

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ & ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ:

ΠΡΟΤΥΠΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ
ΕΠΑΝΑΣΥΜΠΙΕΣΗ ΘΕΡΜΟΥ-ΥΓΡΟΥ ΑΕΡΑ

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΜΠΟΝΤΟΖΟΓΛΟΥ ΒΑΣΙΛΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΒΟΛΟΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1997

αρ. εισ. 64 / Π.Α.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000055738



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 1986/1

Ημερ. Εισ.: 08-10-1997

Δωρεά:

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ

1997

ΑΠΟ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σαν σκοπό έχει την υπολογιστική μελέτη της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με επανασυμπύεση θερμού-υγρού αέρα. Η λειτουργία της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης στηρίζεται στην ενσωμάτωση των βασικών αρχών της μηχανικής συμπύεσης ατμών (MVC-mechanical vapour compression), της εξάτμισης εκτόνωσης (flash evaporation) και της κλασματικής απόσταξης (rectification) σε μια πρωτότυπη συνεργία.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, αρχικά, γίνεται μια ανασκόπηση των διαφόρων μεθόδων αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα. Δίνεται έμφαση κυρίως στις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης, αλλά παρουσιάζεται και η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης. Ταυτόχρονα δίνονται και κάποια στοιχεία για το κόστος λειτουργίας των διαφόρων μεθόδων όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης μαζί με ένα σκαρίφημα της συσκευής. Με μια θερμοδυναμική ανάλυση που γίνεται, υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας στο στάδιο της συμπύεσης (συμπιεστής) και γίνεται σύγκριση με τις άλλες μεθόδους αφαλάτωσης. Από τη θερμοδυναμική ανάλυση προκύπτει ότι όταν η συσκευή λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση ή σε πιέσεις λίγο μεγαλύτερες, αλλά κοντά στην τάση ατμών του νερού στη θερμοκρασία λειτουργίας, η κατανάλωση ενέργειας στο συμπιεστή της συσκευής είναι μικρότερη σε σύγκριση με την κατανάλωση ενέργειας των άλλων μεθόδων.

Έπειτα γίνεται προσομοίωση με κώδικα Η/Υ σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN των φαινομένων μεταφοράς που συμβαίνουν στο στάδιο της εξάτμισης για μία φυσαλίδα. Με την βοήθεια του προγράμματος διερευνάται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων, σημαντικών για το σχεδιασμό της συσκευής και προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η φυσαλίδα δεν ψύχεται καθόλου από την αρχική της θερμοκρασία, κάτι που σημαίνει ότι η μετάδοση θερμότητας στη φυσαλίδα γίνεται πολύ γρήγορα από την

είσοδό της στο νερό. Άρα η κυρίαρχη αντίσταση στον κορεσμό του αέρα είναι η μεταφορά μάζας (διάχυση του υδρατμού στον αέρα της φυσαλίδας).

- Τα μικρά μεγέθη φυσαλίδας κορένονται σε υδρατμό πιο γρήγορα από ότι τα μεγάλα.

- Θεωρητικά, αρκούν 1 με 2 εκατοστά στήλης νερού για να κορεσθούν οι φυσαλίδες σε υδρατμό.

- Όσο πιο μικρό γίνεται το μέγεθος της φυσαλίδας, τόσο πιο μικρό διάστημα ολοκλήρωσης απαιτείται για να αποφεύγονται οι αριθμητικές αστάθειες στα αποτελέσματα.

Στο τελευταίο τμήμα της διπλωματικής περιγράφονται τα διάφορα τμήματα και η διαδικασία συναρμολόγησης συσκευής πρόδρομης κλίμακας (pilot-scale) που κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών για να ελεγχθεί πειραματικά η ιδέα της αφαλάτωσης με συμπίεση υγρού αέρα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	1
1.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2. ΕΞΑΤΜΙΣΗ.....	3
1.2.1. Μηχανική Συμπύεση Ατμών (MVC-Mechanical Vapour Compression).....	3
1.2.2. Εξάτμιση Εκτόνωσης (MSF-Multi Stage Flash evaporation).....	6
1.2.3. Προβλήματα θερμικών μεθόδων.....	8
1.2.4. Εγκαταστάσεις εξάτμισης με ηλιακή ενέργεια.....	9
1.3. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ.....	10
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	13
2.1. Η ΠΡΟΤΥΠΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....	13
2.1.2. Αρχή λειτουργίας.....	13
2.2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	16
2.2.1. Θεωρία.....	16
(α) Λειτουργία της συσκευής με καθαρό νερό.....	16
(β) Λειτουργία της συσκευής με θαλασσινό νερό-Επίδραση αλατιού (NaCl).....	18
2.2.2. Αποτελέσματα.....	19
2.2.3. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	19
2.3. ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ.....	27
2.3.1. Θεωρία.....	27
2.3.2. Αποτελέσματα.....	40

(α) Ακρίβεια υπολογισμών.....	40
(β) Επίδραση διαμέτρου φυσαλίδας και ύψους στήλης νερού.....	41
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	49
3.1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.....	49
3.2. ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.....	53
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	55
5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	57
Α. Πίνακες θερμοδυναμικού υπολογισμού.....	58
Β. Πρόγραμμα FORTRAN, λογικό διάγραμμα και αποτελέσματα.....	65
Γ. Τεχνικά και κατασκευαστικά στοιχεία συμπιεστή και υλικού πορώδους διαφράγματος.....	79
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Σε χώρες όπου υπάρχει μεγάλη ηλιοφάνεια υπάρχει συνήθως και έλλειψη πόσιμου νερού. Παίρνοντας υπόψη ότι τα 3/4 της επιφάνειας της Γης αποτελούνται από θάλασσες μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει πρόβλημα ποσότητας αλλά πρόβλημα ποιότητας του νερού.

Το θαλασσινό νερό περιέχει κυρίως NaCl (αλάτι). Στους ωκεανούς η περιεκτικότητα είναι 3,51% κατά μάζα. Υπάρχουν μερικές εξαιρέσεις όπως π.χ. η Νεκρή θάλασσα που έχει πολύ μεγαλύτερες περιεκτικότητες.

Εκτός από το NaCl, το θαλασσινό νερό περιέχει και διάφορα άλλα άλατα και ιδίως CaSO₄ (γύψο) που αποτίθεται στις θερμαντικές επιφάνειες. Η περιεκτικότητα σε άλατα του νερού της Μεσογείου θαλάσσης είναι (Σωτηρόπουλος, 1996):

	% μάζα
NaCl	3,01
MgCl ₂	0,39
MgSO ₄	0,39
CaSO ₄	0,14
Διάφορα	<u>0.11</u>
	4,04

Παρατηρούμε ότι το ποσοστό των αλάτων είναι σχετικά μικρό.

Τον τελευταίο καιρό λοιπόν αναπτύχθηκαν πολλές ερευνητικές δραστηριότητες γύρω από το αντικείμενο της αφαλάτωσης του νερού οι οποίες μέχρι σήμερα έδωσαν

το αποτέλεσμα ότι υπάρχουν κυρίως τρεις βασικοί τρόποι αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού.

1.Εξάτμιση 2.Κρυστάλλωση 3.Αντίστροφη όσμωση

Η φυσική αρχή λειτουργίας διαφέρει σημαντικά σ' αυτές τις διεργασίες. Κατά την εξάτμιση πρέπει να προσδώσουμε θερμότητα ώστε να εξατμίσουμε το νερό από το διάλυμα. Η θερμότητα εξάτμισης είναι πολύ μεγάλη, περίπου 2500 KJ/Kg. Κατά την κρυστάλλωση του νερού πρέπει να παραλάβουμε με ψυκτική μηχανή τη θερμότητα κρυστάλλωσης που είναι περίπου 300 KJ/Kg. Η αντίστροφη όσμωση απαιτεί ελάχιστη μηχανική ενέργεια για τη λειτουργία των αντλιών υψηλής πίεσης (περίπου 70 bar). Το πρόβλημα εδώ είναι η υψηλή τιμή των ημιπερατών μεμβρανών και η δυσκολία εύρεσης της κατάλληλης μεμβράνης, η οποία να μπορεί να διαχωρίσει το χλωριούχο νάτριο σε σχετικά υψηλή συγκέντρωση και συγχρόνως να παρέχει ικανοποιητικούς ρυθμούς ροής καθαρού νερού. Οι συνήθεις μεμβράνες οξεικής κυτταρίνης δεν θεωρούνται ικανοποιητικές και διεξάγονται έρευνες για την εύρεση νέων βελτιωμένων τύπων. Τελευταία, χρησιμοποιούνται νέες τροποποιημένες μεμβράνες οξεικής κυτταρίνης, οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή στις υψηλές πιέσεις (π.χ. οξεική-νιτρική κυτταρίνη και οξεική-μεθακρυλική κυτταρίνη).

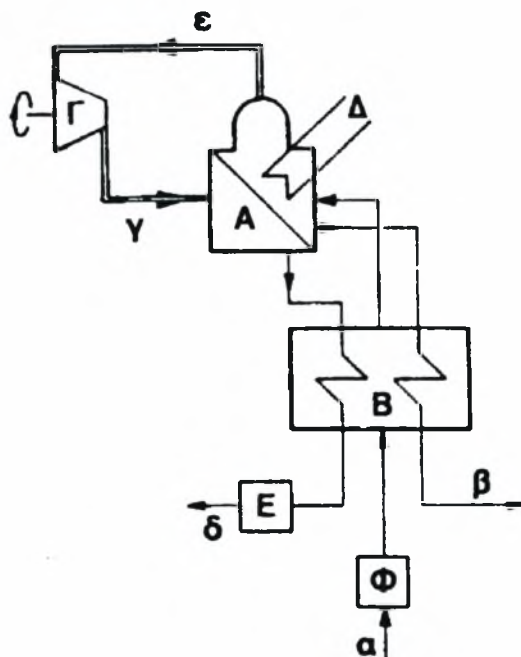
Και οι τρεις παραπάνω τρόποι αφαλάτωσης δίνουν πόσιμο νερό με πολύ λιγότερα από 500 ppm NaCl (1 ppm=1 mg/lit) που είναι οι προδιαγραφές. Το πρόβλημα της επιλογής, ποια από τις τρεις μεθόδους θα χρησιμοποιηθεί, είναι κυρίως οικονομικό. Για την αντίστροφη όσμωση η κατανάλωση ενέργειας είναι 5-6 KWh/m³ παραγόμενου πόσιμου νερού, ενώ για την εξάτμιση είναι 10-20 KWh/m³ (Rodriguez-Girones, M. Rodrigues, J. Peres, J. Veza, 1996). Για την ολοκληρωμένη οικονομική αξιολόγηση πρέπει να συνυπολογιστεί και το κόστος συντήρησης και απόσβεσης του απαιτούμενου εξοπλισμού. Συνήθως δεν μπορούμε εκ των προτέρων να δώσουμε μια ξεκάθαρη απάντηση εάν δεν γνωρίζουμε καλώς τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν στον εκάστοτε τόπο. Π.χ. όταν υπάρχει φθηνή απόβλητη θερμότητα προτιμάται η εξάτμιση. Στα ελληνικά νησιά με τους λίγους κατοίκους φαίνεται να είναι οικονομική η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης. Στις μονάδες αφαλάτωσης μικρού και μεσαίου μεγέθους προτιμάται είτε η μέθοδος της μηχανικής

συμπίεσης ατμών (MVC-mechanical vapour compression), είτε η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης.

1.2. ΕΞΑΤΜΙΣΗ

1.2.1. Μηχανική Συμπίεση Ατμών (MVC-Mechanical Vapour Compression)

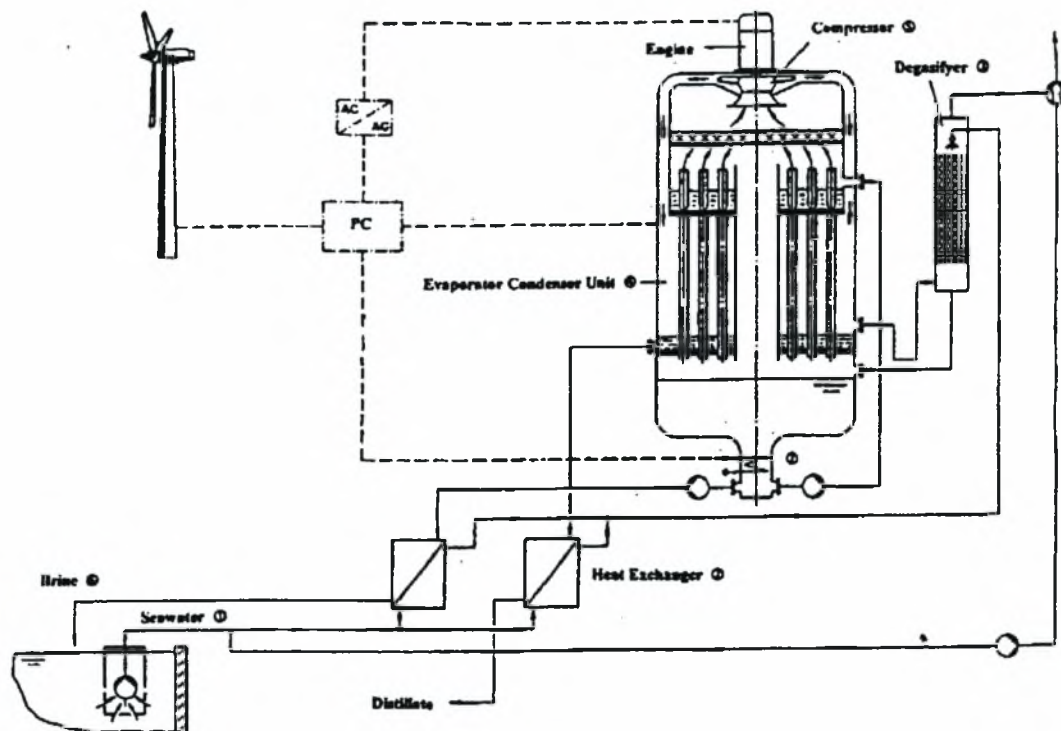
Για την παραγωγή ποσοτήτων πόσιμου νερού πάνω από 2000 m³/ημέρα, η τεχνική MVC είναι μία από τις πιο αναπτυγμένες τεχνικές αφαλάτωσης. Η λειτουργική απόδοση, η αξιοπιστία και η οικονομική απόδοση αυτής της τεχνικής έχουν αποδειχθεί παγκόσμια. Η αρχή λειτουργίας μιας τέτοιας μονάδας δίνεται στο σχήμα 1.1 (Σωτηρόπουλος, 1996).



A. εξατμιστήρας, B. προθερμαντήρας, Γ. συμπιεστής, Δ. πρόσθετη ηλεκτρική θέρμανση, E. φίλτρο με ενεργό άνθρακα, Φ. προσθήκη χημικών ουσιών, α. είσοδος θαλασσινού νερού, β. απαγωγή άλμης, γ,ε. ατμός, δ. συμπύκνωμα ατμού

Σχήμα 1.1: Παραγωγή πόσιμου νερού από θαλασσινό με θερμοσυμπίεση

Στο παρακάτω σχήμα 1.2 φαίνεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας αφαλάτωσης μιας μονάδας αυτού του τύπου που τροφοδοτείται με ενέργεια που παράγει μια ανεμογεννήτρια (Damm, Dr. Gaiser, Kowalczyk, Dr. Plantikow, 1996).



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα ροής της διεργασίας αφαλάτωσης μιας μονάδας MVC.

Το εισερχόμενο θαλασσινό νερό (1) προθερμαίνεται από δύο εναλλάκτες πλακών (2), οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα. Σ' αυτούς τους εναλλάκτες η θερμότητα των εξερχόμενων συμπυκνώματος και άλμης μεταφέρεται στο εισερχόμενο θαλασσινό νερό. Στη συνέχεια το θαλασσινό νερό οδηγείται στον εξαεριωτή (3) όπου εξαεριώνεται για να απομακρυνθούν τα αέρια CO_2 και O_2 (διαλυμένο) και να αποφευχθεί η διάβρωση. Η πίεση μειώνεται στο επίπεδο της τάσης ατμών του προθερμασμένου θαλασσινού νερού και τα διαλυμένα αέρια διαφεύγουν και απομακρύνονται.

Το εξαεριωμένο νερό οδηγείται στη συνδυασμένη μονάδα εξάτμισης-συμπύκνωσης (4), η οποία είναι ένας εναλλάκτης πίπτουσας ροής αποτελούμενος από περίπου 1000 αυλούς. Με κατάλληλη διάταξη που περιλαμβάνει μία αντλία και ειδικά ακροφύσια τύπου jet, το θαλασσινό νερό, που εισέρχεται στο πάνω μέρος,

διανέμεται ομοιόμορφα σ' όλους τους αυλούς έτσι ώστε να δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα (φίλμ) που κατέρχεται προς τα κάτω με την επίδραση της βαρύτητας. Καθώς το υγρό στρώμα κατέρχεται τους αυλούς, θερμαίνεται, οπότε παράγονται πρόσθετοι ατμοί των οποίων η ταχύτητα συνεχώς αυξάνει. Το υγρό στρώμα επιταχύνεται από τη ροή των ατμών και σταθεροποιείται ως προς το πάχος. Οι ατμοί, που προκύπτουν μ' αυτόν τον τρόπο, στη συνέχεια συμπιέζονται στο συμπιεστή (5) σε υψηλότερη πίεση και θερμοκρασία. Έπειτα οδηγούνται στην εξωτερική επιφάνεια των αυλών όπου ο υδρατμός συμπυκνώνεται. Η θερμότητα που αποδίδεται, μεταφέρεται στο εσωτερικό των αυλών προκαλώντας την εξάτμιση.

Συνήθως η συγκέντρωση σε αλάτι της άλμης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 7%. Σε διαφορετική περίπτωση η άλμη οδηγείται πίσω στη θάλασσα. Εκτός από το συμπιεστή η ανεμογεννήτρια τροφοδοτεί με ενέργεια και μία ηλεκτρική αντίσταση (7) ενσωματωμένη στον εξατμιστήρα για τη θέρμανση του θαλασσινού νερού.

Η μονάδα που περιγράφηκε παραπάνω εγκαταστάθηκε στο νησί της Βαλτικής θάλασσας Ruegen από τη γερμανική εταιρεία SEP το 1992. Η απόδοσή της είναι από 5 έως 12,5 m³ γλυκού νερού την ώρα, με κατανάλωση ενέργειας που ποικίλλει από 9 έως 20 KWh/m³.

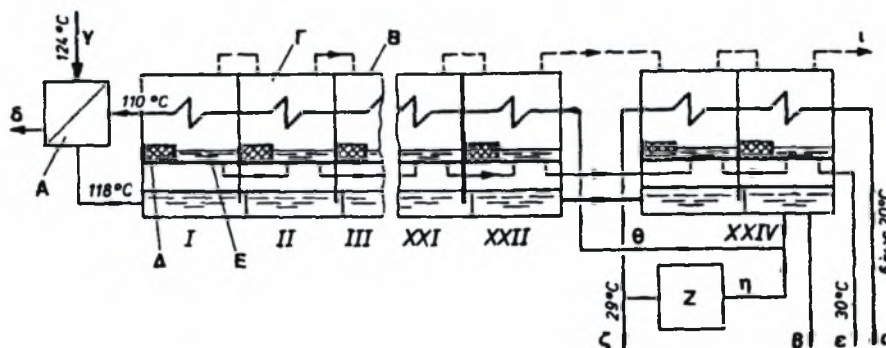
Συνήθως χρησιμοποιούνται μονάδες εξάτμισης βρασμού με πολλά βήματα. Ο εξατμιστήρας πίπτουσας ροής χρησιμοποιείται συνήθως γιατί επιτυγχάνονται υψηλές τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας, μικρή πτώση πίεσης, μηδενικές υδροστατικές πιέσεις και επομένως μικρές διαφορές θερμοκρασίας. Προτιμάται η παράλληλη ροή έτσι ώστε στις υψηλές περιεκτικότητες άλατος όπου υπάρχει ο κίνδυνος επικάλυψης πάνω στη θερμαντική επιφάνεια να επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες.

Μια πειραματική μονάδα αυτού του τύπου κατασκευάστηκε το 1960-61 στις ΗΠΑ στο Freeport του Τέξας για παράγωγη 4000 m³/ημέρα. Η ειδική κατανάλωση ατμού ήταν 1 Kg θερμαντικού ατμού για 11 Kg γλυκού νερού. Ο θερμαντικός ατμός ήταν κορεσμένος σε θερμοκρασία 136 °C, το θαλασσινό νερό εξήρχετο από τον τελευταίο εξατμιστήρα με θερμοκρασία 46 °C. Για τα 12 βήματα αυτό σημαίνει μια μέση διαφορά θερμοκρασίας $\Delta t_{sch}=7,5$ K.

1.2.2. Εξάτμιση Εκτόνωσης (MSF-Multi Stage Flash evaporation)

Σε μονάδες πολλαπλής εκτόνωσης παράγεται σήμερα περισσότερο από το μισό πόσιμο νερό από αφαλάτωση. Ήδη υπάρχουν σε λειτουργία μονάδες με παραγωγή 6000 m³/ημέρα.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση μιας τέτοιας μονάδας μπορεί να ποικίλλει από περίπτωση σε περίπτωση. Στο σχήμα 1.3 δίνεται το διάγραμμα ροής της μονάδας που κατασκευάστηκε στη Γερμανία, νήσος Helgoland από τις εταιρίες G.H.H. και M.A.N (Σωτηρόπουλος, 1996). Μπήκε σε λειτουργία το 1972 και έχει παραγωγή 800 m³/ημέρα. Έχει συνολικά 24 βαθμίδες. Κάθε βαθμίδα έχει κυκλική διατομή και περιλαμβάνει τον εναλλάκτη (δέσμη σωλήνων), το δοχείο διαχωρισμού και τον διαχωριστήρα σταγονιδίων. Δύο συνεχόμενες βαθμίδες αποτελούν μια ενότητα. Οι διάφορες ενότητες συνδέονται και έτσι δίνουν έναν επιμήκη «σωλήνα».

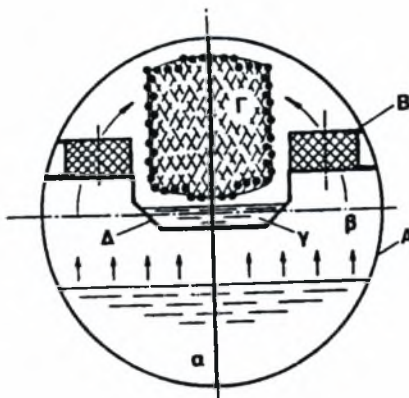


A. τελικός προθερμαντήρας, B. κυλινδρικό περίβλημα, Γ. χώρος εκτόνωσης, Δ. διαχωριστήρας σταγονιδίων, E. συλλογή συμπυκνώματος, Z. προπαρασκευή και εξαερίωση θαλασσινού νερού, α. είσοδος θαλασσινού νερού, β. έξοδος συμπυκνωμένου διαλύματος, γ. θερμαντικός ατμός, δ. συμπύκνωμα θερμαντικού ατμού, ε. πόσιμο νερό, ζ. κύκλος ψυκτικού νερού, η. προπαρασκευασμένο θαλασσινό νερό, θ. τροφοδοσία μονάδας, ι. αδρανή αέρια προς αντλία κενού

Σχήμα 1.3: Μονάδα αφαλάτωσης εξατμιστήρα πολλαπλής εκτόνωσης. Παράδειγμα νησιού Helgoland (κατά G.H.H.-M.A.N.)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4 στο κάτω μέρος της διατομής βρίσκεται το θαλασσινό νερό (α), το οποίο κατά την εκτόνωση εξατμίζεται. Οι αχνοί (β) περνάνε το

διαχωριστήρα σταγονιδίων (B) και συμπυκνώνονται στη δέσμη σωλήνων (Γ). Το απόσταγμα (γ) που αποτελεί και το πόσιμο νερό συγκεντρώνεται στο χώρο (Δ).



Σχήμα 1.4: Διατομή του εξατμιστήρα του σχήματος 1.3

Η λειτουργία της όλης μονάδας φαίνεται από το διάγραμμα ροής του σχ.1.3. Το θαλασσινό νερό (α) εισέρχεται στην τελευταία ενότητα (βαθμίδα XXIII και XXIV) και λειτουργεί κυρίως ως ψυκτικό μέσο για τους συμπυκνωτήρες αχνών.

Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του νερού απάγεται και μόνο το ρεύμα η οδηγείται στο σύστημα εξατμιστήρος αφού πρώτα προπαρασκευαστεί. Η προπαρασκευή συνίσταται στην προσθήκη H_2SO_4 για να ρυθμιστεί το pH στην τιμή 7,2-7,5. Τα άλατα που δημιουργούν αποθέσεις στις θερμαντικές επιφάνειες $CaCO_3$ και $MgCO_3$ μετατρέπονται σε $CaSO_4$ και $MgSO_4$ που είναι κάπως καλύτερα διαλυτά. Στη συνέχεια το θαλασσινό νερό εξαεριώνεται με κενό για να απομακρυνθούν τα αέρια CO_2 (χημική αντίδραση με H_2SO_4) και O_2 (διαλυμένο) για να αποφευχθεί η διάβρωση. Η περαιτέρω πορεία του θαλασσινού νερού προκύπτει εύκολα από το σχήμα. Στα διάφορα βήματα το θαλασσινό νερό προθερμαίνεται μέσα στους σωλήνες των συμπυκνωτήρων έως τους $110\text{ }^{\circ}C$. Στον τελικό προθερμαντήρα που λειτουργεί με θερμαντικό ατμό, η θερμοκρασία φτάνει τους $118\text{ }^{\circ}C$ με αντίστοιχη πίεση για να μην γίνει βρασμός.

Απ' εκεί και πέρα το θαλασσινό νερό και το συμπύκνωμα (πόσιμο νερό) ρέουν παράλληλα ώστε να εκτονώνονται από βαθμίδα σε βαθμίδα.

Κατά την απλή διαδρομή εξατμίζονται μόνο 0,15 Kg ανά Kg θαλασσινού νερού. Για λόγους ενεργειακής οικονομίας το θαλασσινό νερό ανακυκλοφορεί και μόνο ένα μικρό μέρος (β) απάγεται έτσι ώστε να προκύπτει η τελική περιεκτικότητα

$\xi_s=0,07$ Kg NaCl/Kg γλυκού νερού. Η ειδική κατανάλωση ατμού είναι 1 Kg θερμαντικού ατμού για 8,4 Kg πόσιμου νερού.

1.2.3. Προβλήματα θερμικών μεθόδων.

Τα κύρια προβλήματα που παρουσιάζονται στη θερμική αφαλάτωση του θαλασσινού νερού είναι δύο:

- 1.Επικάθιση αλάτων στις θερμαντικές επιφάνειες.
- 2.Υλικά κατασκευής.

1.Επικάθιση αλάτων στις θερμαντικές επιφάνειες.

Το γεγονός αυτό περιορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των μονάδων. Έχουν προταθεί ειδικές μέθοδοι αποσκλήρυνσης που θα επέτρεπαν την αύξηση της θερμοκρασίας από 120 °C στους 180 °C οπότε θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες βαθμίδες με οικονομικότερα αποτελέσματα (40% λιγότερος θερμαντικός ατμός).

2.Υλικά κατασκευής.

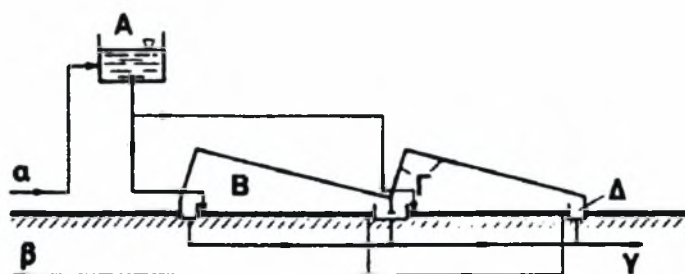
Το θαλασσινό νερό είναι πολύ διαβρωτικό. Οι συσκευές, σωληνώσεις κ.λ.π. μπορούν να κατασκευαστούν μόνο από υλικά υψηλής ποιότητας που να αντέχουν και στις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Μέχρι τώρα έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς κράματα χαλκού-νικελίου όπως π.χ. CuNi10Fe1,2 και CuNi30Fe0,5 (το τελευταίο για θερμοκρασίες πάνω από 120 °C).

Κράματα αλουμινίου αντέχουν τη θερμοκρασία των 130 °C. Τον τελευταίο καιρό άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως το τιτάνιο (Ti). Τα ανοξειδωτα κράματα δεν χρησιμοποιούνται εδώ γιατί παρουσιάζουν τη διάβρωση διάτρησης.

Παρατηρούμε ότι τόσο οι αποθέσεις αλάτων όσο και η διάβρωση περιορίζουν τα θερμοκρασιακά επίπεδα στην αφαλάτωση γύρω στους 120 °C. Παρ' όλα τα ακριβά υλικά που χρησιμοποιούνται, το μεγαλύτερο μέρος του κόστους παραγωγής του πόσιμου νερού είναι έξοδα ενέργειας που αντιστοιχούν στο 30 έως 50% των συνολικών εξόδων. Κάτω απ' αυτές τις προϋποθέσεις θα ήταν λογικό να αναζητήσουμε μια φθηνή πηγή θερμικής ενέργειας σε χαμηλά θερμοκρασιακά επίπεδα. Μια τέτοια πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή ενέργεια.

1.2.4. Εγκαταστάσεις εξάτμισης με ηλιακή ενέργεια

Μια από τις πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής πόσιμου νερού από θαλασσινό με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας είναι η εγκατάσταση στο νησί Πάτμος που προτάθηκε από τον Έλληνα Καθηγητή Δεληγιάννη. Παράγει 50 m³/ημέρα. Η αρχή λειτουργίας αυτής της εγκατάστασης δίνεται στο σχήμα 1.5 (Σωτηρόπουλος, 1996).



