος του σωλήνα. Αν  $S$  είναι ο ρυθμός ροής όγκου του αερίου ανά δευτερόλεπτο σε οποιαδήποτε διατομή του σωλήνα και  $P$  είναι η πίεση στο τμήμα, η ποσότητα του αερίου που διέρχεται ανά δευτερόλεπτο είναι:

$$Q = S \cdot P \quad (2.13)$$

Η αντίσταση  $R$  (ή εμπέδηση) ενός τμήματος του σωλήνα ορίζεται από την σχέση:

$$R = \frac{P_1 - P_2}{Q} \quad (2.14)$$

όπου  $P_1$  και  $P_2$  είναι οι πιέσεις στα άκρα του σωλήνα. Έτσι το  $R$  έχει μονάδες  $s/L$ . Το αντίστροφο του  $R$  ονομάζεται αγωγιμότητα (conductance) και συμβολίζεται με το σύμβολο  $C$ .

$$C = \frac{P_1 - P_2}{Q} \quad (2.14)$$

Η αγωγιμότητα  $C$  εκφράζει την ποσότητα της ροής ανά μονάδα διαφοράς πίεσης. Έτσι, η αγωγιμότητα ενός στομίου, ενός σωλήνα ή ενός στοιχείου κενού είναι ένα μέτρο της απόδοσης για μια δεδομένη πτώση πίεσης κατά μήκος του σωλήνα ή του εξαρτήματος και εκφράζεται ως  $\text{torr} \cdot L / s \cdot \text{torr}^{-1}$  που γίνεται  $L/s$ . Η αγωγιμότητα εξαρτάται από τον τρόπο ροής του αερίου και τη φύση του αερίου. Έτσι, η μεταφορά αερίου μέσω ενός εξαρτήματος που συνδέεται με μια αντλία υψηλού κενού είναι ανάλογη με τη διαφορά πίεσης στο εξάρτημα. Για ένα εξάρτημα με αγωγιμότητα  $C$  ( $L/s$ ) και πιέσεις  $P_1$  και  $P_2$  ( $\text{torr}$ ) που υπάρχουν στα άκρα του, η καθαρή ροή αερίου μέσω του στοιχείου είναι  $C (P_1 - P_2) \text{ torr} \cdot L / s$  η οποία είναι η διαφορά του ρυθμού ροής μάζας από το άκρο υψηλής πίεσης και της αντίστροφης ροής από το άκρο χαμηλής πίεσης.

## 2.8 ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΕΣ

Ας θεωρήσουμε δύο σωλήνες με αγωγιμότητες  $C_1$  και  $C_2$ . Η ροή μάζας σε κάθε σωλήνα δίνεται από:

$$Q_1=C_1P \text{ και } Q_2=C_2P \quad (2.15)$$

Η ολική ροή είναι:

$$Q_T=Q_1+Q_2=(C_1+C_2)P \quad (2.16)$$

Εάν οι δύο σωλήνες αντικατασταθούν από έναν μόνο σωλήνα αγωγιμότητας,  $C_T$ , ο οποίος θα έδινε την ίδια ροή, δηλαδή:

$$Q_T = C_T P \quad (2.17)$$

όπου  $C_T$  είναι η συνολική αγωγιμότητα.

Για παράλληλη σύνδεση πολλών εξαρτημάτων, σωλήνων ή ανοιγμάτων, η συνολική αγωγιμότητα είναι:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (2.18)$$

## 2.9 ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΣΕΙΡΑ

Ας θεωρήσουμε τώρα δύο αγωγιμότητες  $C_1$  και  $C_2$  σε σειρά. που αποτελείται, για παράδειγμα, από έναν σωλήνα που ενώνεται στο ένα άκρο με έναν άλλο σωλήνα διαφορετικής διαμέτρου. Έστω  $P_1$  και  $P_2$  οι πτώσεις πίεσης κατά μήκος των σωλήνων 1 και 2, αντίστοιχα. Έστω  $Q_1$  και  $Q_2$  οι αντίστοιχοι ρυθμοί ροής μάζας.

Έστω  $P_T$  η συνολική πτώση πίεσης στους δύο σωλήνες και  $Q_T$  η αντίστοιχη μέση τιμή του ρυθμού ροής.

Έτσι, έχουμε:

$$P_1 = \frac{Q_1}{C_1}, \quad P_2 = \frac{Q_2}{C_2} \text{ και } P_T = \frac{Q_T}{C_T} \quad (2.19)$$

Όμως ισχύει:

$$P_T = P_1 + P_2 \quad (2.20)$$

Επιπλέον, ο ρυθμός ροής μάζας πρέπει να είναι ίδιος σε όλο το σύστημα, διαφορετικά το αέριο θα συσσωρευτεί στο σύστημα. Συνεπώς, έχουμε:

$$Q_1 = Q_2 = Q_T \quad (2.21)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις παίρνουμε:

$$\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_T}{C_1} + \frac{Q_T}{C_2} \quad (2.22)$$

Συμπεραίνουμε ότι για αγωγιμότητες σε σειρά ισχύει:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (2.23)$$

Για αντλία ταχύτητας  $S$  (L/s) συνδεδεμένη σε θάλαμο μέσω ενός εξαρτήματος αγωγιμότητας  $C$  (L/s) η πραγματική ταχύτητα στο θάλαμο,  $S_c$ , δίνεται από την σχέση:

$$\frac{1}{S_c} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C} \quad (2.24)$$

## 3. ΑΝΤΛΙΕΣ ΚΕΝΟΥ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι αντλίες κενού χρησιμοποιούνται για τη μείωση της πίεσης του αερίου και συνεπώς της πυκνότητας του αερίου σε έναν συγκεκριμένο όγκο. Οι αντλίες κενού ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιούν για να απομακρύνουν τα σωματίδια του αερίου. Έτσι έχουμε:

- α) Αντλίες κενού όπου, μέσω ενός ή περισσοτέρων σταδίων συμπίεσης, τα σωματίδια αερίου απομακρύνονται από τον όγκο που πρόκειται να αντληθεί και εκρέουν στην ατμόσφαιρα (αντλίες συμπίεσης). Τα σωματίδια αερίου αντλούνται μέσω μετατόπισης ή παλμικής μεταφοράς.
- β) Αντλίες κενού όπου τα σωματίδια του αερίου που πρόκειται να αφαιρεθούν συμπυκνώνονται ή συνδέονται με άλλο τρόπο (π.χ. χημικά) σε μία στερεή επιφάνεια, η οποία συχνά αποτελεί μέρος του συνόρου του ίδιου του όγκου που αντλείται.

Μια άλλη ταξινόμηση που ταιριάζει περισσότερο με την τελευταία λέξη της τεχνολογίας και με τις πρακτικές εφαρμογές διακρίνει τους παρακάτω τύπους αντλιών, εκ των οποίων οι τρεις πρώτες κατηγορίες ανήκουν στις αντλίες συμπίεσης και οι δύο υπόλοιπες κατηγορίες ανήκουν στις αντλίες συμπύκνωσης:

1. Αντλίες που λειτουργούν με περιοδικά αυξανόμενο και μειούμενο όγκο θαλάμου αντλίας (περιστροφικό πτερύγιο και περιστροφικές αντλίες εμβόλου, καθώς επίσης και οι τροχοειδείς αντλίες).
2. Αντλίες που μεταφέρουν ποσότητες αερίου από την πλευρά της χαμηλής πίεσης προς την πλευρά της υψηλής πίεσης χωρίς αλλαγή του όγκου του θαλάμου άντλησης (αντλίες Roots, στροβιλομοριακές αντλίες).
3. Αντλίες όπου η άντληση βασίζεται κυρίως στη διάχυση του αερίου σε πίδακα ατμών υψηλής ταχύτητας (αντλίες ατμού).



4. Αντλίες που αντλούν ατμούς μέσω συμπύκνωσης (συμπυκνωτές) και αντλίες που αντλούν μόνιμα αέρια μέσω συμπύκνωσης σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (κρυοαντλίες)

5. Αντλίες που δεσμεύουν ή ενσωματώνουν αέρια με προσρόφιση ή απορρόφιση σε επιφάνειες που είναι ουσιαστικά απαλλαγμένες από αέρια (αντλίες προσρόφισης).

Μια ταξινόμηση των διαθέσιμων αντλιών κενού δίνεται στο σχήμα 3.1. Στις επόμενες ενότητες θα περιγραφούν οι σημαντικότεροι τύποι αντλιών κενού.

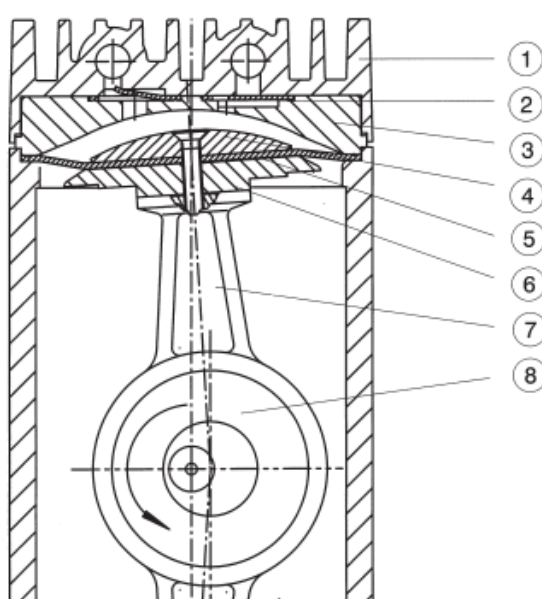
<b>ΑΝΤΛΙΕΣ ΚΕΝΟΥ</b>					
<b>ΑΝΤΛΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΥ</b>					<b>ΑΝΤΛΙΕΣ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗΣ</b>
<b>ΘΕΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ</b>		<b>ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ</b>			
<b>ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΕΣ</b>	<b>ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ</b>	<b>ΑΝΤΛΙΕΣ DRAG</b>	<b>ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΓΡΟΥ</b>	<b>ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΟΝΤΩΝ</b>	<b>ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ</b>
ΑΝΤΛΙΕΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΛΙΕΣ ΣΦΡΑΓΙΣΜΕΝΕΣ ΜΕ ΥΓΡΟ	ΑΕΡΙΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ	ΑΝΤΛΙΕΣ ΕΚΤΙΝΑΞΗΣ		ΛΗΨΗΣ
ΑΝΤΛΙΕΣ ΠΙΣΤΟΝΙΟΥ	ΥΓΡΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ	ΑΝΤΛΙΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	ΥΓΡΟΥ ΠΙΔΑΚΑ		ΛΗΨΗΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΟΓΚΟ
	ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ	ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	ΑΕΡΙΟΥ ΠΙΔΑΚΑ		ΕΞΑΧΝΩΣΗΣ
	ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΠΙΣΤΟΝΙΟΥ	ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	ΠΙΔΑΚΑ ΑΤΜΟΥ		ΛΗΨΗΣ ΙΟΝΤΩΝ
	ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ	<b>ΜΟΡΙΑΚΕΣ</b>	<b>ΑΝΤΛΙΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ</b>		ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ ΙΟΝΤΩΝ
	<b>ΑΝΤΛΙΕΣ ΞΗΡΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ</b>	ΤΟΥΡΜΠΟ-ΜΟΡΙΑΚΕΣ	ΑΥΤΟ-ΚΑΘΑΡΙΖΟΜΕΝΕΣ		ΙΟΝΤΩΝ ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΜΟΥ
	ROOTS		ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΕΣ		ΚΡΥΟΑΝΤΛΙΕΣ
	ΔΑΓΚΑΝΑΣ		<b>ΑΝΤΛΙΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ-ΕΚΤΙΝΑΞΗΣ</b>		ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ
	ΚΥΛΙΣΗΣ				

Σχήμα 3.1 Ταξινόμηση των αντλιών κενού [2].

### 3.2 ΑΝΤΛΙΕΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Πρόσφατα, οι διαφραγματικές αντλίες (diaphragm pumps) άρχισαν να γίνονται όλο και πιο σημαντικές, κυρίως για περιβαλλοντικούς λόγους. Είναι εναλλακτικές των αντλιών κενού πίδακα νερού, δεδομένου

ότι οι αντλίες διαφράγματος δεν παράγουν υγρά λύματα. Συνολικά, η αντλία κενού με διάφραγμα μπορεί να εξοικονομήσει έως και 90% του λειτουργικού κόστους σε σύγκριση με μια αντλία πίδακα νερού. Σε σύγκριση με τις περιστροφικές αντλίες περυγίων, ο θάλαμος άντλησης των αντλιών με διάφραγμα είναι εντελώς απαλλαγμένος από λάδι. Από το σχεδιασμό, δεν απαιτούνται στεγανοποιήσεις άξονα βυθισμένου σε λάδι. Οι αντλίες κενού διαφράγματος είναι αντλίες κενού ξηρής συμπίεσης μονού ή πολλαπλών σταδίων (κατασκευάζονται αντλίες διαφράγματος που έχουν έως και τέσσερα στάδια).



- (1) Καπάκι περιβλήματος (2) Βαλβίδες  
 (3) Καπάκι (4) Δίσκος διαφράγματος  
 (5) Διάφραγμα (6) Δίσκος στήριξης διαφράγματος  
 (7) συνδετική ράβδος (8) Εκκεντρικός δίσκος

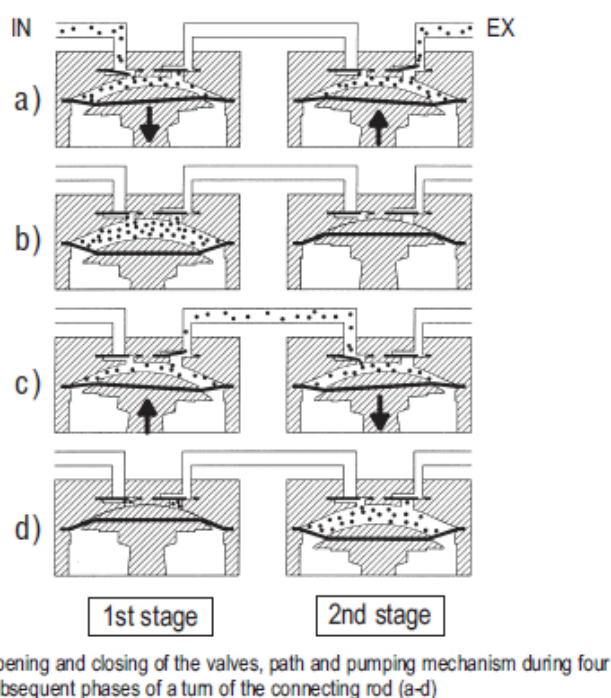
Σχήμα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση μιας αντλίας διαφράγματος [2].

Εδώ η περιφέρεια ενός διαφράγματος τεντώνεται μεταξύ της κεφαλής της αντλίας και του τοιχώματος του περιβλήματος (σχήμα 3.2). Κινείται με ταλαντευόμενο τρόπο μέσω μιας μπιέλας και ενός εκκέντρου. Ο θάλαμος άντλησης ή συμπίεσης, ο όγκος του οποίου αυξάνεται και μειώνεται περιοδικά, επηρεάζει την άντληση. Οι βαλβίδες είναι διατεταγμένες με τέτοιο τρόπο ώστε κατά τη φάση όπου ο όγκος του θαλάμου άντλησης αυξάνεται, είναι ανοιχτός στη γραμμή εισαγωγής.

Κατά τη συμπίεση, ο θάλαμος άντλησης συνδέεται με τη γραμμή εξόδου. Το διάφραγμα παρέχει μια ερμητική σφράγιση μεταξύ του

θαλάμου γραναζιών και του θαλάμου άντλησης έτσι ώστε να παραμένει απαλλαγμένος από λάδια και λιπαντικά (αντλία κενού ξηρής συμπίεσης). Το διάφραγμα και οι βαλβίδες είναι τα μόνα συστατικά σε επαφή με το μέσο που πρόκειται να αντληθεί. Όταν το διάφραγμα επικαλύπτεται με PTFE (τεφλόν) και οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής κατασκευάζονται από ελαστομερές υψηλής περιεκτικότητας σε φθόριο (όπως στην περίπτωση της αντλίας DIVAC της εταιρείας LEYBOLD), τότε είναι δυνατή η άντληση δραστικών ατμών και αερίων. Είναι επομένως κατάλληλες για εφαρμογές κενού στο εργαστήριο χημείας.

Λόγω της περιορισμένης ελαστικής παραμόρφωσης του διαφράγματος επιτυγχάνεται συγκριτικά χαμηλή ταχύτητα άντλησης. Έτσι, ένας όγκος παραμένει στο ανώτερο νεκρό σημείο, ο λεγόμενος "νεκρός χώρος", από όπου τα αέρια δεν μπορούν να μετακινηθούν στη γραμμή εξαγωγής. Η ποσότητα του αερίου που παραμένει στην πίεση εξαγωγής διαστέλλεται στον διαστελλόμενο θάλαμο άντλησης κατά τη διάρκεια της επόμενης διαδρομής αναρρόφησης, γεμίζοντάς τον.



Σχήμα 3.3 Αρχή λειτουργίας μιας αντλίας διαφράγματος δύο σταδίων [2].

Έτσι η ογκομετρική απόδοση χειροτερεύει συνεχώς για αυτό το λόγο. Οι αντλίες κενού διαφράγματος δεν είναι ικανές για την επίτευξη υψηλότερης αναλογίας συμπίεσης από την αναλογία μεταξύ "νεκρού

χώρου" και μέγιστου όγκου του θαλάμου άντλησης. Στην περίπτωση της αντλίας διαφράγματος μονού σταδίου επιτυγχάνεται μία τελική πίεση περίπου 80 mbar. Αντλίες δύο σταδίων, όπως η DIVAC της εταιρείας LEYBOLD, μπορούν να φτάσουν περίπου 10 mbar (σχήμα 3.3), οι αντλίες τριών σταδίων μπορούν να πετύχουν περίπου 2 mbar και οι αντλίες διαφράγματος τεσσάρων σταδίων μπορούν να φτάσουν περίπου τα 0,5 mbar.

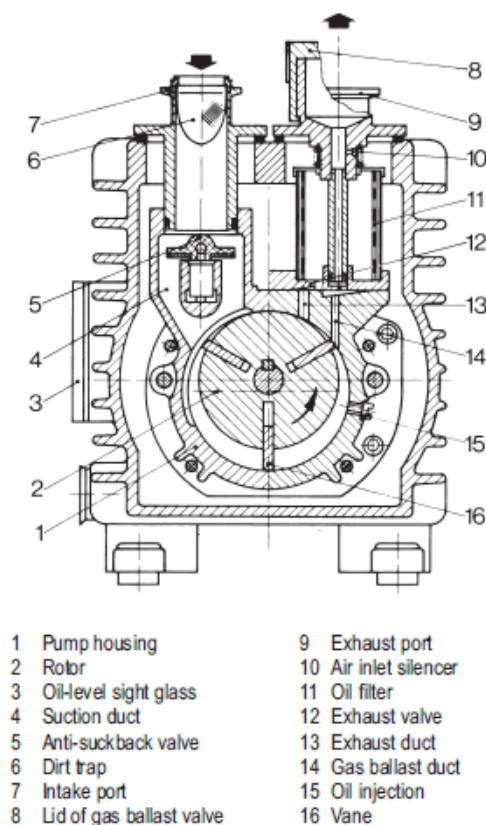


Σχήμα 3.4 Η αντλία διαφράγματος ME 4NT της εταιρείας Vacuubrand [7].

Οι αντλίες διαφράγματος που προσφέρουν τόσο χαμηλή τελική πίεση είναι κατάλληλες ως αντλίες υποστήριξης για στροβιλομοριακές αντλίες. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένα σύστημα αντλίας που είναι απολύτως απαλλαγμένο από λάδι, αυτό έχει μεγάλη σημασία για τις μετρητικές διατάξεις που περιλαμβάνουν συστήματα φασματομέτρου μάζας και ανιχνευτών διαρροής. Σε αντίθεση με τις αντλίες περιστροφικού πτερυγίου, αυτός ο συνδυασμός αντλιών προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι αποφεύγεται εντελώς η πιθανή συσσώρευση ενός υποστρώματος ηλίου.

### 3.3 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Οι αντλίες περιστροφικού πτερυγίου (σχήματα 3.5 και 3.6) αποτελούνται από ένα κυλινδρικό περίβλημα (δακτύλιος άντλησης) στο οποίο ένας έκκεντρα αναρτημένος και με σχισμές στροφέας στρέφεται. Ο ρότορας έχει πτερύγια τα οποία ωθούνται προς τα έξω συνήθως με φυγόκεντρη δύναμη αλλά και με ελατήρια έτσι ώστε τα πτερύγια να γλιστρούν μέσα στο περίβλημα. Το αέριο που εισέρχεται μέσω της εισαγωγής σπρώχνεται κατά μήκος από τα πτερύγια και τελικά εκτινάσσεται από την αντλία από την σφραγισμένη με λάδι βαλβίδα εξαγωγής.

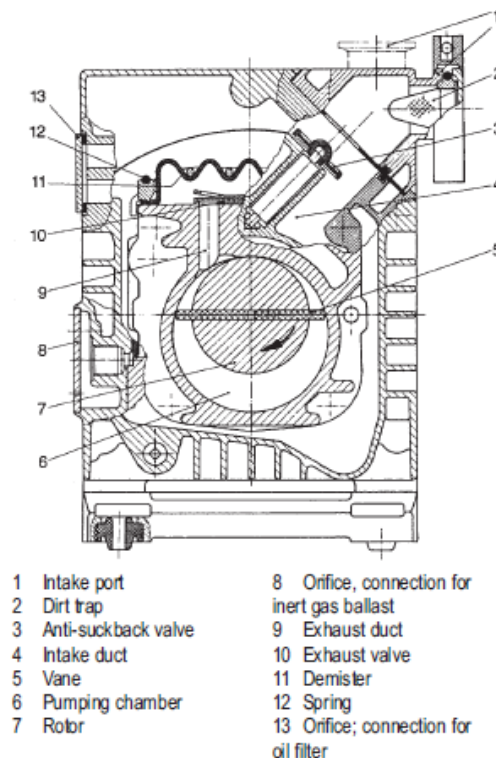


Σχήμα 3.5 Τομή της περιστροφικής αντλίας κενού μονού σταδίου TRIVAC A [2].

Η παλαιότερη σειρά αντλιών TRIVAC A (σχήμα 3.5) της LEYBOLD έχει τρία ακτινικά πτερύγια μετατοπισμένα κατά 120°. Η σειρά TRIVAC B (σχήμα 3.6) έχει μόνο δύο πτερύγια μετατοπισμένα κατά 180°. Και στις δύο περιπτώσεις τα πτερύγια πιέζονται προς τα έξω

από τις φυγόκεντρες δυνάμεις χωρίς τη χρήση ελατηρίων. Σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος αυτό πιθανώς απαιτεί τη χρήση ενός πιο αραιού λαδιού.

Η σειρά A είναι λιπαινόμενη μέσω της προκύπτουσας διαφοράς πίεσης ενώ οι αντλίες της σειράς B έχουν μια γραναζωτή αντλία λαδιού για λίπανση υπό πίεση. Η σειρά TRIVAC B είναι εξοπλισμένη με μια ιδιαίτερα αξιόπιστη βαλβίδα κατά της αναρρόφησης. Η δεξαμενή λαδιού της αντλίας περιστροφικού πτερυγίου εξυπηρετεί τον σκοπό της λίπανσης και της σφράγισης, καθώς και για την πλήρωση νεκρών χώρων και σχισμών. Επίσης, αφαιρεί τη θερμότητα της συμπίεσης του αερίου, δηλαδή χρησιμοποιείται και για σκοπούς ψύξης. Το λάδι παρέχει στεγανοποίηση μεταξύ του ρότορα και του δακτυλίου της αντλίας. Προκειμένου να αυξηθεί το εμβαδόν της σφραγισμένης από το λάδι επιφάνειας ένα λεγόμενο πέρασμα στεγανοποίησης είναι ενσωματωμένο στον δακτύλιος άντλησης. Αυτό παρέχει καλύτερη σφράγιση και επιτρέπει υψηλότερη αναλογία συμπίεσης ή χαμηλότερη τελική πίεση.



Σχήμα 3.6 Τομή της περιστροφικής αντλίας κενού μονού σταδίου TRIVAC B [2].

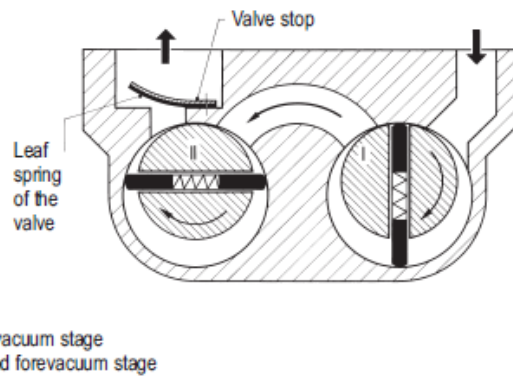
Η LEYBOLD κατασκευάζει τρεις διαφορετικές σειρές περιστροφικών πτερυγίων αντλιών που είναι ειδικά προσαρμοσμένες σε διαφορετικές εφαρμογές όπως υψηλή πίεση εισαγωγής, χαμηλή τελική πίεση ή εφαρμογές στη βιομηχανία ημιαγωγών. Μια περίληψη των περισσότερων και πιο σημαντικών χαρακτηριστικών αυτών των σειρών δίνονται στον Πίνακα 3.1.

Οι αντλίες περιστροφικού πτερυγίου TRIVAC παράγονται ως μονοβάθμιες (TRIVAC S) και ως δύο σταδίων αντλίες (TRIVAC D) (σχήμα 3.7). Με τις αντλίες δύο σταδίων είναι δυνατό να επιτευχθούν χαμηλότερες πιέσεις λειτουργίας και τελικές πιέσεις σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μονοβάθμιες αντλίες. Ο λόγος για αυτό είναι ότι στην περίπτωση των μονοβάθμιων αντλιών, το λάδι έρχεται αναπόφευκτα σε επαφή με την ατμόσφαιρα έξω, από όπου απορροφάται αέριο το οποίο μερικώς διαφεύγει προς την πλευρά κενού περιορίζοντας έτσι την επιτεύξιμη τελική πίεση.

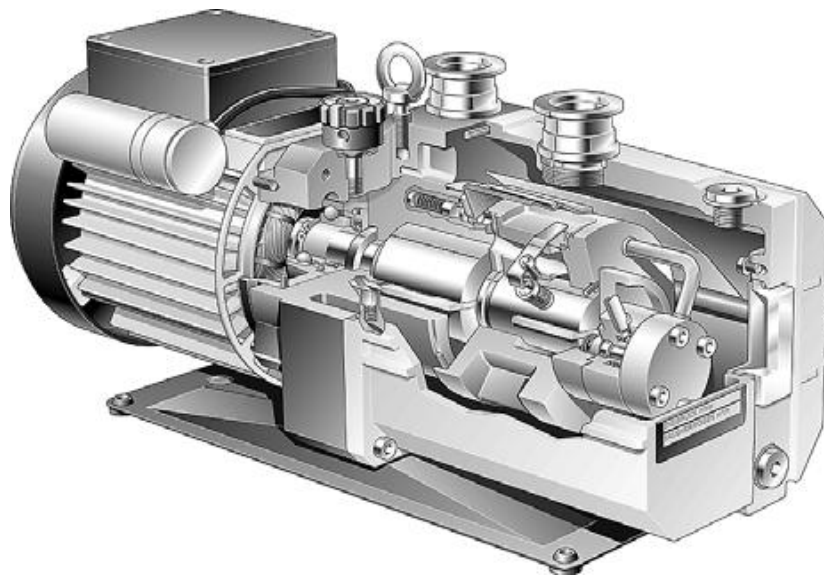
Η τελική πίεση βρίσκεται σχεδόν στην περιοχή υψηλού κενού, οι χαμηλότερες πιέσεις λειτουργίας βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ μεσαίου κενού και υψηλού κενού.

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά των περιστροφικών αντλιών κενού [2]

	TRIVAC A	TRIVAC B	TRIVAC BCS	TRIVAC E	SOGEVAC
Vanes per stage	3	2	2	2	3 (tangential)
Pumping speed [m <sub>3</sub> /h]	1 – 1.5 2 – 4 8 – 16 30 – 60	1.6 4 – 8 16 – 25 40 – 65	– 16 – 25 40 – 65 –	– 2.5 – –	16 – 25 40 – 100 180 – 280 585 – 1200
Sealing passage	yes	yes	yes	yes	no
Ultimate pressure, single-stage [mbar]	< 2 · 10 <sup>-2</sup>	< 2 · 10 <sup>-2</sup>	< 2 · 10 <sup>-2</sup>	–	< 5 · 10 <sup>-1</sup>
Ultimate pressure two-stage [mbar]	< 2.5 · 10 <sup>-4</sup>	< 1 · 10 <sup>-4</sup>	< 1 · 10 <sup>-4</sup>	< 1 · 10 <sup>-4</sup>	–
Oil supply	Pressure difference	Gear pump	Gear pump	Eccentric pump	Pressure difference
Slots	Comparable for all types: about 0.01 to 0.05 mm				
Bearing/lubrication	Axial face / oil	Axial face / oil	Axial face / oil	Ball / grease	Ball / oil
Special characteristics	–	Hydropneumatic anti-suckback valve	Coated parts in contact with medium	Many accessories	Cost-effective
Media	No ammonia	Clean to light particles	Aggressive and corrosive	Clean to light particles	Clean
Main areas of application	Multi-purpose	Multi-purpose	Semiconductor industry	Multi-purpose	Packaging industry



Σχήμα 3.7 Τομή μιας διβάθμιας αντλίας κενού, περιστροφικού περυγίου [2].



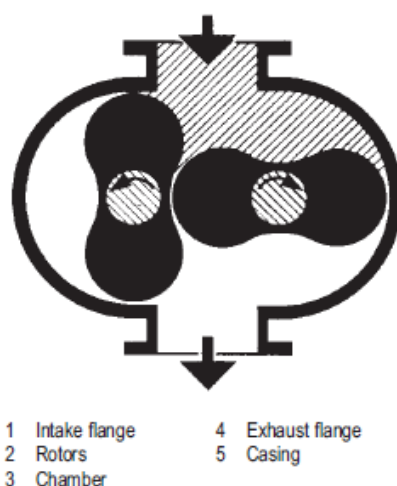
Σχήμα 3.8 Η διβάθμιας αντλίας κενού περιστροφικού περυγίου TRIVAC E [2].

### 3.4 ΑΝΤΛΙΕΣ ROOTS

Η αρχή σχεδιασμού των αντλιών Roots είχε ήδη εφευρεθεί το 1848 από τον Isaiah Davies, αλλά ήταν 20 χρόνια που εφαρμόστηκε στην πράξη από τους Αμερικανούς Francis και Philander Roots. Αρχικά



τέτοιες αντλίες χρησιμοποιήθηκαν ως φουσητήρες για κινητήρες καύσης. Αργότερα, αντιστρέφοντας τη διάταξη κίνησης, η ίδια αρχή χρησιμοποιήθηκε στους μετρητές αερίου. Μόνο από το 1954 αυτή η αρχή άρχισε να χρησιμοποιείται στην τεχνολογία του κενού. Οι αντλίες Roots χρησιμοποιούνται σε συνδυασμούς αντλιών μαζί με αντλίες υποστήριξης (π.χ. αντλίες περιστροφικού πτερυγίου) και επεκτείνουν το εύρος λειτουργίας τους στην περιοχή μεσαίου κενού. Με αντλίες Roots δύο σταδίων το εύρος αυτό επεκτείνεται και στην περιοχή υψηλού κενού. Η αρχή λειτουργίας των αντλιών Roots επιτρέπει την συναρμολόγηση μονάδων με πολύ υψηλές ταχύτητες άντλησης (πάνω από 100.000 m<sup>3</sup>/h) οι οποίες είναι συχνά πιο οικονομικές στη λειτουργία από τις αντλίες εκτοξευτήρα ατμού που λειτουργούν στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας.



Σχήμα 3.9 Τομή μιας αντλίας Roots [2].

Μια αντλία κενού Roots (σχήμα 3.9) είναι ένας περιστροφικός τύπος αντλίας θετικής μετατόπισης όπου δύο συμμετρικού σχήματος στροφεείς περιστρέφονται μέσα στην αντλία και περνούν ο ένας δίπλα στον άλλο σε κοντινή απόσταση. Οι δύο ρότορες έχουν ένα σχήμα που μοιάζει περίπου με το σχήμα του αριθμού 8 και συγχρονίζονται με οδοντωτό γρανάζι. Το διάκενο ανάμεσα στους ρότορες και στο τοίχωμα του περιβλήματος καθώς και μεταξύ των ίδιων των ρότορων ανέρχεται μόνο σε λίγα δέκατα του χιλιοστού. Για το λόγο αυτό οι αντλίες Roots μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες χωρίς μηχανική φθορά. Σε αντίθεση με τις αντλίες περιστροφικού πτερυγίου, οι αντλίες Roots δεν είναι σφραγισμένες με λάδι, έτσι ώστε η εσωτερική διαρροή των αντλιών

ξηρής συμπίεσης από το σχεδιασμό έχει ως αποτέλεσμα το γεγονός ότι μπορούν να επιτευχθούν λόγοι συμπίεσης μόνο στην περιοχή 10-100.

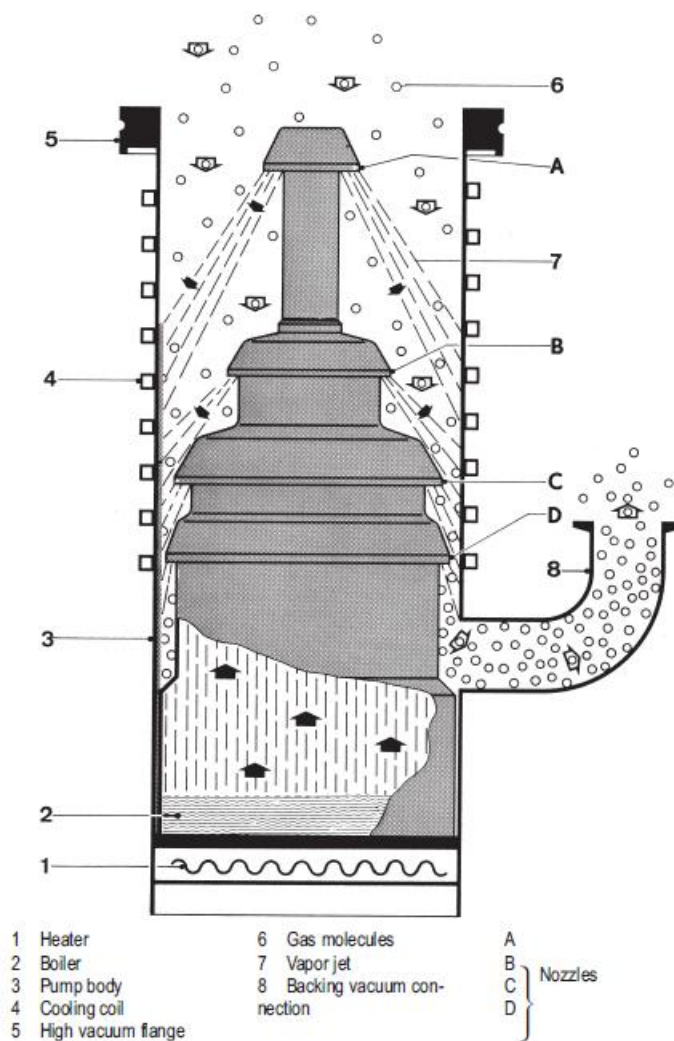


Σχήμα 3.10 Η αντλία Roots ZJP-150 της εταιρείας Huanqiu Vacuum [8].

Κατά τη διάρκεια της φάση συμπίεσης, αυτές οι επιφανειακές περιοχές (ρότορες και περίβλημα) φορτώνονται με αέριο (οριακό στρώμα). Κατά τη φάση αναρρόφησης αυτό το αέριο απελευθερώνεται. Το πάχος του στρώματος του κινούμενου αερίου εξαρτάται από το διάκενο μεταξύ των δύο στροφέων και μεταξύ στροφέων και του τοιχώματος του περιβλήματος. Τα μικρότερα κενά και άρα οι χαμηλότερες ροές προς τα πίσω επιτυγχάνονται σε πιέσεις λειτουργίας στην περιοχή του 1 mbar. Στη συνέχεια, είναι δυνατό να επιτευχθούν σε αυτή την περιοχή οι υψηλότεροι λόγοι συμπίεσης, αλλά αυτό το εύρος πίεσης είναι επίσης το πιο κρίσιμο σε σχέση με τις επαφές μεταξύ των ρότορων και του περιβλήματος.

### 3.5 ΑΝΤΛΙΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Αυτές οι αντλίες αποτελούνται βασικά (σχήμα 3.11) από το σώμα της αντλίας (3) με ένα ψυχρό τοίχωμα (4) και ένα σύστημα ακροφυσίων τριών ή τεσσάρων σταδίων (A-D). Το λάδι που χρησιμεύει ως υγρό αντλίας βρίσκεται στο λέβητα (2) και εξατμίζεται με ηλεκτρική θέρμανση (1). Οι ατμοί του υγρού της αντλίας ρέουν μέσω των σωλήνων ανύψωσης και αναδύονται με υπερηχητική ταχύτητα από τα δακτυλιοειδή ακροφύσια (A-D).



Σχήμα 3.11 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της αντλίας διάχυσης [2].

Στη συνέχεια ο πίδακας που σχηματίζεται έτσι διευρύνεται σαν ομπρέλα και φτάνει στον τοίχο όπου συμβαίνει συμπύκνωση του υγρού

της αντλίας. Το υγρό συμπύκνωμα ρέει προς τα κάτω ως λεπτή μεμβράνη κατά μήκος του τοίχου και τελικά επιστρέφει στον λέβητα. Λόγω αυτής της εξάπλωσης του πίδακα, η πυκνότητα των ατμών είναι σχετικά χαμηλή. Η διάχυση του αέρα ή τυχόν αντλούμενων αερίων (ή ατμών) στον πίδακα είναι τόσο γρήγορη που παρά την υψηλή του ταχύτητα, ο πίδακας γίνεται ουσιαστικά πλήρως κορεσμένος από το αντλούμενο μέσο.



Σχήμα 3.12 Αντλία διάχυσης της σειράς KT της εταιρείας DVEvacuum [9].

Επομένως, οι αντλίες διάχυσης έχουν υψηλή ταχύτητα άντλησης σε ένα ευρύ φάσμα πίεσης. Αυτή είναι πρακτικά σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή εργασίας της αντλίας διάχυσης ( $\leq 10^{-3}$  mbar) επειδή ο αέρας σε αυτές τις χαμηλές πιέσεις δεν μπορεί να επηρεάσει τον πίδακα. Σε υψηλότερες πιέσεις εισόδου, η πορεία του πίδακα αλλάζει. Ως αποτέλεσμα, η ταχύτητα άντλησης μειώνεται έως ότου, περίπου στα  $10^{-1}$  mbar, γίνει αμελητέα.

Η επιτεύξιμη τελική πίεση εξαρτάται από την κατασκευή της αντλίας, την πίεση των ατμών του υγρού της αντλίας που χρησιμοποιείται, τη μέγιστη δυνατή συμπύκνωση του υγρού της αντλίας και την καθαριότητα του δοχείου. Επιπλέον, θα πρέπει να μειώνεται όσο

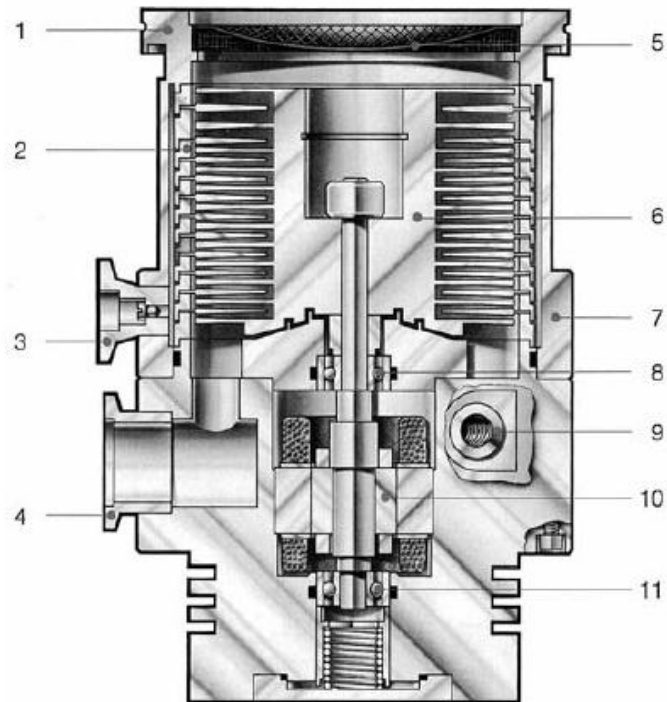
είναι δυνατόν η ανάστροφη ροή του υγρού της αντλίας προς το δοχείο με κατάλληλα διαφράγματα ή παγίδες.

### 3.6 ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΟΡΙΑΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ

Η αρχή της μοριακής αντλίας, γνωστή ήδη από το 1913, είναι ότι τα σωματίδια του αερίου προς άντληση δέχονται, μέσω κρούσης με τις ταχέως κινούμενες επιφάνειες ενός ρότορα, μια ώθηση στην απαιτούμενη κατεύθυνση ροής. Οι επιφάνειες του ρότορα, συνήθως σε σχήμα δίσκου, σχηματίζουν με τις σταθερές επιφάνειες του στάτη, ενδιάμεσους χώρους μέσα στους οποίους το αέριο μπορεί να μεταφέρεται. Στην αρχική μοριακή αντλία Gaede και τις τροποποιήσεις της, οι ενδιάμεσοι χώροι (κανάλια μεταφοράς) ήταν πολύ στενοί, γεγονός που οδήγησε σε κατασκευαστικές δυσκολίες και σε υψηλό βαθμό ευαισθησίας σε μηχανική μόλυνση.

Στα τέλη της δεκαετίας του '50, έγινε δυνατό, μέσω ενός σχεδίου που μοιάζει με στροβίλο και με την τροποποίηση των ιδεών του Gaede, να παραχθεί μία τεχνικά βιώσιμη αντλία, η λεγόμενη στροβιλομοριακή αντλία (turbomolecular pump). Τα κενά μεταξύ του στάτη και των δίσκων του ρότορα κατασκευάστηκαν έχοντας μέγεθος της τάξης των χιλιοστών, έτσι ώστε μπορούσαν να επιτευχθούν ουσιαστικά μεγαλύτερες ανοχές. Ως εκ τούτου, επιτεύχθηκε μεγαλύτερη ασφάλεια στη λειτουργία. Ωστόσο, το φαινόμενο της άντλησης γίνεται σημαντικό μόνο όταν η περιφερειακή ταχύτητα (στο εξωτερικό χείλος) των πτερυγίων του ρότορα φτάσει την τάξη μεγέθους της μέσης θερμικής ταχύτητας των μορίων που πρόκειται να αντληθούν.

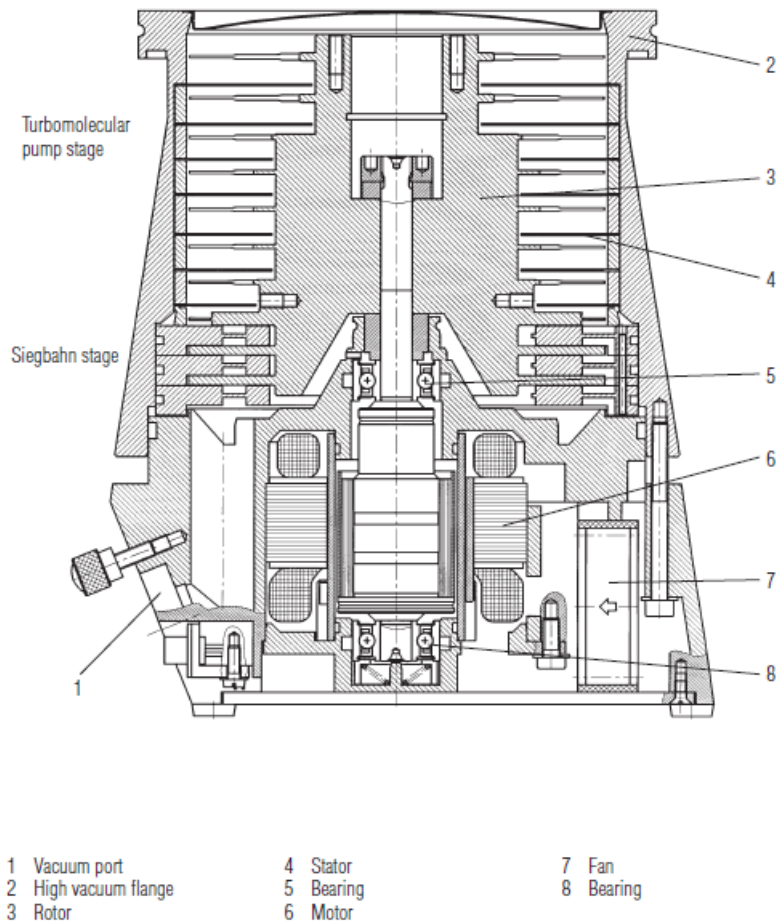
Το σχήμα 3.13 δείχνει την αρχή λειτουργίας μιας τυπικής στροβιλομοριακής αντλίας. Η αντλία είναι ένας συμπιεστής αξονικής ροής κατακόρυφου σχεδιασμού, το ενεργό ή αντλητικό μέρος του οποίου αποτελείται από έναν ρότορα (6) και έναν στάτη (2). Τα πτερύγια του στροβίλου είναι βρίσκονται τοποθετημένα γύρω από τις περιφέρειες του στάτη και του ρότορα. Κάθε ζεύγος ρότορα-στάτη κυκλικών σειρών λεπίδων σχηματίζει ένα στάδιο, έτσι ώστε η συναρμολόγηση να αποτελείται από ένα πλήθος βαθμίδων τοποθετημένων σε σειρά.



- |                            |                  |                            |
|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 1 High vacuum inlet flange | 5 Splinter guard | 9 Cooling water connection |
| 2 Stator pack              | 6 Rotor          | 10 3-phase motor           |
| 3 Venting flange           | 7 Pump casing    | 11 Ball bearings           |
| 4 Forevacuum flange        | 8 Ball bearings  |                            |

Σχήμα 3.13 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της στροβιλομοριακής αντλίας [2].

Το αέριο που πρόκειται να αντληθεί φτάνει απευθείας μέσω του ανοίγματος της φλάντζας εισόδου (1), δηλαδή, χωρίς καμία απώλεια αγωγιμότητας, στην ενεργή περιοχή άντλησης των πτερυγίων που βρίσκονται στην κορυφή του συγκροτήματος ρότορα-στάτη. Αυτή είναι εξοπλισμένη με λεπίδες από ιδιαίτερα μεγάλο ακτινωτό άνοιγμα για να επιτρέπει μια μεγάλη δακτυλιοειδή περιοχή εισόδου. Το αέριο που συλλαμβάνεται από αυτά τα στάδια μεταφέρεται στα κατώτερα στάδια συμπίεσης, των οποίων οι λεπίδες έχουν μικρότερα ακτινικά ανοίγματα, όπου συμπιέζεται το αέριο. Ο ρότορας του στροβίλου (6) είναι τοποθετημένος στον κινητήριο άξονα, ο οποίος υποστηρίζεται από δύο σφαιρικά ρουλεμάν ακριβείας (8 και 11), τοποθετημένα στο περίβλημα του κινητήρα.

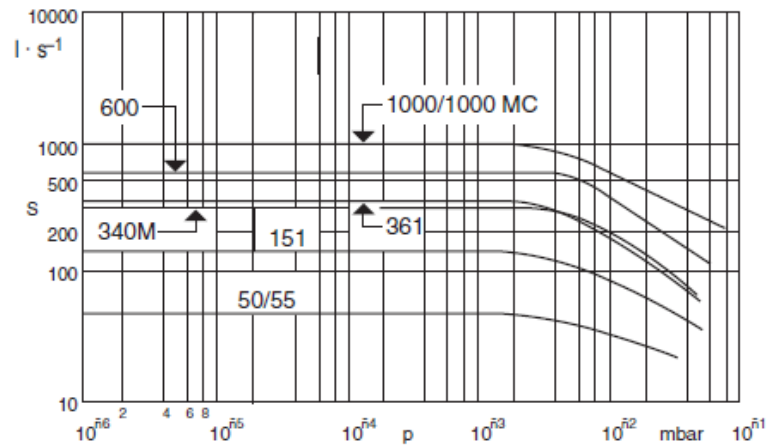


Σχήμα 3.14 Τομή μιας στροβιλομοριακής αντλίας HYCONE [2].

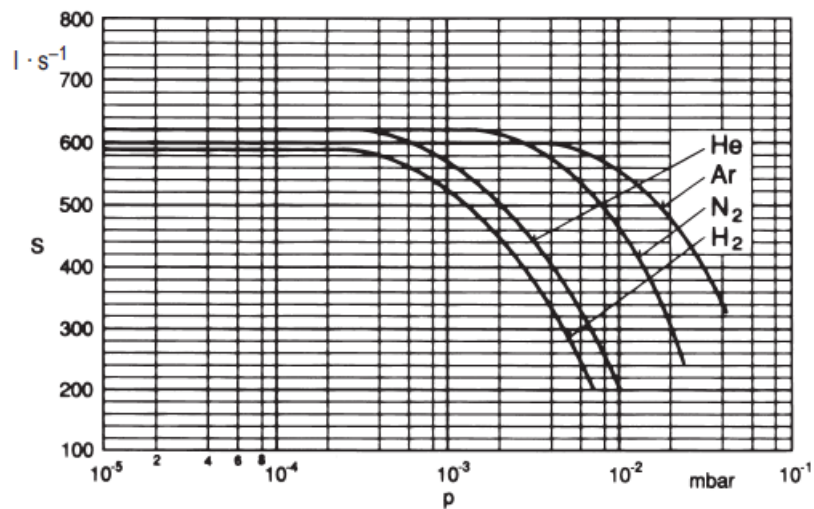
Ο άξονας του ρότορα οδηγείται απευθείας από έναν κινητήρα μέσης συχνότητας. Αυτός ο κινητήρας τροφοδοτείται και αυτόματα ελέγχεται από έναν εξωτερικό μετατροπέα συχνότητας, συνήθως μετατροπέα συχνότητας στερεάς κατάστασης που εξασφαλίζει πολύ χαμηλό επίπεδο θορύβου. Για ειδικές εφαρμογές, για παράδειγμα, σε περιοχές εκτεθειμένες σε ακτινοβολία, χρησιμοποιούνται μετατροπείς συχνότητας.

Οι χαρακτηριστικές ταχύτητας άντλησης (ρυθμός ροής όγκου) των στροβιλομοριακών αντλιών φαίνονται στο σχήμα 3.15. Η ταχύτητα άντλησης παραμένει σταθερή σε ολόκληρο το εύρος της πίεσης εργασίας. Μειώνεται σε πιέσεις παραπάνω από  $10^{-3}$  mbar, καθώς αυτή η τιμή κατωφλίου σηματοδοτεί τη μετάβαση από την περιοχή της μοριακής ροής στην περιοχή της στρωτής ιξώδους ροής των αερίων. Το σχήμα 3.16

δείχνει επίσης ότι η ταχύτητα άντλησης εξαρτάται από τον τύπο του αερίου.



Σχήμα 3.15 Ταχύτητα άντλησης αέρα διαφόρων στροβιλομοριακών αντλιών [2].



Σχήμα 3.16 Χαρακτηριστικές καμπύλες ταχύτητας άντλησης στροβιλομοριακής αντλίας για  $H_2$ , He,  $N_2$  και Ar [2].





Σχήμα 3.17 Η στροβιλομοριακή αντλία Turbovac Magintegra της εταιρείας Leybold [6].

### 3.7 ΑΝΤΛΙΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Ο όρος «αντλίες προσρόφησης» (sorption pumps) περιλαμβάνει όλες τις ρυθμίσεις για την αφαίρεση αερίων και ατμών από ένα χώρο με μέσα προσρόφησης. Τα σωματίδια του αντλούμενου αερίου δεσμεύονται έτσι στις επιφάνειες ή στο εσωτερικό κατάλληλων εξαρτημάτων, είτε από φυσικές δυνάμεις προσρόφησης που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία (δυνάμεις van der Waals), χημειορρόφηση, απορρόφηση ή με ενσωμάτωση κατά την πορεία του συνεχούς σχηματισμού νέων ροφητικών επιφανειών.

Συγκρίνοντας τις αρχές λειτουργίας τους, μπορούμε να διακρίνουμε μεταξύ των αντλιών προσρόφησης, στις οποίες η απορρόφηση των αερίων λαμβάνει χώρα απλώς από διεργασίες προσρόφησης ελεγχόμενης θερμοκρασίας και των αντλιών λήψης, στις οποίες η απορρόφηση και η κατακράτηση των αερίων προκαλούνται ουσιαστικά από το σχηματισμό χημικών ενώσεων. Η λήψη είναι η σύνδεση των αερίων με καθαρές, κυρίως μεταλλικές επιφάνειες, οι οποίες δεν καλύπτονται από στρώματα οξειδίου ή καρβιδίου. Οι ως επί

το πλείστον μεταλλικές επιφάνειες λήψης υψηλής καθαρότητας παράγονται είτε απευθείας στο κενό με εξάτμιση (αντλίες εξάτμισης) ή με sputtering (sputter pumps) ή το παθητικό επιφανειακό στρώμα του λήπτη (μέταλλο) αφαιρείται, έτσι ώστε το καθαρό υλικό να εκτίθεται στο κενό. Αυτό το βήμα ονομάζεται ενεργοποίηση (αντλίες NEG, NEG=Non evaporable getter, μη ατμοποιήσιμος απορροφητής).