A. δεξαμενή νερού, B. μονάδα εξάτμισης, Γ. γυάλινο κάλυμμα, Δ. συλλογή αποστάγματος, α. είσοδος θαλασσινού νερού, β. έξοδος συμπυκνωμένου διαλύματος, γ. πόσιμο νερό

Σχήμα 1.5: Απόσταξη θαλασσινού νερού με ηλιακή ενέργεια

Το θαλασσινό νερό αφού περάσει από τα κατάλληλα φίλτρα οδηγείται σε αβαθείς λεκάνες οι οποίες έχουν καλυφθεί με τζάμια. Οι λεκάνες έχουν εσωτερικά επίχρισμα ασφάλτου ή επένδυση μαύρου ελαστικού. Οι ηλιακές ακτίνες περνούν το γυαλί και το νερό και απορροφώνται στον πυθμένα της λεκάνης. Το νερό θερμαίνεται και εξατμίζεται από την επιφάνειά του. Οι ατμοί συμπυκνώνονται στην εσωτερική επιφάνεια του τζαμιού (Γ) και ρέουν κατά μήκος της κεκλιμένης επιφάνειας όπου και συγκεντρώνονται στον αγωγό (Δ). Το συμπύκνωμα στην επιφάνεια του τζαμιού, λόγω αυξημένης αντανάκλαστικότητας, ελαττώνει την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού παράγονται 5-6 λίτρα/m² και ημέρα. Το χειμώνα μόνο το 10% αυτής της ποσότητας.

Η εγκατάσταση στην Πάτμο έχει έκταση 8650 m². Η λειτουργία είναι διακεκομμένης μορφής, δηλ. το θαλασσινό νερό αφήνεται να εξατμιστεί έως το σημείο όπου θα άρχιζαν να αποτίθενται ανθρακικά ή θειικά άλατα και στη συνέχεια ανανεώνεται.

Τον τελευταίο καιρό άρχισαν να σχεδιάζονται και μονάδες αφαλάτωσης πολλαπλών βημάτων όπου η θερμική ενέργεια παίρνεται από ηλιακή μέσω ηλιοσυλλεκτών. Επειδή οι απαιτούμενες θερμοκρασίες είναι της τάξης των 120-130 °C για την παραγωγή του απαιτούμενου ατμού χρησιμοποιούνται κυλινδροπαραβολικά ηλιόθερμα.

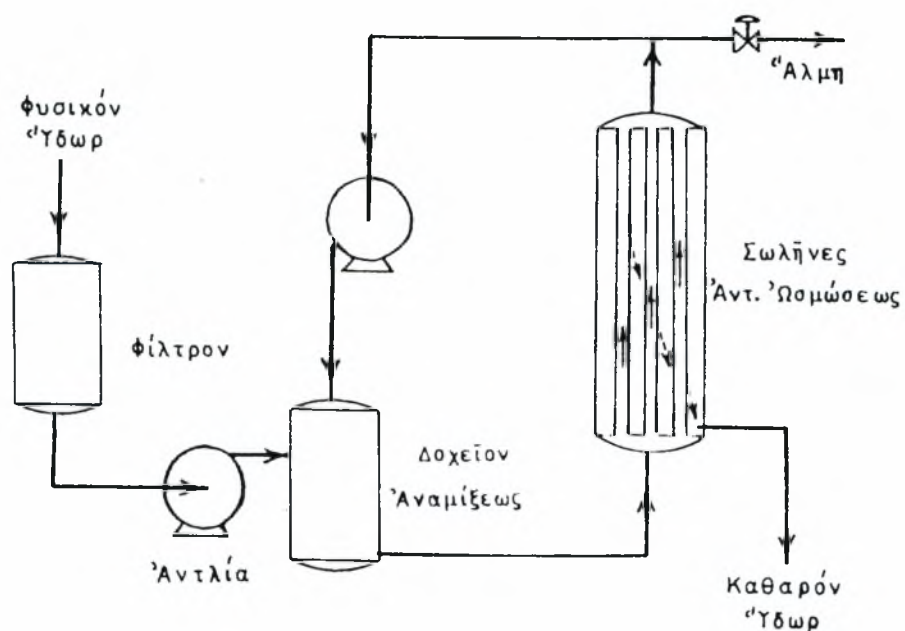
1.3. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης χρησιμοποιούνται ημιπερατές μεμβράνες για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού. Οι κυριότερες διατάξεις μεμβρανών που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής (Σαραβάκος, 1976):

1. Πορώδεις σωλήνες (½ inch).
2. Πλάκες μετά στηριγμάτων (Plate and frame).
3. Σπειροειδή περιβλήματα (Spiral wound).
4. Τριχοειδείς σωλήνες (Permassep).

Οι τρεις πρώτες διατάξεις χρησιμοποιούν μεμβράνες οξεικής κυτταρίνης, ενώ η τέταρτη χρησιμοποιεί τριχοειδείς σωλήνες nylon.

Το σχήμα 1.6 παριστάνει το διάγραμμα ροής μιας μονάδας αφαλάτωσης με τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης με το σύστημα πορωδών σωλήνων.

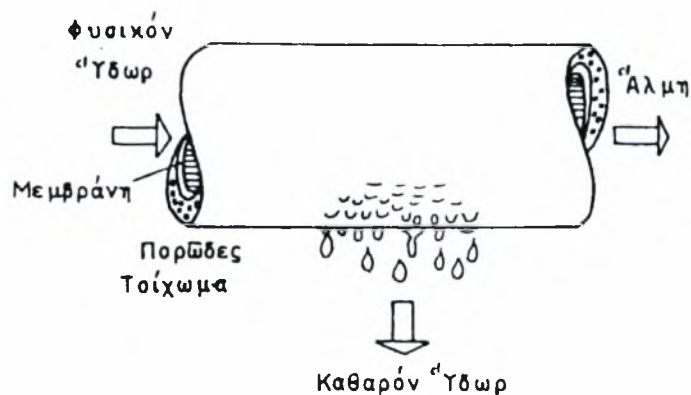


Σχήμα 1.6: Διάγραμμα ροής μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης.

Αρχικά, είναι αναγκαίο το θαλασσινό νερό να καθαριστεί, με κατακάθιση ή διήθηση, από τα διάφορα αιωρήματα (άμμος, υδροξείδιο του σιδήρου κ.λ.π.), τα οποία προκαλούν απόφραξη των πόρων των μεμβρανών. Έπειτα συμπιέζεται με αντλίες σε πίεση 30 bar μέσα στους πορώδεις σωλήνες όπου επέρχεται διαχωρισμός σε καθαρό πόσιμο νερό και συμπυκνωμένο διάλυμα αλάτων (άλη).

Σε όλους τους διαχωρισμούς με μεμβράνες παρατηρείται το φαινόμενο της πολώσεως συγκεντρώσεως (concentration polarization), το οποίο είναι εντονότερο στην αντίστροφη όσμωση. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών (π.χ. αλάτων), λόγω της ροής του νερού διαμέσου της μεμβράνης. Μ' αυτόν τον τρόπο αυξάνει η οσμωτική πίεση του διαλύματος κοντά στη μεμβράνη με αποτέλεσμα την ελάττωση της ροής του νερού και συγχρόνως την αύξηση του ρυθμού διάχυσης των διαλυμένων ουσιών. Η πόλωση συγκεντρώσεως των μεμβρανών μπορεί να προκαλέσει αποθέσεις δυσδιάλυτων αλάτων (π.χ. ανθρακικού ασβεστίου) ή κολλοειδών μεγαλομορίων, τα οποία ελαττώνουν σημαντικά το ρυθμό ροής του νερού.

Για την ελάττωση της πολώσεως συγκεντρώσεως χρησιμοποιούνται μεγάλες ταχύτητες στους σωλήνες, οι οποίες επιτυγχάνονται με ανακυκλοφορία του διαλύματος. Ο μηχανισμός διαχωρισμού με το σύστημα του πορώδους σωλήνα φαίνεται στο σχήμα 1.7. Το καθαρό νερό διέρχεται διαμέσου της μεμβράνης προς το εξωτερικό του σωλήνα όπου συλλέγεται και απομακρύνεται του συστήματος. Το ποσοστό του λαμβανομένου καθαρού νερού αποτελεί περίπου το 80% του νερού τροφοδοτήσεως.



Σχήμα 1.7: Πορώδης σωλήνας με μεμβράνη αντίστροφης όσμωσης.

Η άλμη που εξέρχεται από το σύστημα βρίσκεται υπό πίεση και μέρος της ενέργειας μπορεί να ανακτηθεί με εκτόνωση σε ειδικό στρόβιλο. Για οικονομικούς λόγους η εκτόνωση αυτή ενδείκνυται μόνο σε συστήματα υψηλής πίεσης (100 bar).

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

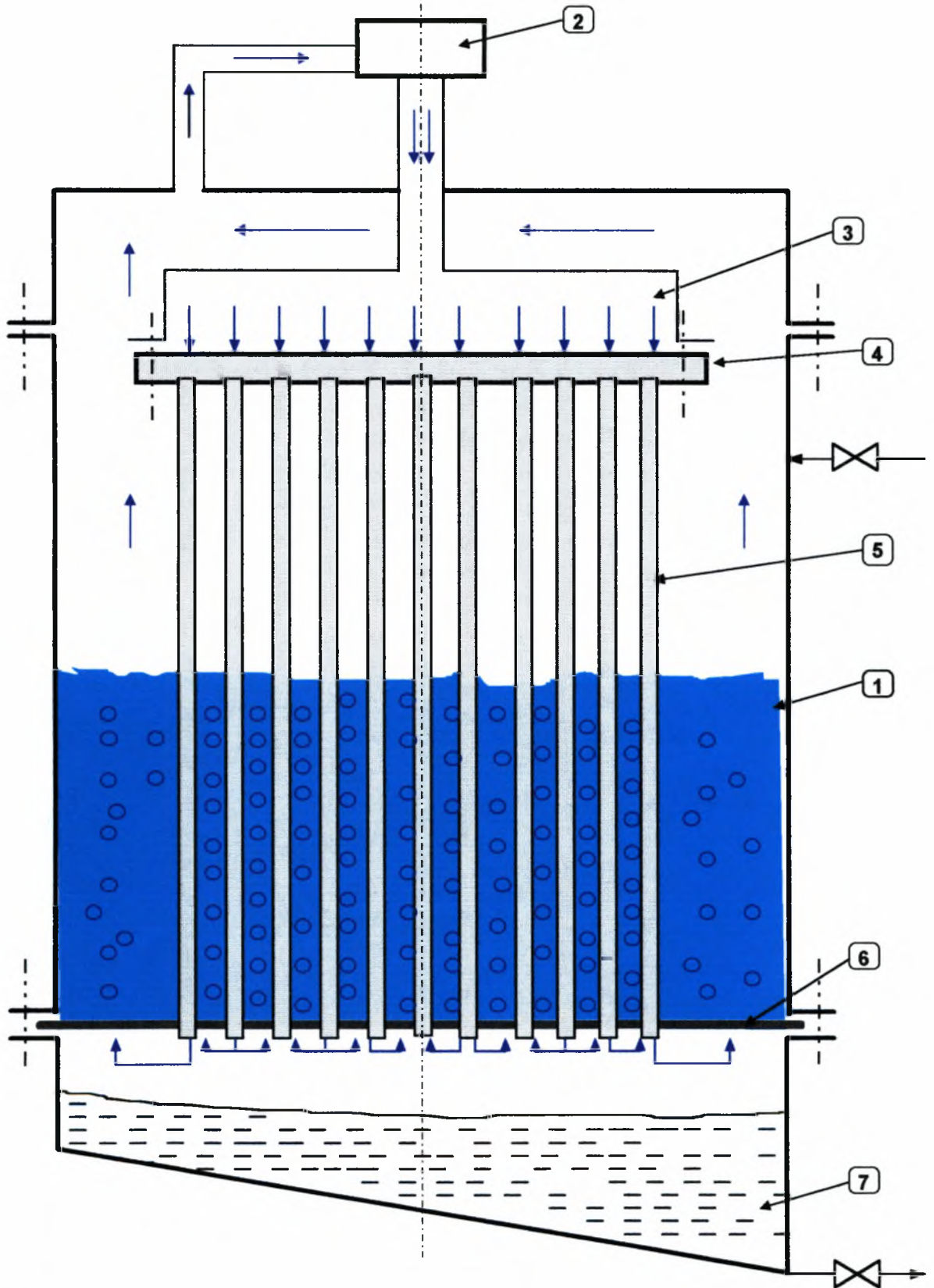
2.1. Η ΠΡΟΤΥΠΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Η πρότυπη συσκευή αφαλάτωσης έχει κατασκευαστεί, βρίσκεται στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών και πρόκειται να τεθεί σε λειτουργία. Η βασική ιδέα της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης στηρίζεται στην ενσωμάτωση των βασικών αρχών της μηχανικής συμπίεσης ατμών (MVC-mechanical vapour compression), της εξάτμισης εκτόνωσης (flash evaporation) και της κλασματικής απόσταξης (rectification) σε μια καινούρια μέθοδο εξάτμισης, η οποία ταυτόχρονα μπορεί να αποτελέσει μία πρότυπη μέθοδο θερμικής αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού (Λίτινας, 1997). Το σχέδιο της πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης σε σκαρίφημα φαίνεται στο σχήμα 2.1 στη σελ. 15. Τα κύρια μέρη της συσκευής είναι ο χώρος του θαλασσινού νερού (1), ο συμπιεστής (2) και ο διανομέας του (3), οι αυλοί που βυθίζονται στο θαλασσινό νερό (5) και η αυλοφόρος πλάκα (4) πάνω στην οποία στηρίζονται οι αυλοί, το πορώδες διάφραγμα (6) και ο χώρος συλλογής του γλυκού νερού (7). Σ' αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι τα κατασκευαστικά σχέδια της συσκευής εκπονήθηκαν από τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Βλαχογιάννη Μιχάλη, ο οποίος είχε την επίβλεψη και την όλη επιμέλεια της κατασκευής των διαφόρων τμημάτων της συσκευής.

2.1.2. Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής βασίζεται στη χρήση αέρα ως εργαζόμενου μέσου σε ένα κλειστό κύκλο, αποτελούμενο από το στάδιο της εξάτμισης και το

στάδιο της συμπύκνωσης. Αέρας εισέρχεται στο χώρο του θαλασσινού νερού (1), με τη μορφή φυσαλίδων μικρής διαμέτρου. Στο χώρο του θαλασσινού νερού γίνεται η εξάτμιση του νερού και η διάχυση του προκύπτοντος υδρατμού στον αέρα της φυσαλίδας. Οι φυσαλίδες διαμορφώνονται κατά το πέρασμα του αέρα διαμέσου του πορώδους διαφράγματος (6) και δημιουργούν άφθονη επιφάνεια για εξάτμιση. Ταυτόχρονα, η παρουσία των φυσαλίδων προκαλεί ανάδευση του νερού με αποτέλεσμα αφενός την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας, αφετέρου τη μείωση σχηματισμού επικαθήσεων. Το κορεσμένο μίγμα αέρα-υδρατμού που προκύπτει, συμπιέζεται από το συμπιεστή (2) σε ελαφρά υψηλότερη πίεση (κατά $dP=0,1 \text{ bar}$) και οδηγείται από το διανομέα του συμπιεστή (3) στους αυλούς (5). Εξαιτίας της αυξημένης πίεσης, η συμπύκνωση προκύπτει σε υψηλότερη θερμοκρασία μέσα στους αυλούς και η αποδιδόμενη λανθάνουσα θερμότητα μεταδίδεται στο στάδιο της εξάτμισης (χώρος θαλασσινού νερού). Το συμπύκνωμα κυλάει στους αυλούς και συλλέγεται στο χώρο συλλογής του γλυκού νερού (7) στο κάτω μέρος της συσκευής, ενώ ο αέρας και η ποσότητα του υδρατμού που δεν έχει συμπυκνωθεί ανακυκλώνεται.



- | | |
|---------------------------------|-------------------------------|
| 1. Χώρος θαλασσινού νερού. | 2. Συμπιεστής. |
| 3. Διανομέας συμπιεστή. | 4. Αυλοφόρος πλάκα. |
| 5. Αυλοί. | 6. Πορώδες διάφραγμα. |
| 7. Χώρος συλλογής γλυκού νερού. | —→ Ροή μίγματος αέρα-υδρατμού |

Σχήμα 2.1: Αρχή λειτουργίας πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης

2.2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

2.2.1. Θεωρία

Σε αυτήν την παράγραφο θα μελετηθεί, από θερμοδυναμική σκοπιά, η βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας της συσκευής, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας στο συμπιεστή. Οι δύο βασικές παράμετροι είναι η θερμοκρασία και η πίεση του χώρου εξάτμισης. Ειδικότερα, για δεδομένη θερμοκρασία T_1 , όσο η πίεση P_1 προσεγγίζει την τάση ατμών του νερού, $P_{sat}(T_1)$, τόσο η αναλογία του αέρα στην αέρια φάση, που προκύπτει από την εξάτμιση, μειώνεται.

(α). Λειτουργία της συσκευής με καθαρό νερό

Αρχικά, υποτίθεται ότι η συσκευή λειτουργεί με καθαρό νερό. Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή της αρχής λειτουργίας της συσκευής το αέριο μίγμα αέρα-υδρατμού, που προκύπτει από το στάδιο της εξάτμισης, είναι κορεσμένο. Δηλαδή, το μίγμα περιέχει τη μέγιστη ποσότητα υδρατμού που μπορούν να πάρουν οι φυσαλίδες αέρα, από το νερό. Οπότε, η μερική πίεση του υδρατμού στο μίγμα είναι ίση με την τάση ατμών του νερού στη θερμοκρασία του μίγματος, δηλαδή $P_{υδρατμού} = P_{sat}$.

Η ενέργεια που θα δαπανηθεί στο συμπιεστή, θα υπολογιστεί ανά Kg υδρατμού που συμπυκνώνεται, σύμφωνα με τον παρακάτω υπολογισμό:

Το πρώτο βήμα που θα πρέπει να γίνει, θεωρώντας ότι το μίγμα βρίσκεται σε κατάσταση ιδανικού αερίου, θα είναι να υπολογιστεί η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του μίγματος, $C_{pμίσματος}$. Η θερμοχωρητικότητα του μίγματος υπολογίζεται παίρνοντας τη μέση μοριακή θερμοχωρητικότητα των μερών του μίγματος. Αν $Y_{υδρατμού}$ και $Y_{αέρα}$ είναι τα μοριακά κλάσματα του υδρατμού και του αέρα στο μίγμα, αντίστοιχα, τότε:

$$C_{pμίσματος} = Y_{υδρατμού} C_{pυδρατμού} + Y_{αέρα} C_{pαέρα}$$

$$= (\text{moles}_{υδρατμού} / \text{moles}_{μίσματος}) C_{pυδρατμού} + (\text{moles}_{αέρα} / \text{moles}_{μίσματος}) C_{pαέρα}$$

$$= \left(\frac{P_{SAT}}{P_1} \right) \cdot C_{\text{υδρατμού}} + \left(\frac{(P_1 - P_{SAT})}{P_1} \right) \cdot C_{\text{αέρα}}, \quad (2.1)$$

σε Joule/mol. μίγματος K ,

όπου από θερμοδυναμικούς πίνακες λαμβάνεται:

$C_{\text{υδρατμού}}=1,9$ KJ/Kg K=34,2 J/mol.K και $C_{\text{αέρα}}=1$ KJ/Kg K=29 J/mol.K, για τις ειδικές θερμοχωρητικότητες του υδρατμού και του αέρα, αντίστοιχα.

Θεωρείται ότι η πίεση πριν το συμπιεστή είναι P_1 και η θερμοκρασία T_1 , και ότι ο συμπιεστής προκαλεί μια αύξηση της πίεσης κατά $\Delta P=0,1$ bar. Οπότε η πίεση μετά το συμπιεστή θα είναι $P_2=P_1+\Delta P$.

Θεωρώντας τη συμπίεση ισοεντροπική ($\Delta S=0$), η θερμοκρασία εξόδου του μίγματος από το συμπιεστή θα είναι:

$$T_2' = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R}{C_{\text{μίσματος}}}}, \text{ σε K} \quad (2.2)$$

όπου $R=8,314$ J/mol K είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων.

Η πραγματική θερμοκρασία εξόδου του μίγματος από το συμπιεστή θα είναι:

$$T_2 = T_1 + \frac{(T_2' - T_1)}{\eta}, \text{ σε K} \quad (2.3)$$

όπου $\eta=0,75$ λαμβάνεται ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή.

Το ισοεντροπικό έργο του συμπιεστή θα είναι:

$$W_s(\text{ισοεντροπικό}) = - C_{\text{μίσματος}}(T_2' - T_1), \text{ σε Joule/mol. μίγματος}, \quad (2.4)$$

ενώ το πραγματικό έργο θα είναι:

$$W_s(\text{πραγματικό}) = W_s(\text{ισοεντροπικό})/\eta, \text{ σε Joule/ mol. μίγματος}. \quad (2.5)$$

Ο υπολογισμός της ποσότητας του υδρατμού που συμπυκνώνεται ανά mol. αέρα που διακινείται στη συσκευή, γίνεται με την παρακάτω βηματική διαδικασία:

- Το μοριακό κλάσμα του αέρα στο μίγμα, σε πίεση P_1 θα είναι:

$$Y_{\text{αέρα}} = \frac{(P_1 - P_{\text{sat}})}{P_1} = \text{moles}_{\text{αέρα}}/\text{moles}_{\text{μίσματος}} \quad (2.6)$$

• Η ποσότητα του υδρατμού ανά mol. αέρα, σε πίεση P_1 και P_2 , δηλ. το πηλίκο του μοριακού κλάσματος του υδρατμού προς το μοριακό κλάσμα του αέρα, σε πίεση P_1 και P_2 , θα είναι:

$$\frac{P_{sat}}{P_1 - P_{sat}} \quad (2.7)$$

και $\frac{P_{sat}}{P_2 - P_{sat}} \quad (2.8),$

αντίστοιχα.

Από τις παραπάνω σχέσεις, η πρώτη εκφράζει την ποσότητα του υδρατμού πριν το συμπιεστή και η δεύτερη την ποσότητα του υδρατμού μετά το συμπιεστή και το στάδιο της συμπύκνωσης, λίγο πριν την είσοδο του αερίου μίγματος αέρα-υδρατμού ξανά στο χώρο του νερού.

• Οπότε αφαιρώντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, υπολογίζεται η ποσότητα του υδρατμού που συμπυκνώθηκε. Δηλαδή,

$$(2.7)-(2.8) = \text{moles}_{\text{υδρατμού}}/\text{moles}_{\text{αέρα}} \text{ που συμπυκνώθηκαν.} \quad (2.9)$$

• Πολλαπλασιάζοντας με το $MB(H_2O)=18$, υπολογίζεται η μάζα του υδρατμού που συμπυκνώθηκε σε

$$\text{Kgr. υδρατμού}/\text{moles}_{\text{αέρα}} \quad (2.10)$$

Στη συνέχεια διαιρώντας το πραγματικό έργο του συμπιεστή (σχ. (2.5)) με τη σχέση (2.6) υπολογίζεται η ενέργεια που δαπανάται στο συμπιεστή ανά mol. αέρα σε

$$\text{Joule}/\text{moles}_{\text{αέρα}} \quad (2.11)$$

Τέλος, διαιρώντας τις δυο παραπάνω σχέσεις, την (2.11) με την (2.10), υπολογίζεται η ενέργεια που δαπανάται στο συμπιεστή ανά Kgr υδρατμού που συμπυκνώθηκε ή ανά Kgr νερού που παράχθηκε σε

$$\text{Joule}/\text{Kgr}(H_2O) = \text{KJ}/\text{m}^3(H_2O), \quad (2.12)$$

αφού η πυκνότητα του νερού είναι $\rho=1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$.

(β). Λειτουργία της συσκευής με θαλασσινό νερό-Επίδραση αλατιού (NaCl)

Σ' αυτήν την περίπτωση, όταν η συσκευή λειτουργεί με θαλασσινό νερό, στην υγρή φάση υπάρχουν δύο συστατικά, το αλάτι (NaCl) και το νερό. Συνήθως, η περιεκτικότητα σε αλάτι του θαλασσινού νερού είναι 3%. Οπότε, το μοριακό κλάσμα του νερού στην υγρή φάση είναι $\chi_i=0,97$, ενώ στην αέρια φάση είναι $y_i=1$. Εφαρμόζοντας το νόμο του Raoult, $y_i P = \chi_i P_{sat}$, για το νερό προκύπτει $P=0,97 P_{sat}$.

Δηλαδή, η μερική πίεση του υδρατμού στο αέριο μίγμα, τώρα, είναι $P_{\text{υδρατμού}}=0,97 P_{\text{sat}}$. Επομένως, ο παραπάνω υπολογισμός πρέπει να γίνει με τη νέα μερική πίεση του υδρατμού.

2.2.2. Αποτελέσματα

Ο παραπάνω υπολογισμός θερμοδυναμικής ισορροπίας έγινε με τη βοήθεια πινάκων του Excel για θερμοκρασίες $T_1=80,90,100,110,120,130$ °C. Για κάθε θερμοκρασία T_1 δοκιμάστηκαν δέκα διαφορετικές τιμές της πίεσης P_1 , ξεκινώντας από πίεση λίγο μεγαλύτερη (κατά 0,02 bar) από την τάση ατμών του νερού στην αντίστοιχη θερμοκρασία και αυξάνοντας κατά 0,05 bar. Οι πίνακες με τα αναλυτικά αποτελέσματα του υπολογισμού περιέχονται στο παράρτημα Α. Στους τρεις πρώτους πίνακες γίνεται ο υπολογισμός για λειτουργία της συσκευής με καθαρό νερό και στους υπόλοιπους για λειτουργία με θαλασσινό. Με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων διαμορφώθηκαν τα διαγράμματα των σχημάτων 2.2-2.6.

2.2.3. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Το διάγραμμα του σχήματος 2.2 εικονίζει την δαπάνη ενέργειας στο συμπιεστή σε KWh/m^3 συμπυκνούμενου υδρατμού, συναρτήσει της απομάκρυνσης της πίεσης λειτουργίας P_1 από τις συνθήκες κορεσμού, και της θερμοκρασίας λειτουργίας T_1 , για λειτουργία με καθαρό νερό. Απ' αυτό το διάγραμμα προκύπτει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας T_1 , η κλίση των ευθειών μικραίνει. Αυτό σημαίνει ότι για μεγαλύτερες θερμοκρασίες λειτουργίας, η απομάκρυνση από τις συνθήκες κορεσμού, συνεπάγεται μικρότερη δαπάνη ενέργειας. Επίσης, για την ίδια τιμή της θερμοκρασίας T_1 , η πίεση λειτουργίας οικονομικά συμφέρει να είναι κοντά στην πίεση κορεσμού. Άλλωστε, τότε προκύπτει από την εξάτμιση αέριο μίγμα με υψηλό ποσοστό σε υδρατμό.

Από το διάγραμμα του σχήματος 2.3 προκύπτει ότι η παρουσία του αλατιού προκαλεί αύξηση της δαπανώμενης ενέργειας με αναλογικό τρόπο. Μία σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες αφαλάτωσης, στις οποίες η κατανάλωση ενέργειας είναι κατά μέσο όρο 9-10 KWh/m^3 παραγόμενου νερού, υποδεικνύει ότι η λειτουργία σε ατμοσφαιρική πίεση ή σε υπερπίεσεις είναι εφικτή και μάλιστα οικονομικά

συμφέρουσα, αφού από το διάγραμμα προκύπτει ότι μπορούν να επιτευχθούν πολύ μικρότερες καταναλώσεις ενέργειας. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πινάκων, παρατηρείται ότι αυτή η αύξηση για την ίδια θερμοκρασία, από πίεση σε πίεση, μειώνεται, ενώ για την ίδια πίεση από θερμοκρασία σε θερμοκρασία αυξάνεται. Γενικά, για την ίδια πίεση από θερμοκρασία σε θερμοκρασία η μέση αύξηση είναι της τάξης του 40%.

Στο διάγραμμα του σχήματος 2.4 γίνεται η σύγκριση, για την ίδια θερμοκρασία, της κατανάλωσης ενέργειας για καθαρό νερό και θαλασσινό.

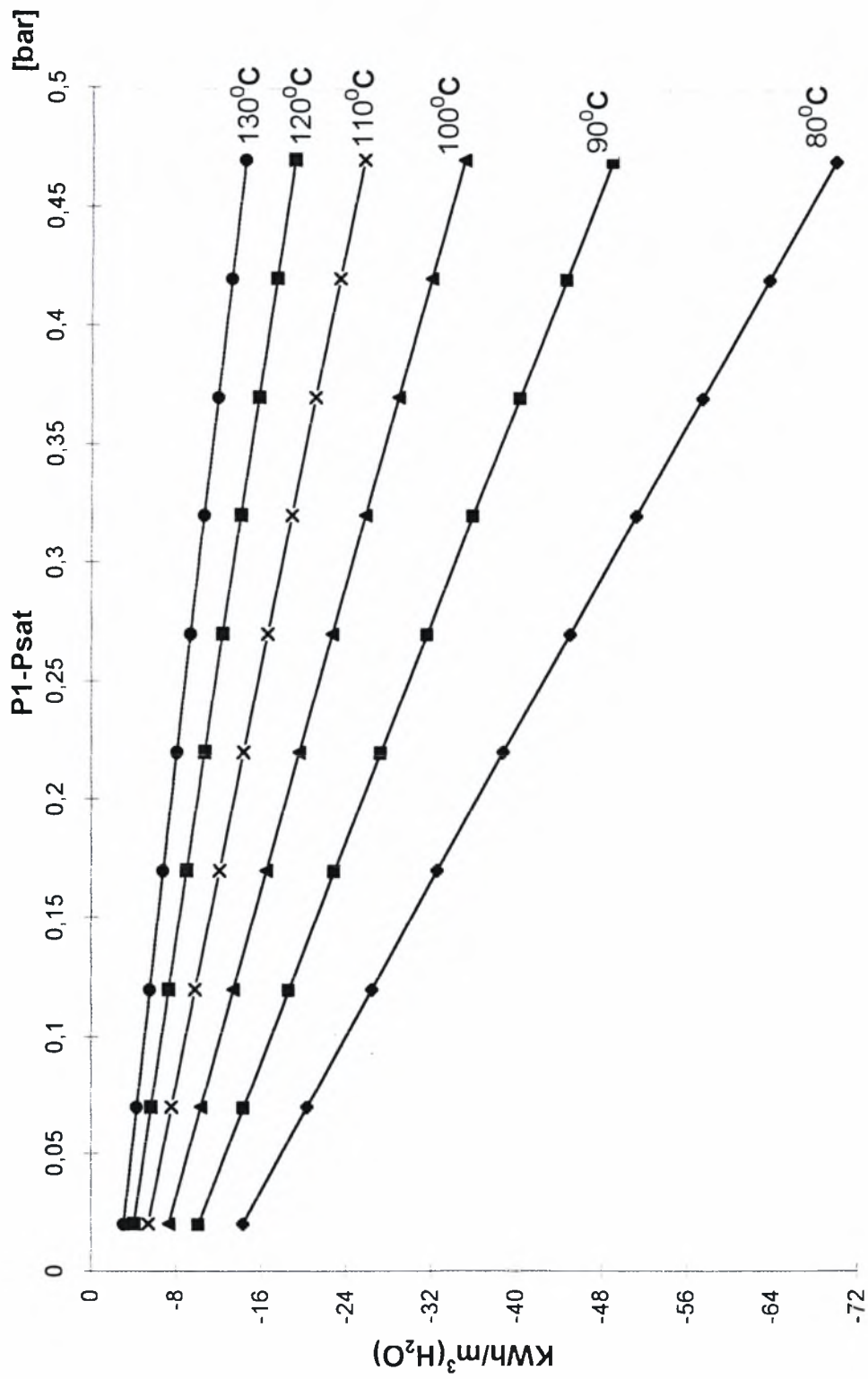
Ακόμη, εξετάζοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα των πινάκων, παρατηρείται ότι για το θαλασσινό νερό, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, ο ρυθμός αύξησης των $\text{moles}_{\text{υδρατμού}}/\text{moles}_{\text{αέρα}} = P(\text{H}_2\text{O})/P_{\text{αέρα}} = 0,97 P_{\text{sat}}/(P_1 - P_{\text{sat}})$, σε πίεση P_1 , μειώνεται, ενώ ο ρυθμός αύξησης των

$\text{moles}_{\text{υδρατμού}}/\text{moles}_{\text{αέρα}} = P(\text{H}_2\text{O})/P_{\text{αέρα}} = 0,97 P_{\text{sat}}/(P_2 - P_{\text{sat}})$, σε πίεση P_2 , αυξάνεται.