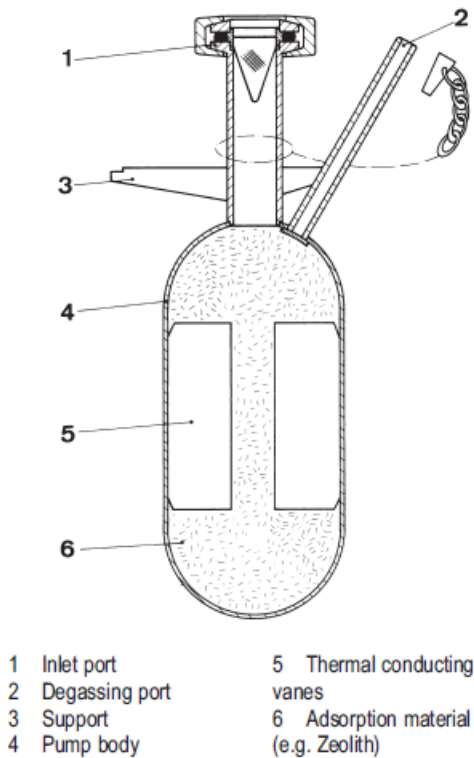
### 3.8 ΑΝΤΛΙΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ

Οι αντλίες προσρόφησης (σχήμα 3.18) λειτουργούν σύμφωνα με την αρχή της φυσικής προσρόφησης αερίων στην επιφάνεια μοριακών κόσκινων ή άλλων υλικά προσρόφησης (π.χ. ενεργοποιημένο  $Al_2O_3$ ). Ο Ζεόλιθος 13X χρησιμοποιείται συχνά ως υλικό προσρόφησης. Αυτό το αλκαλικό αργιλοπυριτικό παρουσιάζει σε σχέση με τη μάζα του μια εξαιρετικά μεγάλη επιφάνεια, περίπου  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ . Αντίστοιχα, η ικανότητά του να απορροφά αέριο είναι σημαντική. Η διάμετρος πόρων του ζεόλιθου 13X είναι περίπου 13 Å, που είναι της τάξης του μεγέθους των υδρατμών, των ατμών του λαδιού και μεγαλύτερων μορίων αερίου (περίπου 10 Å). Υποθέτοντας ότι η μέση μοριακή διάμετρος είναι το ήμισυ αυτής της τιμής,  $5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ , περίπου  $5 \cdot 10^{18}$  μόρια απορροφώνται σε μια μονοστιβάδα σε μια επιφάνεια εμβαδού  $1 \text{ m}^2$ .

Για μόρια αζώτου με σχετική μοριακή μάζα  $M_r = 28$  που αντιστοιχεί σε περίπου  $2 \cdot 10^{-4} \text{ g}$  ή  $0,20 \text{ mbar} \cdot \text{l}$ . Επομένως, μια επιφάνεια προσρόφησης  $1000 \text{ m}^2$  είναι ικανή να προσροφήσει ένα μονομοριακό στρώμα στο οποίο δεσμεύονται περισσότερα από  $133 \text{ mbar} \cdot \text{l}$  αερίου.

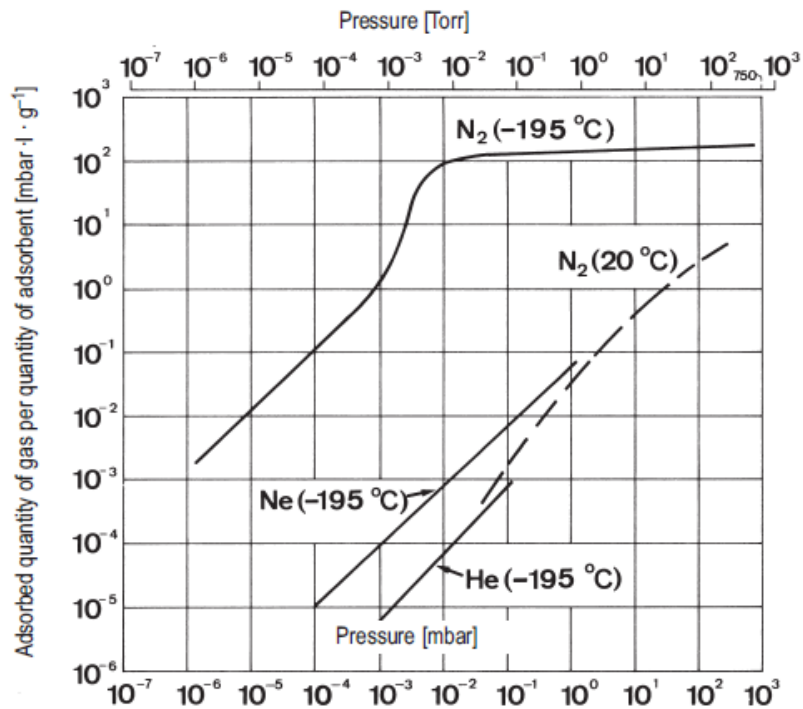
Το υδρογόνο και τα ελαφρά ευγενή αέρια, όπως το ήλιο και το νέον, έχουν σχετικά μικρή διάμετρο σωματιδίων σε σύγκριση με το μέγεθος πόρων των 13 Å για τον ζεόλιθο 13X. Για αυτά τα αέρια επομένως, η προσρόφηση είναι πολύ φτωχή.

Η προσρόφηση των αερίων στις επιφάνειες δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία, αλλά πιο σημαντικά από την πίεση πάνω από την επιφάνεια προσρόφησης. Η εξάρτηση αναπαρίσταται γραφικά για μερικά αέρια από τις ισόθερμες προσρόφησης που δίνονται στο σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.18 Τομή μιας αντλίας προσρόφησης [2].

Στην πράξη, οι αντλίες προσρόφησης συνδέονται μέσω βαλβίδας στο δοχείο που πρόκειται να εκκενωθεί. Το σώμα της αντλίας είναι βυθισμένο μέσα σε υγρό άζωτο έτσι ώστε το φαινόμενο της προσρόφησης να είναι τεχνικά αποδοτικό. Λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων προσρόφησης, η ταχύτητα άντλησης και η τελική πίεση μιας αντλίας προσρόφησης διαφέρουν για τα διάφορα μόρια αερίου. οι καλύτερες τιμές επιτυγχάνονται για το άζωτο, το διοξείδιο του άνθρακα, τους υδρατμούς και για ατμούς υδρογονανθράκων. Ελαφριά ευγενή αέρια δεν αντλούνται σχεδόν καθόλου γιατί η διάμετρος των σωματιδίων τους είναι μικρή σε σύγκριση με τους πόρους του ζεόλιθου. Καθώς η επίδραση της προσρόφησης μειώνεται καθώς αυξάνεται η κάλυψη των επιφανειών του ζεόλιθου, μειώνεται η ταχύτητα άντλησης καθώς αυξάνεται ο αριθμός των σωματιδίων που έχουν ήδη προσροφηθεί. Η ταχύτητα άντλησης μιας αντλίας προσρόφησης εξαρτάται, επομένως, από την ποσότητα του αερίου που έχει ήδη αντληθεί και έτσι δεν είναι σταθερή με το χρόνο.



Σχήμα 3.19 Ισόθερμες προσρόφησης του Ζεολίθου 13X για το άζωτο στους  $-195\text{ }^\circ\text{C}$  και στους  $20\text{ }^\circ\text{C}$  καθώς και για το ήλιο και το νέον στους  $-195\text{ }^\circ\text{C}$  [2].



Σχήμα 3.20 Αντλία προσρόφησης της εταιρείας EVP [10].

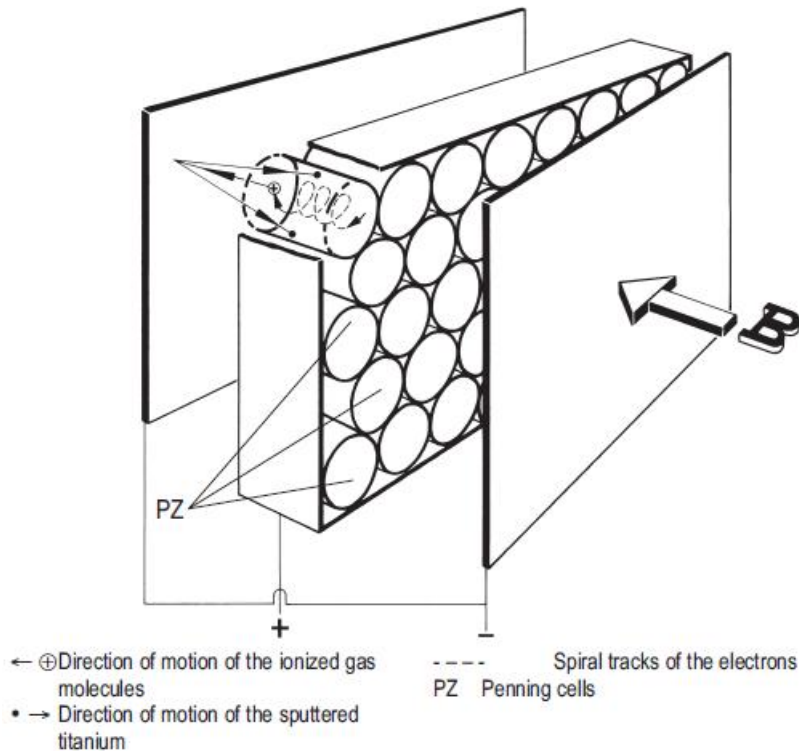
Η τελική πίεση που επιτυγχάνεται με αντλίες προσρόφησης προσδιορίζεται σε πρώτο βαθμό από εκείνα τα αέρια που επικρατούν στο δοχείο στην αρχή της διαδικασίας άντλησης και απορροφώνται ελάχιστα ή καθόλου (π.χ. νέον ή ήλιο) στην επιφάνεια του ζεόλιθου. Στον ατμοσφαιρικό αέρα, υπάρχουν μερικά μέρη ανά εκατομμύριο από αυτά τα αέρια. Επομένως, μπορούν να ληφθούν πιέσεις  $< 10^{-2}$  mbar. Εάν πρόκειται να παράγονται αποκλειστικά πιέσεις κάτω από  $10^{-3}$  mbar με αντλίες προσρόφησης, στο μέτρο του δυνατού δεν πρέπει να υπάρχει νέον ή ήλιο στο αέριο μίγμα.

### 3.9 ΑΝΤΛΙΕΣ ΙΟΝΤΩΝ ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΜΟΥ

Η δράση άντλησης των αντλιών ιόντων διασκορπισμού (sputter-ion pumps) βασίζεται σε διαδικασίες προσρόφησης που εκκινούνται από ιονισμένα σωματίδια αερίου σε εκκένωση Penning (κρύα εκκένωση καθόδου). Μέσω της τοποθέτησης σε παράλληλο σχηματισμό πολλών μεμονωμένων κελιών Penning, η αντλία ιόντων διασκορπισμού επιτυγχάνει μια αρκετά υψηλή ταχύτητα άντλησης για τα μεμονωμένα αέρια.

Στη συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά η αρχή λειτουργίας της αντλίας ιόντων διασκορπισμού. Τα ιόντα προσπίπτουν στην κάθοδο του ηλεκτροδίου εκκένωσης ψυχρής καθόδου και ψεκάζουν το υλικό της καθόδου (τιτάνιο). Το τιτάνιο δρα ως φιλμ λήπτη και απορροφά ενεργά σωματίδια αερίου (π.χ. άζωτο, οξυγόνο, υδρογόνο). Η ενέργεια των σωματιδίων του ιονισμένου αερίου δεν είναι μόνο αρκετά υψηλή για να διασκορπίσει το υλικό της καθόδου αλλά και για να αφήσει τα προσκρουόμενα ιόντα να διεισδύσουν βαθιά στο υλικό της καθόδου (εμφύτευση ιόντων).

Αυτή η διαδικασία απορρόφησης αντλεί ιόντα όλων των τύπων, συμπεριλαμβανομένων των ιόντων αερίων που δεν αντιδρούν χημικά με το διασκορπισμένο φιλμ τιτανίου, δηλαδή, κυρίως ευγενή αέρια.



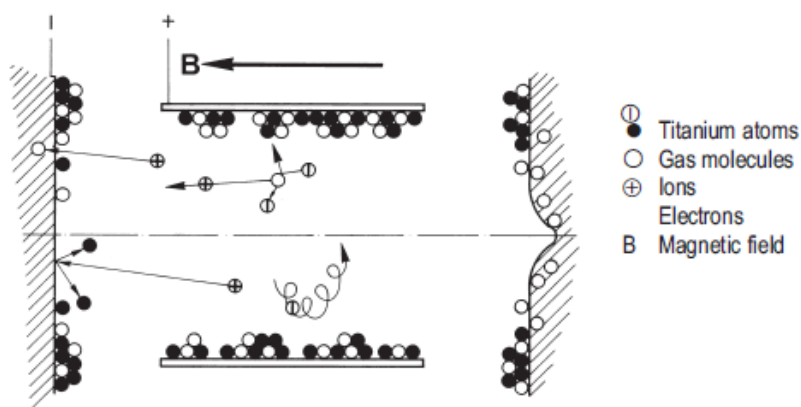
Σχήμα 3.21 Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της αντλίας ιόντων διασκορπισμού [2].

Η ακόλουθη διάταξη χρησιμοποιείται για την παραγωγή των ιόντων, κυλινδρικές άνοδοι από ανοξείδωτο χάλυβα είναι στενά διατεταγμένες μεταξύ τους, με τους άξονές τους κάθετα σε δύο παράλληλες καθόδους (σχήμα 3.21). Οι κάθοδοι είναι σε αρνητικό δυναμικό (μερικά κιλοβολτ) έναντι της ανόδου. Ολόκληρο το σύστημα των ηλεκτροδίων διατηρείται σε ένα ισχυρό, ομοιογενές μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής  $B = 0,1 \text{ T}$ , ( $T = \text{Tesla}$ ,  $1\text{T}=10^4 \text{ Gauss}$ ) που παράγεται από ένα μόνιμο μαγνήτη προσαρτημένος στο εξωτερικό του περιβλήματος της αντλίας.

Η εκκένωση αερίου που παράγεται από την υψηλή τάση περιέχει ηλεκτρόνια και ιόντα. Λόγω της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν κατά μήκος μακριών σπειροειδών τροχιών μέχρι να προσκρούσουν στον κύλινδρο της ανόδου του αντίστοιχου κελιού. Η μεγάλη διαδρομή αυξάνει την απόδοση ιόντων, η οποία ακόμη και σε χαμηλά επίπεδα πυκνότητας (πίεσης) αερίου αρκεί για τη διατήρηση μιας αυτοσυντηρούμενου εκκένωσης αερίου. Δεν απαιτείται παροχή ηλεκτρονίων από μια θερμή κάθοδο. Λόγω της μεγάλης τους μάζας, η

κίνηση των ιόντων δεν επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο της δεδομένης τάξης μεγέθους. Κινούνται κατά μήκος του συντομότερου μονοπατιού και βομβαρδίζουν την κάθοδο.

Στις αντλίες ιόντων διασκορπισμού τύπου διόδου, με διαμόρφωση συστήματος ηλεκτροδίων όπως φαίνεται στο σχήμα 3.22, οι μεμβράνες λήψης σχηματίζονται στις επιφάνειες της ανόδου και μεταξύ των περιοχών ψεκασμού της αντίθετης καθόδου. Τα ιόντα είναι θαμμένα στις επιφάνειες της καθόδου. Καθώς προχωρά η καθοδική εκτόξευση, τα θαμμένα σωματίδια αερίου απελευθερώνονται ξανά. Ως εκ τούτου, η δράση άντλησης για ευγενή αέρια που μπορούν να αντληθούν μόνο με ταφή ιόντων θα εξαφανιστεί μετά από κάποιο χρονικό διάστημα και θα εμφανιστεί ένα "φαινόμενο μνήμης".

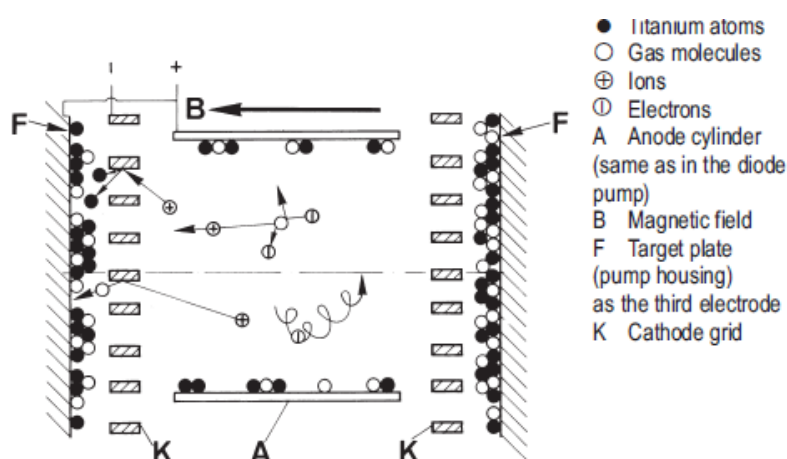


Σχήμα 3.22 Διαμόρφωση των ηλεκτροδίων σε μία διοδική αντλία ιόντων διασκορπισμού [2].

Σε αντίθεση με τις αντλίες τύπου διόδου, οι τριοδικές αντλίες ιόντων διασκορπισμού παρουσιάζουν εξαιρετική σταθερότητα στην ταχύτητα άντλησής τους για ευγενή αέρια. Το σχήμα 3.23 δείχνει τη διαμόρφωση των ηλεκτροδίων των τριοδικών αντλιών ιόντων διασκορπισμού. Η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητά τους για την άντληση ευγενών αερίων εξηγείται ως εξής: η γεωμετρία του συστήματος ευνοεί την πρόσπτωση των ιόντων στις ράβδους τιτανίου του πλέγματος της καθόδου, όπου ο ρυθμός εκτόξευσης είναι σημαντικά υψηλότερος από ότι με την κάθετη πρόσπτωση. Το διασκορπισμένο τιτάνιο κινείται περίπου στην ίδια περίπου κατεύθυνση με τα προσπίπτοντα ιόντα. Οι μεμβράνες λήψης σχηματίζονται κατά προτίμηση στο τρίτο ηλεκτρόδιο,

την πλάκα στόχο, η οποία είναι το πραγματικό τοίχωμα του περιβλήματος της αντλίας. Υπάρχει ένας αυξημένος αριθμός ιονισμένων σωματιδίων που προσπίπτουν στο πλέγμα της καθόδου όπου το ηλεκτρικό τους φορτίο εξουδετερώνεται και αντανακλώνται και από την οποία ταξιδεύουν στην πλάκα στόχο με ενέργεια που εξακολουθεί να είναι σημαντικά υψηλότερη από τη θερμική ενέργεια  $kT/2$  των σωματιδίων των αερίων.

Τα ενεργητικά ουδέτερα σωματίδια μπορούν να διεισδύσουν στο επιφανειακό στρώμα του στόχου, αλλά η επίδρασή τους είναι αμελητέα. Αυτά τα θαμμένα ή εμφυτευμένα σωματίδια καλύπτονται τελικά από στρώματα τιτανίου. Καθώς ο στόχος είναι σε θετικό δυναμικό, τυχόν θετικά ιόντα που φτάνουν εκεί απωθούνται και δεν μπορούν να διασκορπίσουν τα στρώματα του στόχου. Έτσι, τα θαμμένα άτομα του ευγενούς αερίου δεν απελευθερώνονται ξανά. Η ταχύτητα άντλησης της τριοδικής αντλίας διασκορπισμού ιόντων για ευγενή αέρια δεν μειώνεται κατά τη λειτουργία της αντλίας.



Σχήμα 3.23 Διαμόρφωση των ηλεκτροδίων σε μία τριοδική αντλία ιόντων διασκορπισμού [2].

Η ταχύτητα άντλησης των αντλιών ιόντων διασκορπισμού εξαρτάται από την πίεση και τον τύπο του αερίου. Μετράται σύμφωνα με τις μεθόδους που αναφέρονται στο DIN 28 429 και στο PNEUROOP 5615. Η καμπύλη ταχύτητας άντλησης  $S(p)$  παρουσιάζει μέγιστο. Η ονομαστική ταχύτητα άντλησης  $S_n$  δίνεται από το μέγιστο της καμπύλης της ταχύτητας άντλησης για τον αέρα όπου πρέπει να δηλώνεται και η



αντίστοιχη πίεση. Για τον αέρα, το άζωτο, το διοξείδιο του άνθρακα και τους υδρατμούς, η ταχύτητα άντλησης είναι πρακτικά η ίδια. Σε σύγκριση με την ταχύτητα άντλησης για τον αέρα, οι ταχύτητες άντλησης των αντλιών ιόντων διασκορπισμού για άλλα αέρια ανέρχονται κατά προσέγγιση σε:

Υδρογόνο 150 έως 200 %

Μεθάνιο 100%

Άλλο ελαφροί

υδρογονάνθρακες 80 έως 120 %

Οξυγόνο 80 %

Αργό 30%

Ήλιο 28 %



Σχήμα 3.24 Η αντλία διασκορπισμού ιόντων 2L-25 της εταιρείας KYKY TECHNOLOGY CO. LTD [11].

### 3.10 ΚΡΥΟΑΝΤΛΙΕΣ

Όπως είναι γνωστό, το νερό συμπυκνώνεται σε δίκτυα κρύου νερού ή σε παράθυρα και σχηματίζεται πάγος στη μονάδα εξατμιστή στο ψυγείο σας. Αυτή η συμπύκνωση των αερίων και ατμών σε ψυχρές επιφάνειες, ειδικά των υδρατμών, όπως είναι γνωστή στην καθημερινή ζωή, δεν εμφανίζεται μόνο στην ατμοσφαιρική πίεση αλλά και στο κενό.

Αυτό το φαινόμενο έχει χρησιμοποιηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα σε συμπυκνωτές κυρίως σε σχέση με χημικές διεργασίες.

Επίσης, σε ένα σφραγισμένο χώρο (θάλαμος κενού) ο σχηματισμός συμπυκνώματος σε κρύα επιφάνεια σημαίνει ότι ένας μεγάλος αριθμός μορίων αερίου αφαιρείται από τον όγκο. Τα μόρια παραμένουν τοποθετημένα στην ψυχρή επιφάνεια και δεν συμμετέχουν καθόλου στην ατμόσφαιρα του αερίου εντός του θαλάμου κενού. Τότε μπορούμε να πούμε ότι τα σωματίδια έχουν αντληθεί και μιλάμε για κρυοαντλίες (cryopumps) όταν το φαινόμενο της άντλησης επιτυγχάνεται μέσω ψυχρών επιφανειών.

Η κρυομηχανική διαφέρει από τη μηχανική ψύξης στο ότι η οι θερμοκρασίες που εμπλέκονται στην κρυομηχανική είναι κάτω από 120 K ( $< -153$  °C).

Ανάλογα με την αρχή ψύξης διακρίνουμε τους παρακάτω τύπους κρυοαντλιών:

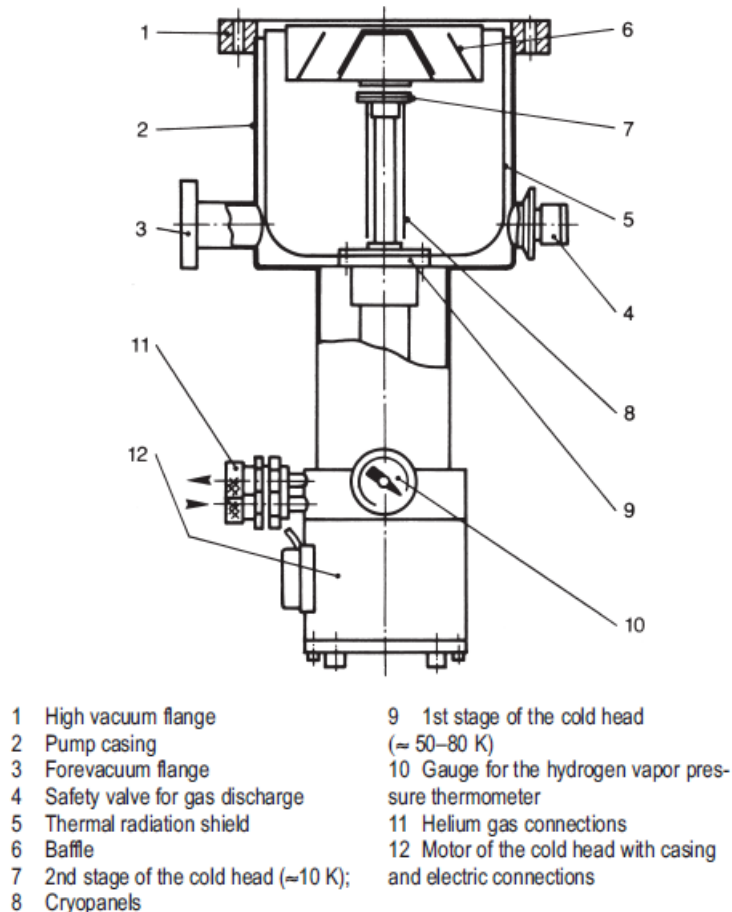
- Κρυοστάτες λουτρού
- Κρυοαντλίες συνεχούς ροής
- Κρυοαντλίες ψυγείου

Στην περίπτωση των κρυοστατών λουτρού, στην πιο απλή περίπτωση μία παγίδα ψύχους γεμισμένη με LN<sub>2</sub> (υγρό άζωτο), η επιφάνεια άντλησης ψύχεται με άμεση επαφή με ένα υγροποιημένο αέριο. Σε επιφάνεια ψυχόμενη με LN<sub>2</sub> (T ≈ 77 K) H<sub>2</sub>O και CO<sub>2</sub> είναι σε θέση να συμπυκνωθούν. Σε μια επιφάνεια που έχει ψυχθεί στους ≈ 10 K όλα τα αέρια εκτός από το He και το Ne μπορούν να αντληθούν μέσω συμπύκνωσης. Μια επιφάνεια που ψύχεται με υγρό ήλιο (T ≈ 4,2 K) είναι ικανό να συμπυκνώσει όλα τα αέρια εκτός από το ήλιο.

Στις κρυοαντλίες συνεχούς ροής η ψυχρή επιφάνεια είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί ως ένας εναλλάκτης θερμότητας. Υγρό ήλιο σε επαρκή ποσότητα αντλείται από μία βοηθητική αντλία από μια δεξαμενή στον εξατμιστή για να επιτευχθεί αρκετά χαμηλή θερμοκρασία στην ψυχρή επιφάνεια (κρυοπάνελ).

Το υγρό ήλιο εξατμίζεται στον εναλλάκτη θερμότητας και έτσι ψύχεται το κρυοπάνελ. Το απόβλητο αέριο που παράγεται (He) χρησιμοποιείται σε ένα δεύτερο εναλλάκτη θερμότητας για την ψύξη του διαφράγματος μιας ασπίδας θερμικής ακτινοβολίας που προστατεύει το σύστημα από τη θερμική ακτινοβολία που προέρχεται από το εξωτερικό.

Το κρύο καυσαέριο ηλίου που εκτοξεύεται από την αντλία ηλίου παρέχεται σε μία μονάδα ανάκτησης ηλίου. Η θερμοκρασία στα κρυοπάνελ μπορεί να ελεγχθεί από τον έλεγχο της ροής του ηλίου.

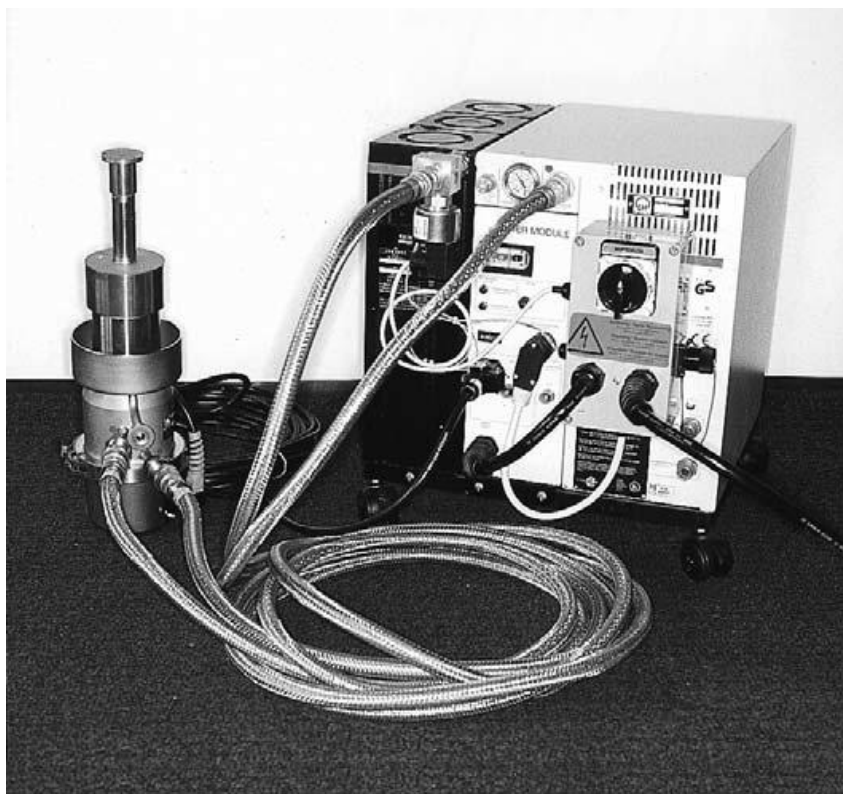


Σχήμα 3.25 Σχηματική αναπαράσταση μιας κρυοαντλίας ψυγείου [2].

Σήμερα οι κρυοαντλίες ψυγείων (σχήμα 3.25) χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά. Αυτές οι αντλίες λειτουργούν βασικά με τον ίδιο τρόπο όπως ένα κοινό οικιακό ψυγείο, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθοι θερμοδυναμικοί κύκλοι που χρησιμοποιούν ήλιο ως ψυκτικό μέσο:

- Διαδικασία Gifford-McMahon
- Διαδικασία Stirling
- Διαδικασία Brayton
- Διαδικασία Claude

Η διαδικασία Gifford-McMahon χρησιμοποιείται κυρίως σήμερα και αυτή η διαδικασία είναι αυτή που έχει αναπτυχθεί περισσότερο. Προσφέρει τη δυνατότητα διαχωρισμού των θέσεων για τη μεγάλη μονάδα συμπίεστη και τη μονάδα εκτόνωσης στην οποία πραγματοποιείται η διαδικασία ψύξης. Έτσι, μπορεί να σχεδιαστεί μία συμπαγής και χαμηλών κραδασμών πηγή ψύχους.



Σχήμα 3.26 Ο βασικός εξοπλισμός μιας κρυοαντλίας ψυγείου [2].

Ολόκληρος ο εξοπλισμός μιας κρυοαντλίας ψυγείου φαίνεται στο σχήμα 3.26 και αποτελείται από τη μονάδα συμπίεστη (1) η οποία συνδέεται μέσω εύκαμπτων γραμμών πίεσης (2), και επομένως χωρίς κραδασμούς, στην κρυοαντλία (3). Η ίδια η κρυοαντλία αποτελείται από το περίβλημα της αντλίας και την ψυχρή κεφαλή μέσα σε αυτό. Ως ψυκτικό χρησιμοποιείται ήλιο που κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλο με τη βοήθεια του συμπίεστη.

### 3.10.1 Η ψυχρή κεφαλή και η αρχή λειτουργίας της

Μέσα στην ψυχρή κεφαλή, ένας κύλινδρος χωρίζεται σε δύο χώρους εργασίας  $V_1$  και  $V_2$  από έναν εκτοπιστή. Κατά τη λειτουργία ο

δεξιός χώρος  $V_1$  είναι ζεστός και ο αριστερός χώρος  $V_2$  είναι κρύος. Σε συχνότητα εκτοπιστή  $f$  η ψυκτική ισχύς  $W$  του ψυγείου είναι:

$$W = (V_{2,\max} - V_{2,\min}) \cdot (p_H - p_N) \cdot f \quad (3.1)$$

Ο εκτοπιστής κινείται πέρα δώθε πνευματικά έτσι ώστε το αέριο να εξαναγκάζεται μέσω του εκτοπιστή και επομένως μέσω του αναγεννητή που βρίσκεται μέσα στον εκτοπιστή. Ο αναγεννητής είναι ένας συσσωρευτής θερμότητας που έχει μεγάλη επιφάνειας ανταλλαγής θερμότητας, που λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας εντός του κύκλου. Στο σχήμα 3.27 περιγράφονται οι τέσσερις φάσεις της ψύξης σε μία κύρα κεφαλή ψυγείου ενός σταδίου που λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή Gifford-McMahon.

Φάση 1:

Ο εκτοπιστής βρίσκεται στο αριστερό νεκρό κέντρο. Ο  $V_2$  όπου παράγεται το κρύο έχει το ελάχιστο του μέγεθος. Η βαλβίδα N παραμένει κλειστή, η H είναι ανοιχτή. Αέριο στην πίεση το  $p_H$  ρέει μέσω του αναγεννητή στον  $V_2$ . Εκεί το αέριο ζεσταίνεται από την αύξηση της πίεσης στο  $V_1$ .

Φάση 2:

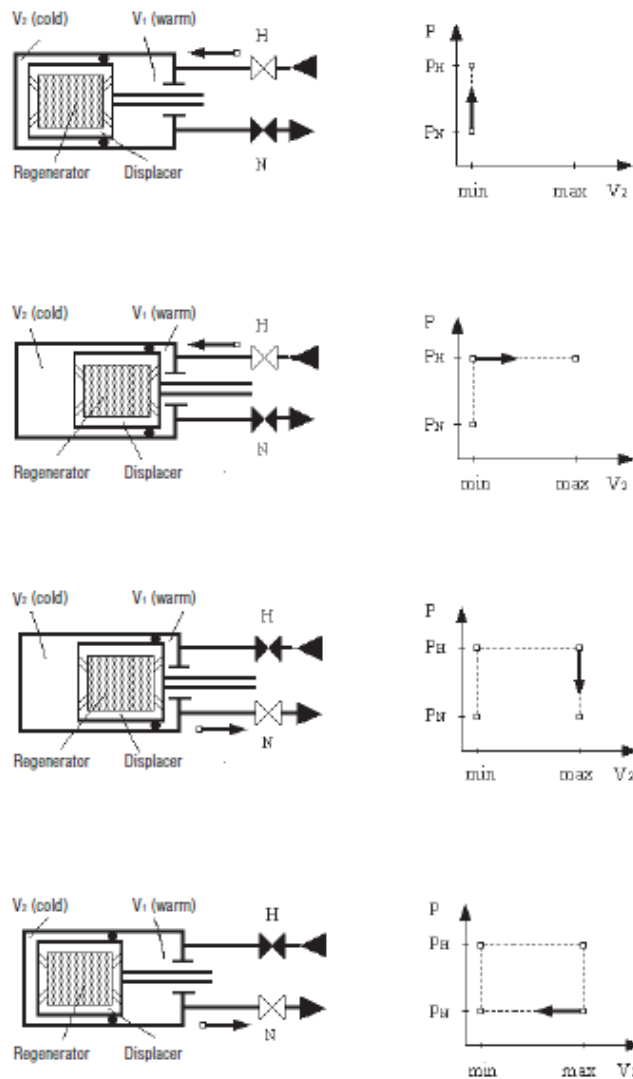
Η βαλβίδα H παραμένει ανοιχτή, η βαλβίδα N κλειστή. Ο εκτοπιστής κινείται προς τα δεξιά και εκτοξεύει το αέριο από τον  $V_1$  μέσω του αναγεννητή στο  $V_2$  όπου ψύχεται στον ψυχρό αναγεννητή. Ο όγκος  $V_2$  έχει το μέγιστο μέγεθος.

Φάση 3:

Η βαλβίδα H είναι κλειστή και η βαλβίδα N στη χαμηλή δεξαμενή πίεσης ανοίγει. Το αέριο διαστέλλεται από την πίεση  $p_H$  στην πίεση  $p_N$  και έτσι ψύχεται. Αυτό αφαιρεί τη θερμότητα από την περιοχή και μεταφέρεται με το διαστελλόμενο αέριο στον συμπιεστή.

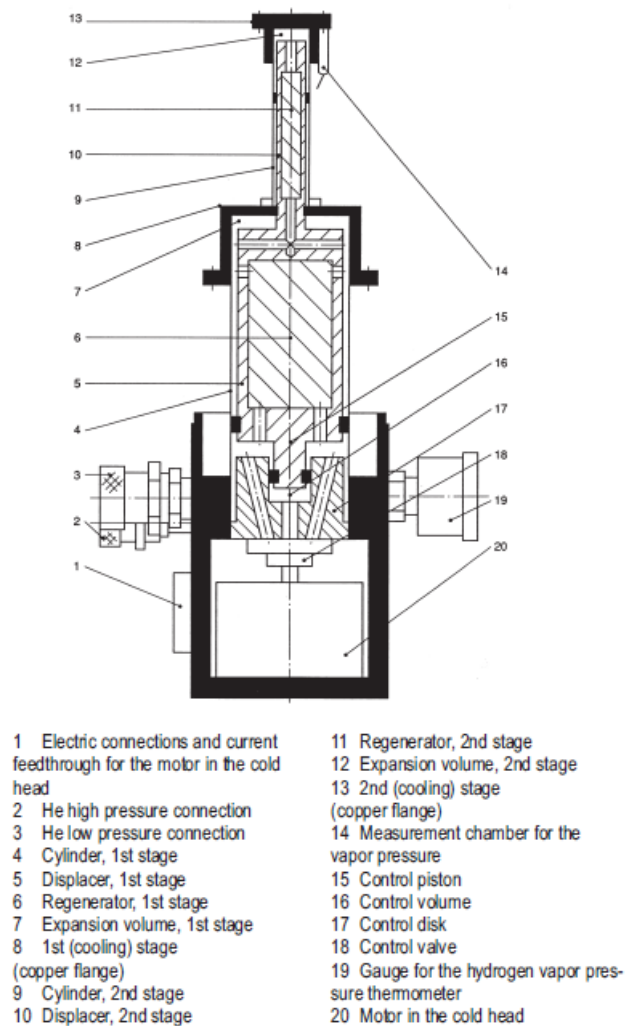
Φάση 4:

Με τη βαλβίδα N ανοιχτή, ο εκτοπιστής μετακινείται στα αριστερά. Το αέριο από το  $V_{2,\max}$  ρέει μέσω του αναγεννητή, ψύχοντας το και στη συνέχεια ρέει μέσα στον όγκο  $V_1$  και στη δεξαμενή χαμηλής πίεσης. Αυτό ολοκληρώνει τον κύκλο.



Σχήμα 3.27 Φάσεις ψύξης με χρήση ψυχρής κεφαλής ενός σταδίου που λειτουργεί σύμφωνα με τη διαδικασία Gifford-McMahon [2].

Οι κρυοαντλίες ψυγείων της σειράς της LEYBOLD χρησιμοποιούν κρύα κεφαλή δύο σταδίων που λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή Gifford-McMahon (σχήμα 3.28). Σε δύο στάδια συνδεδεμένα σε σειρά η θερμοκρασία του ηλίου μειώνεται σε περίπου 30 K στο πρώτο στάδιο και περαιτέρω σε περίπου 10 K στο δεύτερο στάδιο. Οι εφικτές χαμηλές θερμοκρασίες εξαρτώνται μεταξύ άλλων, από τον τύπο του αναγεννητή. Συνήθως, στον αναγεννητή του πρώτου σταδίου χρησιμοποιείται χαλκός-μπρούντζος και στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιείται μόλυβδος. Άλλα υλικά διατίθενται ως αναγεννητές για ειδικές εφαρμογές όπως οι κρυοστάτες για εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες ( $T < 10$  K).



Σχήμα 3.28 Σχηματική αναπαράσταση μιας κρύας κεφαλής δύο σταδίων [2].

Ο σχεδιασμός μιας κρύας κεφαλής δύο σταδίων φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 3.28. Μέσω ενός μηχανισμού ελέγχου με βαλβίδα ελέγχου οδηγούμενη από κινητήρα (18) με δίσκο ελέγχου (17) και οπές ελέγχου πρώτα αλλάζει η πίεση στον όγκο ελέγχου (16) η οποία προκαλεί τους εκτοπιστές (6) του πρώτου σταδίου και του δεύτερου σταδίου (11) να κινηθούν. Αμέσως μετά η πίεση σε ολόκληρο τον όγκο του κυλίνδρου εξισορροπείται από τον μηχανισμό ελέγχου. Η ψυχρή κεφαλή συνδέεται μέσω εύκαμπτων γραμμών πίεσης με τον συμπιεστή.



Σχήμα 3.29 Η κρυοαντλία HERAEUS RPK-800 της εταιρείας Leybold [12].

### **3.11 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΤΛΙΑΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΟΥ ΚΕΝΟΥ**

Οι περισσότερες από τις αντλίες υψηλού κενού που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες μπορούν να λειτουργήσουν με επιτυχία σε συστήματα UHV. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι πολλές εμπορικές εκδόσεις των αντλιών δεν μπορούν να φτάσουν στις απαιτούμενες θερμοκρασίες για γρήγορη εκτόξευση αερίων από τις επιφάνειες. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να ελαχιστοποιηθεί το τμήμα του συστήματος που δεν μπορεί να εκτοξεύσει γρήγορα τα αέρια και επίσης πρέπει η ταχύτητα άντλησης να είναι αρκετά μεγάλη. Οι αντλίες που έχουν αυτά τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε εφαρμογές UHV. Στη συνέχεια γίνεται μία σύγκριση των αντλιών σχετικά με τη χρήση και την καταλληλότητα τους.

#### Αντλίες διάχυσης

Μπορούν να ληφθούν πιέσεις στο εύρος  $10^{-11}$  έως  $10^{-10}$  torr με χρήση αντλίας τριών ή τεσσάρων σταδίων σε συνδυασμό με μια



αποτελεσματική παγίδα που ψύχεται με υγρό άζωτο. Για να αποφευχθεί η ανάστροφη ροή του λαδιού, μια τέτοια παγίδα πρέπει να διασφαλίζει ότι οποιοδήποτε μόριο λαδιού θα κάνει δύο ή περισσότερες συγκρούσεις σε μια επιφάνεια που διατηρείται συνεχώς σε θερμοκρασία υγρού αζώτου. Πιέσεις στο εύρος  $10^{-9}$  torr μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας μόνο ένα υδρόψυκτο διάφραγμα και ένα υγρό άντλησης χαμηλής πίεσης ατμών είτε αιθέρα του πολυφαινυλίου είτε σιλικόνη. Οι αντλίες διάχυσης δεν είναι επιλεκτικές. Είναι αποτελεσματικές για όλα τα αέρια και διατίθενται στο εμπόριο με πολύ μεγάλες ταχύτητες άντλησης, και επομένως είναι μια καλή αντλία γενικής χρήσης για όλα τα μεγέθη συστημάτων. Ωστόσο, η ικανοποιητική λειτουργία απαιτεί συνεχή συντήρηση της ηλεκτρικής θέρμανσης, ψύξη με νερό ή αέρα, αρχική πίεση κάτω από κάποιο κρίσιμο επίπεδο (συντά  $\sim 0,5$  torr) και ψύξη της παγίδας με υγρό άζωτο. Αν κάτι από τα παραπάνω δεν λειτουργήσει σωστά, μπορεί να προκληθεί μόλυνση του συστήματος με λάδι. Σαφώς, η προληπτική συντήρηση είναι κρίσιμη.

Η μόλυνση από λάδι των συστημάτων που αντλούνται με διάχυση συμβαίνει συχνά όταν χρησιμοποιείται αρχικά μία μηχανική αντλία για την πτώση της πίεσης σε πολύ χαμηλά επίπεδα, πριν την έναρξη χρήσης της αντλίας διάχυσης. Μπορεί εύκολα να αποφευχθεί αν περάσουμε από τη μηχανική στην αντλία διάχυσης όταν η πίεση είναι ακόμα στην περιοχή της ιξώδους ροής.

Λόγω της πληθώρας παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση αυτής της αντλίας και η σοβαρή πιθανότητα μόλυνσης με λάδι, αντλίες διάχυσης δεν συνιστώνται σε εφαρμογές UHV. Εξαιρέσεις από αυτήν τη σύσταση μπορεί να περιλαμβάνουν την απαίτηση για χαμηλές δαπάνες κεφαλαίου (σημειώνοντας όμως ότι το κόστος λειτουργίας της αντλίας διάχυσης είναι υψηλό) ή πολύ μεγάλη ταχύτητα άντλησης.

### Κρυοαντλίες

Μια κρυοαντλία παρέχει μια μη επιλεκτική, εγγενώς καθαρή μέθοδο για την άντληση UHV. Πολύ μεγάλες ταχύτητες άντλησης είναι άμεσα διαθέσιμες και η απλότητα της συσκευής επιτρέπει την αξιόπιστη λειτουργία. Η ικανότητα άντλησης ηλίου, υδρογόνου και νέον είναι πολύ περιορισμένη, σε σύγκριση με όλα τα άλλα αέρια, αλλά αυτό σπάνια προκαλεί προβλήματα σε συστήματα UHV. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των αντλιών είναι ότι τα αντλούμενα αέρια απελευθερώνονται πολύ

γρήγορα μέσα σε 10 λεπτά από μια διακοπή ρεύματος, έτσι ώστε μια ταχεία δράσης, στεγανή βαλβίδα είναι απαραίτητη για την απομόνωση του συστήματος κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας έκτακτης ανάγκης και για χρήση κατά τη διάρκεια μιας προγραμματισμένης αναγέννησης της αντλίας. Επίσης, πρέπει απαραίτητα να παίρνονται μέτρα για την αποφυγή μόλυνσης τόσο της κρυοαντλίας όσο και του συστήματος κενού.

Αυτή η αντλία έχει αξία όταν είναι απαραίτητες πολύ μεγάλες ταχύτητες. Τα κύρια προβλήματα συνδέονται με την ταχεία απελευθέρωση αερίου που είχε αντληθεί προηγουμένως σε περίπτωση διακοπής ρεύματος. Μια κρυοαντλία μπορεί να αντλήσει μόνο μικρές ποσότητες ηλίου πριν απαιτηθεί αναγέννηση και δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιείται εάν υπάρχει σημαντική εισροή αυτού του αερίου.

#### Στροβιλομοριακές αντλίες

Μια στροβιλομοριακή αντλία παρέχει μια μη επιλεκτική, καθαρή μέθοδο για την άντληση UHV, συνδυάζοντας απλότητα λειτουργίας και υψηλή αξιοπιστία. Οι τρέχουσες αντλίες περιορίζονται σε μέγιστη ταχύτητα άντλησης 10.000 L/s, αλλά αυτό δεν αποτελεί περιορισμό για τις περισσότερες εφαρμογές UHV. Η αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος κενού περιορίζει τη χρήση των στροβιλομοριακών αντλιών πολύ λιγότερο από τις δύο προηγούμενες αντλίες. Για παράδειγμα, για μια εμπορική αντλία μια θερμοκρασία 160 °C είναι επιτρεπτή στη φλάντζα στερέωσης.

Αν και οι αντλίες είναι αποτελεσματικές για όλα τα αέρια, θα πρέπει να σημειωθεί ένας περιορισμός στην άντληση του υδρογόνου, ενός από τα κύρια υπολειμματικά αέρια σε ένα σύστημα UHV. Ο λόγος συμπίεσης για αυτό το αέριο είναι πάντα μικρότερη από ότι για όλα τα άλλα αέρια. Συχνά είναι τόσο χαμηλός σε μια τυπική στροβιλομοριακή αντλία, με αποτέλεσμα σημαντικό περιορισμό στην ελάχιστη υπολειπόμενη πίεση υδρογόνου που μπορεί να επιτευχθεί. Για παράδειγμα, εάν είναι απαραίτητο να διατηρηθεί μία μερική πίεση υδρογόνου της τάξης του  $10^{-10}$  torr στον θάλαμο κενού πρέπει να διατηρείται η μπροστινή μερική πίεση του υδρογόνου σε  $\sim 6 \cdot 10^{-8}$  torr ή λιγότερο. Ορισμένες μηχανικές αντλίες σφραγισμένες με λάδι δεν μπορούν να ικανοποιήσουν αυτή την απαίτηση, και στην πραγματικότητα παράγουν υδρογόνο με αποικοδόμηση του ελαίου. Σε κάποιες

περιπτώσεις, η προσθήκη μιας αντλίας εξάχνωσης τιτανίου στον θάλαμο κενού μπορεί να λύσει το πρόβλημα.

Μια εναλλακτική και προτιμότερη προσέγγιση είναι η χρήση μιας στροβιλοαντλίας ευρείας εμβέλειας, όπου η βαθμίδα στροβίλου υποστηρίζεται από ένα στάδιο μοριακής έλξης, παρέχοντας πολύ υψηλούς λόγους συμπίεσης, ακόμα και της τάξης του  $10^7$ . Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι τέτοιες αντλίες μπορούν να χρησιμοποιούν ως μπροστινή αντλία μια αντλία διαφράγματος χωρίς λάδι, εξαλείφοντας έτσι κάθε πιθανότητα μόλυνσης λαδιού από αυτή την πηγή.

Για γενικές εφαρμογές UHV, η στροβιλομοριακή αντλία είναι πιθανώς η καλύτερη επιλογή μεταξύ των προηγούμενων αντλιών.

Η αυξανόμενη αξιοπιστία των συστημάτων ρουλεμάν, η διαθεσιμότητα αντλιών μαγνητικών ρουλεμάν και ο συνδυασμός στροβιλομοριακών αντλιών έλξης είναι σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή της στροβιλομοριακής αντλίας.

Ως κύρια δυσκολία θεωρείται το γεγονός ότι μια διακοπή ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της άντλησης μέσα σε ένα ή δύο λεπτά, καθώς ο ρότορας της αντλίας επιβραδύνεται και πρέπει να υπάρχει μια ταχείας δράσης, στεγανή βαλβίδα για την απομόνωση του θαλάμου UHV από τη γραμμή άντλησης σε τέτοια περίπτωση.

### Αντλίες ιόντων διασκορπισμού

Οι αντλίες ιόντων διασκορπισμού είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές UHV με την προϋπόθεση ότι η παροχή αερίου είναι σχετικά χαμηλή. Λόγω της απλής κατασκευής τους και της έλλειψης κινητών μερών, είναι εξαιρετικά αξιόπιστες, απαερώνεται εύκολα και παρέχουν σχεδόν ασφαλή λειτουργία.

Τα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνουν υψηλή επιλεκτικότητα στην άντληση διαφορετικών αερίων, μια σοβαρή μείωση της ταχύτητας άντλησης στις χαμηλότερες πιέσεις και υψηλό αρχικό κόστος.

Δεν διατίθενται σε πολύ μεγάλες ταχύτητες άντλησης και δεν είναι κατάλληλες εάν πρέπει να αντλούνται πολύ μεγάλες ποσότητες αερίου, κυρίως επειδή τέτοιες εφαρμογές έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ωφέλιμης ζωής τους.

Η αντλία ιόντων διασκορπισμού είναι ίσως η καλύτερη επιλογή για γενικές Εφαρμογές UHV εάν είναι απαραίτητο να διατηρείται πάντα χαμηλή πίεση. Παρέχει μακράν την πλησιέστερη προσέγγιση στην

ασφαλή λειτουργία και η διάρκεια ζωής είναι πολύ μεγάλη σε χαμηλές πιέσεις. Ωστόσο, εάν ένα σύστημα πρέπει να ανακυκλώνεται συχνά σε ατμοσφαιρική πίεση ή εάν η αντλία πρέπει να χειριστεί ένα σημαντικό φορτίο αερίου, για παράδειγμα, αέριο αργό σε ένα σύστημα ψεκασμού, η λειτουργική ζωή θα μειωθεί και μια στροβιλομοριακή αντλία μπορεί να είναι καλύτερη επιλογή.

## 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΙΕΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΨΗΛΟΥ ΚΕΝΟΥ

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για να σχεδιαστεί σωστά ένα σύστημα εκκένωσης πρέπει να υπολογιστούν οι βέλτιστες διαστάσεις των σωλήνων εκκένωσης και να βρεθεί ένα στόμιο που κάνει αποτελεσματική την εκκένωση. Επίσης, πρέπει να εκτιμηθούν οι πιέσεις σε διάφορες περιοχές.

Οι πιέσεις σε διάφορες τοποθεσίες εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως οι ρυθμοί εξαγωγής των συστατικών αερίων στοιχείων, η αγωγιμότητα των σωλήνων εκκένωσης και οι πιέσεις σε άλλες θέσεις. Οι πιέσεις σε τέτοια συστήματα μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα κενού, όπως παρουσιάζεται από πολλούς συγγραφείς.

### 4.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ας εξετάσουμε το απλούστερο σύστημα εκκένωσης, όπου υπάρχει ένας θάλαμος που παρουσιάζει έναν ρυθμό παραγωγής αερίων (outgassing)  $Q$  (Pa·L/s) εκκενώνεται από μια αντλία με ταχύτητα  $S$  (L/s) και εσωτερική τελική πίεση  $P_U$  (Pa) μέσω ενός σωλήνα αγωγιμότητας  $C$  (L/s). Η πίεση μέσα στον θάλαμο υπολογίζεται συμβατικά ως εξής:

$$P = P_U + \frac{Q}{S_e} \quad (4.1)$$

όπου  $S_e$  είναι η ενεργός ταχύτητα άντλησης στην πύλη εκκένωσης του θαλάμου. Η ενεργός ταχύτητα άντλησης εκφράζεται ως:

$$\frac{1}{s_e} = \frac{1}{c} + \frac{1}{s} = \frac{s+c}{sc} \quad (4.2)$$

Συνεπώς, η πίεση γράφεται:

$$P = P_U + \frac{s+c}{sc} Q \quad (4.3)$$

Ωστόσο, ο συμβατικός υπολογισμός της πίεσης που αντιπροσωπεύεται από τις παραπάνω εξισώσεις περιέχει τις ακόλουθες ερωτήσεις.

(1) Ο καθαρός ρυθμός παραγωγής αερίων  $Q$  του τοιχώματος του θαλάμου αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητος από την πίεση. Ωστόσο, όπως περιγράφεται στην βιβλιογραφία, το  $Q$  μεταβάλλεται ανάλογα με την πίεση του συστήματος  $P$ .

(2) Η αντλία κενού θεωρείται ότι αντλεί πάντα προς τα έξω τα αέρια στο θάλαμο. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι αντλίες κενού μερικές φορές λειτουργούν ως πηγή αερίου για θαλάμους πολύ υψηλού κενού που είχαν απαερωθεί με θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία.

(3) Η κατανεμημένη εξαγωγή κατά μήκος ενός σωλήνα εκκένωσης αγνοείται στους συμβατικούς υπολογισμούς της πίεσης.

(4) Για ένα περίπλοκο σύστημα υψηλού κενού με πολλούς σωλήνες εκκένωσης, ο μαθηματικός υπολογισμός γίνεται πολύ δύσκολος για να εξαχθούν οι πιέσεις.

Η ανάλυση του συστήματος που βασίζεται στο κύκλωμα κενού είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο στους υπολογισμούς.

### 4.3 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΚΕΝΟΥ

Για τον σχεδιασμό ενός κυκλώματος κενού ενός συστήματος υψηλού κενού, πρέπει να διευκρινιστούν οι χαρακτηριστικές τιμές των στοιχείων άντλησης και των στοιχείων εξαγωγής αερίων.