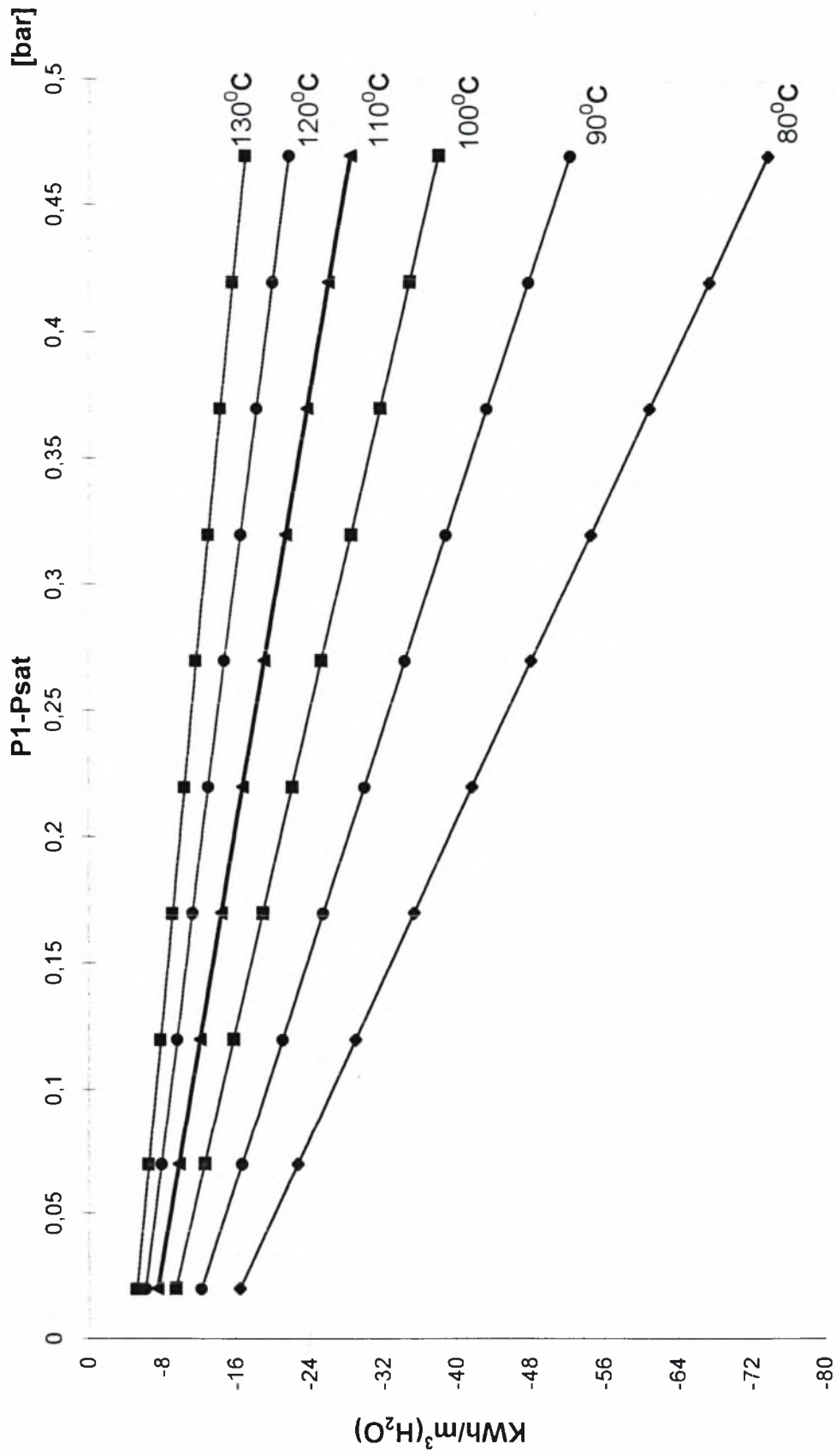
Δηλ. τα $\text{moles}_{\text{υδρατμού}}/\text{moles}_{\text{αέρα}}$ σε πίεση P_1 συγκλίνουν προς κάποιο όριο, ενώ τα $\text{moles}_{\text{υδρατμού}}/\text{moles}_{\text{αέρα}}$ σε πίεση P_2 αυξάνουν συνέχεια. Μεταξύ των 110 και 120 °C, οι δύο ρυθμοί αύξησης γίνονται ίσοι. Από εκεί και πέρα, ο ρυθμός αύξησης σε πίεση P_1 , γίνεται μικρότερος απ' αυτόν σε πίεση P_2 με αποτέλεσμα τα $\text{moles}_{\text{υδρατμού}}/\text{moles}_{\text{αέρα}}$ που συμπυκνώνονται, να μειώνονται. Αυτό παρατηρείται για τις αρχικές τιμές που η πίεση λειτουργίας P_1 είναι πολύ κοντά στην τάση ατμών. Αυτή η διαπίστωση φαίνεται παραστατικότερα στο διάγραμμα του σχήματος 2.5, που εικονίζει την ποσότητα του υδρατμού που συμπυκνώνεται ανά mol. αέρα που διακινείται στη συσκευή συναρτήσεως της απομάκρυνσης από την πίεση κορεσμού και της θερμοκρασίας λειτουργίας T_1 , για λειτουργία με θαλασσινό νερό.

Από το διάγραμμα του σχήματος 2.6, που εικονίζει τη μάζα του υδρατμού που συμπυκνώνεται ανά mol. αέρα συναρτήσεως της απομάκρυνσης από την πίεση κορεσμού, για λειτουργία με καθαρό νερό, προκύπτει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας, η ποσότητα του συμπυκνούμενου υδρατμού αυξάνει, κάτι που οφείλεται στην αύξηση της τάσης ατμών. Ακόμη, αύξηση της διαφοράς $P_1 - P_{\text{sat}}$ από 0,02 σε 0,07 bar προκαλεί μεγάλη μείωση της συμπυκνούμενης ποσότητας υδρατμού. Ενώ, για διαφορά πάνω από 0,15 bar, αυτή η ποσότητα γίνεται πολύ μικρή, κάτι που αποδεικνύει ότι η διαφορά $P_1 - P_{\text{sat}}$ συμφέρει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή.

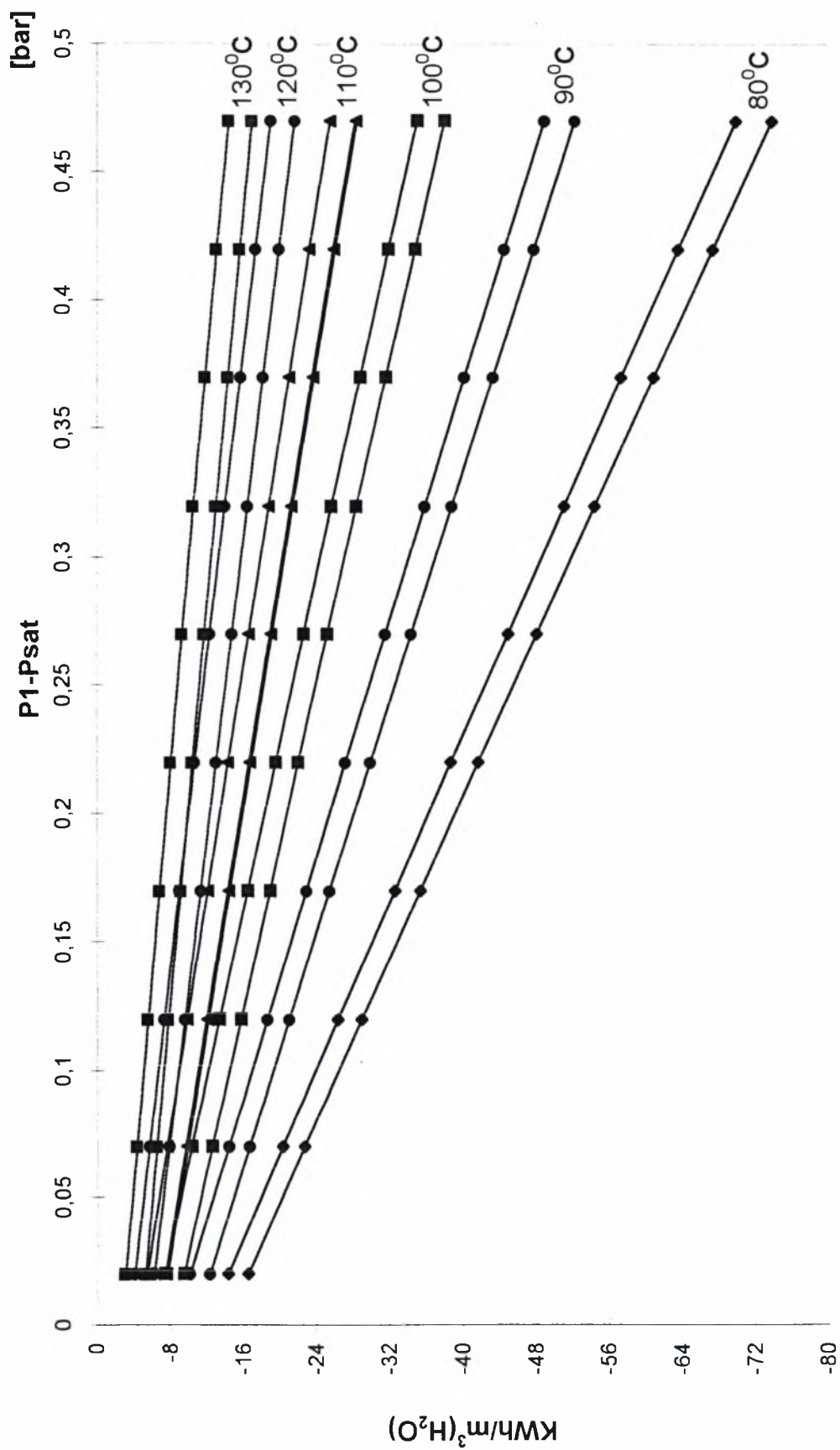
Ακόμη συγκρίνοντας τα δύο τελευταία διαγράμματα, παρατηρείται ότι η ποσότητα του υδρατμού που συμπυκνώνεται είναι πολύ μεγαλύτερη για τη λειτουργία με καθαρό νερό, όταν η πίεση λειτουργίας προσεγγίζει την τάση ατμών του νερού.



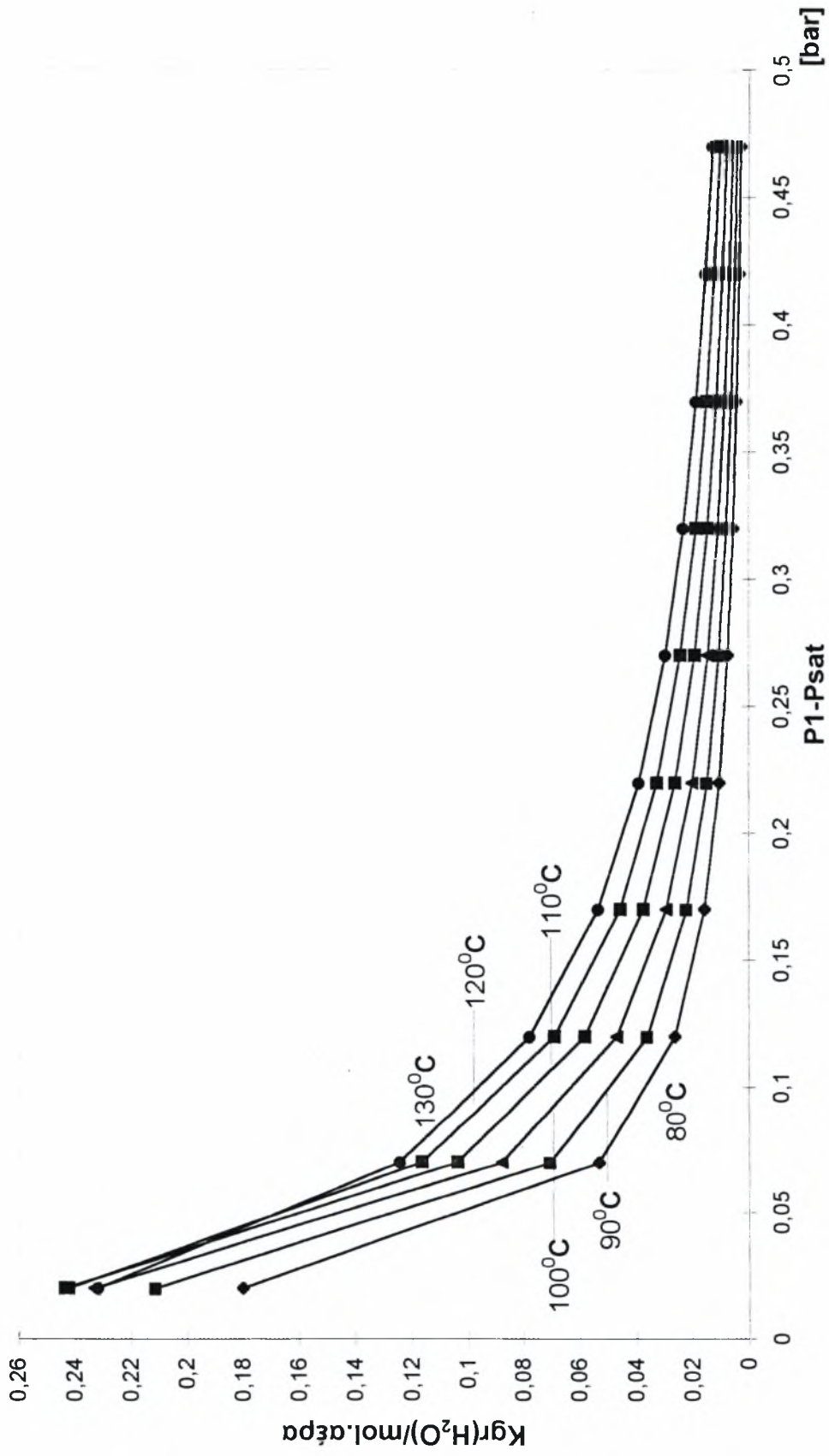
Σχήμα 2.2: Κατανάλωση ενέργειας στο συμπιεστή για λειτουργία με καθαρό νερό.



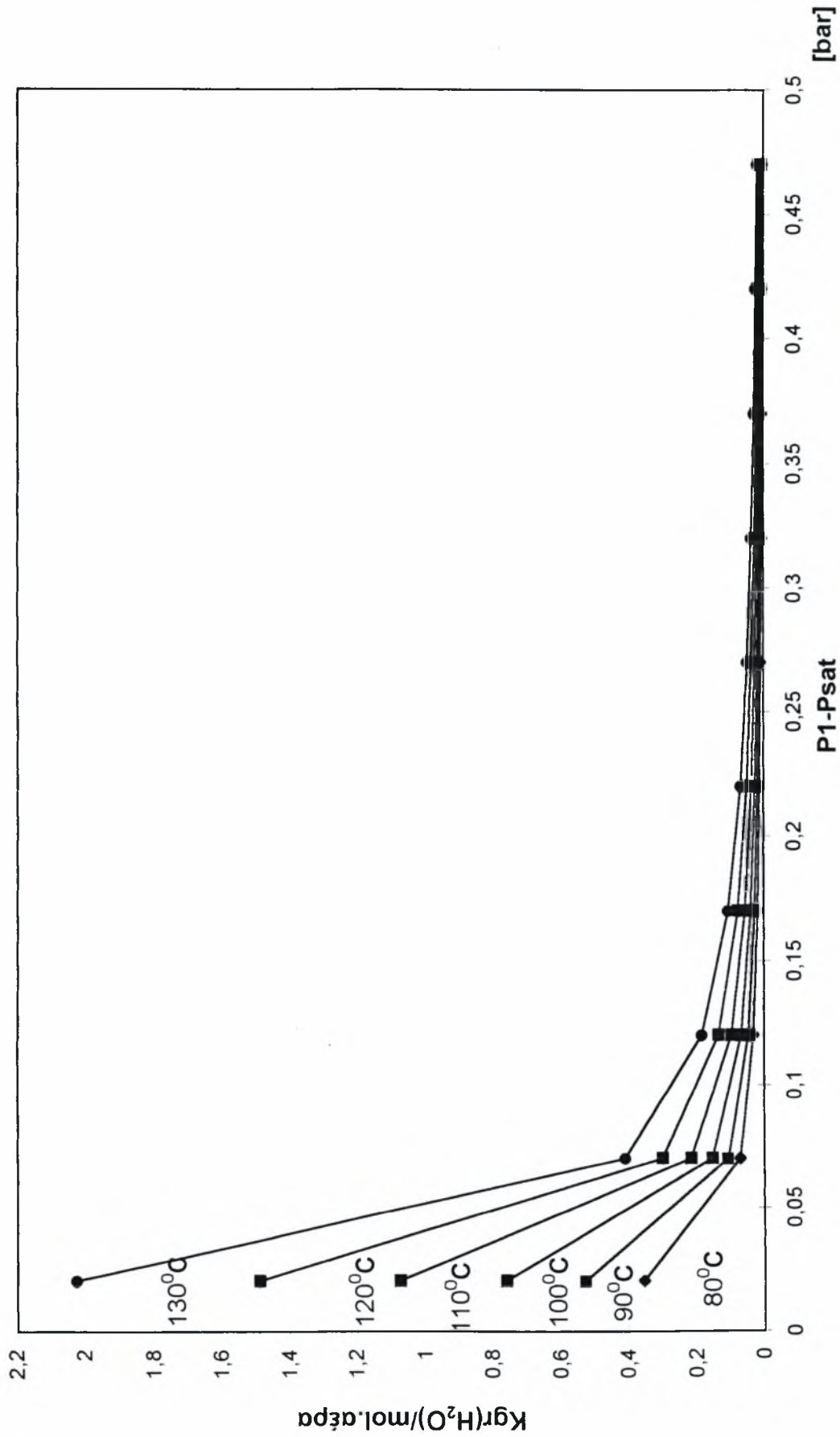
Σχήμα 2.3: Κατανάλωση ενέργειας στο συμπιεστή για λειτουργία με θαλασσινό νερό.



Σχήμα 2.4: Σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας στο συμπιεστή για λειτουργία με καθαρό και θαλασσινό νερό.



Σχήμα 2.5: Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται ανά mol. αέρα συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας, για λειτουργία με θαλασσινό νερό.



Σχήμα 2.6: Ποσότητα υδρατμού που συμπυκνώνεται ανά mol. αέρα συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας, για λειτουργία με καθαρό νερό.

2.3. ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ

2.3.1. Θεωρία

Σ' αυτήν την παράγραφο θα αναλυθούν οι μηχανισμοί που ελέγχουν το στάδιο της εξάτμισης και θα επιχειρηθεί μία προσπάθεια προσομοίωσης αυτών των μηχανισμών με τη βοήθεια ενός κώδικα Η/Υ σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN.

Κατά τη διάρκεια της ανόδου μίας φυσαλίδας στη στήλη του νερού συμβαίνουν οι ακόλουθες μεταβολές:

1. Μεταβολή της θερμοκρασίας της φυσαλίδας εξαιτίας:

(α) του φαινομένου της εξάτμισης, που προκαλεί ψύξη της φυσαλίδας. Αυτό συμβαίνει διότι για να εξατμιστεί μία ποσότητα νερού, θα πρέπει να προσδοθεί θερμότητα ίση με την ενθαλπία εξάτμισης του νερού. Αυτό το ποσό θερμότητας καταναλώνεται από την αισθητή θερμότητα της φυσαλίδας και του νερού που την περιβάλλει.

(β) της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή, μεταξύ της φυσαλίδας και της κυρίως μάζας του νερού.

2. Μεταβολή της συγκέντρωσης του υδρατμού μέσα στη φυσαλίδα λόγω εξάτμισης. Ταυτόχρονα συμβαίνει διάχυση του υδρατμού στον αέρα, μέσα στη φυσαλίδα.

3. Μεταβολή του όγκου της φυσαλίδας εξαιτίας:

(α) της μείωσης της πίεσης μέσα στη φυσαλίδα, λόγω μείωσης της υδροστατικής πίεσης με την άνοδο της φυσαλίδας στη στήλη του νερού.

(β) της μεταβολής της ποσότητας του υδρατμού μέσα στη φυσαλίδα λόγω εξάτμισης και της μεταβολής της θερμοκρασίας.

Γίνεται δηλαδή, ταυτόχρονη μεταφορά ενέργειας και μάζας στη φυσαλίδα. Η διάχυση του υδρατμού, που προκύπτει από την εξάτμιση, μπορεί να επηρεάσει την ολική ροή (flux) της ενέργειας. Με βάση την πρώτη μεταβολή, είναι δυνατόν να γραφεί ένα ενεργειακό ισοζύγιο, που θα εκφράζει τη μεταβολή της ενέργειας της φυσαλίδας, κατά τη διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος dt , που απαιτείται για

να διανύσει η φυσαλίδα μια μικρή απόσταση dx . Αυτό το ενεργειακό ισοζύγιο θα έχει την παρακάτω μορφή:

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT_i}{dt} = h \cdot A \cdot (T_0 - T_i) - N_A \cdot \Delta H_V, \quad (2.13)$$

όπου:

m είναι η μάζα του μίγματος αέρα-υδρατμού της φυσαλίδας και της ποσότητας του νερού που περιέχεται σε έναν λεπτό υμένα γύρω από τη φυσαλίδα σύμφωνα με τη θεωρία λεπτού στρώματος,

C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση όπως παραπάνω,

dT_i είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας της φυσαλίδας στο χρονικό διάστημα dt ,

h είναι ο συντελεστής συναγωγής,

A είναι η επιφάνεια της φυσαλίδας,

T_0 είναι η θερμοκρασία του νερού γύρω από τη φυσαλίδα,

T_i είναι η θερμοκρασία της φυσαλίδας στην αρχή του χρονικού διαστήματος dt ,

N_A είναι η ποσότητα του υδρατμού που εξατμίζεται και διαχέεται στον αέρα μέσα στη φυσαλίδα, στο χρονικό διάστημα dt ,

ΔH_V είναι η ενθαλπία εξάτμισης του νερού στη θερμοκρασία T_i .

Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέρος της παραπάνω εξίσωσης εκφράζει τη ροή ενέργειας λόγω συναγωγής, απουσία μεταφοράς μάζας, ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει τη ροή ενέργειας λόγω μεταφοράς μάζας.

Ο προσδιορισμός των επιμέρους μεγεθών του ενεργειακού ισοζυγίου γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω υπολογιστική διαδικασία:

Το ύψος της στήλης του θαλασσινού νερού, που παρακάτω θα συμβολίζεται με X , χωρίζεται σε M διαστήματα ολοκλήρωσης μήκους dx το καθένα. Η πίεση υπό την οποία θα βρίσκεται η φυσαλίδα θα είναι το άθροισμα της πίεσης πάνω από το νερό, πριν το συμπιεστή, που θα συμβολίζεται με P , και της υδροστατικής ρgh . Επομένως, σε κάθε διάστημα ολοκλήρωσης i , η φυσαλίδα θα βρίσκεται σε πίεση:

$$P_b = P + \rho g(X - (i-1)dx), \quad (2.14)$$

όπου το i παίρνει τιμές από 1, στην είσοδο της φυσαλίδας στο νερό, έως M , στην έξοδο.

• Υπολογισμός της επιφάνειας της φυσαλίδας.

Αν r_b είναι η ακτίνα της φυσαλίδας, η επιφάνειά της δίνεται από τη σχέση:

$$A=4\pi r_b^2. \quad (2.15)$$

•Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής h .

Θεωρώντας τη φυσαλίδα σαν σφαίρα, η κίνησή της μέσα στο νερό είναι όμοια με την περίπτωση της ροής υγρού γύρω από μια σφαίρα. Μια βελτιωμένη συσχέτιση για τη μετάδοση θερμότητας κατά τη ροή υγρού γύρω από μια σφαίρα, σύμφωνα με τον Whitaker, είναι η παρακάτω (Brodkey, Hersey, 1990):

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} = 2 + (0,4 \cdot Re^{1/2} + 0,06 \cdot Re^{2/3}) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}, \quad (2.16)$$

η οποία ισχύει στην περιοχή:

$$3,5 \leq Re \leq 7,6 \times 10^4$$

$$0,71 \leq Pr \leq 380$$

$$1,0 \leq \frac{\mu}{\mu_w} \leq 3,2$$

Η τιμή 2 η οποία είναι η ελάχιστη τιμή του αριθμού Nusselt, αντιστοιχεί στη φυσική συναγωγή. Η παραπάνω εξίσωση συσχετίζει τα δεδομένα με $\pm 30\%$ απόκλιση στη χειρότερη περίπτωση, αλλά τις περισσότερες φορές ακόμη καλύτερη. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μ , ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k και ο αριθμός Pr , υπολογίζονται στη θερμοκρασία του νερού T_0 και το μ_w στη θερμοκρασία της επιφάνειας της φυσαλίδας. Εδώ θεωρείται ότι $(\mu/\mu_w)=1$.

Ο αριθμός Re δίνεται από τη γνωστή εξίσωση:

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot U_b}{\mu} \quad (2.17)$$

όπου:

ρ είναι η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία T_0 ,

d είναι η διάμετρος της φυσαλίδας και

U_b είναι η ταχύτητα της φυσαλίδας.

Η ταχύτητα με την οποία ανεβαίνει η φυσαλίδα μέσα στο νερό, μπορεί να βρεθεί από την ισορροπία δυνάμεων με βάση το δεύτερο νόμο του Newton. Υπάρχουν τρεις δυνάμεις που δρουν στη φυσαλίδα: η οπισθέλκουσα δύναμη F_p , η άνωση F_B και το βάρος F_w :

$$\Sigma F = F_p + F_B + F_w = ma = 0 \quad (2.18)$$

όπου βέβαια για μόνιμη κατάσταση η επιτάχυνση είναι μηδέν.

Η οπισθέλκουσα F_P είναι η δύναμη που ασκεί στη φυσαλίδα το νερό και δίνεται από τη σχέση:

$$F_P = (1/2)\rho C_D U_b^2 A, \quad (2.19)$$

όπου:

A είναι το εμβαδόν προβολής της φυσαλίδας κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης, ίσο με πr_b^2 , αφού η φυσαλίδα έχει θεωρηθεί σαν σφαίρα και

C_D είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας ή τριβής.

Για σφαίρα ο συντελεστής οπισθέλκουσας εξαρτάται από τον αριθμό Re ως εξής (Brodkey, Hersey, 1990):

$$C_D = 24/Re \quad 0 \leq Re \leq 2 \quad (2.20)$$

$$C_D = 18,5/(Re)^{0,6} \quad 2 \leq Re < 500 \quad (2.21)$$

$$C_D = 0,44 \quad 500 \leq Re < 2 \times 10^5 \quad (2.22)$$

Η εξίσωση (2.22) ονομάζεται και "νόμος του Newton" και η περιοχή της τελειώνει στον κρίσιμο αριθμό Reynolds 2×10^5 . Πάνω από αυτόν τον αριθμό το οριακό στρώμα γύρω από τη σφαίρα γίνεται πλήρως τυρβώδες και $C_D = 0,2$.

Η δύναμη της άνωσης F_B δίνεται από τη γνωστή μας σχέση:

$$F_B = \rho V g = \rho [(4/3)\pi r_b^3] g \quad (2.23)$$

Η δύναμη της βαρύτητας F_W (λόγω της μάζας της φυσαλίδας) είναι:

$$F_W = m_b g = \rho_{\text{αέρα}} [(4/3)\pi r_b^3] g \quad (2.24)$$

Θεωρώντας ότι οι δυνάμεις στη διεύθυνση της ταχύτητας είναι θετικές (προς τα πάνω) προκύπτει ότι η δύναμη της άνωσης F_B δρα στη θετική κατεύθυνση, ενώ το βάρος F_W και η οπισθέλκουσα F_P στην αρνητική. Έτσι, αντικαθιστώντας τις παραπάνω εκφράσεις των δυνάμεων στην σχέση (2.18) προκύπτει:

$$-(1/2)\rho C_D U_b^2 A + \rho [(4/3)\pi r_b^3] g - \rho_{\text{αέρα}} [(4/3)\pi r_b^3] g = 0 \quad (2.25)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να λυθεί ως προς την τελική ταχύτητα:

$$U_b^2 = \frac{8 \cdot g \cdot r_b \cdot (\rho - \rho_{\text{αέρα}})}{3 \cdot \rho \cdot C_D} \quad (2.26)$$

Επειδή υπάρχει εξάρτηση μεταξύ του αριθμού Re , της ταχύτητας της φυσαλίδας U_b και του συντελεστή οπισθέλκουσας C_D , πρέπει για τον υπολογισμό του αριθμού Re , να γίνεται μία επαναληπτική διαδικασία ως εξής:

Αρχικά, υποθέτοντας ότι ο αριθμός Re βρίσκεται στην περιοχή πάνω από 500, για $C_D = 0,44$ υπολογίζεται μία τιμή για την ταχύτητα και τον αριθμό Re . Έπειτα, γίνεται

ένας έλεγχος αν ο αριθμός Re βρίσκεται στην περιοχή από 2 έως 500. Αν αυτό συμβαίνει, τότε για μία καινούρια τιμή του συντελεστή οπισθέλκουσας C_D από την εξίσωση (2.21), υπολογίζονται οι τελικές τιμές της ταχύτητας και του αριθμού Re. Διαφορετικά, οι τελικές τιμές είναι αυτές που υπολογίστηκαν για $C_D=0,44$.

Επομένως, έχοντας όλα τα μεγέθη γνωστά, υπολογίζεται από τη συσχέτιση η τιμή του αριθμού Nusselt και τελικά του συντελεστή συναγωγής h .

- Υπολογισμός του χρονικού διαστήματος dt .

Όταν η φυσαλίδα κινείται με ταχύτητα U_b , ο χρόνος που απαιτείται για να διανύσει το κάθε διάστημα ολοκλήρωσης dx , είναι:

$$dt = \frac{dx}{U_b} \tag{2.27}$$

- Υπολογισμός της ποσότητας του υδρατμού, N_A , που εξατμίζεται και διαχέεται στον αέρα μέσα στη φυσαλίδα, στο χρονικό διάστημα dt .

Στη μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε μη μόνιμη κατάσταση ορίζεται η ολοκληρωμένη θερμιδομετρική μέση θερμοκρασία γενικά ως:

$$\bar{\theta} \equiv \frac{\int_V (\rho c_p \theta) dV}{\int_V (\rho c_p) dV} \tag{2.28}$$

και η ανηγμένη θερμιδομετρική μέση θερμοκρασία ως:

$$\bar{\Theta} = \frac{\bar{\theta} - \theta_{\infty}}{\theta_A - \theta_{\infty}} \tag{2.29}$$

Αν συμβεί μια μοναδική αλματώδης μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος θ_{∞} , από τη θερμοκρασία θ_A στη θερμοκρασία θ_{∞} στο χρόνο $t=0$, η μέση θερμοκρασία $\bar{\Theta}$ μετά από χρόνο t μπορεί να υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια από τη σχέση (VDI-Warmeatlas, 1993):

$$\bar{\Theta} = \exp \left\{ - \frac{AR}{V} \frac{Fo}{\frac{1}{Bi} + \frac{1}{Nu_i(Fo)}} \right\} \tag{2.30}$$

όπου:

A είναι η επιφάνεια,

R είναι η ακτίνα αν πρόκειται για κύλινδρο ή σφαίρα, ή το μισό πάχος αν πρόκειται για πλάκα,

V είναι ο όγκος,

Fo είναι ο αριθμός Fourier (Fo),

Bi είναι ο αριθμός Biot (Bi) και

$$Nu_i(Fo) \approx (Nu_{i,\infty}^2 + \frac{4}{\pi} \frac{1}{Fo})^{1/2}$$

Δηλαδή, για μέσους χρόνους t ή αριθμούς Fo, γίνεται επαλληλία της ασύμπτωτης μικρού χρόνου και της ασύμπτωτης μεγάλου χρόνου, της μορφής

$$Nu_i = (Nu_{i,\infty}^2 + Nu_{i,0}^2)^{1/2}$$

Για σφαίρα $Nu_{i,\infty} = \left(\frac{\pi^2}{3}\right)^2$ και $\frac{AR}{V} = 3$

Επομένως για σφαίρα η σχέση (2.29) γίνεται:

$$\bar{\Theta} = \exp \left[-3 \cdot \frac{Fo}{\frac{1}{Bi} + \frac{1}{\left(\left(\frac{\pi^2}{3}\right)^2 + \frac{4}{\pi} \frac{1}{Fo}\right)^{1/2}}} \right] \quad (2.31)$$

Οι αποκλίσεις σε σχέση με κάποιον ακριβή υπολογισμό είναι πάντοτε μικρότερες του 8% περίπου.

Σε αντιστοιχία με τη μετάδοση θερμότητας μπορεί να οριστεί για τη μεταφορά μάζας η ολοκληρωμένη μέση συγκέντρωση ως:

$$\bar{c} \equiv \frac{\int_V c dV}{\int_V dV} \quad (2.32)$$

και η ανηγμένη μέση συγκέντρωση ως:

$$\bar{C} = \frac{\bar{c} - c_i}{c_o - c_i} \quad (2.33)$$

Για την περίπτωση της φυσαλίδας όπου γίνεται μεταφορά μάζας (διάχυση), του υδρατμού στον αέρα, μέσα στη φυσαλίδα:

\bar{c} είναι η μέση συγκέντρωση του υδρατμού μέσα στη φυσαλίδα, κατά τη διάρκεια του κάθε διαστήματος ολοκλήρωσης dx ,

c_i είναι η συγκέντρωση του υδρατμού στη διεπιφάνεια φυσαλίδας-νερού (συγκέντρωση κορεσμού) και

c_0 είναι η ομοιόμορφη συγκέντρωση του υδρατμού στην αρχή του κάθε διαστήματος ολοκλήρωσης dx .

Η συγκέντρωση κορεσμού c_i , θα δίνεται από τη σχέση:

$$c_i = \frac{P_{\text{sat}}(T_i)}{R \cdot T_i} \quad (2.34)$$

όπου:

$P_{\text{sat}}(T_i)$ είναι η τάση ατμών του νερού στη θερμοκρασία της φυσαλίδας T_i και

$R=0,082 \text{ bar atm/Kmol}$. K είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων.

Η συγκέντρωση κορεσμού εκφράζει τη συγκέντρωση του υδρατμού όταν η μερική πίεση του υδρατμού είναι ίση με την τάση ατμών του νερού στη θερμοκρασία της φυσαλίδας T_i .

Η συγκέντρωση c_0 θα υπολογίζεται, όπως είναι γνωστό, από το λόγο των moles υδρατμού προς τον όγκο της φυσαλίδας.

Για τον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης \bar{c} μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (2.31), με την παρακάτω μορφή για τη μεταφορά μάζας:

$$\bar{C} = \frac{\bar{c} - c_i}{c_0 - c_i} = \exp \left\{ -3 \cdot \frac{Fo}{\frac{1}{Bi} + \left(\left(\frac{\pi^2}{3} \right)^2 + \frac{4}{\pi Fo} \right)^{1/2}} \right\} \quad (2.35)$$

Στη μετάδοση θερμότητας ο αριθμός Bi εκφράζει το λόγο της θερμικής αντίστασης αγωγής μέσα στο σώμα προς τη θερμική αντίσταση συναγωγής στο περιβάλλον ρευστό. Στη μεταφορά μάζας ο αριθμός Bi εκφράζει το λόγο της αντίστασης στη μεταφορά μάζας μέσα στο σώμα (διάχυση) προς την αντίσταση στη μεταφορά μάζας με συναγωγή στην επιφάνεια. Στην περίπτωση της φυσαλίδας υπάρχει αντίσταση μόνο στη διάχυση του υδρατμού στον αέρα της φυσαλίδας.

Επομένως ο αριθμός Bi είναι πάρα πολύ μεγάλος, δηλ. $Bi \rightarrow \infty$, και άρα $\frac{1}{Bi} \rightarrow 0$.

Οπότε, η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\bar{C} = \frac{\bar{c} - c_i}{c_0 - c_i} = \exp \left\{ -3 \cdot Fo \cdot \left(\frac{\pi^4}{9} + \frac{4}{\pi \cdot Fo} \right)^{1/2} \right\} \quad (2.36)$$

Λύνοντας αυτή τη σχέση ως προς τη μέση συγκέντρωση προκύπτει:

$$\bar{c} = c_i - (c_i - c_0) \exp \left\{ -3 \cdot Fo \cdot \left(\frac{\pi^4}{9} + \frac{4}{\pi \cdot Fo} \right)^{1/2} \right\} \quad (2.37)$$

που εκφράζει το πόσο μακριά από τη συγκέντρωση κορεσμού βρίσκεται η συγκέντρωση του υδρατμού μέσα στη φυσαλίδα.

Άρα, η ποσότητα του υδρατμού που διαχέεται θα δίνεται από τη σχέση:

$$N_A = (\bar{c} - c_0) V_a \quad (2.38)$$

όπου:

$V_a = (4/3)\pi r_b^3$, είναι ο όγκος της φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του κάθε διαστήματος ολοκλήρωσης dx.

Για να υπολογιστεί η μέση συγκέντρωση \bar{c} θα πρέπει να είναι γνωστή η τιμή του αριθμού Fourier. Ο αριθμός Fo, ο οποίος παριστάνει έναν αδιάστατο χρόνο, στη μεταφορά μάζας συγκρίνει το χρόνο που απαιτείται για να προχωρήσει η διάχυση σε όλη τη φυσαλίδα στη συγκεκριμένη περίπτωση, με το χρόνο που παρήλθε από την έναρξη της διάχυσης. Θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_o = \frac{D \cdot dt}{r_b^2} \quad (2.39)$$

όπου:

D είναι ο συντελεστής διάχυσης του υδρατμού στον αέρα.

Ο συντελεστής διάχυσης για δυαδικά μείγματα μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, αλλά όχι γραμμικά, ενώ μειώνεται με την πίεση. Η διάχυση στα αέρια συστήματα εξαρτάται από το πως τα μόρια του αερίου κινούνται από σημείο σε σημείο. Αφού σε υψηλές θερμοκρασίες τα μόρια έχουν υψηλότερη κινητική ενέργεια, κινούνται γρηγορότερα και πάνε μακρύτερα. Επομένως, ο συντελεστής διάχυσης αυξάνει με τη θερμοκρασία. Όταν η πίεση αυξάνει, υπάρχουν περισσότερα μόρια στο σύστημα και οι κρούσεις αυξάνουν. Επομένως, η μοριακή κίνηση επιβραδύνεται και η διαχυτότητα μειώνεται με την πίεση. Υπάρχουν μια σειρά από εξισώσεις για τον

υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης των αερίων. Η εξάρτηση από την πίεση και θερμοκρασία, μπορεί να εκφραστεί σαν (Brodkey, Hersey, 1990):

$$D=D_0 \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \quad (2.40)$$

όπου το D_0 είναι γνωστό για T_0 και P_0 και ο εκθέτης n μεταβάλλεται μεταξύ 1,75 και 2 σε περιοχές συνηθισμένων θερμοκρασιών και πιέσεων. Συνήθως η τιμή του n βρίσκεται πλησιέστερα προς την τιμή 1,75. Επίσης όταν η πίεση είναι κάτω από 5 atm ο συντελεστής διάχυσης δεν εξαρτάται από τη συγκέντρωση. Άρα ο συντελεστής διάχυσης του υδρατμού στον αέρα θα εξαρτάται σύμφωνα με την παραπάνω σχέση από την πίεση και θερμοκρασία που θα βρίσκεται η φυσαλίδα. Από πίνακες λαμβάνεται:

$$D_0=0,219 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \text{ σε } P_0=1\text{atm} \text{ και } T_0=273 \text{ K.}$$

Επομένως γνωρίζοντας την τιμή του συντελεστή διάχυσης D , υπολογίζεται ο αριθμός Fo και η μέση συγκέντρωση \bar{c} . Οπότε από τη σχέση (2.38) υπολογίζεται η τιμή της ποσότητας του υδρατμού N_A .

- Υπολογισμός του (mC_p) .

Το γινόμενο mC_p που υπεισέρχεται στην εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου δίνεται από τη σχέση:

$$m \cdot C_p = m_b \cdot C_{Pb} + \frac{m_w \cdot C_{Pw}}{2} \quad (2.41)$$

όπου:

m_b είναι η μάζα της φυσαλίδας,

C_{Pb} είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του μίγματος αέρα-υδρατμού που περιέχεται στη φυσαλίδα,

m_w είναι η μάζα μιας ποσότητας νερού που περιέχεται σε έναν λεπτό υμένα γύρω από τη φυσαλίδα και

C_{Pw} είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του νερού στη θερμοκρασία T_0 .

Η μάζα της φυσαλίδας είναι ίση με το άθροισμα των μαζών του υδρατμού και του αέρα μέσα στη φυσαλίδα και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} m_b &= m_{\text{υδρατμού}} + m_{\text{αέρα}} \\ &= n_{\text{υδρατμού}} MB_{\text{υδρατμού}} + n_{\text{αέρα}} MB_{\text{αέρα}} \end{aligned} \quad (2.42)$$

όπου:

$n_{\text{υδρατμού}}$ και $n_{\text{αέρα}}$ είναι τα moles του υδρατμού και του αέρα αντίστοιχα.

Για τα μοριακά βάρη είναι $MB_{\text{υδρατμού}}=MB(\text{H}_2\text{O})=18$ και $MB_{\text{αέρα}}=29$.

Η θερμοχωρητικότητα του μίγματος υπολογίζεται παίρνοντας τη μέση μοριακή θερμοχωρητικότητα των μερών του μίγματος. Αν $Y_{\text{υδρατμού}}$ και $Y_{\text{αέρα}}$ είναι τα μοριακά κλάσματα του υδρατμού και του αέρα στο μίγμα, αντίστοιχα, τότε:

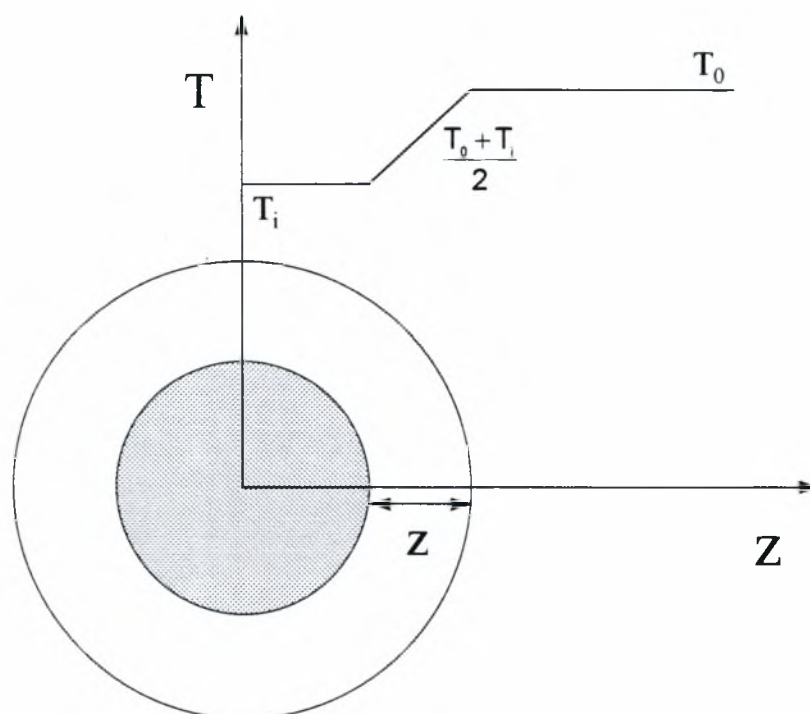
$$\begin{aligned} C_{pb} &= Y_{\text{υδρατμού}} C_{p\text{υδρατμού}} + Y_{\text{αέρα}} C_{p\text{αέρα}} \\ &= (n_{\text{υδρατμού}}/n_{\text{μίσματος}}) C_{p\text{υδρατμού}} + (n_{\text{αέρα}}/n_{\text{μίσματος}}) C_{p\text{αέρα}} \end{aligned} \quad (2.43)$$

όπου από θερμοδυναμικούς πίνακες λαμβάνεται:

$C_{p\text{υδρατμού}}=1,9 \text{ KJ/Kg K}=34,2 \text{ J/mol.K}$ και $C_{p\text{αέρα}}=1 \text{ KJ/Kg K}=29 \text{ J/mol.K}$, για τις ειδικές θερμοχωρητικότητες του υδρατμού και του αέρα, αντίστοιχα. Είναι:

$$n_{\text{μίσματος}}=n_{\text{υδρατμού}}+n_{\text{αέρα}} \quad (2.44)$$

Για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού m_w που περιέχεται σε έναν λεπτό υμένα γύρω από τη φυσαλίδα χρησιμοποιείται η θεωρία του λεπτού στρώματος (υμένα). Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η ολική αντίσταση στη μετάδοση θερμότητας από το νερό στη φυσαλίδα οφείλεται σε ένα λεπτό στρώμα νερού γύρω από τη φυσαλίδα, στο οποίο η μετάδοση θερμότητας γίνεται με αγωγή. Στο παρακάτω σχήμα 2.7 δίδεται η κατανομή της θερμοκρασίας σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, για τη μετάδοση θερμότητας από το νερό στη φυσαλίδα.



Σχήμα 2.7: Θεωρία λεπτού στρώματος

Η κατανομή της θερμοκρασίας, όπως προκύπτει από τη θεωρία αυτή, ακολουθεί τη γραμμή του σχήματος και το z είναι το πάχος του ισοδύναμου στρώματος (υμένα) για μετάδοση θερμότητας με αγωγή. Μέσα στο λεπτό στρώμα αναπτύσσεται η ολική διαφορά θερμοκρασίας $T_o - T_i$, που αποτελεί την ωθούσα δύναμη για τη μετάδοση θερμότητας. Το z δεν μπορεί να μετρηθεί και έχει πλασματική σημασία, αλλά μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

Το ποσό θερμότητας Q που μεταδίδεται με συναγωγή από το νερό προς τη φυσαλίδα πρέπει να είναι ίσο με το ποσό θερμότητας που μεταδίδεται με αγωγή μέσα από το λεπτό στρώμα νερού.

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{T_o - T_i}{z} = h \cdot A \cdot (T_o - T_i) \Rightarrow h = \frac{k}{z} \Rightarrow z = \frac{k}{h} \quad (2.45)$$

όπου:

k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του νερού στη θερμοκρασία T_o ,

h είναι ο συντελεστής συναγωγής και

A είναι η επιφάνεια μέσα από την οποία μεταδίδεται η θερμότητα.

Επομένως, η ποσότητα του νερού m_w που περιέχεται στο λεπτό υμένα θα δίνεται από τη σχέση:

$$m_w = \rho \cdot A \cdot z \quad (2.46)$$

όπου:

ρ είναι η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία T_o ,

$A = 4\pi r_b^2$ είναι η επιφάνεια της φυσαλίδας.

Η σχέση (2.41) προέκυψε σύμφωνα με τον παρακάτω συλλογισμό:

Η διαφορική μεταβολή της ενέργειας του νερού που περιέχεται στο λεπτό στρώμα υμένα κατά μήκος του πάχους του υμένα z για μία διαφορική μεταβολή της θερμοκρασίας dT , δίνεται από τη σχέση:

$$dH = m_w \cdot C_{pw} \cdot dT \quad (2.47)$$

Η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά μήκος του υμένα με τη σχέση:

$$T = T_i + \frac{x}{z} \cdot (T_o - T_i) \quad (2.48)$$

όπου το x παίρνει τιμές από 0 έως z .

Αντικαθιστώντας τη σχέση (2.48) στη σχέση (2.47) και ολοκληρώνοντας από 0 έως z προκύπτει η ολική μεταβολή της ενέργειας κατά μήκος του υμένα:

$$H_1 = m_w \cdot C_{Pw} \cdot \frac{dT}{2} \quad (2.49)$$

Η αντίστοιχη μεταβολή της ενέργειας της φουσαλίδας είναι:

$$H_2 = m_b \cdot C_{pb} \cdot dT \quad (2.50)$$

Οπότε η συνολική μεταβολή της ενέργειας της φουσαλίδας και του νερού που περιέχεται στον υμένα θα είναι:

$$H = H_1 + H_2 = \left(m_b \cdot C_{pb} + \frac{m_w \cdot C_{Pw}}{2} \right) \cdot dT \quad (2.51)$$

Όμως είναι:

$$H = m \cdot C_p \cdot dT \quad (2.52)$$

Τελικά εξισώνοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει η σχέση (2.41).

Παραπάνω ειπώθηκε ότι γίνεται μεταβολή του όγκου της φουσαλίδας κατά τη διάρκεια της πορείας της στη στήλη του νερού. Θεωρώντας το μίγμα αέρα-υδρατμού που περιέχεται στη φουσαλίδα ως ιδανικό αέριο αυτή η μεταβολή του όγκου μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$dV_b = d\left(\frac{n \cdot R \cdot T}{P}\right) = \frac{R \cdot T_i}{P_b} \cdot dn + \frac{n \cdot R}{P_b} \cdot dT_i + \frac{n \cdot R \cdot T_i}{P_b^2} \cdot dP \quad (2.53)$$

όπου:

$dn = N_A$ είναι η μεταβολή στην ποσότητα του μίγματος, που είναι ίση με την ποσότητα του υδρατμού που εξατμίζεται και διαχέεται,

dT_i η μεταβολή της θερμοκρασίας, που υπολογίζεται από την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου,

$dP = -\rho g dx$ η μεταβολή της υδροστατικής πίεσης σε κάθε διάστημα ολοκλήρωσης dx .

Για να απλοποιηθεί η παραπάνω εξίσωση, γράφεται ο νόμος των ιδανικών αερίων για το μίγμα $PV = nRT$, λύνεται ως προς n , γίνεται αντικατάσταση και προκύπτει η τελική μορφή της εξίσωσης

$$dV_b = d\left(\frac{n \cdot R \cdot T}{P}\right) = \frac{R \cdot T_i}{P_b} \cdot dn + \frac{V_a}{T_i} \cdot dT_i + \frac{V_a}{P_b} \cdot dP \quad (2.54)$$

όπου:

$V_a = (4/3)\pi r_b^3$, είναι ο όγκος της φουσαλίδας κατά τη διάρκεια του κάθε διαστήματος ολοκλήρωσης dx .

Όπως έχει αναφερθεί, η φυσαλίδα σχηματίζεται κατά το πέρασμα του αέρα και της ποσότητας του υδρατμού που δεν έχει συμπυκνωθεί στο στάδιο της συμπύκνωσης μέσα από το πορώδες διάφραγμα. Η υπόθεση που θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω ότι υπάρχει φυσαλίδα πριν το πορώδες δεν ισχύει, αλλά γίνεται για την ανάλυση του φαινομένου. Έτσι λοιπόν, θεωρείται ότι η φυσαλίδα πριν το πορώδες διάφραγμα είναι κορεσμένη σε υδρατμό και στη θερμοκρασία του νερού T_0 . Οπότε η ποσότητα του υδρατμού που περιέχει δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_{\text{υδρατμού}}(0) = P_{\text{sat}}(T_0) \cdot \frac{V_0}{R \cdot T_0} \quad (2.55)$$

όπου:

$V_0 = (4/3)\pi r_{b0}^3$ είναι ο όγκος της φυσαλίδας για την αρχική τιμή r_{b0} της ακτίνας της πριν το πορώδες διάφραγμα.

Κατά το πέρασμά της μέσα από το πορώδες διάφραγμα, η φυσαλίδα υφίσταται μία πτώση πίεσης κατά ΔP , οπότε η πίεσή της πριν το πορώδες είναι ίση με το άθροισμα της πίεσης που έχει η φυσαλίδα μετά το πορώδες, στην είσοδο του νερού και του ΔP . Αυτή η τιμή της πίεσης δίνεται από τη σχέση:

$$P_0 = P + \rho g X + \Delta P \quad (2.56)$$

Η μερική πίεση του αέρα μέσα στη φυσαλίδα είναι:

$$P_{\text{αέρα}} = P_0 - P_{\text{sat}}(T_0) \quad (2.57)$$

και η ποσότητα του αέρα είναι:

$$n_{\text{αέρα}} = \frac{P_{\text{αέρα}} \cdot V_0}{R \cdot T_0} \quad (2.58)$$

που θα είναι η ίδια σε όλη τη διάρκεια της πορείας της φυσαλίδας στη στήλη του νερού.

Αφού η φυσαλίδα υφίσταται την πτώση πίεσης κατά το πέρασμά της μέσα από το πορώδες, τότε η πίεσή της μειώνεται και ο όγκος της αυξάνεται, σύμφωνα με το νόμο των ιδανικών αερίων, εφόσον η ποσότητα του μίγματος αέρα-υδρατμού δεν αλλάζει. Τότε δεν είναι πια κορεσμένη σε υδρατμό και μπορεί να πάρει κι άλλη ποσότητα υδρατμού μέχρι να κορεστεί. Η καινούρια τιμή του όγκου της φυσαλίδας θα είναι:

$$V_1 = \frac{V_0 \cdot P_0}{P_{b0}} \quad (2.59)$$

όπου:

$P_{b0}=P+rgX$ είναι η πίεση της φυσαλίδας αμέσως μετά το πορώδες.

Αφού αλλάζει ο όγκος, θα αλλάξει και η ακτίνα της φυσαλίδας. Η καινούρια τιμή της ακτίνας θα είναι:

$$r_{b1} = \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (2.60)$$

Αν η φυσαλίδα ήταν κορεσμένη σε υδρατμό στη θερμοκρασία T_i του κάθε διαστήματος ολοκλήρωσης dx , η ποσότητα του υδρατμού που θα περιείχε θα ήταν:

$$n_{\text{υδρατμού}} = \frac{P_{\text{sat}}(T_i) \cdot n_{\text{αερα}}}{P_b - P_{\text{sat}}(T_i)} \quad (2.61)$$

Η παραπάνω υπολογιστική διαδικασία κωδικοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και προέκυψε το πρόγραμμα που υπάρχει στο παράρτημα Β, μαζί με το λογικό του διάγραμμα. Επίσης στο παράρτημα Β υπάρχουν αποτελέσματα από την εκτέλεση του προγράμματος όπως ακριβώς εκτυπώνονται από το πρόγραμμα. Το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιήθηκε για τα μεγέθη των παραπάνω σχέσεων είναι το S.I. (Διεθνές Σύστημα).

2.3.2. Αποτελέσματα

(α) Ακρίβεια υπολογισμών

Το πρόγραμμα αποτελεί ένα πολύ καλό εργαλείο για το σχεδιασμό της συσκευής και την επιλογή βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας. Συγκεκριμένα, μπορεί να διερευνηθεί και να επιλεγεί το βέλτιστο μέγεθος φυσαλίδας και το βέλτιστο ύψος στήλης θαλασσινού νερού με κριτήριο τη μέγιστη ποσότητα υδρατμού που μπορεί να πάρει η φυσαλίδα.

Αρχικά, μελετήθηκε η επίδραση του διαστήματος ολοκλήρωσης στα αποτελέσματα. Γενικά, στις αριθμητικές μεθόδους προκαλούνται αριθμητικές αστάθειες στα αποτελέσματα. Όσο πιο μικρό είναι το διάστημα ολοκλήρωσης, τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η πραγματική τιμή μιας συνάρτησης. Από την άλλη μεριά, μπορεί το μικρό διάστημα ολοκλήρωσης να εξασφαλίζει καλύτερη ακρίβεια, αλλά αυξάνει κατά πολύ τη λεγόμενη υπολογιστική προσπάθεια που έχει να κάνει κυρίως με αύξηση του χρόνου της αριθμητικής επίλυσης.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση δοκιμάστηκαν τρία διαφορετικά διαστήματα ολοκλήρωσης $Dx=1, 0.5, 0.1$ mm για δύο διαφορετικά μεγέθη φυσαλίδας, ακτίνας $r_b=0.1$ και 0.5 mm για ένα μικρό ύψος στήλης νερού $X=0.01$ m με αρχική θερμοκρασία $T_0=100$ °C. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα των σχημάτων 2.7 και 2.8 και εικονίζουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας της φυσαλίδας ως συνάρτηση της απόστασης από το πορώδες διάφραγμα. Όπως φαίνεται, για το μικρότερο μέγεθος φυσαλίδας ($r_b=0.1$ mm) τα μεγαλύτερα διαστήματα ολοκλήρωσης προκαλούν αριθμητική αστάθεια και δίνουν μη φυσιολογικά αποτελέσματα, κάτι που δεν συμβαίνει με το μικρό διάστημα ολοκλήρωσης. Ενώ στο άλλο μέγεθος φυσαλίδας ($r_b=0.5$ mm) κανένα από τα τρία διαστήματα ολοκλήρωσης δεν προκαλεί αριθμητική αστάθεια. Επομένως το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι όσο μικρότερο γίνεται το μέγεθος της φυσαλίδας, τόσο μικρότερο διάστημα ολοκλήρωσης απαιτείται για να αποφεύγονται οι αριθμητικές αστάθειες στα αποτελέσματα.

(β) Επίδραση διαμέτρου φυσαλίδας και ύψους στήλης νερού

Η αέρια φυσαλίδα αναμένεται να ψυχθεί λόγω εξάτμισης κατά την είσοδό της στο νερό. Για την εκτίμηση της σημασίας του φαινομένου αυτού γίνεται λεπτομερής υπολογισμός μεταβολής της θερμοκρασίας φυσαλίδας $r_b=0.5$ mm στο πρώτο 1 εκατοστό της διαδρομής της.

Αποδεικνύεται ότι το μεταβατικό φαινόμενο έχει πολύ μικρό χαρακτηριστικό χρόνο και απαιτεί αντίστοιχα μικρό διάστημα ολοκλήρωσης. Τα αποτελέσματα για διάστημα ολοκλήρωσης $Dx=1, 0.5, 0.1$ και 0.01 mm παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 2.9, όπου φαίνεται ότι η φυσαλίδα δεν ψύχεται καθόλου. Η θερμοκρασία της δεν πέφτει κάτω από τους $99,5$ °C, κάτι που συμβαίνει στο πρώτο μισό χιλιοστό, και πολύ γρήγορα αποκτά την αρχική της θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι η μετάδοση θερμότητας στη φυσαλίδα γίνεται πολύ γρήγορα σε σχέση με την εξάτμιση.