Χαρακτηριστικές τιμές ενός στερεού υλικού ως πηγής παραγωγής αερίων:

Ο καθαρός ρυθμός παραγωγής αερίων  $Q$  του τοιχώματος ενός θαλάμου εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ του ρυθμού ελεύθερης παραγωγής  $Q_0$  και του ρυθμού ελεύθερης προσρόφησης  $Q_S$  ως:

$$Q = Q_0 - Q_S \quad (4.4)$$

Όταν  $Q = Q_0 - Q_S < 0$ , το τοίχωμα του θαλάμου δείχνει μια καθαρή λειτουργία άντλησης. Η λειτουργία του τοιχώματος του θαλάμου σε πίεση  $P$  μπορεί να αναπαρασταθεί από τη γεννήτρια πίεσης με εσωτερική πίεση  $P_x$  και αντίσταση εσωτερικής ροής  $R_x$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Η εσωτερική πίεση  $P_x$  και η αντίσταση ροής  $R_x$  είναι χαρακτηριστικά του τοιχώματος του θαλάμου όσον αφορά την παραγωγή αερίων και την άντληση. Η πίεση  $P_x$  γενικά μειώνεται με το χρόνο  $t$  που έχει παρέλθει μετά την εκκένωση του τοιχώματος του θαλάμου σε υψηλό κενό. Από την άλλη πλευρά, η αντίσταση ροής  $R_x$ , που αντιπροσωπεύει το πορώδες του τοιχώματος, θεωρείται σταθερά, ανεξάρτητη από το χρόνο  $t$ .

Η βασική έννοια του καθαρού ρυθμού παραγωγής αερίων  $Q$  που εκφράζεται με την εξίσωση (4.4) μπορεί να προκύψει από την καμπύλη ανόδου της πίεσης, ως εξής.

Ας εξετάσουμε έναν θάλαμο χωρίς διαρροές μοναδιαίου όγκου που αποτελείται από ομοιογενή τοιχώματα, ο οποίος εκκενώνεται από μια αντλία σε μια αρκετά χαμηλή πίεση  $P_1$ . Αφού ο θάλαμος έχει πλέον απομονωθεί από την αντλία, η πίεση  $P$  αυξάνεται σταδιακά με το χρόνο που περνά και τελικά φτάνει σε μία πίεση κορεσμού  $P$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 (α). Η καμπύλη θα μπορούσε να προεκταθεί σε μηδενική πίεση, όπως φαίνεται από τη διακεκομμένη γραμμή.

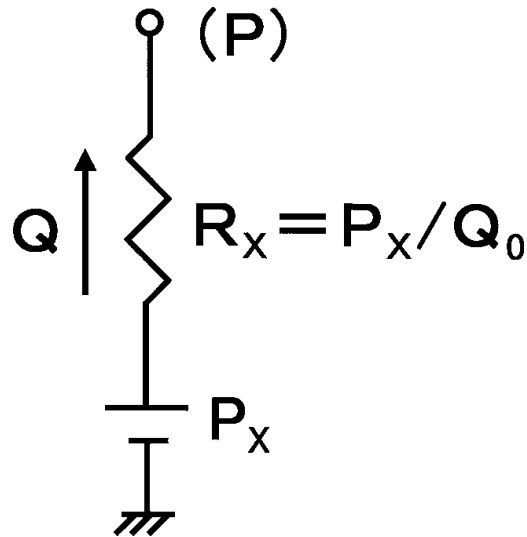
Η κλίση  $(dP/dt)_p$  είναι ο καθαρός ρυθμός παραγωγής αερίων,  $Q$ , του τοιχώματος του θαλάμου στην πίεση  $P$ , και η κλίση  $(dP/dt)_0$  σε μηδενική πίεση ονομάζεται ρυθμός ελεύθερης παραγωγής αερίων  $Q_0$  του τοιχώματος.

Η καταγεγραμμένη πίεση  $P$  ως συνάρτηση του χρόνου  $t$  που έχει παρέλθει θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι εκφράζεται από μία σχέση της μορφής:

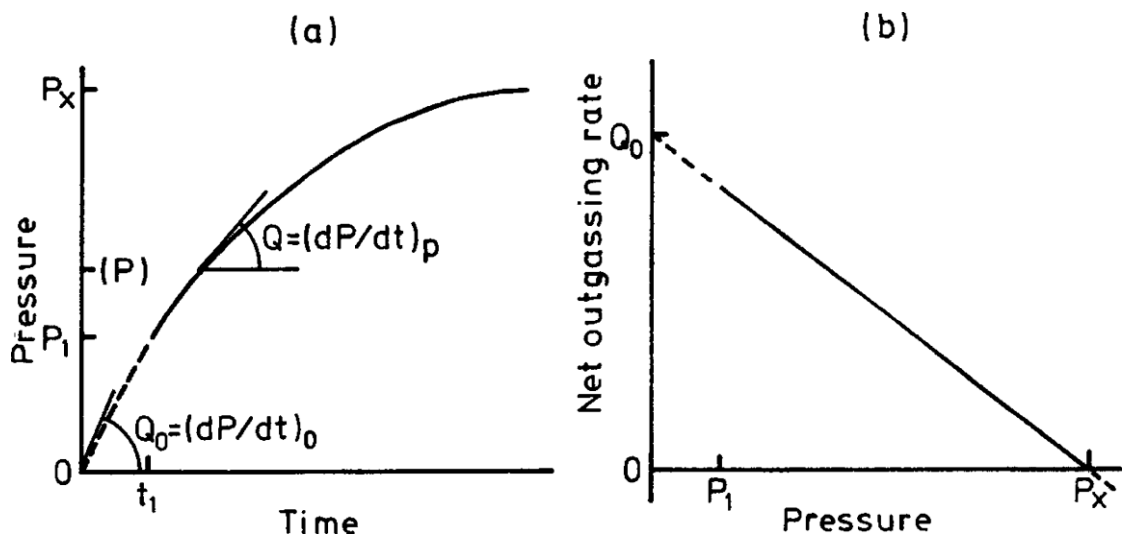
$$P = P_x [1 - \exp\{(-Q_0/P_x)t\}] \quad (4.5)$$

Παραγωγίζοντας την (4.5) ως προς  $t$  παίρνουμε:

$$(dP/dt)_p = Q_0 \exp\{-Q_0/P_x)t\} \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.1 Γεννήτρια πίεσης με  $P_x$  και  $R_x$ , αναπαριστώντας παραγωγή αερίων ή άντληση [3].



Σχήμα 4.2 (α) Τυπική καμπύλη ανόδου πίεσης και (β) καθαρός ρυθμός παραγωγής αερίου  $Q$  εξαρτώμενος από την πίεση  $P$  [3].

Από τις (4.5) και (4.6), το  $Q$  που ορίζεται ως  $(dP/dt)_p$  θα μπορούσε να εκφραστεί ως:



$$Q = Q_0 (1 - P/P_X) \quad (4.7)$$

Ο καθαρός ρυθμός παραγωγής αερίων  $Q$  ως συνάρτηση της πίεσης  $P$  αντιπροσωπεύεται από μια ευθεία γραμμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 (β). Η προεκτεινόμενη γραμμή κόβει τον οριζόντιο άξονα  $P$  και τον κατακόρυφο άξονα  $Q$  στις τιμές  $P_X$  και  $Q_0$ , αντίστοιχα. Η λειτουργία του τοιχώματος του θαλάμου ως πηγή αερίου θα μπορούσε να χαρακτηρίζεται από την  $P_X$  και την  $Q_0$ . Ο τοίχος εκκλύει αποτελεσματικά αέρια στο εύρος πίεσης χαμηλότερα από την  $P_X$ , όπου ο ρυθμός  $Q$  μειώνεται με την αύξηση του  $P$ . Από την άλλη μεριά, είναι αποτελεσματικά απορροφητικός (ή προσροφητικός) για τα αέρια στο εύρος της πίεσης υψηλότερα από την  $P_X$ .

Η εξίσωση (4.7) μπορεί να ξαναγραφτεί ως:

$$Q = P_X/Z_X - P/Z_X \quad (4.8)$$

αν το  $Q_0$  αντικατασταθεί από τον λόγο  $P_X/Z_X$ . Το  $Z_X$  με διάσταση σύνθετης αντίστασης (εμπέδησης) ροής έχει επίσης μία τιμή χαρακτηριστική του τοιχώματος. Ο πρώτος όρος της εξίσωσης (4.8) αντιπροσωπεύει τον ρυθμό ελεύθερης παραγωγής  $Q_0$ , ενώ ο δεύτερος όρος σημαίνει τον ρυθμό ελεύθερης προσρόφησης  $Q_s$  στην πίεση  $P$ . Η αποτελεσματική λειτουργία του τοιχώματος του θαλάμου ως πηγή αερίου σε πίεση  $P$  θα μπορούσε να αντιπροσωπεύεται από μια γεννήτρια πίεσης με εσωτερική πίεση  $P_X$  και εσωτερική αντίσταση ροής  $Z_X$  για πεδίο  $P_X$ .

Η γεννήτρια πίεσης εισάγει αέρια στο πεδίο του  $P$  με τον καθαρό ρυθμό  $Q$  που αντιπροσωπεύεται από τη διαφορά μεταξύ του ρυθμού ελεύθερης παραγωγής  $Q_0$  και του ρυθμού ελεύθερης προσρόφησης  $Q_s$ , όπως εκφράζεται από την εξίσωση (4.4).

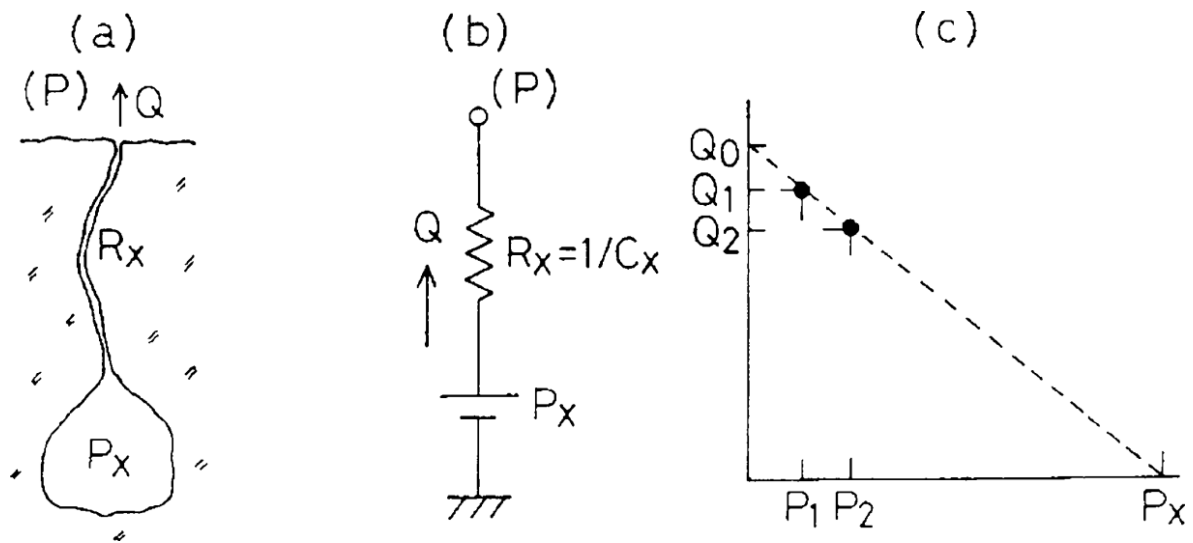
Τα στερεά υλικά ως πηγές αερίου που τοποθετούνται μέσα σε έναν θάλαμο κενού θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ένα είδος τοίχων, και έτσι ο καθαρός ρυθμός παραγωγής αερίων  $K$  ανά μονάδα επιφάνειας ενός στερεού υλικού θα μπορούσε να εκφραστεί με την ακόλουθη εξίσωση ανάλογη με την εξίσωση (4.7):

$$K = K_0 (1 - P/P_X) \quad (4.8)$$

Οι χαρακτηριστικές τιμές, η εσωτερική πίεση  $P_X$  και ο ρυθμός ελεύθερης παραγωγής  $K_0$  ανά μονάδα επιφάνειας ενός στερεού υλικού εξαρτώνται από την ιστορία του στερεού υπό κενό. Οι τιμές  $P_X$  και  $K_0$  θα μπορούσαν να εκτιμηθούν με δύο διαφορετικές τιμές του  $K$ ,  $K_1$  και  $K_2$ , μετρημένες σε δύο διαφορετικές πιέσεις  $P_1$  και  $P_2$  με χρήση των σχέσεων:

$$P_X = (K_1 P_2 - K_2 P_1) / (K_1 - K_2) \quad (4.9)$$

$$K_0 = (P_1 K_2 - P_2 K_1) / (P_1 - P_2) \quad (4.10)$$



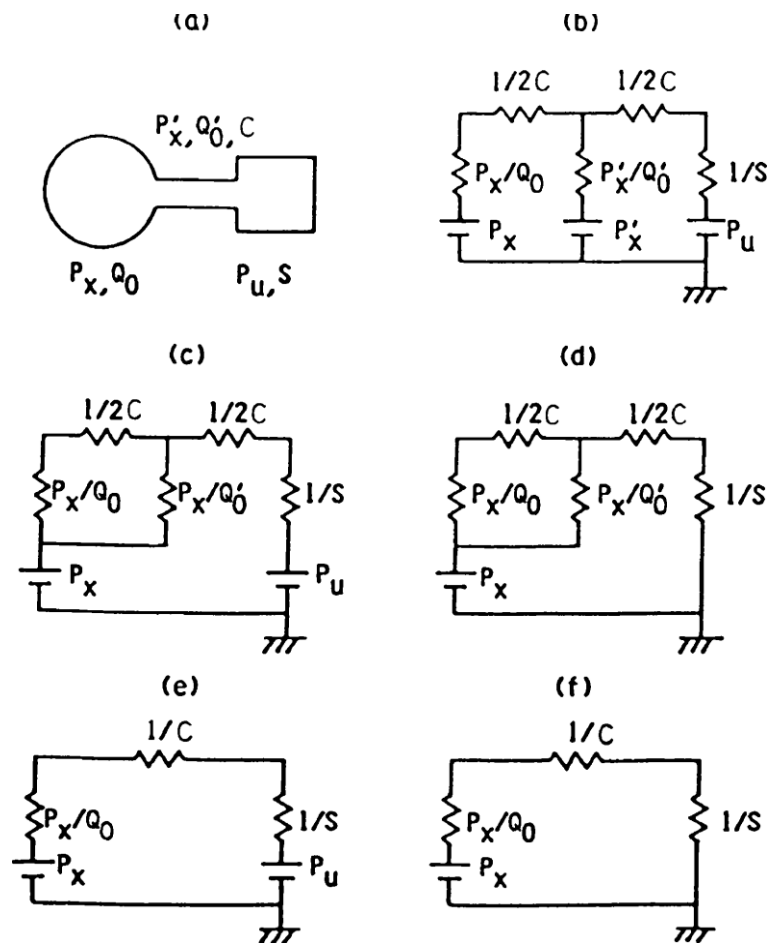
Σχήμα 4.3 Έννοια της πηγής παραγωγής αερίων. (α) Απεικόνιση της πηγής παραγωγής αερίων, (β) Γεννήτρια πίεσης ως πηγή παραγωγής αερίων, και (γ) Οι χαρακτηριστικές τιμές  $P_X$  και  $Q_0$  [3].

#### 4.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΚΕΝΟΥ

Ένα κύκλωμα κενού αποτελείται από τις χαρακτηριστικές τιμές των συστατικών του στοιχείων.

Οι καθαρές ροές και πιέσεις του αερίου σε ένα σύστημα υψηλού κενού υπό σταθερή κατάσταση πίεσης θα μπορούσε να αναλυθεί χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα κενού που αποτελείται από τις χαρακτηριστικές τιμές των συστατικών στοιχείων, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Ας εξετάσουμε το απλό σύστημα του σχήματος 4.4 (α), όπου ένας θάλαμος με  $P_x$  και  $Q_0$  εκκενώνεται από μια αντλία με τελική πίεση  $P_u$  και ταχύτητα  $S$  μέσω ενός σωλήνα με  $P'_x$ ,  $Q'_0$  και αγωγιμότητα  $C$ .



Σχήμα 4.4 Σύστημα υψηλού κενού και κυκλώματα κενού. (α) Αρχικό σύστημα, (β) το κύκλωμα κενού που αντιστοιχεί στο (α), και (γ), (δ), (ε) και (στ) απλοποιημένα κυκλώματα κενού κάτω από διάφορες συνθήκες [3].

Το κύκλωμα κενού που αντιστοιχεί στο σύστημα του σχήματος 4.4(α) προκύπτει από την μετατροπή των στοιχείων του συστήματος στα στοιχεία του κυκλώματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4(β). Τόσο το  $P_x$  όσο και το  $P'_x$  των τοιχωμάτων είναι συνήθως πολύ υψηλότερα από το  $P_u$  της αντλίας και την πίεση  $P$  στον θάλαμο. Επομένως, το κύκλωμα κενού μπορεί να απλοποιηθεί χωρίς αξιολογικό σφάλμα υπό διάφορες συνθήκες ως εξής.

Όταν το  $P'_X$  μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το ίδιο με το  $P_X$ , το κύκλωμα κενού (b) μπορεί να απλοποιηθεί στο κύκλωμα (c). Εάν το  $P_u$  είναι αμελητέα χαμηλό, το κύκλωμα (c) μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω στο κύκλωμα (d). Αν η  $Q'_0$  μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μηδέν, το κύκλωμα (c) μπορεί να απλοποιηθεί στο κύκλωμα (e). Τέλος, το κύκλωμα (f) είναι το απλούστερο αποδεκτό σύμφωνα με όλες τις απαιτήσεις που περιγράφονται παραπάνω.

Τα κυκλώματα (b)–(f) μπορούν να αναλυθούν με τους νόμους του Kirchhoff όπως τα ηλεκτρικά κυκλώματα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κύκλωμα κενού περιλαμβάνει φυσικά τη σχέση μεταξύ των αποτελεσματικών λειτουργιών των συστατικών στοιχείων ως πηγών αερίου σε ένα πρωτότυπο σύστημα. Σε ένα σύστημα υψηλού κενού, το στοιχείο με τη χαμηλότερη εσωτερική πίεση  $P_X$  λειτουργεί πάντα ως αποτελεσματική αντλία, ενώ το στοιχείο με το υψηλότερο  $P_X$  λειτουργεί πάντα ως αποτελεσματική πηγή αερίου.

Το στοιχείο με ενδιάμεσο  $P_X$  λειτουργεί ως αντλία όταν το  $P_X$  του είναι χαμηλότερο από την πίεση  $P$  στο πεδίο κενού και λειτουργεί ως πηγή αερίου όταν το  $P_X$  του είναι υψηλότερο από το  $P$  στο πεδίο. Οι πιέσεις συμπεριλαμβανομένων των εσωτερικών πιέσεων  $P_X$  στοιχείων θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως είδη δυναμικών που διέπουν τις καθαρές ροές αερίου σε ολόκληρο το σύστημα υψηλού κενού.

Οι αναλύσεις για τις καθαρές ροές και τις πιέσεις αερίου πρέπει να διεξάγονται σε μεμονωμένα είδη αερίου ξεχωριστά αφού τόσο η αγωγιμότητα ενός σωλήνα όσο και η ταχύτητα άντλησης μιας αντλίας εξαρτώνται από το είδος του αερίου. Οι μερικές πιέσεις  $P_i$  σε ένα σύστημα υψηλού κενού αναλύονται από ένα κύκλωμα κενού για μεμονωμένα είδη αερίων «i». Οι συνολικές πιέσεις  $P$  σε μια περιοχή μοριακής ροής λαμβάνονται ως:

$$P = \sum_i P_i \quad (4.11)$$

Όπως φαίνεται παραπάνω, μπορεί να σχεδιαστεί το κύκλωμα κενού ενός συστήματος υψηλού κενού αντικαθιστώντας κάθε στοιχείο εξόδου αερίου με την αντίστοιχη γεννήτρια πίεσης με εσωτερική πίεση  $P_X$  και αντίσταση εσωτερικής ροής  $R_X$ , και συνδέοντας τους ακροδέκτες εξόδου γεννητριών πίεσης με αντιστάσεις ροής αερίου. Ωστόσο, σχεδόν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής αερίων είναι καθαροί ρυθμοί

παραγωγής αερίων  $Q$  μετρημένοι σε υψηλό κενό. Επομένως, πρέπει να εκτιμηθούν οι χαρακτηριστικές τιμές  $P_X$  και  $R_X$  από την εξίσωση:

$$R_X \approx P_X/Q \quad (4.12)$$

υποθέτοντας την τιμή  $P_X$ . Για ένα σύστημα υψηλού κενού, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι το  $P_X$  όλων των στοιχείων που εκπέμπουν αέρια είναι, για παράδειγμα,  $10^5$  Pa, και το  $R_X$  του μεμονωμένου στοιχείου γίνεται:

$$R_X \approx 10^5/Q \quad (\text{σε s/L}) \quad (4.13)$$

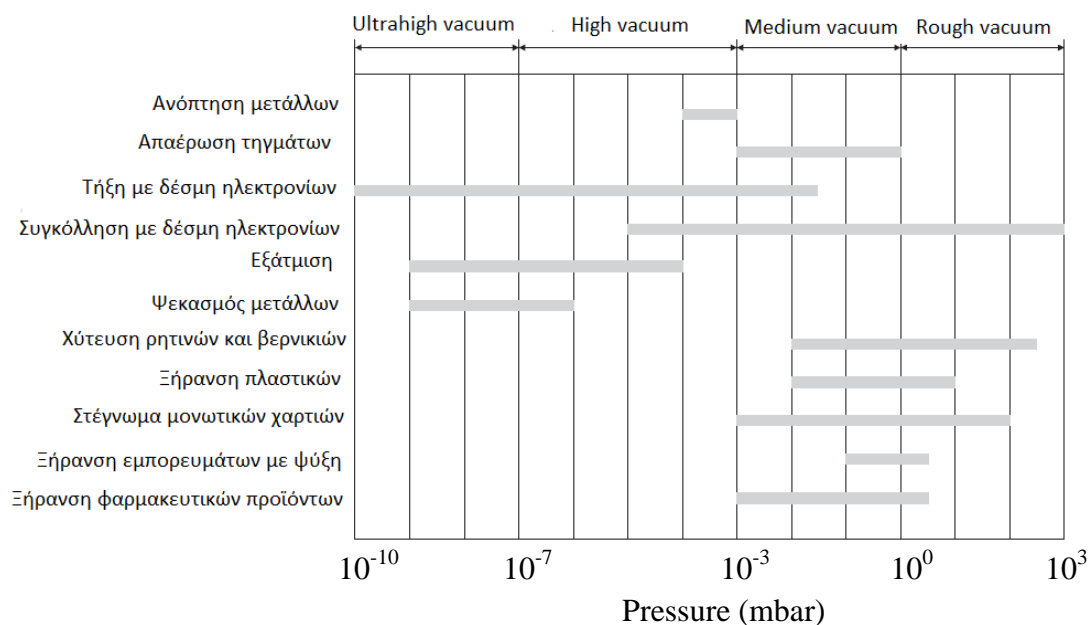
Για ένα σύστημα εξαιρετικά υψηλού κενού, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι το  $P_X$  όλων των στοιχείων παραγωγής αερίων είναι, για παράδειγμα, 1 Pa.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για τις πηγές ατμού υπάρχει η τάση ατμών των υλικών στοιχείων. Η λειτουργία της ως πηγή αερίου μπορεί να αναπαρασταθεί από τη γεννήτρια πίεσης με εσωτερική πίεση  $P_X$  (τάση ατμών) και μηδενική αντίσταση εσωτερικής ροής, εφαρμοσμένη σε ένα πεδίο πίεσης  $P$ .

## 5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΕΝΟΥ

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η τεχνολογία κενού χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στη βιομηχανικές παραγωγικές διαδικασίες τις τελευταίες δεκαετίες. Μερικές από αυτές τις διαδικασίες και τα τυπικά εύρη πίεσης εργασίας φαίνονται στο σχήμα 5.1. Στις επόμενες ενότητες θα περιγράψουμε πολλές διαδικασίες από την τεχνολογία επίστρωσης που είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός τεχνολογικός τομέας που εκμεταλλεύεται την τεχνολογία κενού.



Σχήμα 5.1 Περιοχές πιέσεων για διάφορες βιομηχανικές διεργασίες [2].

## 5.2 ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ

Η εναπόθεση λεπτών μεμβρανών χρησιμοποιείται για την αλλαγή των επιφανειακών ιδιοτήτων του υλικού βάσης, δηλαδή του υποστρώματος. Για παράδειγμα, οπτικές ιδιότητες όπως η μετάδοση ή η ανάκλαση των φακών και άλλων προϊόντων γυαλιού, μπορεί να ρυθμιστεί εφαρμόζοντας κατάλληλα συστήματα στρώσεων επίστρωσης. Μεταλλικές επιστρώσεις σε πλαστικά προϊόντα παράγουν αγωγίμες επιστρώσεις για πυκνωτές μεμβρανών. Πολυμερή στρώματα σε μέταλλα ενισχύουν την αντοχή στη διάβρωση του υποστρώματος.

Μέσω της χρήσης του κενού είναι δυνατή η δημιουργία επικαλύψεων με υψηλό βαθμό ομοιόμορφου πάχους που κυμαίνεται από αρκετά νανόμετρα έως περισσότερο από 100 nm, ενώ εξακολουθεί να επιτυγχάνεται πολύ καλή αναπαραγωγιμότητα των ιδιοτήτων επίστρωσης.

Επίπεδα υποστρώματα, ιστός και λωρίδες, καθώς και σύνθετα χυτά πλαστικά μέρη μπορούν να επιστρωθούν χωρίς ουσιαστικούς περιορισμούς ως προς το υλικό του υποστρώματος. Για παράδειγμα, μπορούν να επικαλυφθούν μέταλλα, κράματα, γυαλί, κεραμικά, πλαστικά και χαρτί. Η ποικιλία των υλικών επίστρωσης είναι επίσης πολύ μεγάλη. Εκτός από τις μεταλλικές και τις επιστρώσεις κραμάτων, στρώματα μπορούν να παραχθούν από διάφορες χημικές ενώσεις ή στρώματα διαφορετικών υλικών που εφαρμόζονται σε μορφή σάντουιτς.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της επίστρωσης κενού σε σχέση με άλλες μεθόδους είναι ότι πολλές επιθυμητές ειδικές ιδιότητες επίστρωσης, όπως δομή, σκληρότητα, ηλεκτρική αγωγιμότητα ή δείκτη διάθλασης, λαμβάνονται απλώς επιλέγοντας μία συγκεκριμένη μέθοδο επίστρωσης και τις παραμέτρους της διαδικασίας για ένα συγκεκριμένο υλικό επίστρωσης.