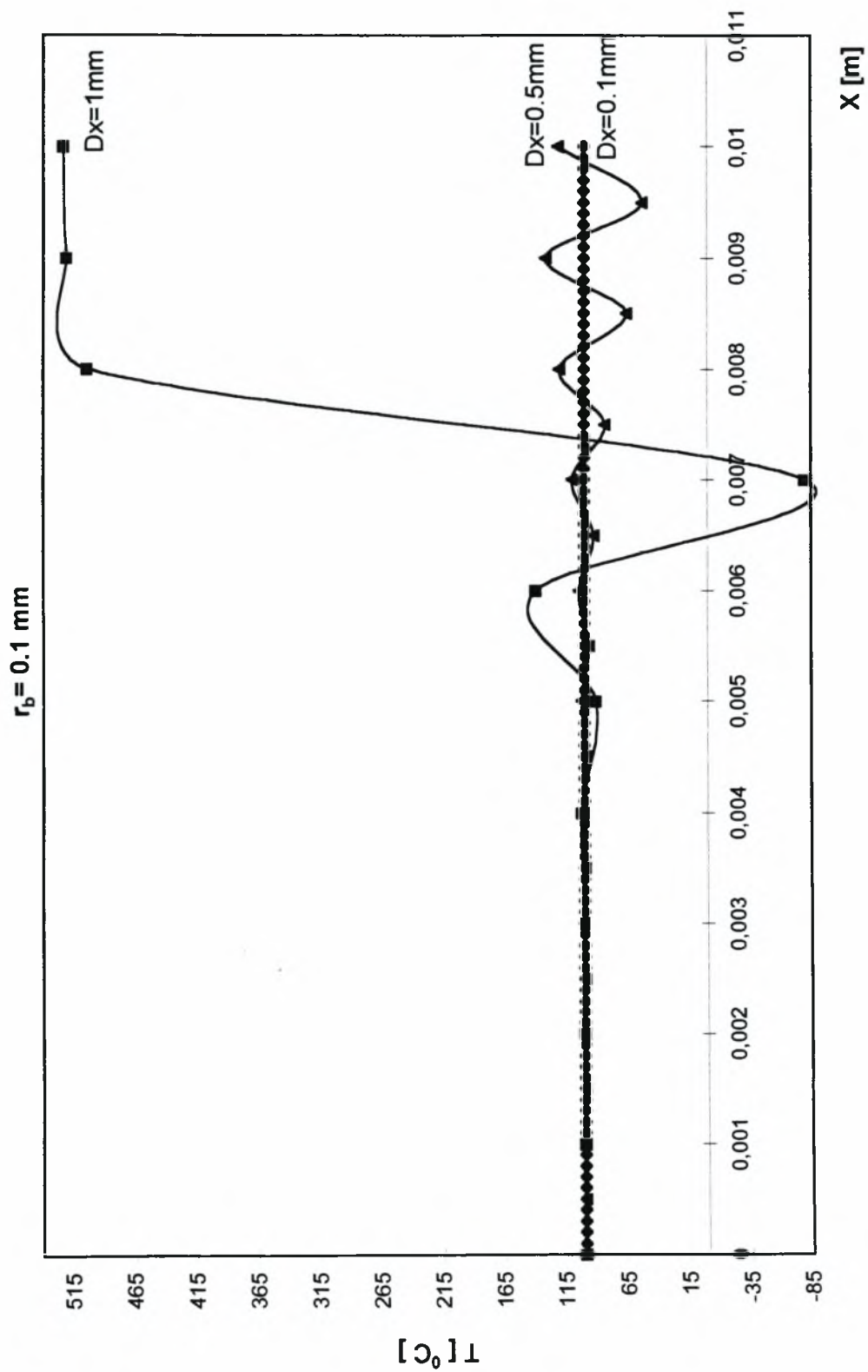
Στη συνέχεια για διάστημα ολοκλήρωσης $Dx=0.1$ mm και για κάποιο ύψος που μπορεί να δώσει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα π.χ. $X=0.2$ m, δοκιμάστηκαν διάφορα μεγέθη φυσαλίδας, ακτίνας $r_b=0.1-1$ mm, για την επιλογή του βέλτιστου μεγέθους, όσον αφορά την ποσότητα του υδρατμού που εξατμίζεται σε σχέση με την ποσότητα του αέρα που περιέχεται στη φυσαλίδα στην είσοδό της στο νερό. Μία

φουσαλίδα ακτίνας 0.1 mm θεωρείται μικρή και μπορεί δύσκολα να σχηματιστεί, ενώ μία φουσαλίδα ακτίνας 1 mm θεωρείται μεγάλη. Έτσι προέκυψε το διάγραμμα του σχήματος 2.10. Σ' αυτό το διάγραμμα φαίνεται ότι οι μικρές φουσαλίδες εξατμίζουν μεγαλύτερη ποσότητα υδρατμού, κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού οι μικρές φουσαλίδες κορένονται σε υδρατμό γρηγορότερα σε σχέση με τις μεγάλες. Η διαφορά μεταξύ των φουσαλίδων 0.1 και 1 mm είναι πολύ μικρή, της τάξης του 2%. Άρα η φουσαλίδα ακτίνας $r_b=0.5$ mm, που μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί κατά τη δίοδο του αέρα μέσα από το πορώδες διάφραγμα, θα ήταν μια πολύ καλή επιλογή.

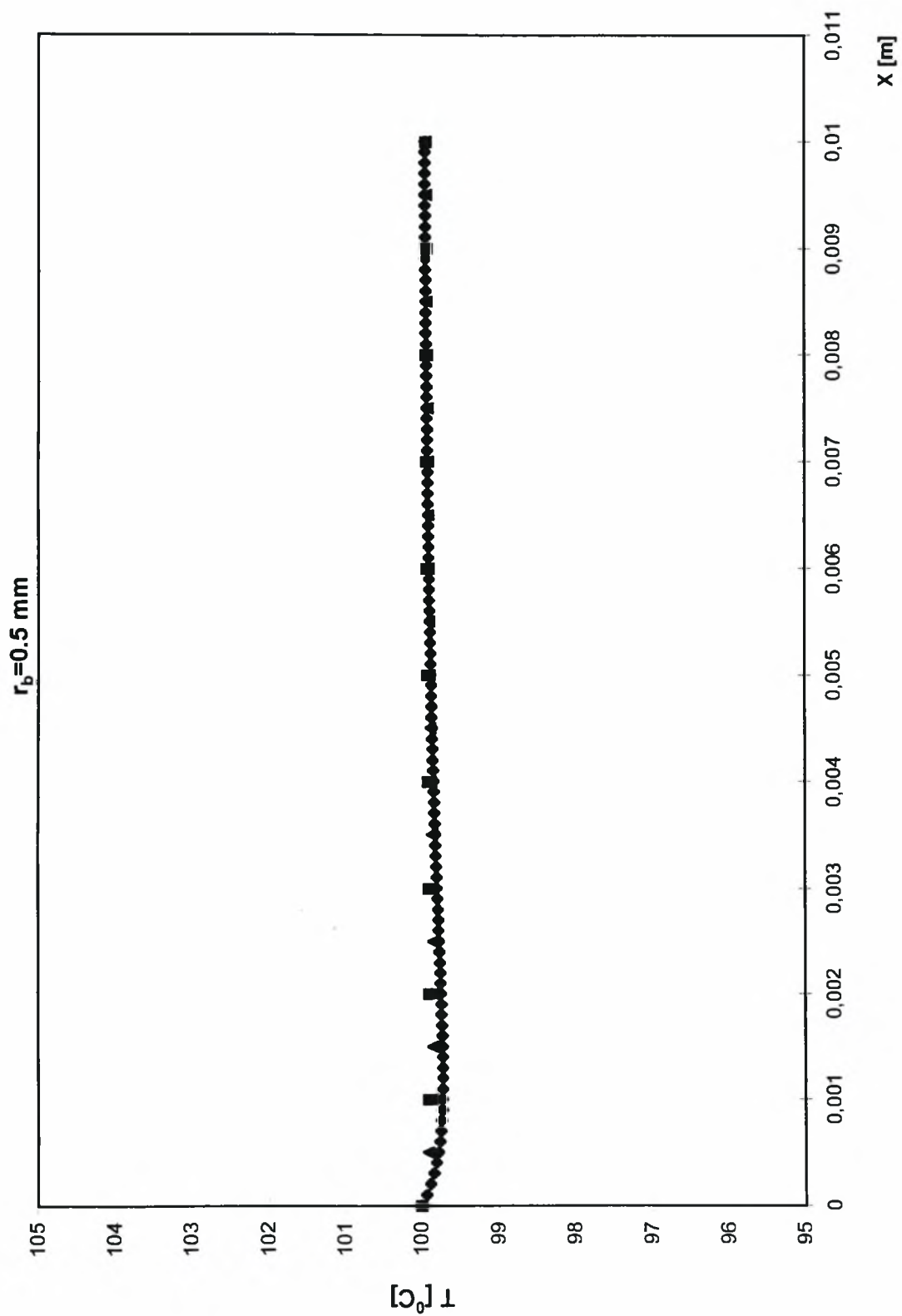
Για αυτό το μέγεθος φουσαλίδας και με το ίδιο διάστημα ολοκλήρωσης δοκιμάστηκαν διάφορα ύψη για την επιλογή της βέλτιστης τιμής με κριτήριο το πόσο κοντά στον κορεσμό θα βρίσκεται η φουσαλίδα κατά την έξοδο της από τη στήλη του νερού. Έτσι προέκυψε το διάγραμμα του σχήματος 2.11, που εικονίζει το πηλίκιο της συγκέντρωσης του υδρατμού μέσα στη φουσαλίδα προς τη συγκέντρωση κορεσμού, στην έξοδο της φουσαλίδας από το νερό για διάφορα ύψη. Σ' αυτό το διάγραμμα φαίνεται πως για ύψη πάνω από 1,5-2 εκατοστά η φουσαλίδα βγαίνει από το νερό σχεδόν κορεσμένη σε υδρατμό. Για αυτά τα ύψη το ποσοστό κορεσμού της φουσαλίδας σε υδρατμό είναι πάνω από 99%. Στο 1 χιλιοστό το ποσοστό κορεσμού της φουσαλίδας σε υδρατμό είναι κοντά στο 86%, στα 5 χιλιοστά ανεβαίνει κοντά στο 96%, ενώ στο 1 εκατοστό βρίσκεται στο 98,5%. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι θεωρητικά αρκεί ακόμη και 1 εκατοστό στήλης νερού για να βγει η φουσαλίδα κορεσμένη σε υδρατμό.

Στο διαγράμμα του σχήματος 2.12 δείχνεται η μεταβολή του πηλίκιου της συγκέντρωσης του υδρατμού μέσα στη φουσαλίδα προς τη συγκέντρωση κορεσμού κατά τη διάρκεια της πορείας της φουσαλίδας μέσα στο νερό για ύψη 1 και 2 εκατοστά. Και για τα δύο ύψη παρατηρείται ότι η συγκέντρωση της φουσαλίδας σε υδρατμό είναι κοντά στο 65% του κορεσμού στην είσοδό της στο νερό και πολύ γρήγορα, κοντά στα 2 χιλιοστά, φτάνει στο 90%.

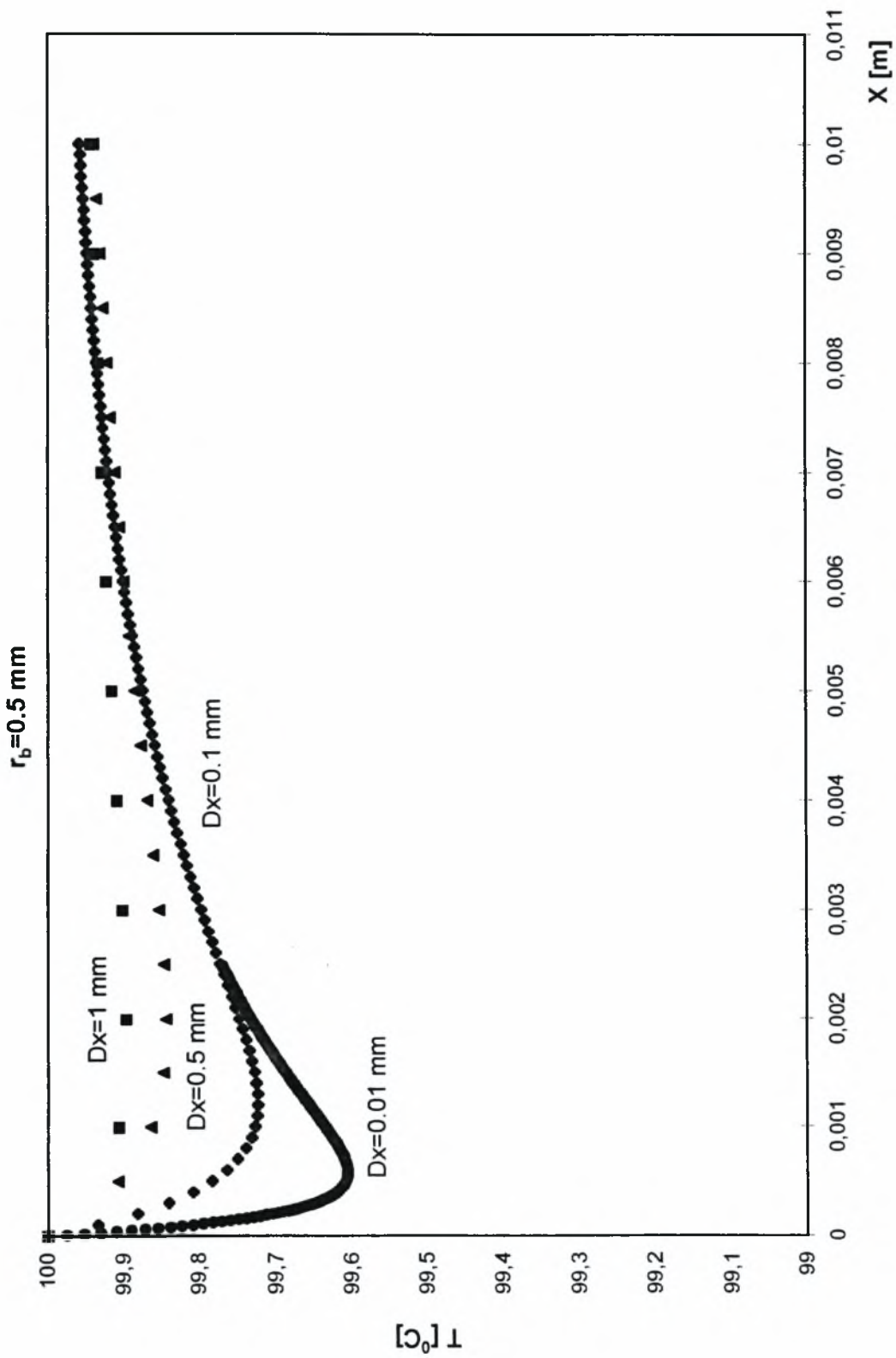
Το πρακτικό συμπέρασμα που προκύπτει από τους ανωτέρω υπολογισμούς είναι ότι στήλη νερού περί τα 10 εκατοστά πρέπει να είναι επαρκής, ώστε φουσαλίδες ακτίνας $r_b=0.1-1$ mm να εξέρχονται κορεσμένες σε υδρατμό. Οι προβλέψεις αυτές θα ελεγχθούν με τη λειτουργία της πιλοτικής συσκευής αφαλάτωσης, τα βασικά τμήματα της οποίας περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.



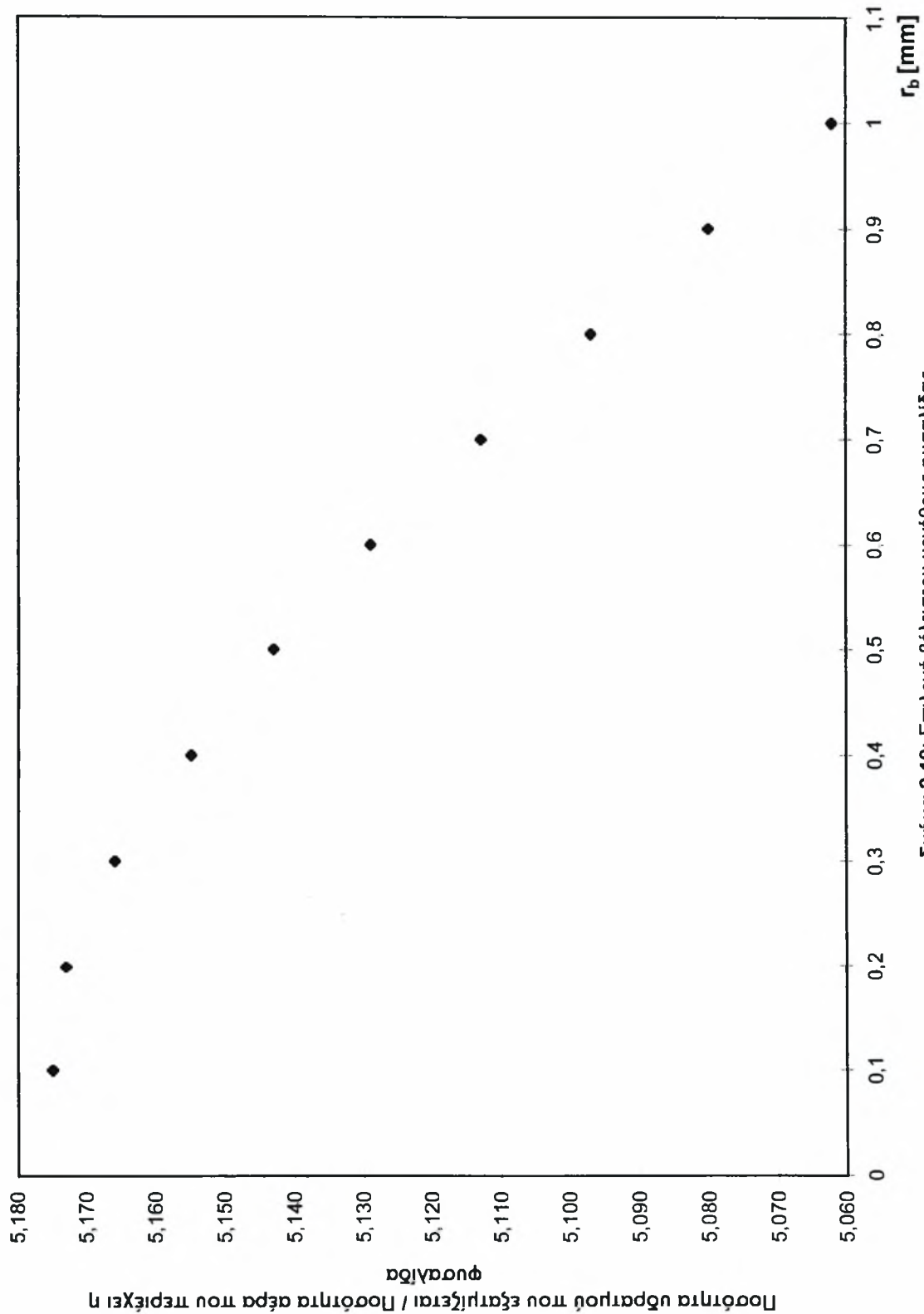
Σχήμα 2.7: Εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το διάστημα ολοκλήρωσης



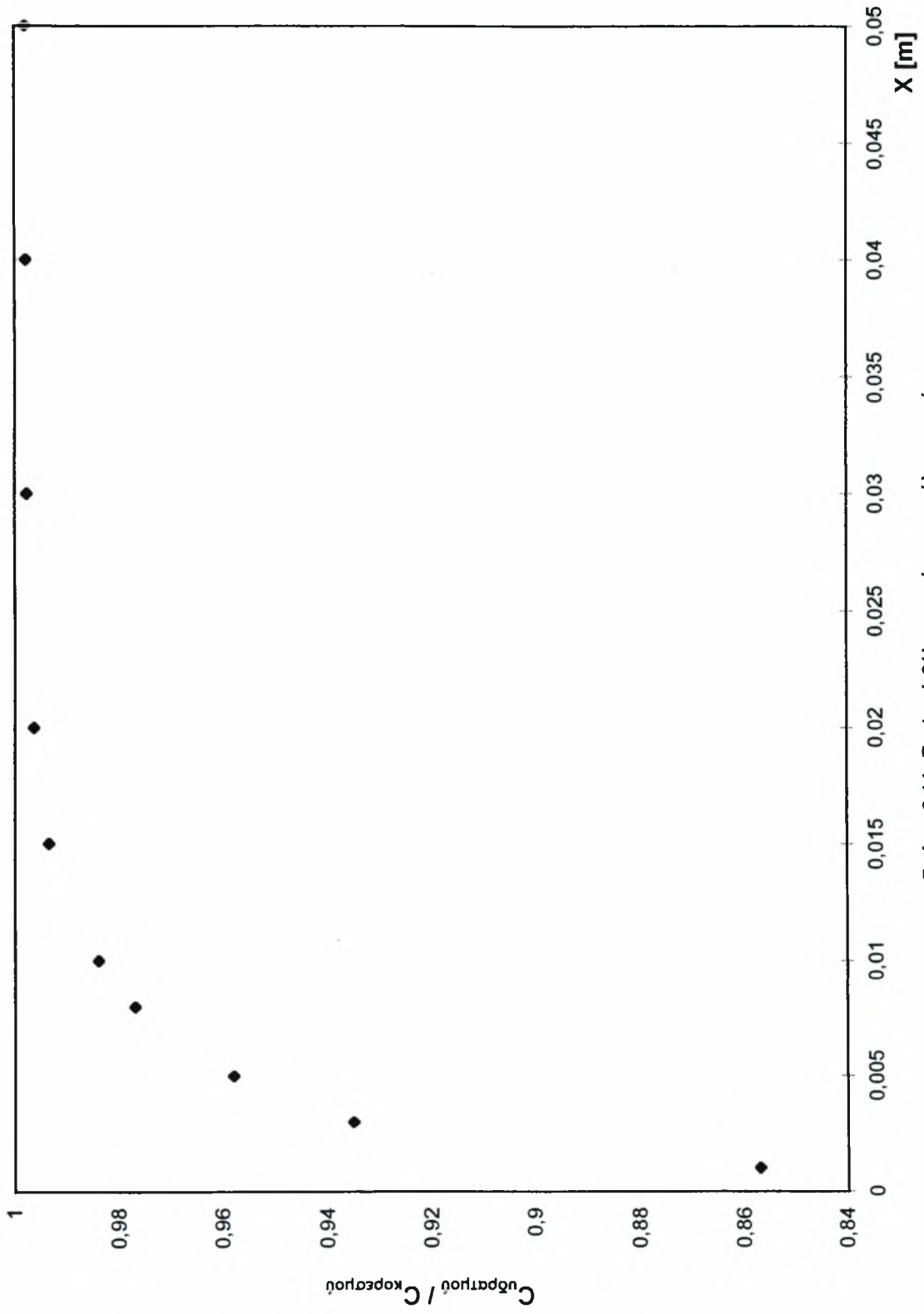
Σχήμα 2.8: Εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το διάστημα ολοκλήρωσης



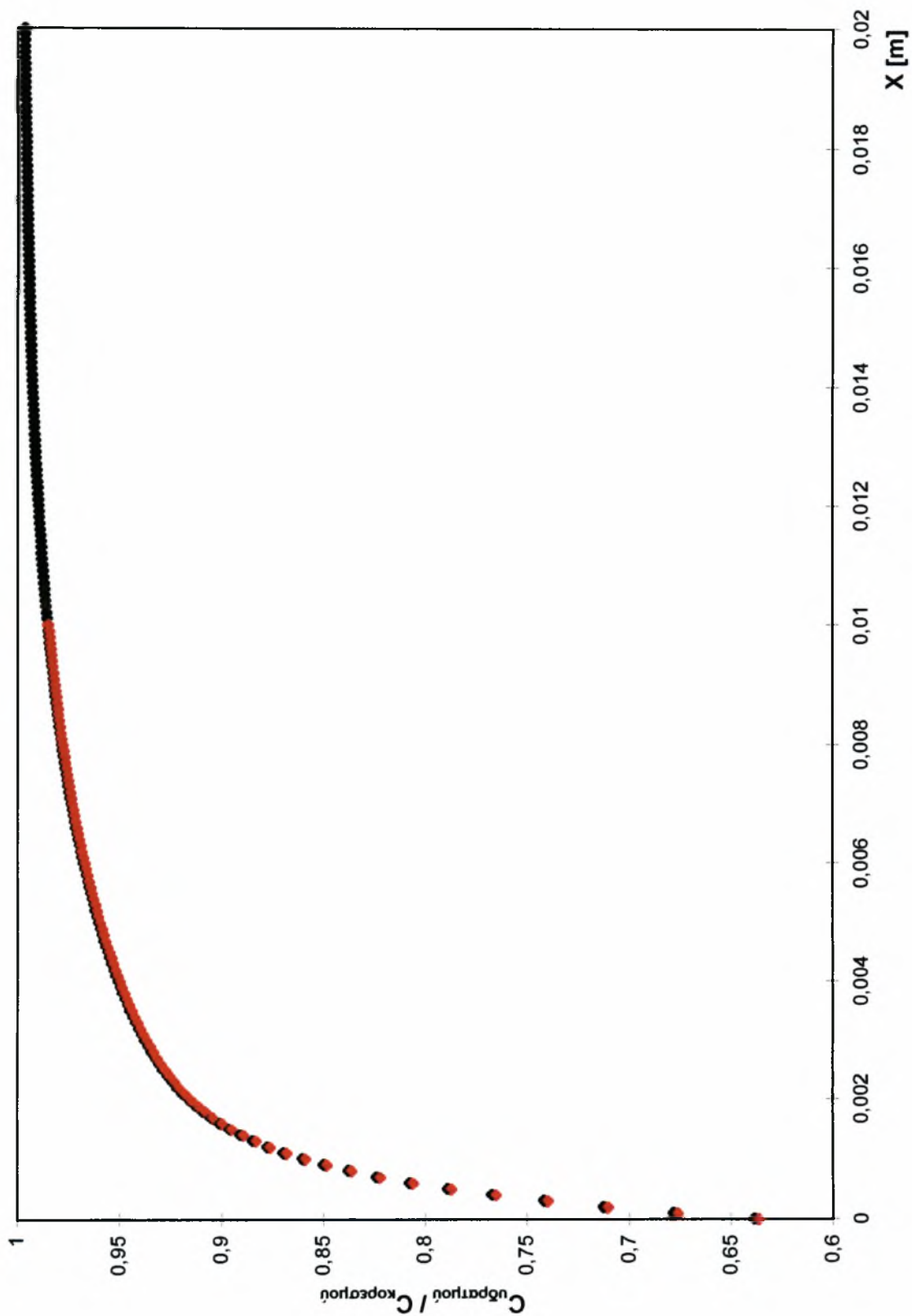
Σχήμα 2.9: Μεταβολή της θερμοκρασίας της φουσαλίδας για διάφορα διαστήματα ολοκλήρωσης



Σχήμα 2.10: Επιλογή βέλτιστου μεγέθους φασαλίδας.



Σχήμα 2.11: Επιλογή βέλτιστου ύψους στήλης νερού.



Σχήμα 2.12: Μεταβολή της συγκέντρωσης υδρατιμού προς τη συγκέντρωση κορεσμού στη φυσική φασαλίδα για ύψος 1 και 2 cm

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η εργαστηριακή συσκευή αφαλάτωσης. Ειδικότερα, περιγράφονται αναλυτικά τα διάφορα τμήματα της συσκευής και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή και τη συναρμολόγηση αυτών των τμημάτων.

3.1. Κατασκευή της συσκευής.

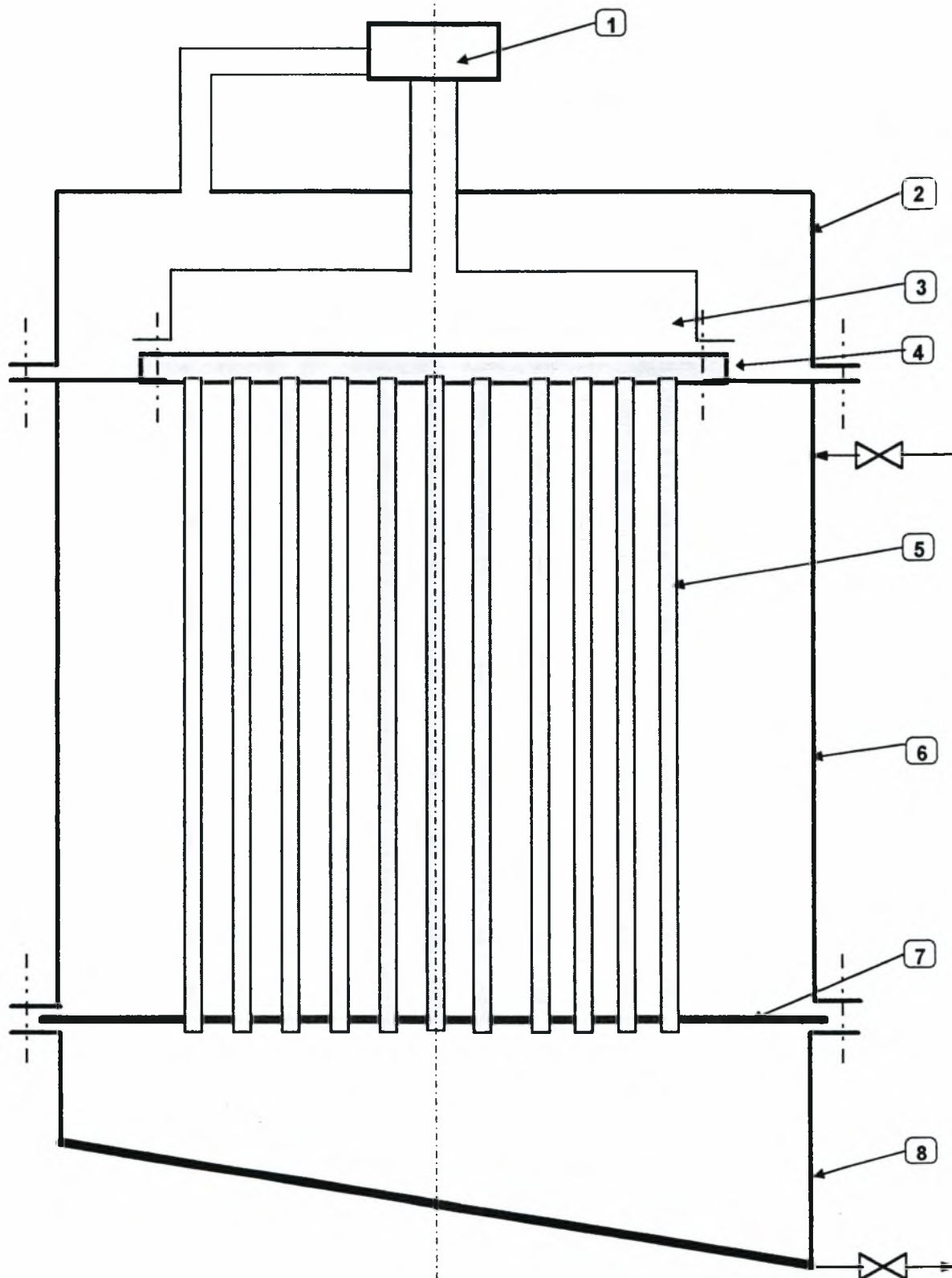
Στο σχήμα 3.1 (σελ. 50) φαίνεται το σκαρίφημα της συσκευής. Η συσκευή αποτελείται από τα εξής τμήματα:

1. Συμπιεστής.

Ο συμπιεστής είναι ένας μικρός εργαστηριακός συμπιεστής τύπου DTE 6 της κατασκευάστριας εταιρείας PICOLINO. Τα κύρια τεχνικά του χαρακτηριστικά είναι ότι έχει παροχή 6,0/7,2 m³/h, ονομαστική ισχύς 0,25/0,30 KW, ταχύτητα ηλεκτροκινητήρα 2750/3300 min⁻¹ στα 50/60 Hz και μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πίεσης κατά $\Delta P=1$ bar μέγιστο. Όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τα κατασκευαστικά στοιχεία του συμπιεστή βρίσκονται στο διαφημιστικό φυλλάδιό του που περιέχεται στο παράρτημα Γ.

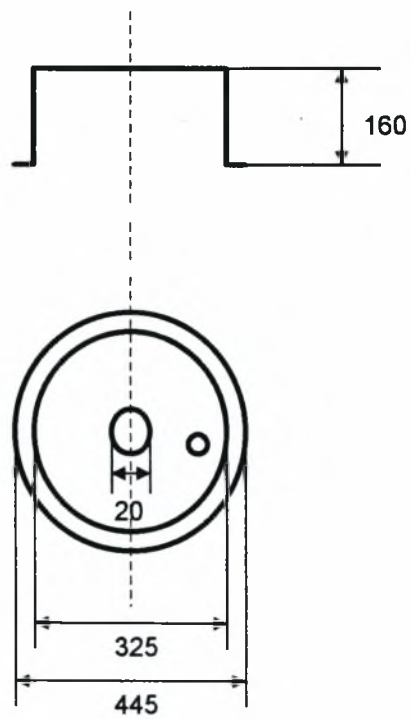
2. Καπάκι 1.

Το σκαρίφημα του καπακιού 1 σε όψη και κάτοψη φαίνεται στο σχήμα 3.2 (σελ. 51). Πρόκειται για ένα κυλινδρικό τεμάχιο το οποίο είναι κατασκευασμένο από πολυεστέρα στις εγκαταστάσεις της εταιρείας Τσιανάκας που βρίσκεται στη βιομηχανική περιοχή Βόλου.



- | | |
|-------------------------|---------------------|
| 1. Συμπιεστής. | 2. Καπάκι 1. |
| 3. Διανομέας συμπιεστή. | 4. Αυλοφόρος πλάκα. |
| 5. Αυλοί. | 6. Κέλυφος. |
| 7. Πορώδες διάφραγμα. | 8. Καπάκι 2. |

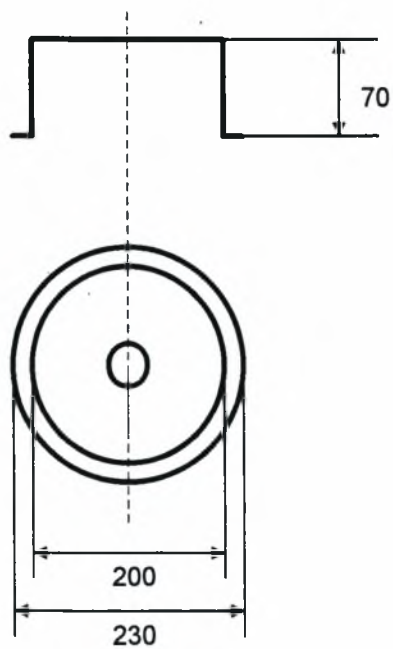
Σχήμα 3.1: Σκαρίφημα πρότυπης συσκευής αφαλάτωσης



Σχήμα 3.2: Σκαρίφημα καπακιού 1.

3. Διανομέας συμπιεστή.

Ο διανομέας του συμπιεστή χρησιμεύει για να διανέμει ομοιόμορφα το αέριο μίγμα αέρα-υδρατμού, που έρχεται από το συμπιεστή, στους αυλούς. Το σκαρίφημα του διανομέα του συμπιεστή σε όψη και κάτοψη φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Σκαρίφημα διανομέα συμπιεστή.

Κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο και το υλικό κατασκευής του είναι μπρούντζος (ορείχαλκος). Το πάχος του τοιχώματος είναι τέτοιο ώστε να αντέχει πιέσεις της τάξης των 2 bar.

4. Αυλοφόρος πλάκα.

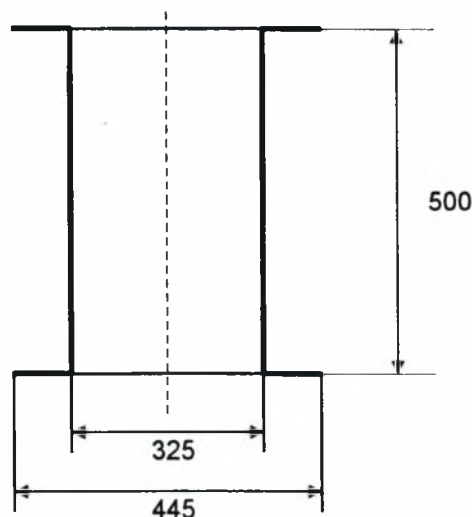
Η αυλοφόρος πλάκα είναι ένας κυκλικός δίσκος διαμέτρου 230 mm και πάχους 20 mm, πάνω στην οποία έχουν ανοιχτεί οπές για τη στήριξη των αυλών. Η στήριξη των αυλών πάνω στην αυλοφόρο πλάκα έγινε με εκτόνωση του τμήματος των αυλών που εφάπτεται στις οπές, με ειδικό εκτονωτικό εργαλείο. Το υλικό κατασκευής της αυλοφόρου πλάκας είναι μπρούντζος.

5. Αυλοί.

Οι αυλοί είναι χαλκοσωλήνες του εμπορίου 3/4 in. με εσωτερική διάμετρο 19 mm και εξωτερική 21 mm, μήκους 500 mm. Οι αυλοί έχουν τοποθετηθεί και οι οπές στην αυλοφόρο πλάκα έχουν ανοιχτεί έτσι, ώστε ανά τρεις να σχηματίζουν ισόπλευρο τρίγωνο. Το πλήθος των αυλών είναι 25.

6. Κέλυφος.

Το κέλυφος αποτελεί το κεντρικό τμήμα της συσκευής όπου γίνεται η εξάτμιση και περιέχει τους αυλούς μέσα στους οποίους γίνεται η συμπύκνωση του υδρατμού. Το σκαρίφημα του κελύφους φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Σκαρίφημα κελύφους

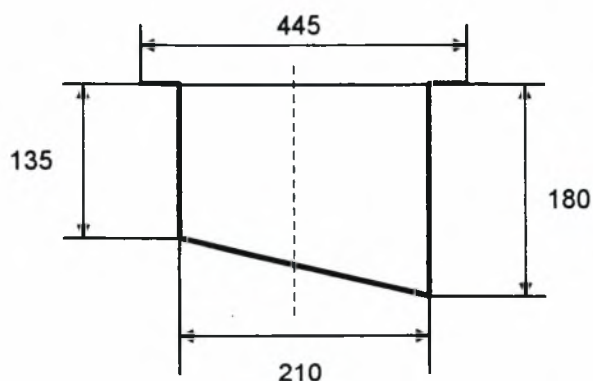
Πρόκειται για ένα κυλινδρικό τεμάχιο το οποίο είναι κατασκευασμένο και αυτό από πολυεστέρα όπως και το καπάκι 1.

7. Πορώδες διάφραγμα.

Το πορώδες διάφραγμα βρίσκεται ανάμεσα στο κέλυφος και στο καπάκι 2. Αποτελεί τον πάτο του κελύφους. Είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα με την τεχνική της κονιομεταλλουργίας και αφήνει να περνάει ο αέρας αλλά όχι το νερό. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού του υλικού υπάρχουν στο φυλλάδιο που περιέχεται στο παράρτημα Γ. Πάνω του έχουν ανοιχτεί οπές σύμφωνα με τη διάταξη των αυλών για να στηριχτούν οι αυλοί.

8. Καπάκι 2.

Το καπάκι 2 αποτελεί το κάτω μέρος της συσκευής όπου καταλήγει ο υδρατμός που συμπυκνώνεται στους αυλούς, δηλ. είναι ο χώρος συλλογής του γλυκού νερού. Είναι κατασκευασμένο από πολυεστέρα και πρόκειται για ένα κυλινδρικό τεμάχιο του οποίου η κάτω βάση είναι κεκλιμένη. Το σκαρίφημα του καπακιού 2 φαίνεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Σκαρίφημα καπακιού 2.

3.2. Συναρμολόγηση της συσκευής.

Η συναρμολόγηση της συσκευής έγινε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών.

Για τη σύνδεση του συμπιεστή με το καπάκι 1 και το διανομέα του συμπιεστή χρησιμοποιήθηκαν ελαστικά σωληνάκια διαμέτρου 12 mm. Για τη σύνδεση του καπακιού 1 και του διανομέα με τα σωληνάκια χρησιμοποιήθηκαν ρακόρ.

Τα δύο καπάκια δένονται με το κέλυφος, όπως και ο διανομέας του συμπιεστή με την αυλοφόρο πλάκα, με κοχλίες και παξιμάδια προδιαγραφών M 13. Για τη στεγανοποίηση στις παραπάνω συνδέσεις χρησιμοποιήθηκε λάστιχο πάχους 4 mm και ελαστομερής σιλικόνη για την κόλληση του λάστιχου πάνω στο κέλυφος.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η σύνδεση των αυλών με την αυλοφόρο πλάκα έγινε με εκτόνωση. Επειδή δεν μπορεί να γίνει συγκόλληση του πορώδους διαφράγματος με τους αυλούς, στο τέλος κάθε αυλού συγκολλήθηκε ένα είδος παξιμαδιού με εξωτερικό σπείρωμα. Με τη βοήθεια ενός παξιμαδιού, μιας ροδέλας και σιλικόνης στηρίχτηκε το πορώδες διάφραγμα πάνω στους αυλούς και στεγανοποιήθηκε ο χώρος του κελύφους.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σαν σκοπό είχε τη μελέτη, μέχρι ενός σημείου μιας καινούριας ιδέας, η οποία είναι δυνατόν να αποτελέσει μία πρότυπη μέθοδο θερμικής αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού.

Όπως προκύπτει από τη μελέτη της διπλωματικής, αυτή η ιδέα στηρίζεται στην ενσωμάτωση των αρχών της μηχανικής συμπίεσης ατμών (mechanical vapour compression-MVC), της εξάτμισης εκτόνωσης (flash evaporation) και της κλασματικής απόσταξης (rectification) σε μια καινοτόμο μέθοδο εξάτμισης. Όπως αποδεικνύεται αυτή η μέθοδος μπορεί να υλοποιηθεί με μια απλή, στην κατασκευή και λειτουργία της, συσκευή η οποία είναι ήδη έτοιμη και πρόκειται να τεθεί σε λειτουργία στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών.

Η κατανάλωση ενέργειας σ' αυτή τη μέθοδο γίνεται σχεδόν αποκλειστικά στο στάδιο της συμπίεσης, για τη λειτουργία του συμπιεστή. Με μια απλή θερμοδυναμική ανάλυση που έγινε, διαπιστώθηκε ότι η λειτουργία της συσκευής σε ατμοσφαιρική πίεση ή σε πιέσεις λίγο μεγαλύτερες από την ατμοσφαιρική είναι οικονομικά συμφέρουσα. Μάλιστα όταν η πίεση λειτουργίας είναι κοντά στην τάση ατμών του νερού στη θερμοκρασία λειτουργίας, οι καταναλώσεις ενέργειας που προκύπτουν είναι πολύ ικανοποιητικές (3-7 KWh/m³) σε σχέση με τις καταναλώσεις ενέργειας που έχουν οι συμβατικές μέθοδοι αφαλάτωσης (9-10 KWh/m³ παραγόμενου πόσιμου νερού). Στις ανωτέρω συνθήκες το κορεσμένο μείγμα αέρα-υδρατμού που προκύπτει από την εξάτμιση είναι πλούσιο σε υδρατμό.

Από την προσομοίωση, με κώδικα Η/Υ σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, των φαινομένων μεταφοράς που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ανόδου μιας φυσαλίδας στο χώρο του νερού προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η φυσαλίδα δεν ψύχεται αισθητά από την αρχική της θερμοκρασία, κάτι που σημαίνει ότι η μετάδοση θερμότητας στη φυσαλίδα γίνεται πολύ γρήγορα από την είσοδό της στο νερό. Άρα η κυρίαρχη αντίσταση στον κορεσμό είναι η μεταφορά μάζας (διάχυση του υδρατμού στον αέρα της φυσαλίδας).

- Τα μικρά μεγέθη φυσαλίδας κορένονται σε υδρατμό πιο γρήγορα από ότι τα μεγάλα.

- Θεωρητικά, αρκούν 1 με 2 εκατοστά στήλης νερού για να κορεσθούν οι φυσαλίδες σε υδρατμό.

- Όσο πιο μικρό γίνεται το μέγεθος της φυσαλίδας, τόσο πιο μικρό διάστημα ολοκλήρωσης απαιτείται για να αποφεύγονται οι αριθμητικές αστάθειες στα αποτελέσματα.

Συνέχιση της παρούσας διπλωματικής θα αποτελούσε ο πειραματικός έλεγχος των παραπάνω συμπερασμάτων που προέκυψαν με θεωρητικές αναλύσεις.

5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

A. Πίνακες θερμοδυναμικού υπολογισμού.

B. Πρόγραμμα FORTRAN, λογικό διάγραμμα και αποτελέσματα.

**Γ. Τεχνικά και κατασκευαστικά στοιχεία συμπιεστή και υλικού πορώδους
διαφράγματος.**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακες θερμοδυναμικού υπολογισμού.

T1=80°C		T2'		T2		Ws (ισεvτρ.)		Ws (τρav.)		mol. (air/μiv.) (P1-Psat)/P1		mol(H2O/air) Psat/(P1-Psat)		moles(H2O/αέp) Psat/(P2-Psat)		mol(H2O)/ moles(αέp)		kgr. H2O/ (mol.αέpa)		Joule / (mol.αέpa)		Joule / kgr. H2O	
P1 (bar)	P2 (bar)	Cpμiv. J/mol.μiv	K	K	K	(ισεvτρ.)	(ισεvτρ.)	(τρav.)	(P1-Psat)/P1	mol(H2O/air) Psat/(P1-Psat)	moles(H2O/αέp) Psat/(P2-Psat)	mol(H2O)/ moles(αέp)	kgr. H2O/ (mol.αέpa)	Joule / (mol.αέpa)	Joule / kgr. H2O								
0,4936	0,5936	33,7974	369,39	374,85	374,85	-553,893	-738,525	0,04051864	0,12877116	23,68	3,946666667	19,733333	0,3552	-18226,79	-51314,15								
0,5436	0,6436	33,3561	368,17	373,23	373,23	-506,166	-674,888	0,12877116	0,20215633	6,765714286	2,785882353	3,9798319	0,071637	-5240,984	-73160,32								
0,5936	0,6936	32,9892	367,13	371,83	371,83	-466,007	-621,343	0,20215633	0,26413922	3,946666667	2,152727273	1,7939394	0,0322909	-3073,578	-95183,99								
0,6436	0,7436	32,6793	366,21	370,62	370,62	-431,75	-575,667	0,26413922	0,3171857	2,785882353	1,754074074	1,0318083	0,0185725	-2179,409	-117345,7								
0,6936	0,7936	32,4141	365,41	369,54	369,54	-402,183	-536,245	0,3171857	0,36309844	2,152727273	1,48	0,6727273	0,0121091	-1690,633	-139616,8								
0,7436	0,8436	32,1845	364,7	368,59	368,59	-376,405	-501,874	0,36309844	0,40322581	1,754074074	1,28	0,4740741	0,0085333	-1382,197	-161976,2								
0,7936	0,8936	31,9839	364,06	367,75	367,75	-353,731	-471,642	0,40322581	0,43859649	1,48	1,127619048	0,352381	0,0063429	-1169,672	-184407,7								
0,8436	0,9436	31,807	363,49	366,99	366,99	-333,633	-444,844	0,43859649	0,47000895	1,28	1,007659574	0,2723404	0,0049021	-1014,245	-206899								
0,8936	0,9936	31,65	362,97	366,3	366,3	-315,696	-420,928	0,47000895	0,49809241	1,127619048	0,910769231	0,2168498	0,0039033	-895,5734	-229440,3								
0,9436	1,0436	31,5095	362,51	365,68	365,68	-299,588	-399,451	0,49809241		1,007659574	0,830877193	0,1767824	0,0031821	-801,9607	-252023,8								
T1=90°C		T2'		T2		Ws (ισεvτρ.)		Ws (τρav.)		mol. (air/μiv.) (P1-Psat)/P1		mol(H2O/air) Psat/(P1-Psat)		moles(H2O/αέp) Psat/(P2-Psat)		mol(H2O)/ moles(αέp)		kgr. H2O/ (mol.αέpa)		Joule / (mol.αέpa)		Joule / kgr. H2O	
P1 (bar)	P2 (bar)	Cpμiv. J/mol.μiv	K	K	K	(ισεvτρ.)	(ισεvτρ.)	(τρav.)	(P1-Psat)/P1	mol(H2O/air) Psat/(P1-Psat)	moles(H2O/αέp) Psat/(P2-Psat)	mol(H2O)/ moles(αέp)	kgr. H2O/ (mol.αέpa)	Joule / (mol.αέpa)	Joule / kgr. H2O								
0,7211	0,8211	33,8613	374,76	378,68	378,68	-398,252	-531,003	0,0277354	0,09077941	35,055	5,8425	29,2125	0,525825	-19145,31	-36410,04								
0,7711	0,8711	33,5461	374,14	377,85	377,85	-373,626	-498,168	0,09077941	0,14614541	10,01571429	4,124117647	5,8915966	0,1060487	-5487,678	-51746,75								
0,8211	0,9211	33,2693	373,58	377,1	377,1	-351,866	-469,155	0,14614541	0,19515555	5,8425	3,186818182	2,6556818	0,0478023	-3210,193	-67155,65								
0,8711	0,9711	33,0242	373,07	376,42	376,42	-332,5	-443,333	0,19515555	0,23884486	4,124117647	2,596666667	1,527451	0,0274941	-2271,691	-82624,62								
0,9211	1,0211	32,8058	372,61	375,81	375,81	-315,153	-420,204	0,23884486	0,27803522	3,186818182	2,1909375	0,9958807	0,0179259	-1759,317	-98144,11								
0,9711	1,0711	32,6098	372,19	375,25	375,25	-299,525	-399,367	0,27803522	0,31338752	2,596666667	1,894864865	0,7018018	0,0126324	-1436,39	-113706,5								
1,0211	1,1211	32,4331	371,8	374,73	374,73	-285,373	-380,498	0,31338752	0,34543927	2,1909375	1,669285714	0,5216518	0,0093897	-1214,145	-129305,6								
1,0711	1,1711	32,2728	371,44	374,26	374,26	-272,498	-363,331	0,34543927	0,37463206	1,894864865	1,491702128	0,4031627	0,0072569	-1051,793	-144936,3								
1,1211	1,2211	32,1268	371,12	373,82	373,82	-260,734	-347,645	0,37463206	0,40133208	1,669285714	1,348269231	0,3210165	0,0057783	-927,9633	-160594,6								
1,1711	1,2711	31,9933	370,81	373,42	373,42	-249,943	-333,257	0,40133208		1,491702128	1,23	0,2617021	0,0047106	-830,3767	-176276,9								

Πίνακας Α.1

T1=100°C		P2		Cpμγ.		T2'		T2		Ws		Ws		Ws		mol.(air/μγ.)		mol.(H2O/air)		moles(H2O/αέρ)		mol(H2O)/		kgr.H2O/		Joule /		Joule /	
P1	(bar)	(bar)	(bar)	J/mol.μγ	K	K	(ισεντρ.)	(ισεντρ.)	(ισεντρ.)	(πραγ.)	(P1-Psat)/P1	(P1-Psat)/P1	Psat/(P1-Psat)	Psat/(P1-Psat)	Psat/(P2-Psat)	moles(αέρ)	moles(αέρ)	mol(H2O)/	mol(H2O)/	moles(αέρ)	moles(αέρ)	mol(H2O)/	mol(H2O)/	moles(αέρ)	moles(αέρ)	mol(H2O)/	mol(H2O)/	moles(αέρ)	moles(αέρ)
1,0333	1,1333	33,9032	381,546	384,395	-289,739	-276,82	-386,3188	0,019355463	50,665	8,444166667	42,22083	0,759975	-19959,16	-26262,92															
1,0833	1,1833	33,6769	381,22	383,96	-276,82	-369,0937	0,064617373	14,47571429	5,960588235	8,515126	0,153272	-5711,989	-37266,94																
1,1333	1,2333	33,4706	380,918	383,557	-265,004	-353,3381	0,105885467	8,444166667	4,605909091	3,838258	0,069089	-3336,984	-48300,04																
1,1833	1,2833	33,2817	380,636	383,182	-254,154	-338,8716	0,143666019	5,960588235	3,752962963	2,207625	0,039737	-2358,746	-59358,55																
1,2333	1,3333	33,1081	380,375	382,833	-244,157	-325,5424	0,1783832	4,605909091	3,1665625	1,439347	0,025908	-1824,961	-70439,41																
1,2833	1,3833	32,948	380,13	382,507	-234,916	-313,2215	0,210395075	3,752962963	2,738648649	1,014314	0,018258	-1488,73	-81540,03																
1,3333	1,4333	32,8	379,901	382,201	-226,349	-301,7986	0,240006	3,1665625	2,412619048	0,753943	0,013571	-1257,463	-92658,21																
1,3833	1,4833	32,6626	379,686	381,915	-218,384	-291,1792	0,267476325	2,738648649	2,155957447	0,582691	0,010488	-1088,617	-103792																
1,4333	1,5333	32,5348	379,484	381,646	-210,961	-281,2814	0,29303007	2,412619048	1,948653846	0,463965	0,008351	-959,9061	-114939,9																
1,4833	1,5833	32,4157	379,294	381,392	-204,025	-272,034	0,316861053	2,155957447	1,777719298	0,378238	0,006808	-858,5276	-126100,4																
T1=110°C		P2		Cpμγ.		T2'		T2		Ws		Ws		Ws		mol.(air/μγ.)		mol.(H2O/air)		moles(H2O/αέρ)		mol(H2O)/		kgr.H2O/		Joule /		Joule /	
P1	(bar)	(bar)	(bar)	J/mol.μγ	K	K	(ισεντρ.)	(ισεντρ.)	(ισεντρ.)	(πραγ.)	(P1-Psat)/P1	(P1-Psat)/P1	Psat/(P1-Psat)	Psat/(P1-Psat)	Psat/(P2-Psat)	moles(αέρ)	moles(αέρ)	mol(H2O)/	mol(H2O)/	moles(αέρ)	moles(αέρ)	mol(H2O)/	mol(H2O)/	moles(αέρ)	moles(αέρ)	mol(H2O)/	mol(H2O)/	moles(αέρ)	moles(αέρ)
1,4527	1,5527	33,9312	389,299	391,398	-213,719	-284,959	0,013767467	71,635	11,93916667	59,69583	1,074525	-20698	-19262,47																
1,5027	1,6027	33,7671	389,124	391,165	-206,786	-275,7143	0,046582818	20,46714286	8,427647059	12,0395	0,216711	-5918,798	-27311,95																
1,5527	1,6527	33,6136	388,959	390,945	-200,288	-267,0502	0,07728473	11,93916667	6,512272727	5,426894	0,097684	-3455,406	-35373,28																
1,6027	1,7027	33,4696	388,802	390,736	-194,185	-258,9136	0,106071005	8,427647059	5,306296296	3,121351	0,056184	-2440,946	-43445,33																
1,6527	1,7527	33,3344	388,653	390,537	-188,443	-251,258	0,133115508	6,512272727	4,4771875	2,035085	0,036632	-1887,518	-51527,15																
1,7027	1,8027	33,2071	388,512	390,349	-183,031	-244,0418	0,15857168	5,306296296	3,872162162	1,434134	0,025814	-1539	-59617,85																
1,7527	1,8527	33,0871	388,377	390,17	-177,921	-237,2283	0,182575455	4,4771875	3,411190476	1,065997	0,019188	-1299,344	-67716,68																
1,8027	1,9027	32,9738	388,249	389,999	-173,089	-230,7848	0,205247684	3,872162162	3,048297872	0,823864	0,01483	-1124,421	-75822,96																
1,8527	1,9527	32,8665	388,127	389,836	-168,511	-224,6819	0,226696173	3,411190476	2,755192308	0,655998	0,011808	-991,1145	-83936,09																
1,9027	2,0027	32,7649	388,011	389,681	-164,17	-218,8933	0,247017396	3,048297872	2,513508772	0,534789	0,009626	-886,1451	-92055,51																

Πίνακας Α.2

T1=120°C													
P1 (bar)	P2 (bar)	Cpμμγ J/mol,μμγ	T2' K	T2 K	Ws (σεντρ.)	Ws (τηραγ.)	mol (air/μμγ.) (P1-Psat)/P1	mol(H2O/air) Psat/(P1-Psat)	moles(H2O/αέπα) Psat/(P2-Psat)	moles(H2O)/ moles(αέπα)	kg H2O/ (mol αέπα)	Joule / (mol αέπα)	Joule / kg H2O
2,0054	2,1054	33,95013	397,7113	399,2817	-159,9492	-213,2656	0,009973073	99,27	16,546	82,725	1,48905	-21384,15	-14360,93
2,0554	2,1554	33,82972	397,6152	399,1536	-156,1303	-208,1738	0,034056631	28,36285714	11,67882353	16,68403361	0,300312605	-6112,577	-20354,05
2,1054	2,2054	33,71502	397,5229	399,0305	-152,4894	-203,3193	0,056996295	16,545	9,024545455	7,520454545	0,135368182	-3567,236	-26352,1
2,1554	2,2554	33,60564	397,4342	398,9123	-149,0144	-198,6859	0,078871671	11,67882353	7,353333333	4,325490196	0,077858824	-2519,103	-32354,75
2,2054	2,3054	33,50122	397,3489	398,7986	-145,6641	-194,2589	0,099756146	9,024545455	6,204375	2,820170455	0,050763068	-1947,357	-38361,68
2,2554	2,3554	33,40144	397,2668	398,6891	-142,5185	-190,0247	0,11971269	7,353333333	5,365945946	1,987387387	0,035729773	-1587,34	-44372,6
2,3054	2,4054	33,30598	397,1878	398,5837	-139,4784	-185,9712	0,138804546	6,204375	4,727142857	1,477232143	0,025590179	-1339,806	-50387,25
2,3554	2,4554	33,21457	397,1116	398,4821	-136,5651	-182,0868	0,157085945	5,365945946	4,224255319	1,141690627	0,02050431	-1159,155	-56405,38
2,4054	2,5054	33,12696	397,0381	398,3842	-133,771	-178,3614	0,174607134	4,727142857	3,818076923	0,909065934	0,016363187	-1021,501	-62426,78
2,4554	2,5554	33,04293	396,9672	398,2896	-131,0889	-174,7853	0,191414841	4,224255319	3,483157895	0,741097424	0,013339754	-913,1228	-68451,25
T1=130°C													
P1 (bar)	P2 (bar)	Cpμμγ J/mol,μμγ	T2' K	T2 K	Ws (σεντρ.)	Ws (τηραγ.)	mol (air/μμγ.) (P1-Psat)/P1	mol(H2O/air) Psat/(P1-Psat)	moles(H2O/αέπα) Psat/(P2-Psat)	moles(H2O)/ moles(αέπα)	kg H2O/ (mol αέπα)	Joule / (mol αέπα)	Joule / kg H2O
2,7213	2,8213	33,96325	406,5759	407,7679	-121,4502	-161,9337	0,007349429	135,065	22,51083333	112,5541667	2,025975	-22033,5	-10875,51
2,7713	2,8713	33,87371	406,5216	407,6955	-119,2894	-159,0526	0,025258904	38,59	15,89	22,7	0,4086	-6296,891	-15410,89
2,8213	2,9213	33,78733	406,4689	407,6252	-117,2041	-156,2722	0,042533584	22,51083333	12,27863636	10,23219697	0,184179545	-3674,089	-19948,41
2,8713	2,9713	33,70397	406,4177	407,5569	-115,1904	-153,5872	0,059206631	15,89	10,00481481	5,865185185	0,105933333	-2594,088	-24487,93
2,9213	3,0213	33,62346	406,368	407,4907	-113,2447	-150,993	0,075308938	12,27863636	8,4415625	3,837073864	0,06906733	-2004,981	-29029,37
2,9713	3,0713	33,54565	406,3198	407,4264	-111,3637	-148,4849	0,090869316	10,00481481	7,300810811	2,704004004	0,048672072	-1634,049	-33572,62
3,0213	3,1213	33,47043	406,2729	407,3638	-109,544	-146,0587	0,105914872	8,4415625	6,431666667	2,009896833	0,036178125	-1379,023	-38117,58
3,0713	3,1713	33,39765	406,2273	407,3003	-107,7829	-143,7105	0,120470159	7,300810811	5,747446809	1,553364002	0,027960552	-1192,914	-42664,18
3,1213	3,2213	33,3272	406,1829	407,2439	-106,0775	-141,4366	0,134559318	6,431666667	5,194807692	1,236858974	0,022263462	-1051,11	-47212,33
3,1713	3,2713	33,25898	406,1398	407,1863	-104,4251	-139,2335	0,148204206	5,747446809	4,739122807	1,008324001	0,018149832	-939,4708	-51761,96