## 5.3 ΠΗΓΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ

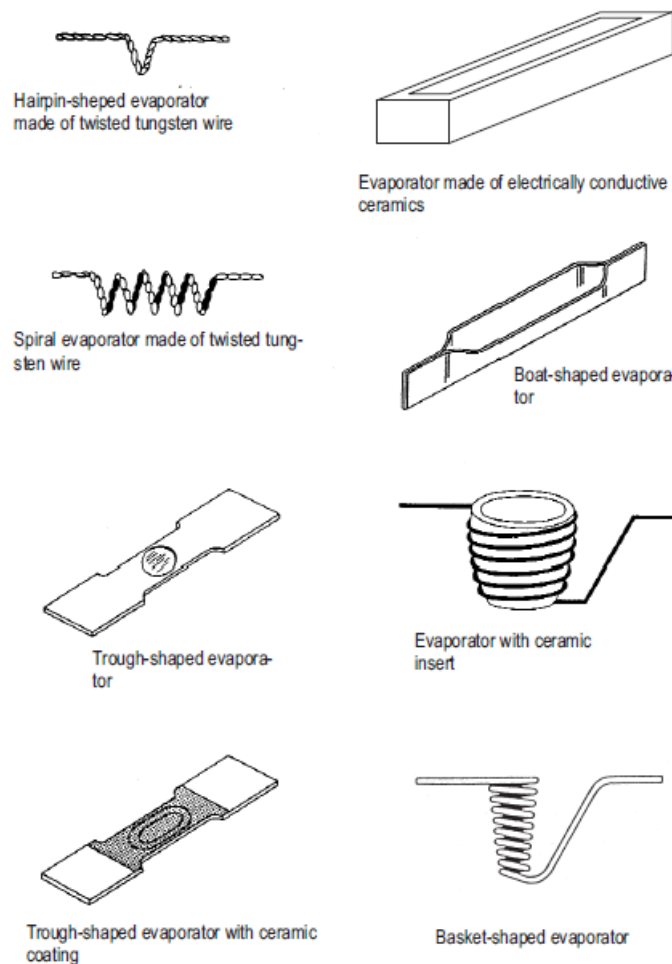
Σε όλες τις μεθόδους επίστρωσης υπό κενό, τα στρώματα σχηματίζονται με εναπόθεση υλικού από την αέρια φάση. Το υλικό επικάλυψης μπορεί να σχηματιστεί με φυσικές διεργασίες όπως η

εξάτμιση και ο ψεκασμός ή με χημική αντίδραση. Επομένως, γίνεται διάκριση μεταξύ φυσικής και χημικής εναπόθεσης ατμών:

- φυσική εναπόθεση ατμών (physical vapor deposition, PVD)
- χημική εναπόθεση ατμών (chemical vapor deposition, CVD)

## 5.4 ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΕΞΑΤΜΙΣΤΕΣ

Στη διαδικασία εξάτμισης το υλικό που πρόκειται να εναποτεθεί θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία αρκετά υψηλή ώστε να φτάσει σε μια αρκετά υψηλή τάση ατμών και να ρυθμιστεί η επιθυμητή ταχύτητα εξάτμισης ή συμπύκνωσης.



Σχήμα 5.2 Διάφοροι θερμικοί εξατμιστές [2].



Οι απλούστερες πηγές που χρησιμοποιούνται στην εξάτμιση αποτελούνται από νήματα σύρματος, βάρκες από λαμαρίνα ή ηλεκτρικά αγώγιμα κεραμικά που θερμαίνονται περνώντας ηλεκτρικό ρεύμα μέσω αυτών (σχήμα 5.2).

Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί ως προς τον τύπο του υλικού που θα θερμανθεί. Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν οι απαραίτητες θερμοκρασίες εξατμιστή χωρίς σημαντική εξάτμιση της θήκης της πηγής και έτσι μολύνεται η επίστρωση. Επιπλέον, μπορεί να προκύψουν χημικές αντιδράσεις μεταξύ του υλικού της πηγής και του υλικού που πρόκειται να εξατμιστεί με αποτέλεσμα είτε μείωση της διάρκειας ζωής του εξατμιστή είτε μόλυνση της επικάλυψης.

## **5.5 ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΡΕΣ ΔΕΣΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ**

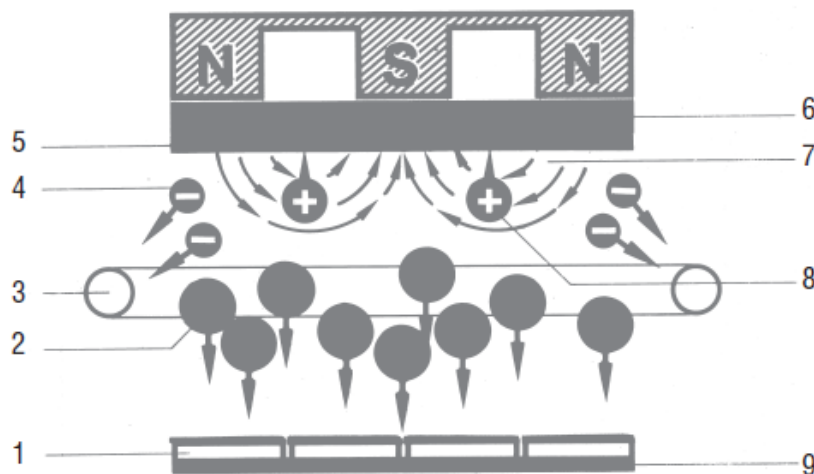
Για να εξατμιστεί το υλικό επικάλυψης χρησιμοποιώντας πιστόλι δέσμης ηλεκτρονίων, το υλικό, που διατηρείται σε υδρόψυκτο χωνευτήριο, βομβαρδίζεται από μία εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων και ως εκ τούτου θερμαίνεται. Δεδομένου ότι το χωνευτήριο παραμένει κρύο, κατ' αρχήν, αποφεύγεται η μόλυνση της επικάλυψης από το υλικό του χωνευτηρίου και επιτυγχάνεται ένας υψηλός βαθμός καθαρότητας της επίστρωσης. Με την εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων, μπορούν να ληφθούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες του προς εξάτμιση υλικού και άρα πολύ υψηλοί ρυθμοί εξάτμισης. Κατά συνέπεια, ενώσεις υψηλού σημείου τήξης όπως τα οξειδία μπορούν να εξατμιστούν εκτός από μέταλλα και κράματα. Με την αλλαγή της ισχύος της δέσμης ηλεκτρονίων ο ρυθμός εξάτμισης μπορεί να ελεγχθεί εύκολα και γρήγορα.

## **5.6 ΚΑΘΟΔΙΚΟΣ ΨΕΚΑΣΜΟΣ**

Στη διαδικασία επιμετάλλωσης καθόδου, ο στόχος, ένα στερεό, βομβαρδίζεται με ιόντα υψηλής ενέργειας σε εκκένωση αερίου (σχήμα 5.3). Τα προσκρουόμενα ιόντα μεταφέρουν την ορμή τους στα άτομα του υλικού στόχου, εκτοπίζοντάς τα. Αυτά τα εκτοπισμένα άτομα, τα

διασκορπισμένα σωματίδια, συμπυκνώνονται στο υπόστρωμα. Σε σύγκριση με τα εξατμισμένα σωματίδια, τα διασκορπισμένα σωματίδια έχουν πολύ υψηλότερη κινητική ενέργεια. Ως εκ τούτου, οι συνθήκες της συμπύκνωσης και της ανάπτυξη του στρώματος είναι πολύ διαφορετικές στις δύο διαδικασίες.

Τα διασκορπισμένα στρώματα έχουν συνήθως υψηλότερη συγκολλητική αντοχή και πιο πυκνή δομή επίστρωσης από τα εξατμισμένα. Οι κάθοδοι διασκορπισμού είναι διαθέσιμες σε πολλά διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα και μεγέθη καθώς και διαμορφώσεις ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Αυτό που έχουν κοινό όλες οι κάθοδοι διασκορπισμού είναι ότι καλύπτουν πολύ μεγάλη περιοχή σε σύγκριση με τους εξατμιστές και συνεπώς έχουν την ικανότητα επικάλυψης μεγάλων υποστρωμάτων με υψηλό βαθμό ομοιομορφίας. Σε αυτόν τον τύπο επεξεργασίας μετάλλων, κράματα οποιασδήποτε σύνθεσης καθώς και οξειδία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά επικάλυψης.



- 1. Υποστρώματα 2 Διασκορπισμένα άτομα
- 3 Άνοδος 4 Ηλεκτρόνια
- 5 Στόχος 6 Κάθοδος
- 7 Μαγνητικές δυναμικές γραμμές
- 8 Ιόντα αργού 9 Υπόστρωμα

Σχήμα 5.3 Σχηματική αναπαράσταση μιας διάταξης καθοδικού ψεκασμού υψηλής απόδοσης [2].

## 5.7 ΧΗΜΙΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΤΜΩΝ

Σε αντίθεση με τις μεθόδους PVD, όπου η προς απόθεση ουσία είναι είτε στερεά ή υγρά, στη χημική εναπόθεση ατμών η ουσία βρίσκεται ήδη στη φάση του ατμού όταν εισάγεται στο σύστημα κενού. Για να γίνει η εναπόθεση, η ουσία πρέπει να διεγείρεται θερμικά, δηλαδή μέσω κατάλληλων υψηλών θερμοκρασιών ή με ένα πλάσμα. Γενικά, σε αυτό το είδος διαδικασίας, λαμβάνει χώρα ένας μεγάλος αριθμός χημικών αντιδράσεων, μερικές από τις οποίες αξιοποιούνται για τον έλεγχο της επιθυμητής σύνθεσης και των ιδιοτήτων της επικάλυψης. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας μονομερή πυριτίου-υδρογόνου, μπορούν να δημιουργηθούν είτε μαλακές επικαλύψεις πολυμερών Si-H, είτε σκληρές επιστρώσεις πυριτίου είτε, με προσθήκη οξυγόνου, επιστρώσεις χαλαζία, με κατάλληλο έλεγχο των παραμέτρων της διαδικασίας.

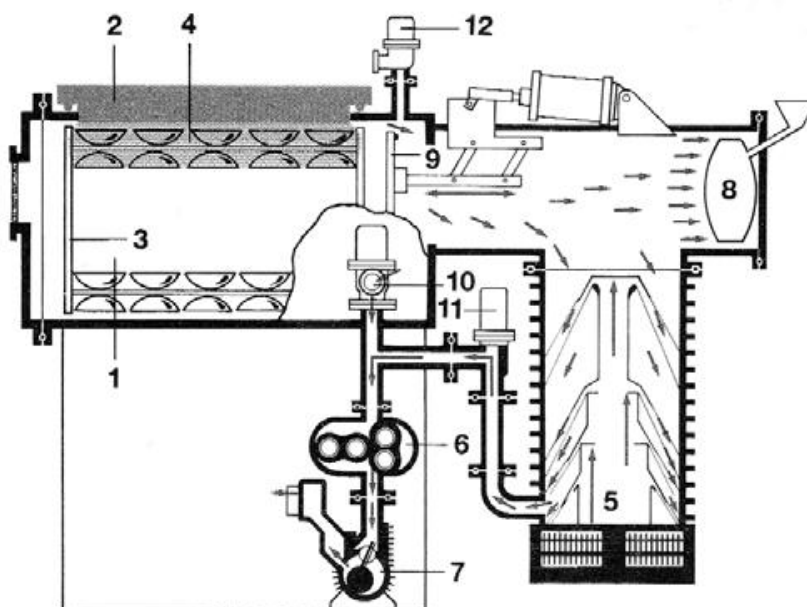
## 5.8 ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Για τα χυτά πλαστικά μέρη, οι τεχνικές επίστρωσης υπό κενό αντικαθιστούν όλο και περισσότερο τις συμβατικές μεθόδους επίστρωσης, όπως η ηλεκτρολυτική επίστρωση. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας μεθόδους επίστρωσης κενού, οι ανακλαστικές αυτοκινήτων αποκτούν μία κατοπτρική επιφάνεια, τα πλαστικά είδη στα έπιπλα, είδη διακόσμησης, καθώς και πολλά προϊόντα της βιομηχανία ηλεκτρονικών είναι επικαλυμμένα με μέταλλο.

Το σχήμα 5.4 δείχνει έναν τύπο συστήματος κενού στο οποίο μεγάλες παρτίδες χυτευμένων πλαστικών μερών μπορούν να επικαλυφθούν ταυτόχρονα. Τα υποστρώματα τοποθετούνται σε ένα κλουβί που περιστρέφεται πέρα από την πηγή επικάλυψης, μια κάθοδος ψεκασμού σε αυτό το παράδειγμα.

Σε ορισμένες εφαρμογές, με τη χρήση επεξεργασίας εκκένωσης λάμπης, τα υποστρώματα καθαρίζονται και η επιφάνεια ενεργοποιείται πριν από την διαδικασία επίστρωσης. Αυτό ενισχύει την συγκολλητική δύναμη και την ικανότητα αναπαραγωγής των ιδιοτήτων επίστρωσης. Μπορεί να εφαρμοστεί επίστρωση αντιδιαβρωτικής προστασίας μετά από ψεκασμό. Στην περίπτωση αυτή, ένας ατμός μονομερούς εισάγεται στο

σύστημα και πραγματοποιείται μία εκκένωση πλάσματος υψηλής συχνότητας. Το μονομερές είναι ενεργό στο πλάσμα και εναποτίθεται στα υποστρώματα σαν μία επίστρωση πολυμερούς. Σε αυτό το είδος συστήματος μπορεί να υπάρχουν πλαστικά υποστρώματα με εμβαδόν επιφάνειας πολλών δεκάδων  $m^2$  στον κλωβό, προκαλώντας αντίστοιχα υψηλή ροή αερίου εκρόφησης.



- 1 Θάλαμος κενού 2 Κάθοδος υψηλής απόδοσης
- 3 Στήριγμα υποστρώματος 4 Υποστρώματα
- 5 Αντλία διάχυσης 6. Αντλία Roots
- 7 Αντλία περιστροφικού εμβόλου
- 8 Ψυχή παγίδα 9 Βαλβίδα υψηλού κενού
- 10 Βαλβίδα για γραμμή παράκαμψης
- 11 Βαλβίδα πρόσοψης 12 Βαλβίδα εξαερισμού

Σχήμα 5.4 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος για επικάλυψη εξαρτημάτων [2].

Το σύστημα κενού πρέπει να μπορεί να επιτυγχάνει αξιόπιστα τις απαιτούμενες πιέσεις παρά αυτά τα υψηλά φορτία αερίου. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται, το σύστημα εκκενώνεται με συνδυασμό αντλίας υποστήριξης και αντλίας Roots. Μια αντλία διάχυσης μαζί με μια κρύα επιφάνεια σχηματίζει το σύστημα αντλίας υψηλού κενού. Οι κρύες επιφάνειες αντλούν μεγάλο μέρος των ατμών και των πτητικών ουσιών που εκπέμπονται από τα πλαστικά μέρη ενώ η αντλία διάχυσης

ουσιαστικά αφαιρεί τα μη συμπυκνώσιμα αέρια καθώς και το ευγενές αέριο που απαιτείται για τη διαδικασία του ψεκασμού.

Μια εντελώς διαφορετική ιδέα για τα ίδια στάδια διεργασίας φαίνεται στο σχήμα 5.5. Το σύστημα αποτελείται από τέσσερις ξεχωριστούς σταθμούς που αποτελούνται από ένα τύμπανο που περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα με τέσσερις θαλάμους υποστρώματος και σταθμούς επεξεργασίας τοποθετημένους στο θάλαμο κενού.



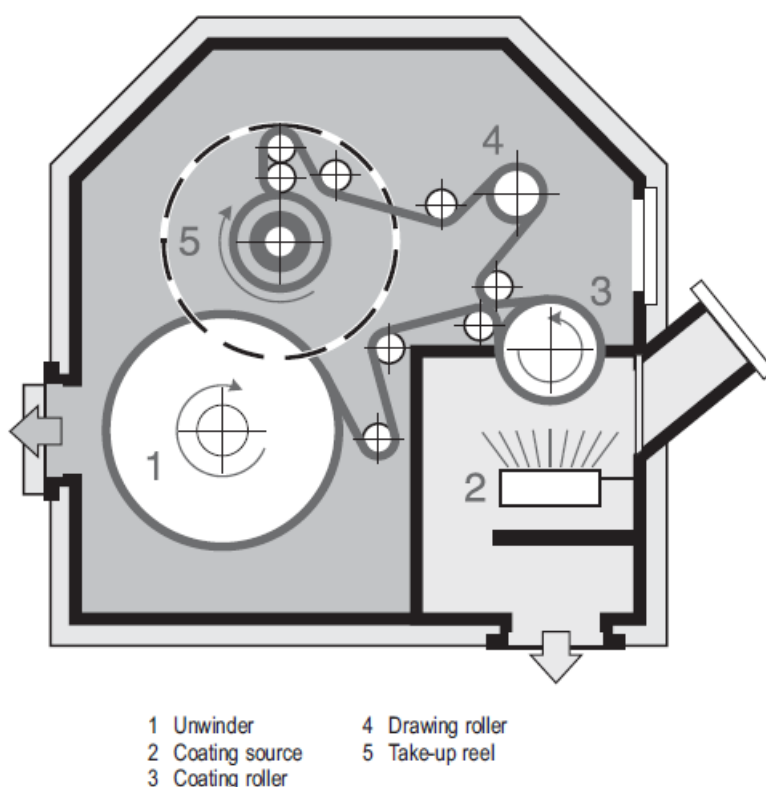
Σχήμα 5.5 Μονάδα επίστρωσης εξαρτημάτων με πολλούς θαλάμους [2].

Κατά την περιστροφή, ένας θάλαμος υποστρώματος μετακινείται από το σταθμό φόρτωσης και εκφόρτωσης στον σταθμό προεπεξεργασίας, στον σταθμό επιμετάλλωσης, στον σταθμό προστατευτικής επίστρωσης και μετά πίσω στην αρχική θέση. Δεδομένου ότι κάθε σταθμός έχει το δικό του σύστημα άντλησης, και οι τέσσερις διαδικασίες μπορούν να εκτελεστούν ταυτόχρονα με εντελώς ανεξάρτητες και ρυθμιζόμενες παραμέτρους διαδικασίας. Το σύστημα κενού αποτελείται από στροβιλομοριακή αντλίες και σετ αντλιών

υποστήριξης που αποτελούνται από αντλίες Roots και περιστροφικού πτερυγίου.

## 5.9 ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΙΣΤΟΥ

Οι πλαστικοί ιστοί και τα χαρτιά με επικάλυψη μετάλλου παίζουν σημαντικό ρόλο στις συσκευασίες τροφίμων. Διατηρούν τα τρόφιμα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σύμφωνα με τις απαιτήσεις αποθήκευσης και μεταφοράς και δίνουν στη συσκευασία μία πιο ελκυστική εμφάνιση. Άλλος σημαντικός τομέας εφαρμογής του μεταλλικού ιστού είναι η παραγωγή πυκνωτών μεμβράνης για ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές. Η επίστρωση μετάλλου πραγματοποιείται σε συστήματα επίστρωσης ιστού κενού. Το σχήμα 5.6 δείχνει μία τυπική μονάδα.



Σχήμα 5.6 Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος κενού επίστρωσης ιστού [2].

Η μονάδα αποτελείται από δύο θαλάμους, τον θάλαμο περιέλιξης με το ρολό του ιστού που πρόκειται να επικαλυφθεί και το σύστημα περιέλιξης, καθώς και τον θάλαμο επίστρωσης, όπου βρίσκονται οι εξατμιστές. Οι δύο θαλάμοι είναι σφραγισμένοι ο ένας από τον άλλο, εκτός από δύο σχισμές από τις οποίες περνά ο ιστός. Αυτό κάνει δυνατή την άντληση υψηλών φορτίων αερίου από τον κύλινδρο ιστού χρησιμοποιώντας ένα σχετικά μικρό σετ άντλησης. Η πίεση στον θάλαμο περιέλιξης μπορεί να είναι μεγαλύτερη κατά έναν συντελεστή υψηλότερο του 100 από την πίεση που δημιουργείται ταυτόχρονα στον θάλαμο επίστρωσης. Το σετ αντλίας για το θάλαμο περιέλιξης συνήθως αποτελείται από έναν συνδυασμό αντλιών Roots και περιστροφικών πτερυγίων.

Με ρολά χαρτιού που έχουν την ιδιότητα να ελευθερώνουν έντονα αέρια, μπορεί να χρειαστεί να εγκατασταθεί μία κρύα επιφάνεια στον θάλαμο περιέλιξης για να λειτουργεί ως αντλία υδρατμών. Τα ρολά του πλαστικού ιστού ή το χαρτί έχουν τυπικά διαμέτρους μεταξύ 400 και 1000 mm και πλάτος από 400 έως 3000 mm. Απαιτείται ένα ακριβές, ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα περιέλιξης για το τύλιγμα και το ξετύλιγμα καθώς και για την καθοδήγηση του ιστού.

Κατά τη διαδικασία επίστρωσης ο ιστός, με ταχύτητα μεγαλύτερη από 10 m/s, διέρχεται από μια ομάδα εξατμιστών που αποτελείται από κεραμικά σκάφη, από τα οποία εξατμίζεται αλουμίνιο. Για να επιτευχθεί το απαραίτητο πάχος επίστρωσης Al σε αυτά, απαιτούνται υψηλές ταχύτητες ιστού και πολύ υψηλοί ρυθμοί εξατμίσεως. Οι εξατμιστές πρέπει να λειτουργούν σε θερμοκρασίες άνω των 1400 °C. Η θερμική ακτινοβολία των εξατμιστών, μαζί με τη θερμότητα της συμπύκνωσης του αναπτυσσόμενου στρώματος, αποδίδει σημαντικό θερμικό φορτίο για τον ιστό. Με τη βοήθεια των κρύων κυλίνδρων, το φύλλο ψύχεται κατά τη διάρκεια και μετά την επίστρωση έτσι ώστε να μην υποστεί ζημιά κατά την επίστρωση και να έχει κρυώσει αρκετά πριν την περιέλιξη.

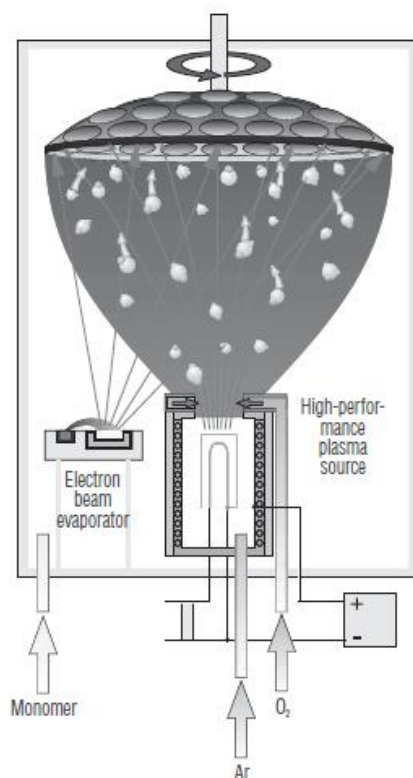
Κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας επίστρωσης το πάχος της επίστρωσης παρακολουθείται συνεχώς με οπτικό σύστημα μέτρησης ή μέσω συσκευών μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης. Οι μετρούμενες τιμές συγκρίνονται με τις επιθυμητές τιμές του πάχους επίστρωσης στο σύστημα και έτσι, η ισχύς του εξατμιστή ελέγχεται αυτόματα.

## 5.10 ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ

Οι επικαλύψεις κενού έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην παραγωγή οφθαλμικών βοηθημάτων, φακών για κάμερες και άλλα οπτικά όργανα καθώς και στην παραγωγή μεγάλης ποικιλίας οπτικών φίλτρων και ειδικών καθρεφτών. Για να αποκτηθούν οι επιθυμητές ιδιότητες μετάδοσης ή ανάκλασης, τουλάχιστον τρεις, αλλά μερικές φορές έως και 50 επιστρώσεις εφαρμόζονται στα γυάλινα ή πλαστικά υποστρώματα. Οι ιδιότητες επίστρωσης, όπως το πάχος και ο δείκτης διάθλασης των επιμέρους επιστρώσεων, πρέπει να ελέγχονται με μεγάλη ακρίβεια και να ταιριάζουν μεταξύ τους. Οι περισσότερες από αυτές τις επικαλύψεις παράγονται χρησιμοποιώντας εξατμιστές δέσμης ηλεκτρονίων σε μονάδες μονού θαλάμου (σχήμα 5.7). Οι εξατμιστές εγκαθίστανται συνήθως στο κάτω μέρος του θαλάμου με χωνευτήρια που λειτουργούν αυτόματα, στα οποία υπάρχουν αρκετά διαφορετικά υλικά. Τα υποστρώματα είναι τοποθετημένα σε μια περιστρεφόμενη θήκη πάνω από τους εξατμιστές. Η εφαρμογή κατάλληλων θωρακίσεων σε συνδυασμό με σχετική κίνηση μεταξύ εξατμιστή και υποστρωμάτων, έχει ως αποτέλεσμα πολύ υψηλό βαθμό ομοιομορφίας της επίστρωσης. Με τη βοήθεια ελεγκτών πάχους επίστρωσης και άμεση μέτρηση των επιτευχθέντων οπτικών ιδιοτήτων του συστήματος κατά τη διάρκεια της επίστρωσης, η διαδικασία επίστρωσης ελέγχεται πλήρως με αυτόματο τρόπο.

Μία από τις βασικές απαιτήσεις των επιστρώσεων είναι να διατηρούν τις ιδιότητές τους υπό συνθήκες συνθήκες περιβάλλοντος για μεγάλες χρονικές περιόδους. Αυτό απαιτεί να παράγονται όσο το δυνατόν πιο πυκνές επιστρώσεις, στις οποίες δεν μπορεί να διεισδύσει ούτε οξυγόνο ούτε νερό. Στην περίπτωση των γυάλινων φακών, αυτό επιτυγχάνεται με τη διατήρηση των υποστρωμάτων σε θερμοκρασίες έως 300 °C κατά την επίστρωση με θερμαντήρες ακτινοβολίας. Ωστόσο, οι πλαστικοί φακοί, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στην οπτική των γυαλιών, δεν επιτρέπεται να θερμανθούν πάνω από τους 80 °C.





Σχήμα 5.7 Μονάδα επίστρωσης για οπτικές επιστρώσεις [2].

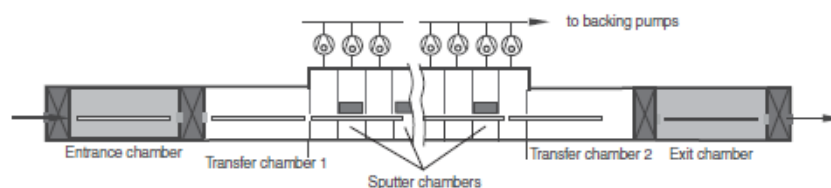
Για να αποκτήσουν πυκνές, σταθερές επικαλύψεις αυτά τα υποστρώματα βομβαρδίζονται με ιόντα Ar από μια πηγή ιόντων κατά τη διάρκεια της επικάλυψης. Μέσω του βομβαρδισμού ιόντων εφαρμόζεται η σωστή ποσότητα ενέργειας στο αναπτυσσόμενο στρώμα έτσι ώστε τα επικαλυμμένα σωματίδια να είναι διατεταγμένα στις ενεργειακά πιο ευνοϊκές θέσεις του πλέγματος, χωρίς να φτάνει η θερμοκρασία του υποστρώματος σε απαράδεκτα υψηλές τιμές. Ταυτόχρονα μπορεί να προστεθεί οξυγόνο στο αργόν. Τα προκύπτοντα ιόντα οξυγόνου είναι πολύ αντιδραστικά και διασφαλίζουν ότι το οξυγόνο περιλαμβάνεται στο αναπτυσσόμενο στρώμα κατά βούληση.