Πίνακας Α.3

T1=80°C													
P1	P2	Срμιν.	T2'	T2	Ws	Ws	mol.(air/μιν.)	mol(H2O/air)	moles(H2O/αέρα)	moles(H2O)	kgр.H2O/	Joule /	Joule /
(bar)	(bar)	J/mol,μιν	K	K	(ισεντρ.)	(πραγ.)	(P1-P _{H2O})/P1	P _{H2O} /(P1-P _{H2O})	P _{H2O} /(P2-P _{H2O})	moles(αέρα)	(mol.αέρα)	(mol.αέρα)	kgр.H2O
0,4936	0,5936	33,653	369,46	374,95	-553,95	-738,6	0,06930308	13,42937325	3,422985217	10,006388	0,180115	-10657,5	-59170,5
0,5436	0,6436	33,225	368,24	373,31	-506,21	-674,94	0,15490802	5,455443663	2,493876487	2,96156718	0,053308	-4357,06	-81733,4
0,5936	0,6936	32,87	367,18	371,9	-466,04	-621,39	0,22609164	3,422985217	1,961470146	1,46151507	0,026307	-2748,39	-104473
0,6436	0,7436	32,569	366,26	370,68	-431,78	-575,7	0,28621504	2,493876487	1,616393627	0,87748286	0,015795	-2011,44	-127349
0,6936	0,7936	32,312	365,45	369,6	-402,21	-536,27	0,33767013	1,961470146	1,374569131	0,58690102	0,010564	-1588,16	-150334
0,7436	0,8436	32,089	364,73	368,64	-376,42	-501,9	0,38220549	1,616393627	1,19568567	0,42070796	0,007573	-1313,16	-173407
0,7936	0,8936	31,894	364,09	367,79	-353,75	-471,66	0,42112903	1,374569131	1,057999853	0,31656928	0,005698	-1120	-196551
0,8436	0,9436	31,723	363,52	367,02	-333,65	-444,86	0,4554386	1,19568567	0,948749298	0,24693637	0,004445	-976,777	-219754
0,8936	0,9936	31,57	363	366,33	-315,71	-420,94	0,48590868	1,057999853	0,859949683	0,19805017	0,003565	-866,299	-243008
0,9436	1,0436	31,434	362,53	365,71	-299,6	-399,46	0,51314964	0,948749298	0,786350067	0,16239923	0,002923	-778,454	-266303
T1=90°C													
P1	P2	Срμιν.	T2'	T2	Ws	Ws	mol.(air/μιν.)	mol(H2O/air)	moles(H2O/αέρα)	moles(H2O)	kgр.H2O/	Joule /	Joule /
(bar)	(bar)	J/mol,μιν	K	K	(ισεντρ.)	(πραγ.)	(P1-P _{H2O})/P1	P _{H2O} /(P1-P _{H2O})	P _{H2O} /(P2-P _{H2O})	moles(αέρα)	(mol.αέρα)	(mol.αέρα)	kgр.H2O
0,7211	0,8211	33,715	374,81	378,75	-398,28	-531,04	0,05690334	16,57366022	4,82204165	11,7516186	0,211529	-9332,31	-44118,3
0,7711	0,8711	33,41	374,18	377,91	-373,65	-498,2	0,11805602	7,470554634	3,55994514	3,91060949	0,070391	-4220,02	-59951,2
0,8211	0,9211	33,141	373,62	377,16	-351,89	-469,18	0,17176105	4,82204165	2,82146843	2,00057322	0,03601	-2731,59	-75855,8
0,8711	0,9711	32,903	373,11	376,47	-332,52	-443,36	0,21930088	3,55994514	2,336735009	1,22321013	0,022018	-2021,68	-91820,2
0,9211	1,0211	32,692	372,64	375,85	-315,17	-420,22	0,26167951	2,82146843	1,994138397	0,82733003	0,014892	-1605,87	-107835
0,9711	1,0711	32,502	372,22	375,29	-299,54	-399,38	0,29969416	2,336735009	1,739155007	0,59758	0,010756	-1332,64	-123892
1,0211	1,1211	32,33	371,83	374,77	-285,38	-380,51	0,3339859	1,994138397	1,541986654	0,45215174	0,008139	-1139,31	-139986
1,0711	1,1711	32,175	371,47	374,29	-272,51	-363,34	0,36507609	1,739155007	1,384972089	0,35418292	0,006375	-995,254	-156111
1,1211	1,2211	32,033	371,14	373,85	-260,74	-347,66	0,3933931	1,541986654	1,256978779	0,28500787	0,00513	-883,737	-172264
1,1711	1,2711	31,904	370,83	373,45	-249,95	-333,27	0,41929212	1,384972089	1,150641335	0,23433075	0,004218	-794,832	-188440

Πίνακας Α.4

T1=100°C		T2'		T2		Ws	Ws	Ws	mol.(air/μνγ.)	mol(H2O/air)	moles(H2O/αέρα)	kg.H2O/	Joule /	Joule /
P1	P2	Срμνγ.	K	K	(ισεντρο.)	(ισεντρο.)	(ισεντρο.)	(P1-P _{H2O})/P1	P _{H2O} /(P1-P _{H2O})	moles(H2O/αέρα)	kg.H2O/	Joule /	Joule /	
(bar)	(bar)	μ/μολ,μνγ	K	K				(P1-P _{H2O})/P1	P _{H2O} /(P2-P _{H2O})	moles(αέρα)	(mol.αέρα)	(mol.αέρα)	kg.H2O	
1,0333	1,1333	33,756	381,58	384,44	-289,8	-386,34	0,0487748	19,50239092	6,535289463	12,9671015	0,233408	-7920,85	-33935,7	
1,0833	1,1833	33,537	381,25	384,01	-276,8	-369,11	0,09267885	9,789948107	4,904720083	4,88522802	0,087934	-3982,68	-45291,7	
1,1333	1,2333	33,336	380,95	383,6	-265	-353,35	0,1327089	6,535289463	3,925339159	2,6099503	0,046979	-2662,62	-56676,6	
1,1833	1,2833	33,153	380,67	383,22	-254,2	-338,88	0,16935604	4,904720083	3,271984927	1,63273516	0,029389	-2001,02	-68086,9	
1,2333	1,3333	32,985	380,4	382,87	-244,2	-325,55	0,2030317	3,925339159	2,805090768	1,12024839	0,020164	-1603,47	-79519,3	
1,2833	1,3833	32,83	380,16	382,54	-234,9	-313,23	0,23408322	3,271984927	2,454803833	0,81718109	0,014709	-1338,12	-90971,5	
1,3333	1,4333	32,686	379,93	382,23	-226,4	-301,81	0,26280582	2,805090768	2,182289481	0,62280129	0,01121	-1148,41	-102441	
1,3833	1,4833	32,553	379,71	381,95	-218,4	-291,19	0,28945203	2,454803833	1,964234541	0,49056929	0,00883	-1006	-113926	
1,4333	1,5333	32,429	379,51	381,67	-211	-281,29	0,31423917	2,182289481	1,785797213	0,39649227	0,007137	-895,144	-125425	
1,4833	1,5833	32,313	379,31	381,42	-204	-272,04	0,33735522	1,964234541	1,637079675	0,32715487	0,005889	-806,394	-136937	
T1=110°C		T2'		T2		Ws	Ws	Ws	mol.(air/μνγ.)	mol(H2O/air)	moles(H2O/αέρα)	kg.H2O/	Joule /	Joule /
P1	P2	Срμνγ.	K	K	(ισεντρο.)	(ισεντρο.)	(ισεντρο.)	(P1-P _{H2O})/P1	P _{H2O} /(P1-P _{H2O})	moles(αέρα)	kg.H2O/	Joule /	Joule /	
(bar)	(bar)	μ/μολ,μνγ	K	K				(P1-P _{H2O})/P1	P _{H2O} /(P2-P _{H2O})	moles(αέρα)	(mol.αέρα)	(mol.αέρα)	kg.H2O	
1,4527	1,5527	33,783	389,33	391,44	-213,7	-284,97	0,04335444	22,06568648	8,526877366	13,5388091	0,243699	-6573,01	-26971,9	
1,5027	1,6027	33,624	389,15	391,2	-206,8	-275,72	0,07518533	12,30046645	6,525084397	5,77538205	0,103957	-3667,25	-35276,7	
1,5527	1,6527	33,475	388,98	390,98	-200,3	-267,06	0,10496619	8,526877366	5,28448443	3,24239294	0,058363	-2544,24	-43593,2	
1,6027	1,7027	33,336	388,83	390,77	-194,2	-258,92	0,13288888	6,525084397	4,440266342	2,08481806	0,037527	-1948,41	-51920,5	
1,6527	1,7527	33,204	388,68	390,57	-188,4	-251,27	0,15912204	5,28448443	3,828627394	1,45585704	0,026205	-1579,07	-60257,5	
1,7027	1,8027	33,081	388,53	390,38	-183	-244,05	0,18381453	4,440266342	3,365091857	1,07517449	0,019353	-1327,69	-68603,3	
1,7527	1,8527	32,965	388,4	390,2	-177,9	-237,23	0,20709819	3,828627394	3,001676095	0,8269513	0,014885	-1145,52	-76957,2	
1,8027	1,9027	32,855	388,27	390,02	-173,1	-230,79	0,22909025	3,365091857	2,709104236	0,65598762	0,011808	-1007,42	-85318,5	
1,8527	1,9527	32,751	388,15	389,86	-168,5	-224,69	0,24989529	3,001676095	2,468500713	0,53317538	0,009597	-899,125	-93686,6	
1,9027	2,0027	32,652	388,03	389,7	-164,2	-218,9	0,26960687	2,709104236	2,267148574	0,44195566	0,007955	-811,916	-102061	

Πίνακας Α.5

T1=120°C		T2		Ws		Ws		mol(H2O/air)		moles(H2O/αέρα)		moles(H2O)		kgr.H2O/		Joule /	
P1	P2	T2'	T2	(ισεντρ.)	(ισεντρ.)	(P1-P _{H2O})/P1	P _{H2O} /(P1-P _{H2O})	mol(H2O/air)	P _{H2O} /(P2-P _{H2O})	moles(H2O/αέρα)	moles(αέρα)	moles(αέρα)	moles(αέρα)	(mol.αέρα)	(mol.αέρα)	Joule /	Joule /
(bar)	(bar)	K	K	(πραγ.)	(πραγ.)	(P1-P _{H2O})/P1	P _{H2O} /(P1-P _{H2O})	mol(H2O/air)	P _{H2O} /(P2-P _{H2O})	moles(H2O/αέρα)	moles(αέρα)	moles(αέρα)	moles(αέρα)	(mol.αέρα)	(mol.αέρα)	kgr.H2O	kgr.H2O
2,0054	2,1054	397,73	399,31	-159,95	-213,27	0,0396739	24,20550011	10,72519798	10,72519798	13,4803021	0,242645	13,4803021	0,242645	-5375,61	-22154,2		
2,0554	2,1554	397,64	399,18	-156,13	-208,18	0,0630349	14,86421945	8,389184621	8,389184621	6,47503483	0,116551	6,47503483	0,116551	-3302,6	-28336,2		
2,1054	2,2054	397,54	399,06	-152,49	-203,32	0,0852864	10,72519798	6,88876886	6,88876886	3,83642912	0,069056	3,83642912	0,069056	-2384,02	-34523,1		
2,1554	2,2554	397,45	398,94	-149,02	-198,69	0,1065055	8,389184621	5,843628816	5,843628816	2,5455558	0,04582	2,5455558	0,04582	-1865,54	-40714,6		
2,2054	2,3054	397,37	398,82	-145,7	-194,26	0,1267625	6,88876886	5,073843009	5,073843009	1,81492585	0,032669	1,81492585	0,032669	-1532,5	-46910,3		
2,2554	2,3554	397,28	398,71	-142,52	-190,03	0,1461213	5,843628816	4,483259692	4,483259692	1,36036912	0,024487	1,36036912	0,024487	-1300,49	-53110		
2,3054	2,4054	397,2	398,61	-139,48	-185,97	0,1646404	5,073843009	4,015826942	4,015826942	1,05801607	0,019044	1,05801607	0,019044	-1129,58	-59313,5		
2,3554	2,4554	397,13	398,5	-136,57	-182,09	0,1823733	4,483259692	3,636661996	3,636661996	0,8465977	0,015239	0,8465977	0,015239	-998,449	-65520,4		
2,4054	2,5054	397,05	398,4	-133,77	-178,36	0,1993689	4,015826942	3,322919722	3,322919722	0,69290722	0,012472	0,69290722	0,012472	-894,647	-71730,5		
2,4554	2,5554	396,98	398,31	-131,09	-174,79	0,2156724	3,636661996	3,059012456	3,059012456	0,57764954	0,010398	0,57764954	0,010398	-810,435	-77943,8		
T1=130°C		T2'		Ws		Ws		mol(H2O/air)		moles(H2O/αέρα)		moles(H2O)		kgr.H2O/		Joule /	
P1	P2	T2'	T2	(ισεντρ.)	(ισεντρ.)	(P1-P _{H2O})/P1	P _{H2O} /(P1-P _{H2O})	mol(H2O/air)	P _{H2O} /(P2-P _{H2O})	moles(H2O/αέρα)	moles(αέρα)	moles(αέρα)	moles(αέρα)	(mol.αέρα)	(mol.αέρα)	Joule /	Joule /
(bar)	(bar)	K	K	(πραγ.)	(πραγ.)	(P1-P _{H2O})/P1	P _{H2O} /(P1-P _{H2O})	mol(H2O/air)	P _{H2O} /(P2-P _{H2O})	moles(H2O/αέρα)	moles(αέρα)	moles(αέρα)	moles(αέρα)	(mol.αέρα)	(mol.αέρα)	kgr.H2O	kgr.H2O
2,7213	2,8213	406,59	407,79	-121,45	-161,94	0,0371289	25,93316442	13,03359547	13,03359547	12,899569	0,232192	12,899569	0,232192	-4361,47	-18783,9		
2,7713	2,8713	406,54	407,72	-119,29	-159,06	0,0545011	17,34824118	10,43766506	10,43766506	6,91057612	0,12439	6,91057612	0,12439	-2918,39	-23461,5		
2,8213	2,9213	406,48	407,64	-117,21	-156,28	0,0712576	13,03359547	8,704058278	8,704058278	4,32953719	0,077932	4,32953719	0,077932	-2193,1	-28141,3		
2,8713	2,9713	406,43	407,58	-115,19	-153,59	0,0874304	10,43766506	7,464301687	7,464301687	2,97336338	0,053521	2,97336338	0,053521	-1756,71	-32823,1		
2,9213	3,0213	406,38	407,51	-113,25	-151	0,1030497	8,704058278	6,533681263	6,533681263	2,17037702	0,039067	2,17037702	0,039067	-1465,27	-37506,8		
2,9713	3,0713	406,33	407,44	-111,37	-148,49	0,1181432	7,464301687	5,809388989	5,809388989	1,6549127	0,029788	1,6549127	0,029788	-1256,84	-42192,3		
3,0213	3,1213	406,29	407,38	-109,55	-146,06	0,1327372	6,533681263	5,229654777	5,229654777	1,30402649	0,023472	1,30402649	0,023472	-1100,38	-46879,5		
3,0713	3,1713	406,24	407,32	-107,78	-143,71	0,1468561	5,809388989	4,75512804	4,75512804	1,05426095	0,018977	1,05426095	0,018977	-978,596	-51568,3		
3,1213	3,2213	406,2	407,26	-106,08	-141,44	0,1605225	5,229654777	4,359552375	4,359552375	0,8701024	0,015662	0,8701024	0,015662	-881,115	-56258,7		
3,1713	3,2713	406,15	407,2	-104,43	-139,24	0,1737581	4,75512804	4,024737381	4,024737381	0,73039066	0,013147	0,73039066	0,013147	-801,319	-60950,5		

Πίνακας Α.6

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πρόγραμμα FORTRAN, λογικό διάγραμμα και αποτελέσματα.

Πρόγραμμα προσομοίωσης των φαινομένων μεταφοράς που συμβαίνουν στη φουσαλίδα κατά τη διάρκεια της ανόδου της στηήλη του νερού της πρότυπης συσκευής αφαλάτισης

```
PROGRAM AFALAT
PARAMETER (N=101)
IMPLICIT REAL *8(A-H,O-Z)
REAL *8 rb(N),T(N),Psat(N),dT(N),dVb(N),CA(N),NA(N)
REAL *8 Pb(N),V(N),W(N),Osat(N),Y2(N),C(N)
S(L)=P+(Rw*g*(X-(L-1)*Dx))/1.0E5
OPEN(17,FILE="AFALAT66.TXT")
g=9.81
PI=3.14159
Cpair=1.0
Cpsteam=1.9
MBwater=18
MBair=29
R=0.082
PRINT *,"DOSE THN PIESH PRIN TO SYMBIESTH P"
READ *,P
PRINT *,"DOSE THN THERMOKRASIA TOU NEROU T0"
READ *,T0
PRINT *,"DOSE TO DIASTHMA OLOKLRWSHS Dx"
READ *,Dx
PRINT *,"DOSE TO YPSOS TOY NEROY X"
READ *,X
PRINT *,"DOSE THN AKTINA THS FYSALLIDAS PRIN TO PORWDES rb0"
READ *,rb0
PRINT *,"DOSE THN PTWSH PIESHS STO PORWDES DPpor"
READ *,DPpor
PRINT *,"DOSE THN PYKNOTHTA TOY NEROY Rw KAI TOY AERA Rair,TO
*IKSWDES Aw,TO SYNTELESTH THERMIKHS AGWGIMOTHTAS Bw,TON ARITHMO
*PRANTDL Pr, THN EIDIKH THERMOTHTA Cpw TOY NEROY STH
*THERMOKRASIA T0"
READ *,Rw,Rair,Aw,Bw,Pr,Cpw
```

```
Υπολογισμός αρχικής ποσότητας υδρατμού
Psat0=EXP(11.9648-(3984.923/(233.426+T0)))
V0=(4.0/3.0)*PI*rb0**3
W0=(Psat0*V0)/(R*(T0+273)) !Αρχικά Kmoles υδρατμού μέσα στη φουσαλίδα
P0=P+(Rw*g*X)/1.0E5
A1=P0/(R*(T0+273)) !Ολική συγκέντρωση στην είσοδο της φουσαλίδας στο νερό
A2=Psat0/(P0+DPpor) !Μοριακό κλάσμα υδρατμού πριν το πορώδες
CA0=A1*A2 !Συγκέντρωση υδρατμού πριν το πορώδες
A3=((P0+DPpor)-Psat0)*V0/(R*(T0+273)) !Kmoles αέρα μέσα στη φουσαλίδα
Osat0=(Psat0*A3)/(P0-Psat0) !Kmoles υδρατμού σε κατάσταση κορεσμού
!στην είσοδο της φουσαλίδας στο νερό
T(1)=T0
W(1)=W0
Osat(1)=Osat0
CA(1)=CA0
V(1)=V0*(P0+DPpor)/P0
Y=1.0/3.0
rb(1)=(3*V(1)/4.0/PI)**Y
dP=-Rw*g*Dx*1.0E-5 !Μεταβολή υδροστατικής πίεσης σε κάθε διάστημα
!ολοκλήρωσης
M=N-1
```

```
DO 20 I=1,M
Ta=T(I)
rba=rb(I)
Va=(4.0/3.0)*PI*rba**3
```

Υπολογισμός πίεσης μέσα στη φουσαλίδα στην αρχή κάθε διαστήματος ολοκλήρωσης
 $L=I$
 $P_b(I)=S(L)$

Υπολογισμός ταχύτητας φουσαλίδας U_b και αριθμού Re
 $CD=0.44$!Συντελεστής οπισθέλκουσας για αριθμό Re
!μεγαλύτερο του 500

```
Ub=SQRT(8*g*rba*(Rw-Rair)/(3*Rw*CD))
Re=2*Rw*rba*Ub/Aw
```

Έλεγχος για τον αριθμό Re

```
IF (Re.GE.2.0 .AND. Re.LT.500) THEN
J=0
```

```
9 Ub0=Ub
CD=18.5/(Re**0.6)
Ub=SQRT(8*g*rba*(Rw-Rair)/(3*Rw*CD))
Re=2*Rw*rba*Ub/Aw
B=(Ub-Ub0)/Ub0
```

Έλεγχος σύγκλισης της ταχύτητας

```
IF (B.LT.1.0E-4)GO TO 11
J=J+1
IF (J.GT.20) THEN
WRITE(17,*)"H Ub DEN SYGLINEI"
GO TO 99
ENDIF
GO TO 9
ENDIF
```

Υπολογισμός συντελεστή συναγωγής h και μεταδιδόμενης θερμότητας Q μεταξύ φουσαλίδας και περιβάλλοντος νερού

```
11 Awall=Aw !Θεωρείται ότι το ιξώδες του νερού έχει την
!ίδια τιμή στην επιφάνεια της φουσαλίδας και
!στην κυρίως μάζα του νερού
```

```
Y=2.0/3.0
ANu=2+((0.4*SQRT(Re)+0.06*(Re**Y))*(Pr**0.4)*((Aw/Awall)**0.14)) !Αριθμός Nu
```

```
h=(Bw*ANu)/(2*rba)
z=Bw/h !Υπολογισμός λεπτού υμένα νερού γύρω από τη
!φουσαλίδα σύμφωνα με τη θεωρία λεπτού στρώματος
```

```
A=4*PI*rba**2
Q=h*A*(T0-Ta)/1.0E3
```

```
Amwater=A*z*Rw !Μάζα νερού που περιέχεται στο λεπτό υμένα
```

```
Cpb=(W(I)/(W(I)+A3))*Cpsteam+(A3/(W(I)+A3))*Cpair !Cp φουσαλίδας
Amb=W(I)*MBwater+A3*MBair !Μάζα φουσαλίδας
```

Υπολογισμός (mC_p) για το ενεργειακό ισοζύγιο
 $AmC_p=Amb*C_{pb}+(Am_{water}*C_{pw})/2$

Υπολογισμός του χρόνου που απαιτείται για να διανύσει η φουσαλίδα το διάστημα ολοκλήρωσης Dx
f=Dx/Ub

Υπολογισμός συντελεστή διάχυσης D του υδρατμού στον αέρα
D0=0.219E-4 !Τιμή του D σε1 atm και 273 K
P0=1
T01=273
D=D0*(P0/Pb(I))*((Ta+273)/T01)**1.75

Υπολογισμός αριθμού FOURIER
f1=D*f/rba**2

Psat(I)=EXP(11.9648-(3984.923/(233.426+Ta)))
C(I)=Psat(I)/(R*(Ta+273)) !Συγκέντρωση υδρατμού στη διεπιφάνεια
!φουσαλίδας-νερού

B1=((PI**4)/9.0)+(4.0/(PI*f1))
B2=SQRT(B1)
B3=(-3.0)*f1*B2 !Ανηγμένη μέση συγκέντρωση
B4=C(I)-(C(I)-CA(I))*EXP(B3) !Ολοκληρωμένη μέση συγκέντρωση

Υπολογισμός Kmoles υδρατμού που διαχέονται στον αέρα της φουσαλίδας σε κάθε διάστημα ολοκλήρωσης Dx
NA(I)=(B4-CA(I))*Va
W(I+1)=W(I)+NA(I) !Ολικά Kmoles υδρατμού μέσα στη φουσαλίδα στο
!τέλος κάθε διαστήματος ολοκλήρωσης Dx

Υπολογισμός της μεταβολής της θερμοκρασίας της φουσαλίδας σε κάθε διάστημα ολοκλήρωσης Dx
DHv=2522.2-2.6843*Ta !Ενθαλπία εξάτμισης νερού στη θερμοκρασία Ta
H1=(DHv*18)*NA(I) !Θερμότητα εξάτμισης

dT(I)=((Q*f)-H1)/AmCp !Ενεργειακό ισοζύγιο
Μεταβολή όγκου της φουσαλίδας
dVb(I)=(R*(Ta+273)*NA(I)/Pb(I))+((Va*dT(I))/(Ta+273))
*-(Va*dP/Pb(I))
T(I+1)=Ta+dT(I)
V(I+1)=Va+dVb(I)
Y=1.0/3.0
rb(I+1)=(3*V(I+1)/4.0/PI)**Y

Psat(I+1)=EXP(11.9648-(3984.923/(233.426+T(I+1))))
Kmoles υδρατμού σε κατάσταση κορεσμού στο τέλος κάθε διαστήματος ολοκλήρωσης

Dx
Osat(I+1)=(Psat(I+1)*A3)/((Pb(I)+dP)-Psat(I+1))
Συγκέντρωση υδρατμού στο τέλος κάθε διαστήματος ολοκλήρωσης Dx
CA(I+1)=W(I+1)/V(I+1)

20 CONTINUE

DO 30 I=1,N
A5=I/10.
NB5=INT(I/10.)
Y2(I)=(I-1)*Dx
PRINT *,T(I)

30 CONTINUE

Εκτύπωση των αποτελεσμάτων
DO 40 I=1,N

AS=1/10.

NB5=INT(I/10.)

3 FORMAT(F7.4,2X,F10.5,2X,E11.6,2X,E11.6,2X,E11.6,2X,E11.6,2X,E11.6)

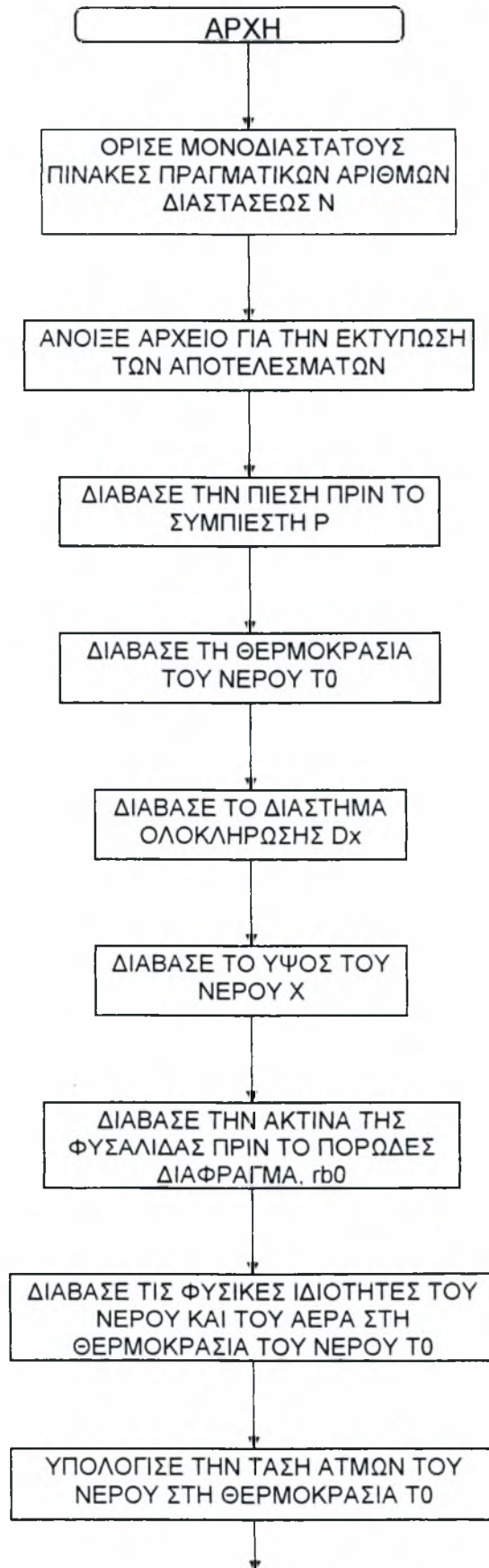
WRITE(17,3)Y2(I),T(I),CA(I),C(I),NA(I),W(I),Osat(I)