Το σύστημα κενού μιας τέτοιας μονάδας επίστρωσης συνήθως αποτελείται από ένα βασικό σετ αντλίας που αποτελείται από μια περιστροφική αντλία περυγίων και μια αντλία Roots καθώς και ένα σύστημα άντλησης υψηλού κενού. Ανάλογα με τις απαιτήσεις, εδώ χρησιμοποιούνται αντλίες διάχυσης, κρυοαντλίες ή στροβιλομοριακές αντλίες, στις περισσότερες περιπτώσεις σε σύνδεση με μεγάλες κρύες επιφάνειες που ψύχονται με ψυγείο. Οι αντλίες πρέπει να εγκαθίστανται και να προστατεύονται με κατάλληλες θωρακίσεις με τρόπο που κανένα

υλικό επίστρωσης δεν θα μπορεί να εισαχθεί στις αντλίες και ότι οι θερμαντήρες του συστήματος δεν θα τις υπερφορτώνουν θερμικά. Δεδομένου ότι η θωράκιση μειώνει πάντα την αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης, ο κατασκευαστής του συστήματος πρέπει να βρει έναν κατάλληλο συμβιβασμό μεταξύ του εξοπλισμού θωράκισης και της μείωσης της ταχύτητας άντλησης.

## 5.11 ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΓΥΑΛΙΟΥ

Το επικαλυμμένο γυαλί παίζει σημαντικό ρόλο σε πολλές εφαρμογές: τζάμια παραθύρων στις ζώνες μέτριου και ψυχρού κλίματος έχουν επίστρωση που αντανάκλα τη θερμότητα για τη μείωση του κόστους θέρμανσης, σε χώρες με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία, χρησιμοποιούνται επιστρώσεις ηλιακής προστασίας που μειώνουν τα έξοδα του κλιματισμού. Τα επικαλυμμένα παράθυρα του αυτοκινήτου μειώνουν τη θέρμανση του εσωτερικού και οι καθρέπτες χρησιμοποιούνται τόσο στην βιομηχανία επίπλων όσο και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι περισσότερες από αυτές τις επικαλύψεις παράγονται σε μεγάλα εν σειρά συστήματα κενού. Το σχήμα 5.8 δείχνει ένα τυπικό σύστημα.

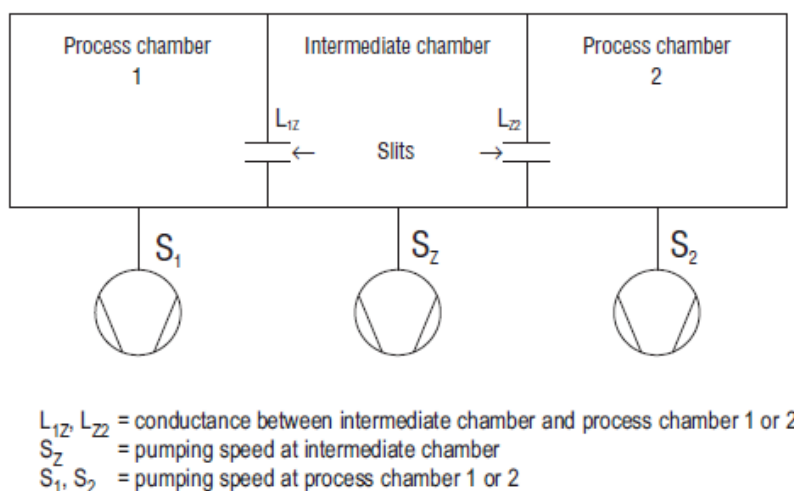


Σχήμα 5.8 Μονάδα για επίστρωση γυαλιού [2].

Οι μεμονωμένοι υαλοπίνακες μεταφέρονται σε έναν θάλαμο εισόδου σε ατμοσφαιρική πίεση. Αφού κλείσει η βαλβίδα εισόδου, ο θάλαμος εκκενώνεται με ένα σετ αντλιών. Μόλις η πίεση είναι αρκετά χαμηλή, η βαλβίδα προς τον εκκενωμένο θάλαμο μεταφοράς μπορεί να ανοίξει. Ο υαλοπίνακας μετακινείται στον θάλαμο μεταφοράς και από εκεί με σταθερή ταχύτητα στους θαλάμους διεργασίας, όπου η επίστρωση πραγματοποιείται μέσω καθοδικού διασκορπισμού. Στην

πλευρά της εξόδου υπάρχει, κατ' αναλογία με την πλευρά της εισόδου, ένας θάλαμος μεταφοράς στον οποίο παραμένει το τζάμι μέχρι να μπορέσει να μεταφερθεί έξω από τον θάλαμο εξόδου.

Οι περισσότερες επικαλύψεις αποτελούνται από μια στοίβα εναλλακτικών στρωμάτων μετάλλου και οξειδίου. Δεδομένου ότι τα μεταλλικά στρώματα μπορεί να μην έχουν μολυνθεί με οξυγόνο, οι μεμονωμένοι σταθμοί διεργασίας πρέπει να απομονώνονται υπό κενό ο ένας από τον άλλον και από τους σταθμούς μεταφοράς. Η χρήση βαλβίδων για διαχωρισμό των θαλάμων διεργασίας δεν είναι ικανοποιητική γιατί αυξάνει τις συνολικές διαστάσεις. Για αποφυγή συχνών και ανεπιθύμητη εκκινήσεων και διακοπών της κίνησης των υαλοπινάκων, οι θάλαμοι διεργασίας διαχωρίζονται υπό κενό μέσω των λεγόμενων «κλειδώσεων με σχισμή», δηλαδή, συνεχώς ανοιχτές σχισμές συνδυασμένες με ενδιάμεσο θάλαμο με δική του αντλία κενού (σχήμα 5.9). Τα κενά στις σχισμές διατηρούνται τόσο μικρά όσο είναι τεχνικά δυνατό να ελαχιστοποιηθεί η απόσταση και επομένως η αγωγιμότητα καθώς οι υαλοπίνακες μεταφέρονται μέσω αυτών. Η ταχύτητα άντλησης στον ενδιάμεσο θάλαμο διατηρείται όσο το δυνατόν ψηλότερα για να επιτευχθεί μία σημαντικά χαμηλότερη πίεση στον ενδιάμεσο θάλαμο από ότι στους θαλάμους διεργασίας.



Σχήμα 5.9 Αρχή του διαχωρισμού θαλάμων [2].

Αυτή η χαμηλότερη πίεση μειώνει σημαντικά τη ροή αερίου από έναν θάλαμο διεργασίας μέσω του ενδιάμεσου θαλάμου στον παρακείμενο θάλαμο διεργασίας. Για πολύ αυστηρές απαιτήσεις

διαχωρισμού μπορεί να χρειαστεί να τοποθετηθούν αρκετοί ενδιάμεσοι θάλαμοι μεταξύ δύο θαλάμων διεργασίας.

Η διαδικασία επίστρωσης γυαλιού απαιτεί υψηλές ροές αερίου για τις διεργασίες διασκορπισμού καθώς και χαμηλή συγκέντρωση υδρογονανθράκων. Η μόνη αντλία κενού που ικανοποιεί αυτές τις απαιτήσεις καθώς και σταθερότητα στον χρόνο της υψηλής ταχύτητας άντλησης είναι η στροβιλομοριακή αντλία που χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά.

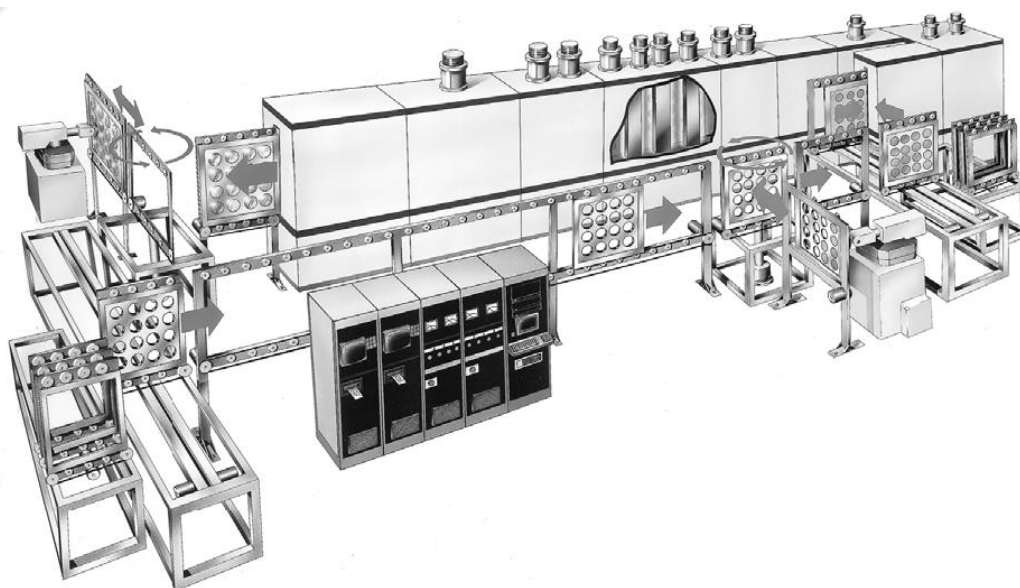
Ενώ οι θάλαμοι μεταφοράς και διεργασίας εκκενώνονται συνεχώς, οι θάλαμοι εισόδου και εξόδου πρέπει να αερίζονται περιοδικά και στη συνέχεια να εκκενώνονται πάλι. Λόγω των μεγάλων όγκων αυτών των θαλάμων και του μικρού χρόνου κύκλου, απαιτείται υψηλή ταχύτητα άντλησης. Παρέχεται από συνδυασμούς αντλιών περιστροφικού πτερυγίου και αντλιών Roots. Για ιδιαίτερα σύντομους χρόνους κύκλου χρησιμοποιούνται επίσης ψυχρές αντλίες Roots. Όλες οι κύριες λειτουργίες μιας μονάδας, όπως η μεταφορά γυαλιού, ο έλεγχος της διεργασίας διασκορπισμού και ο έλεγχος της αντλίας, πραγματοποιούνται πλήρως αυτόματα. Αυτός είναι ο μόνος τρόπος για να διασφαλιστεί η υψηλή παραγωγικότητα μαζί με την υψηλή ποιότητα των προϊόντων.

## **5.12 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΙΣΚΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Οι επικαλύψεις για μέσα αποθήκευσης δεδομένων μαγνητικής ή μαγνητοοπτικής συνήθως αποτελούνται από πολλές λειτουργικές επιστρώσεις που εφαρμόζονται σε μηχανικά φινιρισμένους δίσκους. Εάν τοποθετηθούν πολλές πλάκες σε έναν κοινό φορέα, οι διαδικασίες επίστρωσης μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ένα σύστημα χρησιμοποιώντας μια παρόμοια αρχή με αυτήν χρησιμοποιείται για την επίστρωση γυαλιού. Ωστόσο, οι περισσότεροι δίσκοι πρέπει να είναι επικαλυμμένοι και στις δύο πλευρές και υπάρχουν ουσιαστικά μεγαλύτερες απαιτήσεις χαμηλής μόλυνσης από σωματίδια σε σύγκριση με την επίστρωση γυαλιού. Επομένως, εν σειρά συστήματα για μνήμες δεδομένων χρησιμοποιούν έναν κατακόρυφο φορέα που διατρέχει το σύστημα (σχήμα 5.10). Οι κάθοδοι διασκορπισμού στους σταθμούς της

διεργασίας είναι τοποθετημένες και στις δύο πλευρές του φορέα έτσι ώστε η μπροστινή και η πίσω πλευρά του δίσκου να μπορούν να επικαλυφθούν ταυτόχρονα.

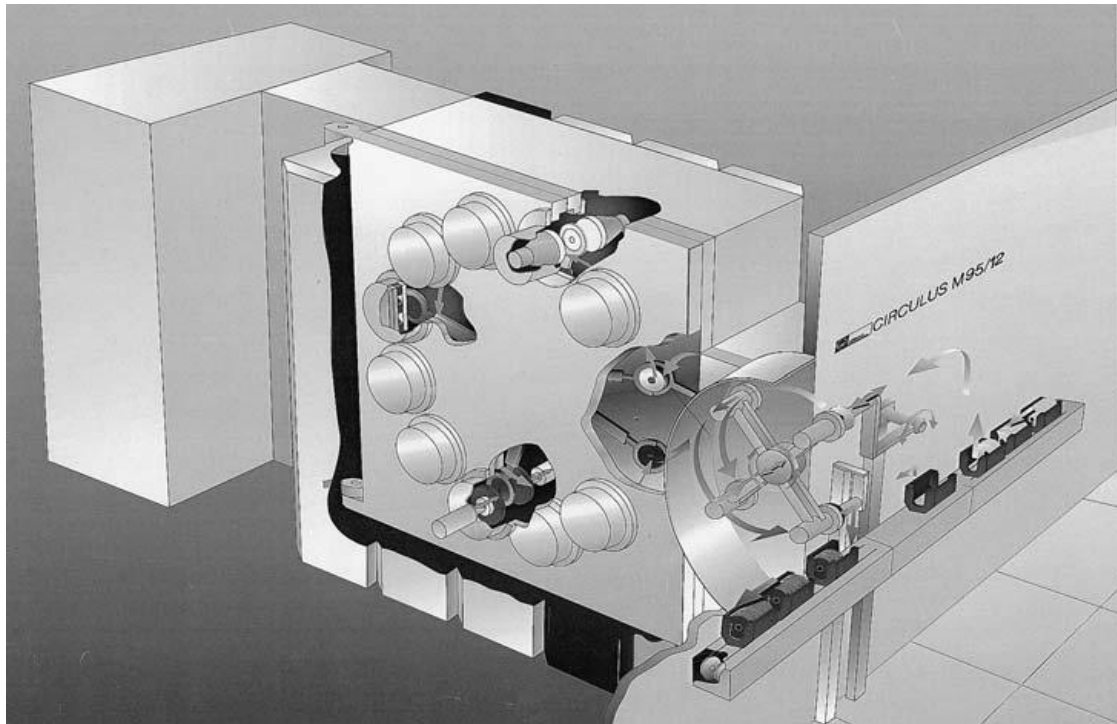
Μια εντελώς διαφορετική ιδέα εφαρμόζεται για την επίστρωση μεμονωμένων δίσκων. Σε αυτήν την περίπτωση οι διαφορετικοί σταθμοί διεργασίας είναι διατεταγμένοι σε κύκλο στον κενό θάλαμο (σχήμα 5.11). Οι δίσκοι μεταφέρονται μεμονωμένα σε έναν βραχίονα μεταφοράς σε σχήμα αστεριού. Ο βραχίονας μεταφοράς μεταφέρει τα υποστρώματα από τον ένα σταθμό επεξεργασίας στον επόμενο.



Σχήμα 5.10 Μονάδα για επίστρωση δίσκων αποθήκευσης δεδομένων με σύστημα μεταφοράς φορέα [2].

Κατά τη διάρκεια του κύκλου της διεργασίας όλες οι διαδικασίες είναι απενεργοποιημένες και οι σταθμοί συνδέονται μεταξύ τους υπό κενό. Μόλις ο βραχίονας έχει φτάσει στη θέση διεργασίας, οι μεμονωμένοι σταθμοί διαχωρίζονται ο ένας από τον άλλο. Κάθε σταθμός αντλείται μέσω της δικής του στροβιλομοριακής αντλίας και ξεκινούν οι επιμέρους διεργασίες. Όσο περισσότεροι σταθμοί διεργασίας υπάρχουν στο σύστημα, τόσο περισσότερες διεργασίες μπορούν να εκτελεστούν παράλληλα. Με τη σφράγιση των σταθμών διεργασίας, μπορεί να επιτευχθεί εξαιρετικός διαχωρισμός των επιμέρους διεργασιών. Ωστόσο, δεδομένου ότι το πιο αργό βήμα της διαδικασίας καθορίζει το χρονικό

διάστημα εκτέλεσης του κύκλου, δύο σταθμοί διεργασίας μπορεί να χρειαστεί να αφιερωθούν σε ιδιαίτερα χρονοβόρες διαδικασίες.



Σχήμα 5.11 Μονάδα για μεμονωμένη επίστρωση δίσκων αποθήκευσης δεδομένων [2].

## 6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

### 6.1 ΕΚΚΕΝΩΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΕΝΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ

Βασικά, προκύπτουν δύο ανεξάρτητα ερωτήματα σχετικά με το μέγεθος του συστήματος κενού:

1. Ποια είναι η αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης που πρέπει να διατηρεί η διάταξη της αντλίας ώστε να μειωθεί η πίεση σε ένα δεδομένο δοχείο σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα στην επιθυμητή τιμή;
2. Σε ποια τιμή πρέπει να φτάσει η αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης της διάταξης της αντλίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κενού έτσι ώστε τα αέρια και οι ατμοί που απελευθερώνονται μέσα στο δοχείο να μπορούν να αντληθούν γρήγορα ενώ η δεδομένη πίεση λειτουργίας του δοχείου, διατηρείται σταθερή και δεν γίνεται υπέρβαση αυτής;

Κατά τη διαδικασία άντλησης ορισμένων διεργασιών (π.χ. ξήρανση και θέρμανση), παράγονται ατμοί που δεν υπήρχαν αρχικά στον θάλαμο κενού, οπότε προκύπτει ένα τρίτο ερώτημα:

3. Ποια αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης πρέπει να φτάσει η διάταξη της αντλίας ώστε η διαδικασία να μπορεί να ολοκληρωθεί εντός ορισμένου χρόνου;

Η αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης μιας διάταξης αντλίας νοείται ως η πραγματική ταχύτητα άντλησης ολόκληρης της διάταξης της αντλίας που επικρατεί στο δοχείο. Η ονομαστική ταχύτητα άντλησης της αντλίας μπορεί τότε να υπολογίζεται από την πραγματική ταχύτητα άντλησης εάν η αντίσταση ροής (αγωγιμότητα) των διαφραγμάτων, ψυχρών παγίδων, φίλτρων, βαλβίδων και σωληνώσεων που είναι εγκατεστημένα μεταξύ της αντλίας και του δοχείου είναι γνωστή. Στον προσδιορισμό της απαιτούμενης ονομαστικής ταχύτητας άντλησης επιπλέον, υποτίθεται ότι το σύστημα κενού είναι στεγανό. ως εκ τούτου, ο ρυθμός διαρροής πρέπει να είναι τόσο μικρός ώστε τα αέρια που εισρέουν από έξω να αφαιρούνται αμέσως από τη συνδεδεμένη διάταξη αντλίας και η πίεση στο δοχείο να παραμένει σταθερή.

Οι ερωτήσεις που αναφέρονται παραπάνω είναι χαρακτηριστικές για τις τρεις πιο βασικές ασκήσεις της τεχνολογίας κενού:

1. Εκκένωση του δοχείου για να επιτευχθεί μια καθορισμένη πίεση.
2. Άντληση ποσοτήτων αερίου και ατμού που συνεχώς απελευθερώνονται μέσα στο δοχείο σε μία ορισμένη πίεση.
3. Άντληση των αερίων και των ατμών που παράγονται κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας και της πίεσης.

Η αρχική εκκένωση ενός θαλάμου κενού επηρεάζεται στις περιοχές μεσαίου, υψηλού και υπερ-υψηλού κενού από ποσότητες αερίου που συνεχώς ελευθερώνονται, γιατί σε αυτές τις περιοχές η διαφυγή αερίων και ατμών από τα τοιχώματα του δοχείου είναι τόσο σημαντική που καθορίζει μόνη της τις διαστάσεις και τη διάταξη του συστήματος κενού.

## **6.2 ΕΚΚΕΝΩΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΕΝΟΥ ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΗΓΕΣ ΑΕΡΙΟΥ Η ΑΤΜΟΥ**

Λόγω των παραγόντων που περιγράφονται παραπάνω, μια αξιολόγηση του χρόνου άντλησης πρέπει να είναι βασικά διαφορετικός για την εκκένωση ενός δοχείου στην περιοχή χαμηλού κενού από την εκκένωση στο μεσαίο και στο υψηλό κενό.

### **6.2.1 Εκκένωση θαλάμου στην περιοχή χαμηλού κενού**

Σε αυτή την περίπτωση η απαιτούμενη αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης  $S_{eff}$ , μιας διάταξης αντλίας κενού εξαρτάται μόνο από την απαιτούμενη πίεση  $P$ , τον όγκο  $V$  του δοχείου και τον χρόνο άντλησης  $t$ . Με σταθερή ταχύτητα άντλησης  $S_{eff}$  και υποθέτοντας ότι η τελική πίεση, το  $P_{end}$  που μπορεί να επιτευχθεί με τη διάταξη της αντλίας είναι τέτοιο ώστε  $P_{end} \ll P$ , η μείωση με το χρόνο της πίεσης  $P(t)$  σε ένα θάλαμο δίνεται από την εξίσωση:

$$-\frac{dP}{dt} = \frac{S_{eff}}{V} P \quad (6.1)$$



Ξεκινώντας από τα 1013 mbar (ατμοσφαιρική πίεση) τη χρονική στιγμή  $t=0$ , η πραγματική ταχύτητα άντλησης υπολογίζεται ως συνάρτηση του χρόνου άντλησης  $t$  από την εξίσωση (6.1) ως εξής:

$$\int_{1013}^P \frac{dP}{P} = -\frac{S_{eff}}{V} t \quad (6.2\alpha)$$

$$\Rightarrow \ln \frac{P}{1013} = -\frac{S_{eff}}{V} t \quad (6.2\beta)$$

$$\Rightarrow S_{eff} = \frac{V}{t} \ln \frac{1013}{P} = \frac{V}{t} 2,3 \log \frac{1013}{P} \quad (6.3)$$

Εισάγοντας την αδιάστατη ποσότητα:

$$\sigma = \ln \frac{1013}{P} = 2,3 \log \frac{1013}{P} \quad (6.4)$$

στην εξίσωση (6.3), η σχέση μεταξύ της πραγματικής ταχύτητας άντλησης,  $S_{eff}$ , και του χρόνου άντλησης  $t$  δίνεται από τη σχέση:

$$S_{eff} = \frac{V}{t} \sigma \quad (6.5)$$

Ο λόγος  $V/S_{eff}$  γενικά ορίζεται ως σταθερά χρόνου  $\tau$ . Έτσι ο χρόνος άντλησης ενός θαλάμου κενού από την ατμοσφαιρική πίεση σε μία πίεση  $P$  δίνεται από τη σχέση:

$$t = \tau \times \sigma \quad (6.6)$$

όπου:

$$\tau = \frac{V}{S_{eff}} \quad (6.7)$$

και η ποσότητα  $\sigma$  δίνεται από τη σχέση (6.4).

Η εξάρτηση του συντελεστή  $\sigma$  από την επιθυμητή τελική πίεση φαίνεται στο σχήμα 6.1. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα άντλησης των αντλιών περιστροφικού πτερυγίου και περιστροφικού

εμβόλου ενός σταδίου μειώνεται κάτω από τα 10 mbar με έρμα αερίου (gas ballast, εξοπλισμός που δεν επιτρέπει την συμπύκνωση των ατμών στο θάλαμο) και κάτω από το 1 mbar χωρίς έρμα αερίου. Αυτή η θεμελιώδης συμπεριφορά είναι διαφορετική για αντλίες διαφόρων μεγεθών και τύπων αλλά δεν πρέπει να αγνοείται στον προσδιορισμό της εξάρτησης του χρόνου άντλησης από το μέγεθος της αντλίας.

Πρέπει να επισημανθεί ότι οι εξισώσεις (6.1 έως 6.7) καθώς και το σχήμα 6.1 εφαρμόζονται μόνο όταν η τελική πίεση που μπορεί να επιτευχθεί από την χρησιμοποιούμενη αντλία είναι κατά πολλές τάξεις μεγέθους χαμηλότερη από την επιθυμητή πίεση.

#### Παράδειγμα 6.1

Θα αντληθεί θάλαμος κενού όγκου 500 λίτρων έως τελική πίεση 1 mbar μέσα σε 10 λεπτά. Ποια είναι η απαιτούμενη ενεργός ταχύτητα άντλησης;

Δεδομένα: 500 l=0,5 m<sup>3</sup>, 10 min=(1/6) h

Από την εξίσωση (6.3) παίρνουμε:

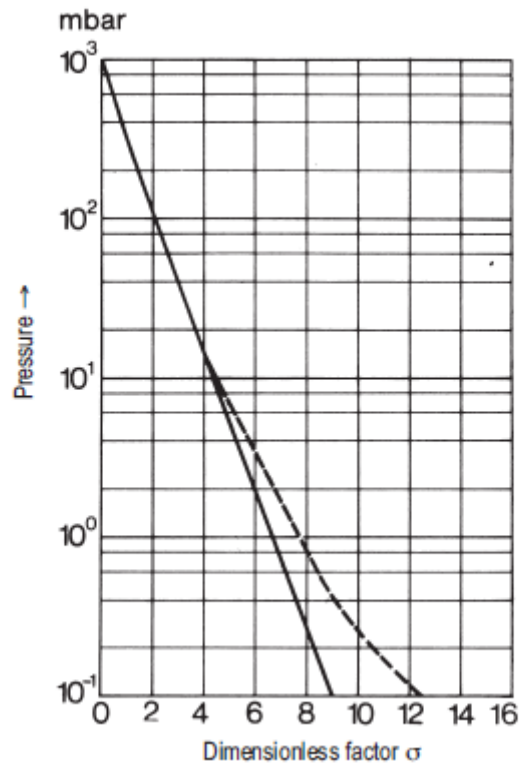
$$S_{eff} = \frac{0,5}{1/6} 2,3 \log \frac{1013}{1} = 20,8 \frac{m^3}{h}$$

Για το παράδειγμα που δίνεται παραπάνω διαβάζουμε την τιμή  $\sigma=7$  από την ευθεία γραμμή στο σχήμα 6.1. Ωστόσο, από τη διακεκομμένη γραμμή διαβάζουμε την τιμή  $\sigma=8$ . Σύμφωνα με την εξίσωση (6.5) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

$$S_{eff} = \frac{0,5}{1/6} 7 = 21 \frac{m^3}{h}$$

$$S_{eff} = \frac{0,5}{1/6} 8 = 24 \frac{m^3}{h}$$

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η ταχύτητα άντλησης μειώνεται κάτω από τα 10 mbar. Η απαιτούμενη αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης ανέρχεται επομένως σε περίπου 24 m<sup>3</sup>/h.



Σχήμα 6.1 Εξάρτηση του αδιάστατου παράγοντα  $\sigma$  για τον υπολογισμό του χρόνου άντλησης  $t$  σύμφωνα με την εξίσωση 6.6. Η διακεκομμένη γραμμή ισχύει για μονοβάθμιες αντλίες όπου η ταχύτητα άντλησης μειώνεται κάτω από τα 10 mbar [2].

### 6.2.2 Εκκένωση θαλάμου στην περιοχή υψηλού κενού

Είναι πολύ πιο δύσκολο να δοθούν γενικοί τύποι για χρήση στην περιοχή υψηλού κενού. Δεδομένου ότι ο χρόνος άντλησης για να επιτευχθεί μία δεδομένη πίεση υψηλού κενού εξαρτάται ουσιαστικά από την έκλυση αερίου από τις εσωτερικές επιφάνειες του θαλάμου, η κατάσταση και η προεπεξεργασία αυτών των επιφανειών έχουν πολύ μεγάλη σημασία στην τεχνολογία κενού. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει το χρησιμοποιούμενο υλικό να εμφανίζει πορώδεις περιοχές ή, ιδιαίτερα όταν πρόκειται να ακολουθήσει θέρμανση του θαλάμου, να περιέχει κοιλότητες. Οι εσωτερικές επιφάνειες πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λείες (ώστε η αληθινή επιφάνεια να ταυτίζεται με τη γεωμετρική επιφάνεια) και σχολαστικά καθαρισμένη και επίσης να έχει απολιπανθεί.

Η απελευθέρωση αερίων μέσα στον θάλαμο εξαρτάται πολύ από την επιλογή του υλικού και την κατάσταση της επιφάνειας και μπορεί να

προσδιοριστεί πειραματικά μόνο κατά περίπτωση από τη μέθοδο ανύψωσης της πίεσης: το σύστημα εκκενώνεται όσο το δυνατόν καλύτερα και τέλος η αντλία και ο θάλαμος απομονώνονται με βαλβίδα. Τώρα μετράται ο χρόνος για την αύξηση της πίεσης εντός του θαλάμου κατά μία ορισμένη ποσότητα, για παράδειγμα, μια δύναμη του 10. Η ποσότητα του αερίου  $Q$  που απελευθερώνεται ανά μονάδα χρόνου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{V\Delta P}{t} \quad (6.8)$$

όπου  $\Delta P$  είναι η μετρούμενη αύξηση πίεσης )

Η ποσότητα αερίου  $Q$  αποτελείται από το άθροισμα όλης της έκλυσης αερίου και όλων των πιθανών διαρροών. Το αν οφείλεται σε έκλυση αερίου ή σε διαρροή μπορεί να προσδιοριστεί με την ακόλουθη μέθοδο:

Η ποσότητα αερίου που προκύπτει από την έκλυση αερίου πρέπει να μικραίνει με το χρόνο ενώ η ποσότητα αερίου που εισέρχεται στο σύστημα από διαρροή παραμένει σταθερή με τον χρόνο. Πειραματικά, αυτή η διάκριση δεν γίνεται πάντα εύκολα, αφού συχνά χρειάζεται σημαντικό χρονικό διάστημα πριν η μετρούμενη καμπύλη πίεσης-χρόνου προσεγγίσει μια σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) τελική τιμή. Έτσι η αρχή αυτής της καμπύλης ακολουθεί μια ευθεία γραμμή για μεγάλο χρονικό διάστημα και έτσι προσομοιώνει τη διαρροή.

Εάν η έκλυση αερίου  $Q$  και η απαιτούμενη πίεση  $P_{end}$  είναι γνωστές, είναι εύκολο να προσδιορίσουμε την απαραίτητη αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης:

$$S_{eff} = \frac{Q}{P_{end}} \quad (6.9)$$

### Παράδειγμα 6.2

Ένας θάλαμος κενού 500 λίτρων μπορεί να έχει συνολική επιφάνεια (συμπεριλαμβανομένων όλων των συστημάτων) περίπου  $5 \text{ m}^2$ . Υποθέτουμε μία σταθερή έκλυση αερίου της τάξης των  $2 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$  ανά  $\text{m}^2$  επιφάνειας. Αυτή είναι μια αναμενόμενη τιμή όταν, για παράδειγμα, υπάρχουν βαλβίδες που συνδέονται με τον θάλαμο κενού.

Για να διατηρηθεί στο σύστημα μία πίεση  $1 \cdot 10^{-5}$  mbar, η αντλία πρέπει να έχει ταχύτητα άντλησης ίση με:

$$S_{eff} = \frac{5 \times 2 \times 10^{-4} \text{ mbar l/s}}{1 \times 10^{-5} \text{ mbar}} = 100 \text{ l/s}$$

Απαιτείται μία ταχύτητα άντλησης 100 l/s μόνο για τη συνεχή άντληση της ποσότητας του αερίου που ρέει μέσα από τις διαρροές ή που προέρχεται από έκλυση από τα τοιχώματα του θαλάμου. Εδώ η διαδικασία εκκένωσης είναι παρόμοια με το παράδειγμα 6.1. Ωστόσο, στην περίπτωση μιας αντλίας διάχυσης η διαδικασία άντλησης δεν ξεκινά από την ατμοσφαιρική πίεση, αλλά αντίθετα από την χαμηλότερη πίεση  $P_V$ . Τότε η εξίσωση (6.3) μετατρέπεται σε:

$$S_{eff} = \frac{V}{t} \ln \frac{P_V}{P} = \frac{V}{t} \ln K$$

Σε πίεση  $P_V = 2 \cdot 10^{-3}$  mbar, η συμπίεση  $K$  είναι στο παράδειγμά μας:

$$K = \frac{2 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-5}} = 200$$

Για να επιτευχθεί η τελική πίεση  $1 \cdot 10^{-5}$  mbar μέσα σε 5 λεπτά μετά την έναρξη της άντλησης με την αντλία διάχυσης απαιτείται μια αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης ίση με:

$$S_{eff} = \frac{500}{5 \times 60} 2,3 \log 200 = 9 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Αυτή είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με την αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης που απαιτείται για τη διατήρηση της τελικής πίεσης. Ο χρόνος άντλησης και το τελικό κενό στις περιοχές υψηλού και υπερ-υψηλού κενού εξαρτώνται κυρίως από το ρυθμό έκλυσης αερίου και τους ρυθμούς διαρροής.

### 6.2.3 Εκκένωση θαλάμου στην περιοχή μεσαίου κενού

Στην περιοχή χαμηλού κενού, ο όγκος του δοχείου είναι καθοριστικός για το χρόνο που απαιτείται για τη διαδικασία άντλησης. Στο υψηλό και υπερυψηλό κενό η έκλυση αερίου από τα τοιχώματα

παίζει σημαντικό ρόλο. Στην περιοχή μεσαίου κενού, η διαδικασία άντλησης επηρεάζεται και από τις δύο ποσότητες. Επιπλέον, στην περιοχή μεσαίου κενού, ιδιαίτερα με περιστροφικές αντλίες, η απόλυτη πίεση που μπορεί να επιτευχθεί δεν είναι πλέον αμελητέα. Αν η ποσότητα του αερίου που εισέρχεται στο θάλαμο είναι γνωστό ότι έχει ένα ρυθμό  $Q$  (σε  $\text{mbar}\cdot\text{l/s}$ ) από έκλυση αερίου από τα τοιχώματα και τις διάφορες διαρροές, η διαφορική εξίσωση (6.1) για τη διαδικασία άντλησης γίνεται:

$$\frac{dP}{dt} = - \frac{S_{eff} (P - P_{end}) - Q}{V} \quad (6.10)$$

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης είναι:

$$t = \frac{V}{S_{eff}} \ln \frac{(P_0 - P_{end}) - Q/S_{eff}}{(P - P_{end}) - Q/S_{eff}} \quad (6.11)$$

όπου:

$P_0$  είναι η πίεση στην αρχή της διαδικασίας άντλησης

$P$  είναι η επιθυμητή πίεση

Σε αντίθεση με την εξίσωση 6.2β, αυτή η εξίσωση δεν επιτρέπει μια οριστική λύση για το  $S_{eff}$ , επομένως, η αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης για μία γνωστή έκλυση αερίου δεν μπορεί να προσδιοριστεί από την καμπύλη χρόνου-πίεσης χωρίς περαιτέρω πληροφορίες.

Στην πράξη, λοιπόν, η ακόλουθη μέθοδος θα καθορίσει μια αντλία με επαρκώς υψηλή ταχύτητα άντλησης:

α) Η ταχύτητα άντλησης υπολογίζεται από την εξίσωση 6.3 ως συνάρτηση του όγκου του θαλάμου χωρίς έκλυση αερίου και τον επιθυμητό χρόνο άντλησης.

β) Βρίσκεται το πηλίκο του ρυθμού έκλυσης αερίου διά την ταχύτητα άντλησης. Αυτό το πηλίκο πρέπει να είναι μικρότερο από την απαιτούμενη πίεση. Για ασφάλεια, αυτό πρέπει να είναι περίπου δέκα φορές μικρότερο. Εάν δεν πληρείται αυτή η προϋπόθεση, θα πρέπει να επιλεγεί μια αντλία με αντίστοιχα υψηλότερη ταχύτητα άντλησης.

### 6.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Η αντλία υποστήριξης πρέπει επίσης να διαχειριστεί την ποσότητα του αερίου ή του ατμού που μεταφέρεται μέσω μιας αντλίας υψηλού κενού. Επιπλέον, στη λειτουργία της αντλίας υψηλού κενού (αντλία διάχυσης, στροβιλομοριακή αντλία), δεν πρέπει ποτέ να ξεπεραστεί, έστω και για σύντομο χρονικό διάστημα, η μέγιστη επιτρεπτή υποστηρικτική πίεση. Αν  $Q$  είναι η αποτελεσματική ποσότητα αερίου ή ατμού, η οποία αντλείται από την αντλία υψηλού κενού με αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης  $S_{eff}$  σε μια είσοδο που βρίσκεται σε πίεση  $P_A$ , αυτή η ποσότητα αερίου πρέπει οπωσδήποτε να μεταφερθεί από την αντλία υποστήριξης με ταχύτητα άντλησης  $S_V$  στην πίεση υποστήριξης  $P_V$ . Για την ποσότητα  $Q$ , ισχύει η εξίσωση συνέχειας:

$$Q = P_A S_{eff} = P_V S_V \quad (6.12)$$

Η απαιτούμενη ταχύτητα άντλησης της αντλίας υποστήριξης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_V = \frac{P_A}{P_V} S_{eff} \quad (6.12\alpha)$$

#### Παράδειγμα 6.3

Στην περίπτωση μιας αντλίας διάχυσης που έχει ταχύτητα άντλησης ίση με 400 l/s, σε πολλές περιπτώσεις η πραγματική ταχύτητα άντλησης είναι το 50 % της τιμής που αναφέρεται στα έντυπα των εταιρειών κατασκευής αντλιών. Η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση υποστήριξης είναι  $2 \cdot 10^{-1}$  mbar. Η ταχύτητα άντλησης που απαιτείται ως ελάχιστη για την αντλία υποστήριξης εξαρτάται από την πίεση εισαγωγής  $P_A$  σύμφωνα με την εξίσωση 6.12α.

Σε πίεση εισαγωγής  $P_A = 1 \cdot 10^{-2}$  mbar η ονομαστική ταχύτητα άντλησης για την αντλία υψηλού κενού όπως αναφέρεται στον κατάλογο είναι περίπου 100 l/s. Το 50 % αυτής της τιμής είναι 50 l/s. Επομένως η ταχύτητα άντλησης της αντλίας υποστήριξης πρέπει να ανέρχεται σε τουλάχιστον:

$$S_V = \frac{1 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-1}} 50 = 2,5 \frac{l}{s} = 9 \frac{m^3}{h}$$

Σε πίεση εισαγωγής  $P_A = 1 \cdot 10^{-3}$  mbar η αντλία έχει ήδη φτάσει στην ονομαστική ταχύτητα άντλησης 400 l/s. η αποτελεσματική ταχύτητα άντλησης είναι τώρα  $S_{\text{eff}} = 200$  l/s. Άρα η απαιτούμενη ταχύτητα άντλησης για την αντλία υποστήριξης ανέρχεται σε:

$$S_V = \frac{1 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-1}} 200 = 1 \frac{l}{s} = 3,6 \frac{m^3}{h}$$

Εάν η αντλία υψηλού κενού πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την άντληση ατμών μεταξύ  $10^{-3}$  και  $10^{-2}$  mbar, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια αντλία υποστήριξης που προσφέρει μια ονομαστική ταχύτητα άντλησης 12 m<sup>3</sup>/h, η οποία σε κάθε περίπτωση πρέπει να έχει ταχύτητα άντλησης ίση με 9 m<sup>3</sup>/h σε πίεση  $2 \cdot 10^{-1}$  mbar. Εάν δεν πρόκειται να αντληθούν ατμοί, μία περιστροφική αντλία πτερυγίων ενός σταδίου που λειτουργεί χωρίς έρμα αερίου ανταποκρίνεται σε αυτές τις απαιτήσεις στις περισσότερες περιπτώσεις. Εάν πρόκειται να αντληθούν, έστω και σε μικρή ποσότητα, ατμοί, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια αντλία έρματος αερίου δύο σταδίων ως αντλία υποστήριξης που προσφέρει την απαιτούμενη ταχύτητα άντλησης στα  $2 \cdot 10^{-1}$  mbar.

Εάν η αντλία υψηλού κενού πρόκειται να χρησιμοποιηθεί μόνο σε χαμηλότερες πιέσεις εισαγωγής από  $10^{-3}$  mbar, μια μικρότερη αντλία υποστήριξης θα κάνει τη δουλειά. Στην περίπτωση του παραδείγματος αυτή θα είναι μια αντλία που προσφέρει ταχύτητα άντλησης 6 m<sup>3</sup>/h. Αν οι πιέσεις εισαγωγής είναι ακόμη χαμηλότερες, κάτω από  $10^{-4}$  mbar, για παράδειγμα, η απαιτούμενη ταχύτητα άντλησης για την αντλία υποστήριξης μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 6.12α ως εξής:

$$S_V = \frac{1 \times 10^{-4}}{2 \times 10^{-1}} 200 = 0,1 \frac{l}{s} = 0,36 \frac{m^3}{h}$$

Θεωρητικά σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια μικρότερη αντλία υποστήριξης με ταχύτητα άντλησης περίπου 1 m<sup>3</sup>/h. Αλλά στην πράξη πρέπει να εγκατασταθεί μια μεγαλύτερη αντλία υποστήριξης γιατί, ειδικά κατά την εκκίνηση ενός συστήματος εκκένωσης, μπορεί να εμφανιστούν μεγάλες ποσότητες



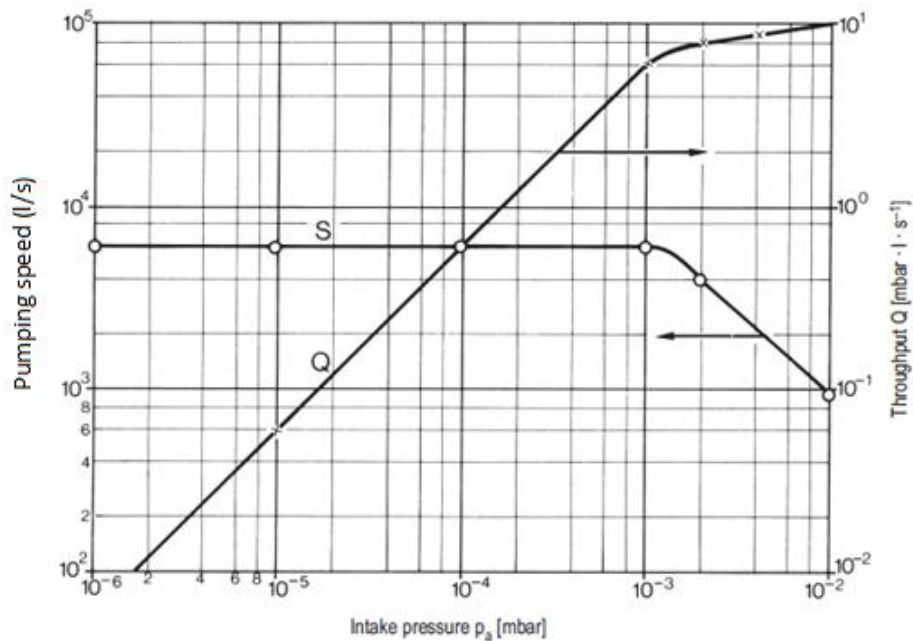
αερίου για σύντομες χρονικές περιόδους. Η λειτουργία της αντλίας υψηλού κενού κινδυνεύει εάν οι αυτές οι ποσότητες αερίου δεν μπορούν να αντληθούν αμέσως από την αντλία υποστήριξης. Αν εργαζόμαστε μόνιμα σε πολύ χαμηλές πιέσεις εισόδου, συνιστάται η εγκατάσταση ενός όγκου έρματος (δοχείο υπερχειλίσης) μεταξύ της αντλίας υψηλού κενού και της αντλίας υποστήριξης. Έτσι, η αντλία υποστήριξης θα πρέπει να λειτουργεί μόνο για σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, η μέγιστη επιτρεπτή πίεση υποστήριξης δεν πρέπει ποτέ να ξεπεραστεί. Το μέγεθος του όγκου του έρματος εξαρτάται από τη συνολική ποσότητα αερίου που πρέπει αντλείται στη μονάδα του χρόνου. Εάν αυτός ο ρυθμός είναι πολύ χαμηλός, εφαρμόζεται ο εμπειρικός κανόνας που λέει ότι 0,5 λίτρο όγκου έρματος επιτρέπει 1 λεπτό χρόνο άντλησης με την αντλία υποστήριξης απομονωμένη.

Για την εύρεση του πιο κατάλληλου μεγέθους αντλίας υποστήριξης, σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια γραφική μέθοδος. Σε αυτή την περίπτωση το σημείο εκκίνησης είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα άντλησης των αντλιών σύμφωνα με την εξίσωση 6.12. Η χαρακτηριστική ταχύτητα άντλησης μιας αντλίας προκύπτει εύκολα από τη μετρούμενη ταχύτητα άντλησης (ρυθμός ροής όγκου) της αντλίας για μια αντλία διάχυσης 6000 l/s (καμπύλη S στο σχήμα 6.2). Για να υπολογίσουμε τη χαρακτηριστική τιμή Q (καμπύλη Q στο σχήμα 6.2), θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν οι τιμές του S με την αντίστοιχη τιμή  $P_A$  του και να σχεδιαστεί η γραφική παράσταση. Εάν υποθεθεί ότι η πίεση εισόδου της αντλίας διάχυσης δεν υπερβαίνει τα  $10^{-2}$  mbar, η μέγιστη τιμή του Q είναι  $9,5 \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$

Ως εκ τούτου, το μέγεθος της αντλίας υποστήριξης πρέπει να είναι τέτοιο ώστε αυτή η τιμή του Q να μπορεί να επιτευχθεί από την αντλία σε πίεση εισαγωγής (της αντλίας υποστήριξης) η οποία είναι ίση ή κατά προτίμηση χαμηλότερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη υποστηρικτική πίεση της αντλίας διάχυσης. δηλαδή  $4 \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$  για την αντλία διάχυσης των 6000 l/s.

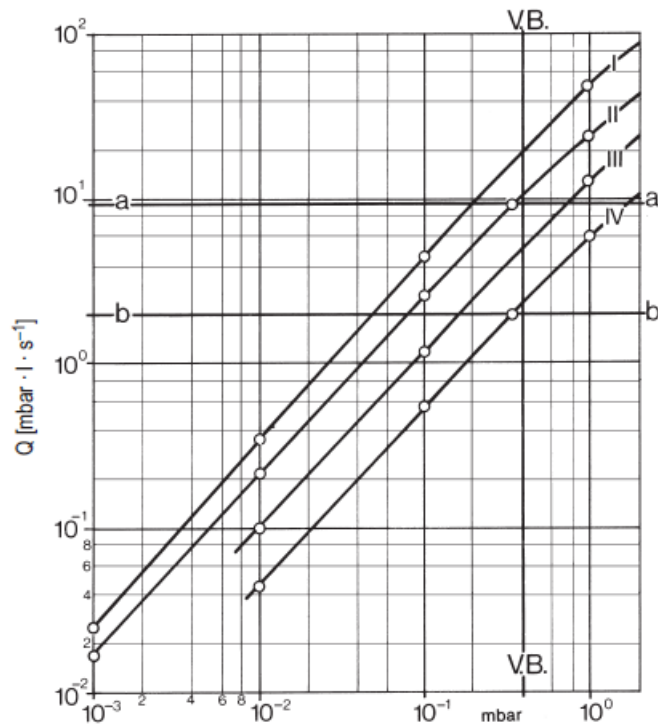
Αφού ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά των εμπορικά διαθέσιμων περιστροφικών αντλιών δύο σταδίων με έμβολο, μπορούν να υπολογιστούν οι καμπύλες Q με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιείται για την εύρεση της καμπύλης Q για την αντλία διάχυσης στο σχήμα 6.2. Το αποτέλεσμα είναι η ομάδα των καμπυλών Q, 1 έως 4 στο σχήμα 6.3. Οι τέσσερις περιστροφικές αντλίες εμβόλου 2 σταδίων

που θεωρήθηκαν έχουν ονομαστικές ταχύτητες 200, 100, 50 και 25 m<sup>3</sup>/h, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.2 Ταχύτητα άντλησης μιας αντλίας διάχυσης 6000 l/s [2].

Η κρίσιμη πίεση υποστήριξης της αντλίας διάχυσης 6000 l/s έχει σημειωθεί ως V.B. ( $P = 4 \cdot 10^{-1}$  mbar). Η μέγιστη τιμή του  $Q = 9,5$  mbar · l/s εμφανίζεται ως οριζόντια γραμμή a. Αυτή η γραμμή τέμνει τις τέσσερις καμπύλες Q. Μετρώντας από δεξιά προς τα αριστερά, το πρώτο σημείο τομής που αντιστοιχεί σε πίεση εισαγωγής κάτω από την κρίσιμη πίεση υποστήριξης των  $4 \cdot 10^{-1}$  mbar αντιστοιχεί στην καμπύλη II. Αυτό αντιστοιχεί στην περιστροφική αντλία εμβόλου δύο σταδίων με ονομαστική ταχύτητα άντλησης ίση με 100 m<sup>3</sup>/h. Επομένως, αυτή η αντλία είναι η σωστή αντλία υποστήριξης για την αντλία διάχυσης των 6000 l/s.



Σχήμα 6.3 Καμπύλες  $Q$  για τέσσερις περιστροφικές αντλίες δύο σταδίων [2].

Ωστόσο, εάν η διαδικασία άντλησης είναι τέτοια ώστε η μέγιστη τιμή  $Q$  των  $9,5 \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$  είναι απίθανο να επιτευχθεί, μπορεί φυσικά να χρησιμοποιηθεί μια μικρότερη αντλία υποστήριξης. Αυτό γίνεται φανερό, για παράδειγμα, από τη γραμμή  $b$  στο σχήμα 6.3, η οποία αντιστοιχεί σε μέγιστη τιμή  $Q$  μόνο  $2 \text{ mbar l/s}$ . Το πρώτο σημείο τομής που αντιστοιχεί σε πίεση εισαγωγής κάτω από την κρίσιμη πίεση υποστήριξης σε αυτή την περίπτωση ανήκει στην καμπύλη I. Συνεπώς μία περιστροφική αντλία εμβόλου δύο σταδίων με ταχύτητα άντλησης  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  θα ήταν επαρκής.

#### 6.4 ΕΚΚΕΝΩΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΜΕ ΕΚΛΥΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΑΤΜΩΝ

Οι προηγούμενες παρατηρήσεις σχετικά με τον χρόνο άντλησης τροποποιούνται σημαντικά εάν προκύψουν ατμοί και αέρια κατά τη διαδικασία εκκένωσης. Αν μέσα στον θάλαμο κενού συμβαίνουν

διεργασίες θέρμανσης ιδιαίτερα, είναι δυνατόν να προκύψουν μεγάλες ποσότητες ατμών. Τότε ο απαραίτητος χρόνος άντλησης εξαρτάται από πολύ διαφορετικές παραμέτρους. Η αυξανόμενη θέρμανση των τοιχωμάτων του θαλάμου συνοδεύεται από αυξημένη έκλυση αερίων και ατμών από τα τοιχώματα. Ωστόσο, επειδή οι υψηλότερες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα την επιταχυνόμενη διαφυγή αερίων και ατμών από τους τοίχους, ο ρυθμός με τον οποίο μπορούν να αφαιρεθούν από τον θάλαμο είναι επίσης αυξημένος.

Το μέγεθος της επιτρεπόμενης θερμοκρασίας για τη διαδικασία θέρμανσης καθορίζεται ουσιαστικά από το υλικό του θαλάμου. Οι ακριβείς χρόνοι άντλησης μπορούν στη συνέχεια να εκτιμηθούν με υπολογισμό μόνο εάν είναι γνωστή η ποσότητα των εξελισσόμενων και αντλούμενων ατμών. Ωστόσο, αυτό συμβαίνει σπάνια, εκτός από τις διαδικασίες ξήρανσης.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως θέμα την τεχνολογία κενού και τις εφαρμογές της. Ο όρος κενό μπορεί να οριστεί ως μία κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένας χώρος όταν έχει λιγότερη ύλη από το περιβάλλον του. Το κενό μπορεί να ταξινομηθεί σε διάφορες περιοχές ανάλογα με την τιμή της πίεσης. Για την εκτέλεση υπολογισμών σε ένα σύστημα κενού είναι απαραίτητη η γνώση των παραμέτρων που καθορίζουν την ροή ενός αερίου.

Η τεχνολογία κενού έχει πάρα πολλές εφαρμογές στην βιομηχανία και στην επιστημονική έρευνα. Για παράδειγμα, στην επιστήμη επιφανειών υπάρχει η ανάγκη για καθαρές επιφάνειες. Συνεπώς, είναι απαραίτητο οι επιφάνειες να διατηρούνται σε κενό ώστε να μην αντιδρούν με τα αέρια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα ενός συνηθισμένου δωματίου.

Η ανάγκη για την επίτευξη όλο και χαμηλότερων πιέσεων οδήγησε στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών αντλιών που εκμεταλλεύονται διαφορετικές αρχές της φυσικής και της χημείας.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1] Dorothy M. Hoffman, Bawa Singh, John H. Thomas, III, Handbook of vacuum science and technology, Academic Press (1998).
- 2] Walter Umrath, Fundamentals of Vacuum Technology, Leybold Vacuum (2007).
- 3] Nagamitsu Yoshimura, Vacuum Technology, Practice for Scientific Instruments, Springer (2008).
- 4] David J. Hucknall, Vacuum Technology and Applications, Butterworth-Heinemann Ltd (1991).
- 5] E. Al-Dmour, Fundamentals of Vacuum Physics and Technology, Proceedings of the 2017 CERN–Accelerator–School course on Vacuum for Particle Accelerators, Glumsløvn, (Sweden).
- 6] <https://www.indiamart.com/proddetail/turbomolecular-pumps-magnetically-levitated-1936629512.html> (πρόσβαση στις 4-2-2022).
- 7] <https://www.carlroth.com/com/en/c/diaphragm-vacuum-pump-me-4-series-me-4nt/p/kh50.1> (πρόσβαση στις 3-2-2022).
- 8] [http://www.chinathz.com/english/Products/Roots\\_Vacuum\\_Pumps\(ZJP-150\).htm](http://www.chinathz.com/english/Products/Roots_Vacuum_Pumps(ZJP-150).htm) (πρόσβαση στις 3-2-2022).
- 9] <https://www.dvevacuum.com/product/oil-diffusion-vacuum-pumps/> (πρόσβαση στις 4-2-2022).
- 10] <https://www.evpvacuum.com/vacuum-adsorption-pump.html> (πρόσβαση στις 4-2-2022).
- 11] <http://www.kykytech.com/sale-11610889-ultra-high-vacuum-sputter-ion-pump-oil-less-7-10-8-pa-ultimate-pressure.html> (πρόσβαση στις 4-2-2022).
- 12] <http://www.fergutec.com/shop/leybold-heraeus-rpk-800-cryo-pump-cold-head/> (πρόσβαση στις 4-2-2022).