40 CONTINUE

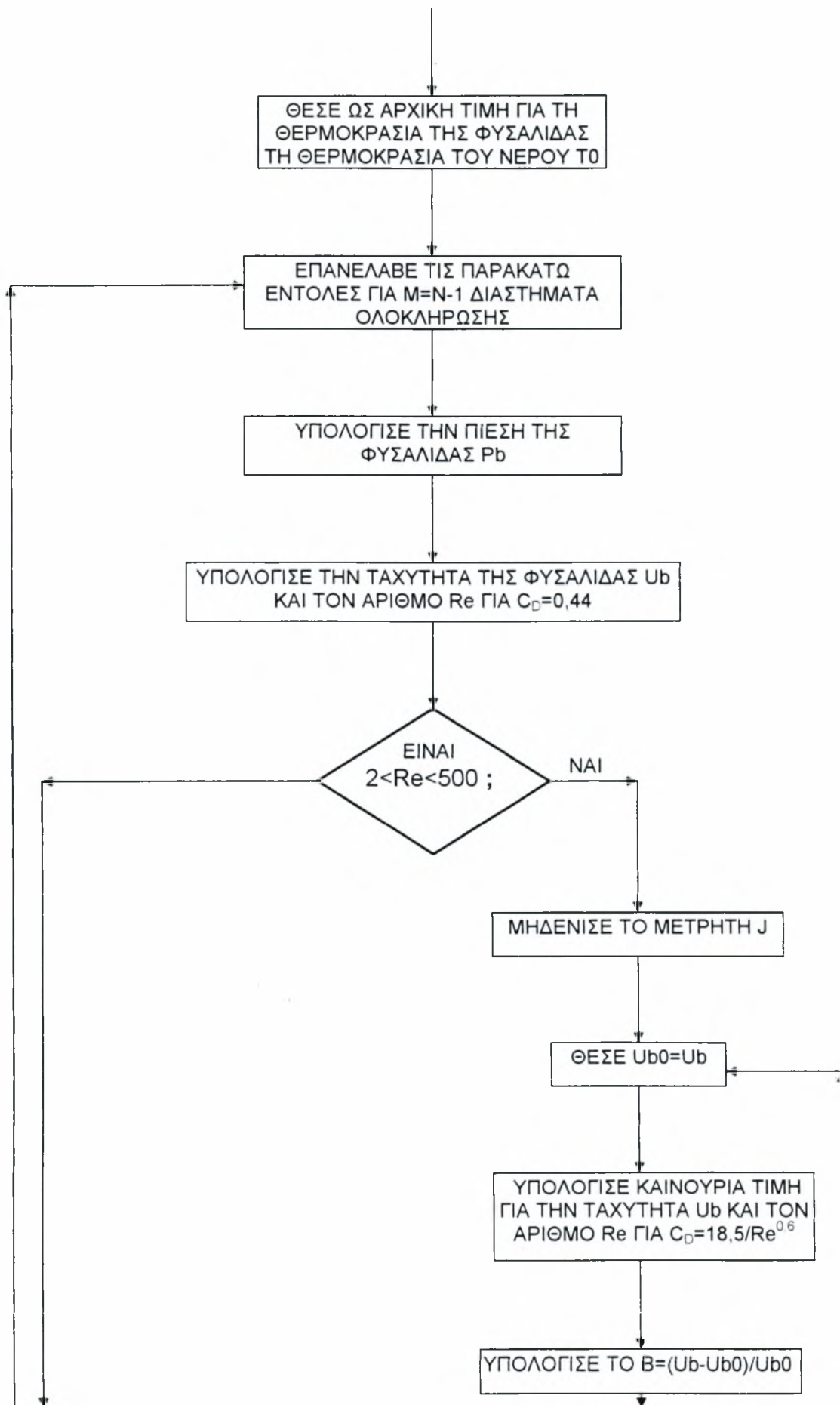
99 STOP

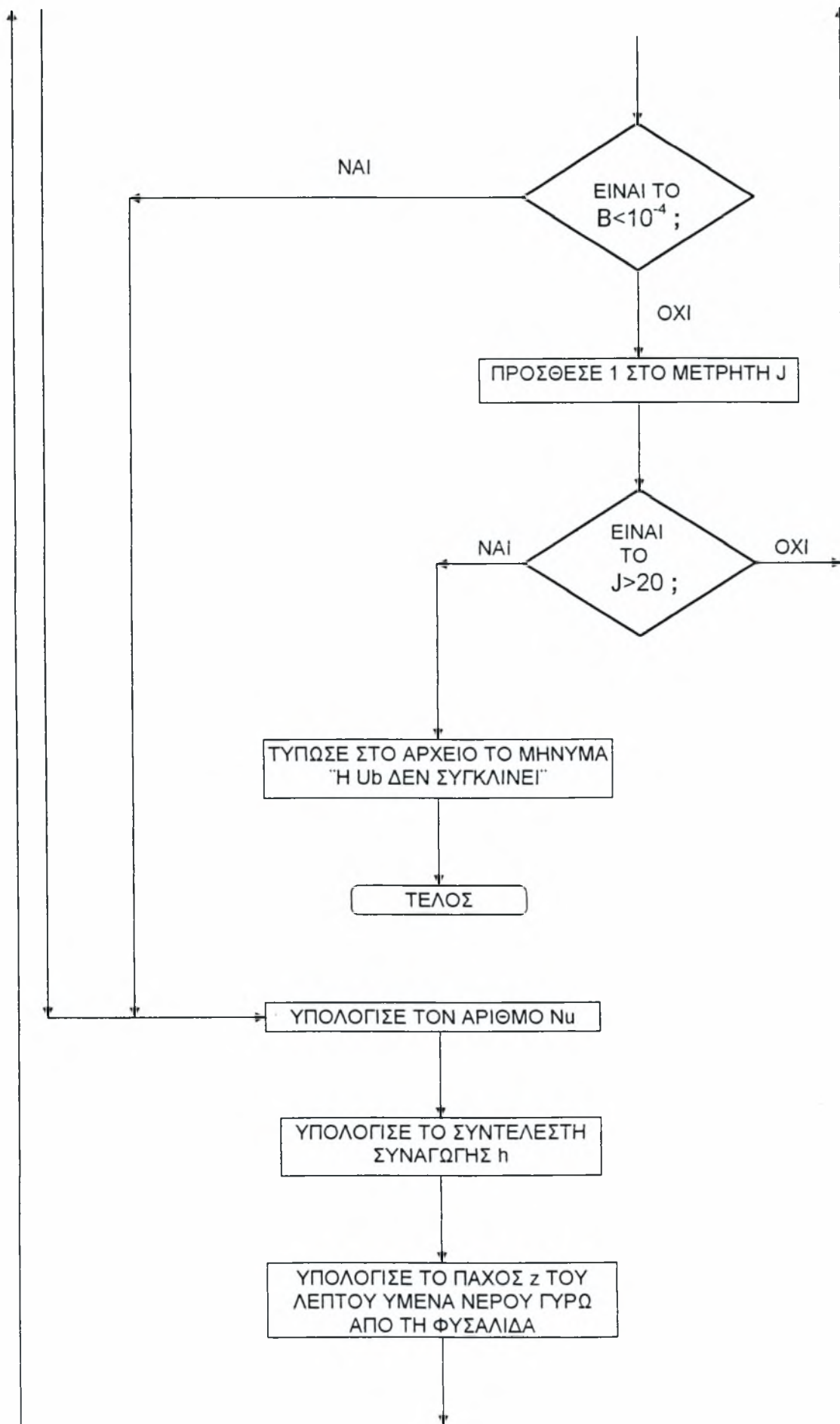
END

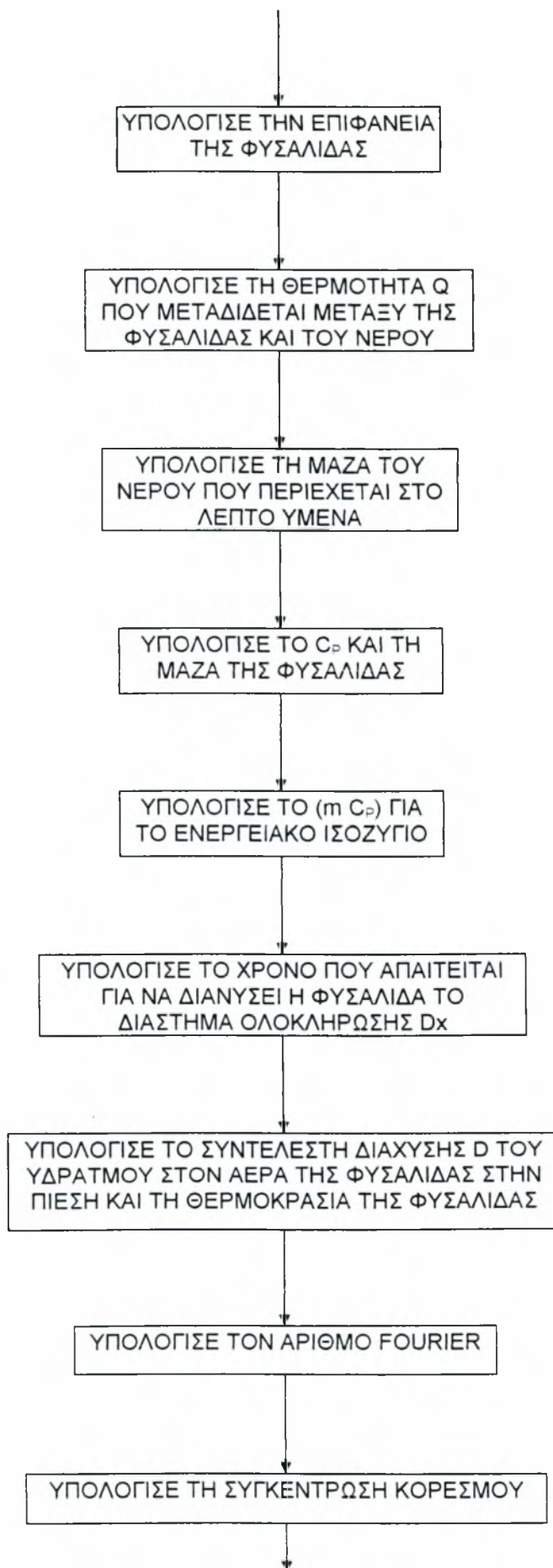
ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

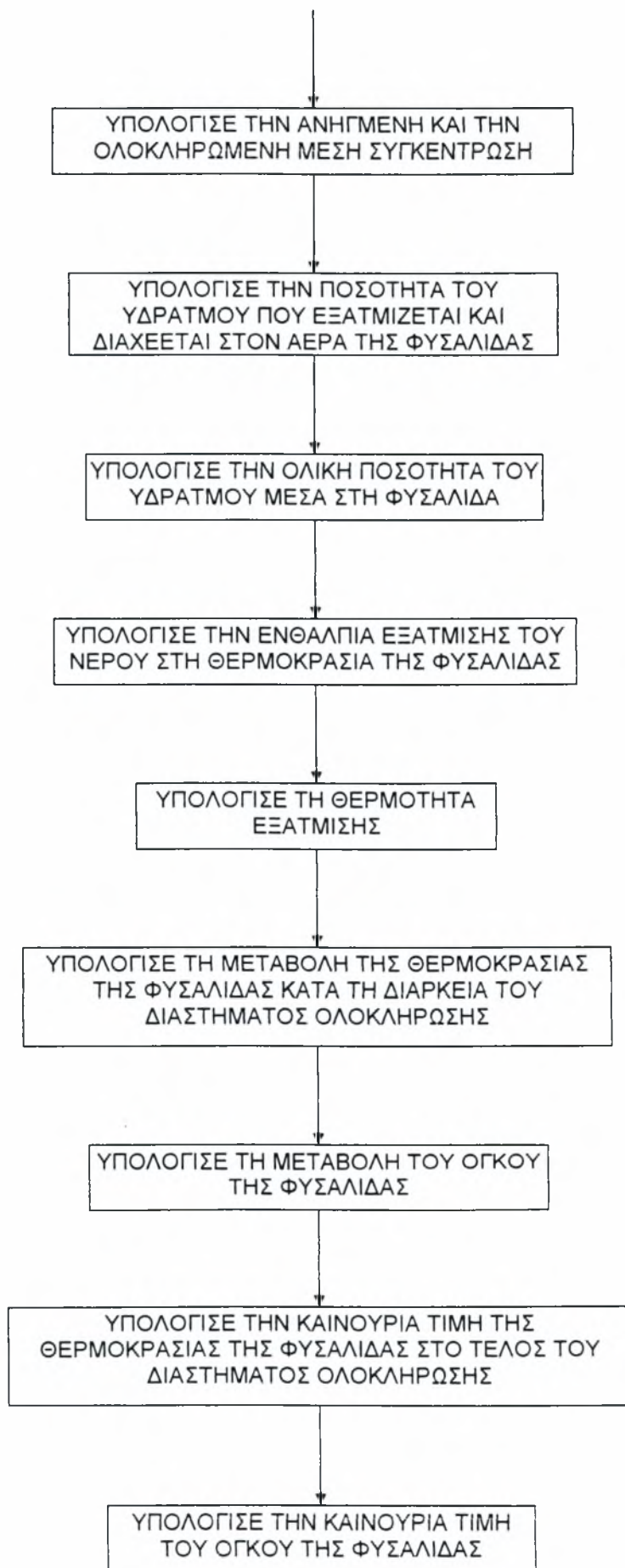


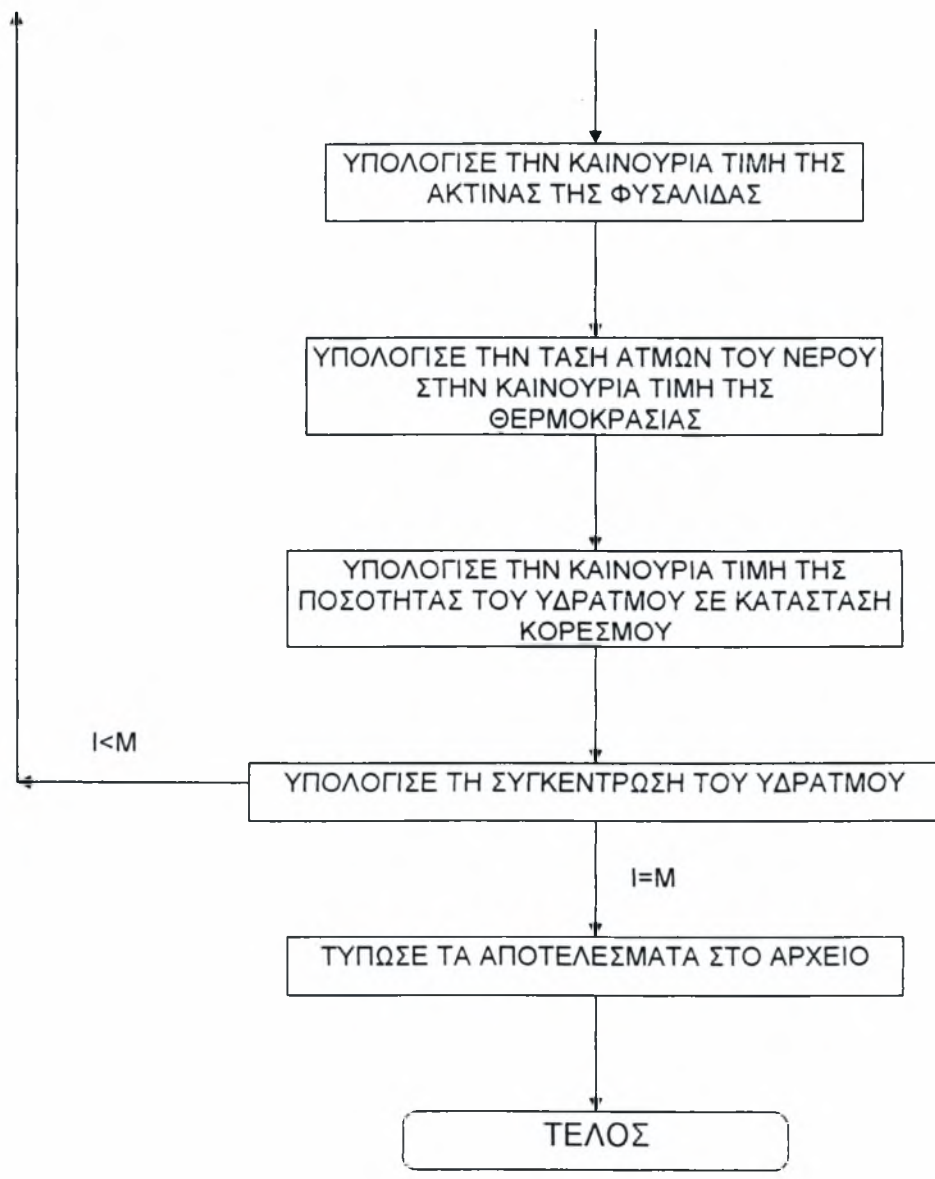










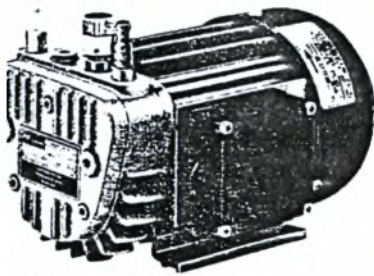


100.00000	1.734901	2.728434
99.93396	1.790124	2.649538
99.88167	1.838796	2.590146
99.84043	1.881934	2.545114
99.80810	1.920387	2.510901
99.78300	1.954865	2.484987
99.76377	1.985961	2.465530
99.74932	2.014174	2.451156
99.73875	2.039920	2.440815
99.73136	2.063549	2.433699
99.72655	2.085355	2.429173
99.72385	2.105585	2.426735
99.72285	2.124450	2.425982
99.72323	2.142123	2.426591
99.72472	2.158754	2.428299
99.72710	2.174470	2.430893
99.73020	2.189376	2.434197
99.73385	2.203562	2.438067
99.73795	2.217108	2.442384
99.74237	2.230077	2.447051
99.74705	2.242526	2.451986
99.75191	2.254503	2.457123
99.75689	2.266050	2.462407
99.76194	2.277203	2.467790
99.76704	2.287991	2.473236
99.77215	2.298442	2.478713
99.77724	2.308579	2.484196
99.78229	2.318422	2.489663
99.78728	2.327990	2.495097
99.79222	2.337297	2.500484
99.79707	2.346357	2.505813
99.80184	2.355184	2.511074
99.80652	2.363788	2.516262
99.81110	2.372179	2.521369
99.81559	2.380366	2.526391
99.81998	2.388357	2.531327
99.82426	2.396159	2.536172
99.82845	2.403780	2.540927
99.83253	2.411225	2.545590
99.83652	2.418501	2.550160
99.84040	2.425613	2.554638
99.84419	2.432566	2.559024
99.84788	2.439364	2.563320
99.85148	2.446012	2.567525
99.85498	2.452515	2.571642
99.85840	2.458876	2.575671
99.86172	2.465099	2.579615
99.86496	2.471188	2.583474
99.86812	2.477146	2.587250
99.87119	2.482977	2.590945
99.87419	2.488683	2.594561
99.87710	2.494269	2.598099

99.87994	2.499736	2.601561
99.88271	2.505088	2.604948
99.88540	2.510327	2.608263
99.88803	2.515457	2.611507
99.89058	2.520480	2.614682
99.89308	2.525397	2.617790
99.89550	2.530213	2.620831
99.89787	2.534929	2.623808
99.90017	2.539547	2.626723
99.90242	2.544070	2.629576
99.90461	2.548499	2.632369
99.90675	2.552838	2.635104
99.90883	2.557088	2.637782
99.91085	2.561251	2.640405
99.91283	2.565330	2.642974
99.91476	2.569325	2.645490
99.91664	2.573240	2.647955
99.91847	2.577075	2.650369
99.92026	2.580832	2.652734
99.92200	2.584514	2.655052
99.92370	2.588123	2.657324
99.92536	2.591658	2.659549
99.92698	2.595123	2.661731
99.92856	2.598519	2.663869
99.93010	2.601848	2.665965
99.93160	2.605110	2.668021
99.93306	2.608308	2.670036
99.93449	2.611443	2.672011
99.93589	2.614516	2.673949

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Τεχνικά και κατασκευαστικά στοιχεία συμπιεστή και υλικού πορώδους
διαφράγματος.



Kleiner, trockenlaufender Drehschieberverdichter. Kompakte, einbaufreundliche Bauart, besonders leiser Lauf, korrosionsschutzter Rotor, Druckanschluß von oben und stirnseitig möglich. Schlauchanschluß. Ansaugschalldämpfer und Druckbegrenzungsventil sind serienmäßig. Volumenstrom 3.5 bis 9.6 m³/h, Überdrücke bis 1 bar.

Small, dry running rotary vane compressors. Compact design, easy to build into machines, very low noise level, corrosion proof rotors. Pressure connections can be fitted onto the top or front. Hose connector, inlet silencer and pressure relief valve fitted as standard. Capacities from 3.5 to 9.6 m³/hr, pressure upto 1 bar.

Ce petit compresseur sec a palettes est d'une conception tres compacte et facilement integrable. Son fonctionnement est particulierement silencieux. Il beneficie d'un rotor traite anti-corrosion. La tuyauterie de refoulement peut se monter soit par le haut, soit de maniere frontale. Les debits vont de 3.5 a 9.6 m³/h pour une surpression jusqu'a 1 bar.

Piccolo compressore a palette funzionante a secco in esecuzione compatta, facile da montare, funzionamento particolarmente silenzioso, rotore trattato anticorrosione, attacco della pressione dall'alto o frontale. Incorpora attacco portagomma, silenziatore sull'aspirazione e valvola limitatrice di pressione. Portate da 3.5 a 9.6 m³/h, sovrappressione fino ad 1 bar.

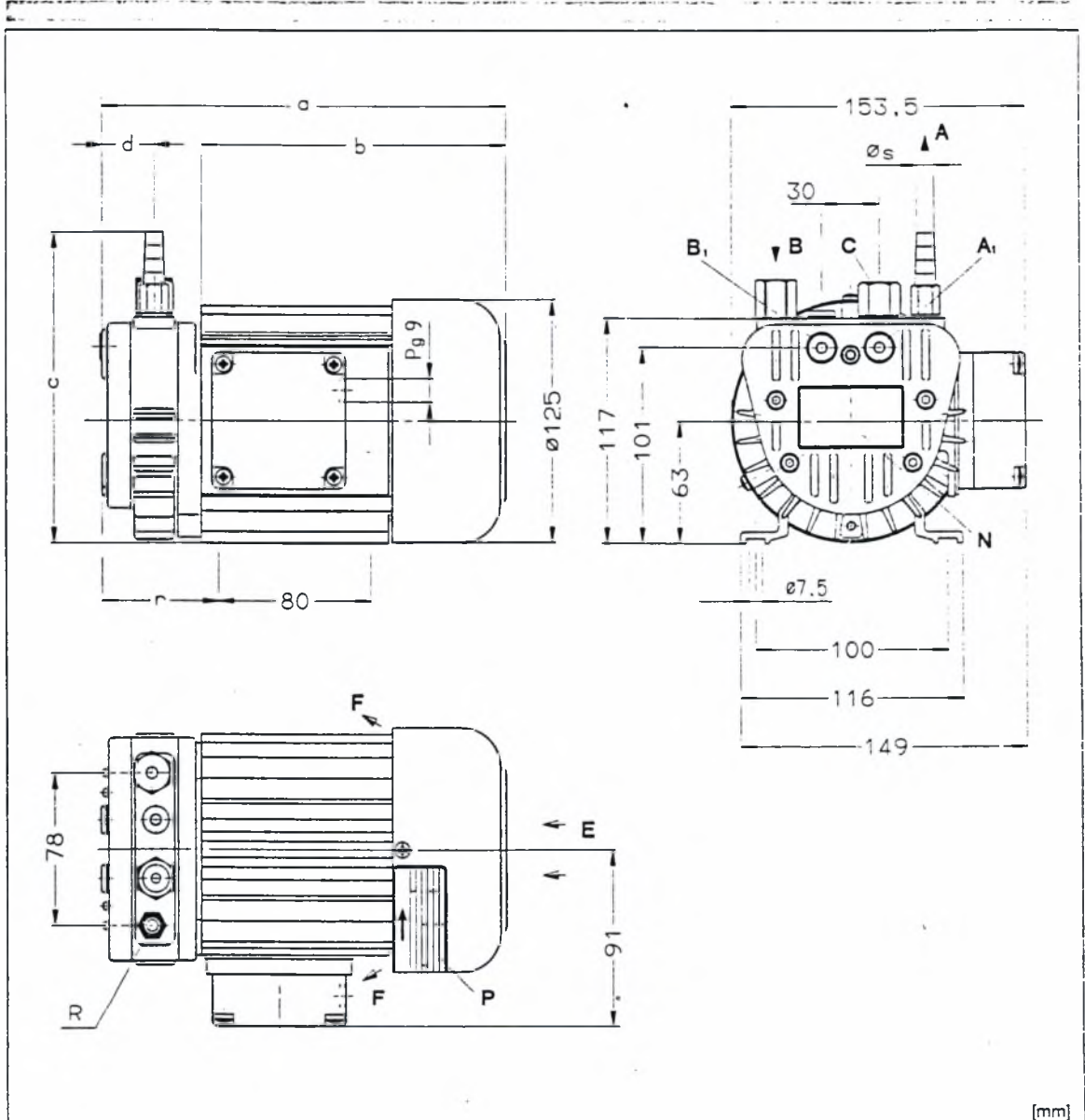
COLINO

DTE

DTE 3

DTE 6

DTE 8



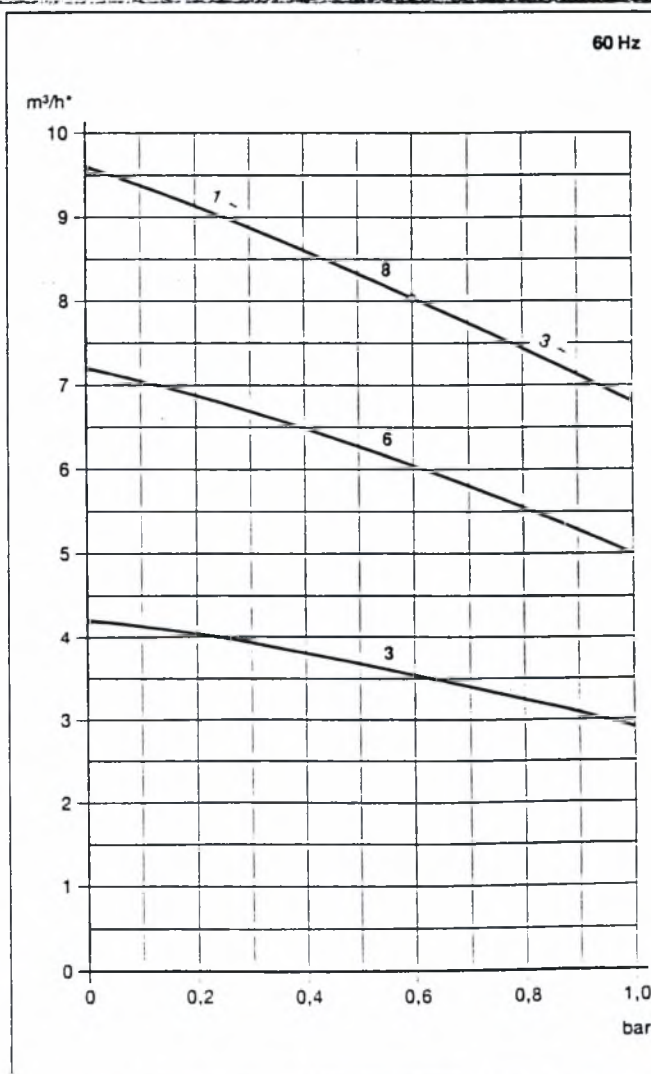
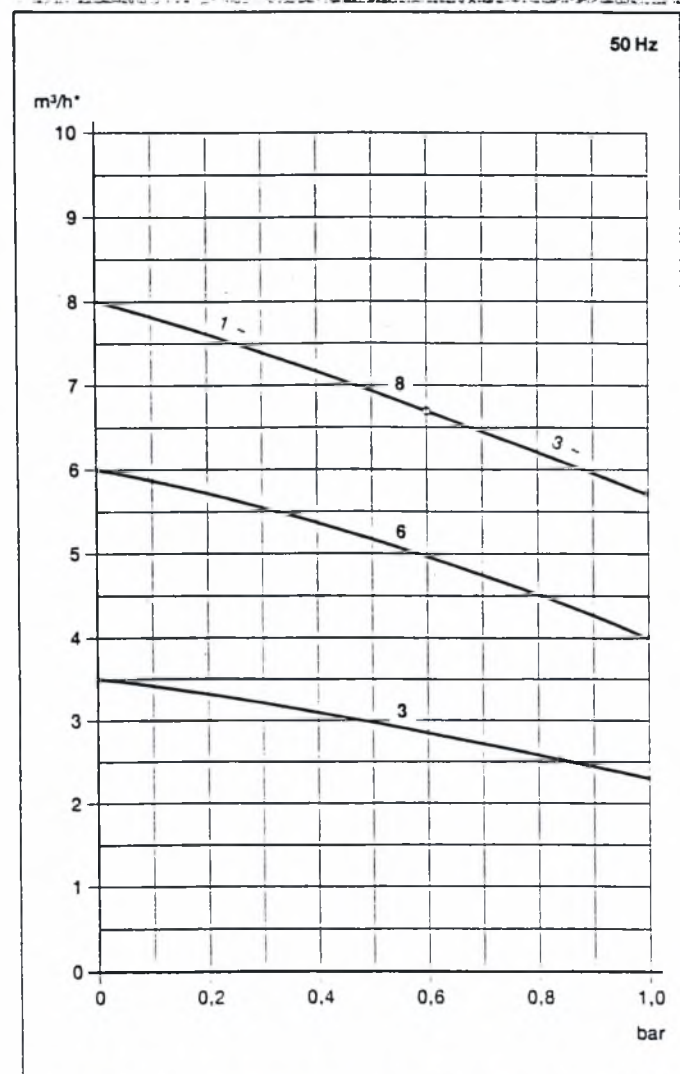
[mm]

A	Druck-Anschluß	Pressure connection	Raccord surpression	Attacco pressione
A ₁	Alternativer Druck-Anschluß	Pressure connection alternative	Raccord alternatif surpression	Attacco pressione alternativo
B	Ansaugung	Suction	Aspiration	Aspirazione
B ₁	Alternative Ansaugung	Suction alternative	Aspiration alternative	Aspirazione alternativa
C	Druck-Begrenzungsventil	Pressure limitation valve	Limiteur surpression	Valvola limitatrice di pressione
E	Kühlluft-Eintritt	Cooling air entry	Entree air refroidissement	Entrata aria di raffreddamento
F	Kühlluft-Austritt	Cooling air exit	Sortie air refroidissement	Uscita aria di raffreddamento
F ₁	Datenschild	Data plate	Etiquette caracteristique	Targhetta dati
N				
P	Motordatenschild	Motor data label	Etiquette caracterist. moteur	Targhetta dati del motore

DTE		3	6	8
[mm]	a	209	224	249
	b	158	158	179
	c	152	158	158
	d	24	38	27
	r	59	74	79
	Øs	9	12	12
	R	G 1/8	G 3/8	G 3/8

DTE		3	6	8
m ³ /h	50 Hz	3.5	6.0	8.0
	60 Hz	4.2	7.2	9.6
bar		1.0	1.0	0.6 (1~) 1.0 (3~)
3 ~			200-255/346-440 V (50/60 Hz) ↓	
1 ~			230 V ± 10% (50/60 Hz) ↓	
kW (50 Hz)	3 ~	0.12	0.25	0.37
	1 ~	0.12	0.25	0.35
kW (60 Hz)	3 ~	0.145	0.30	0.44
	1 ~	0.145	0.30	0.42
A (50 Hz)	3 ~	1.1/0.63	1.4/0.81	2.42/1.4
	1 ~	1.3	2.3	3.9
A (60 Hz)	3 ~	0.9/0.52	1.44/0.83	2.25/1.3
	1 ~	1.4	2.5	3.4
min ⁻¹	50 Hz		2750	
	60 Hz		3300	
dB(A)	50 Hz	57	60	64
	60 Hz	58	61	66
kg		6.3	7.9	9.1
ZRD		6	6	12
ZRK		6 (03)	12 (03)	12 (03)
ZMS (50 Hz)	3 ~	16/10	16/10	40/16
	1 ~	16	24	40
ZMS (60 Hz)	3 ~	10/10	16/10	24/16
	1 ~	16	40	40

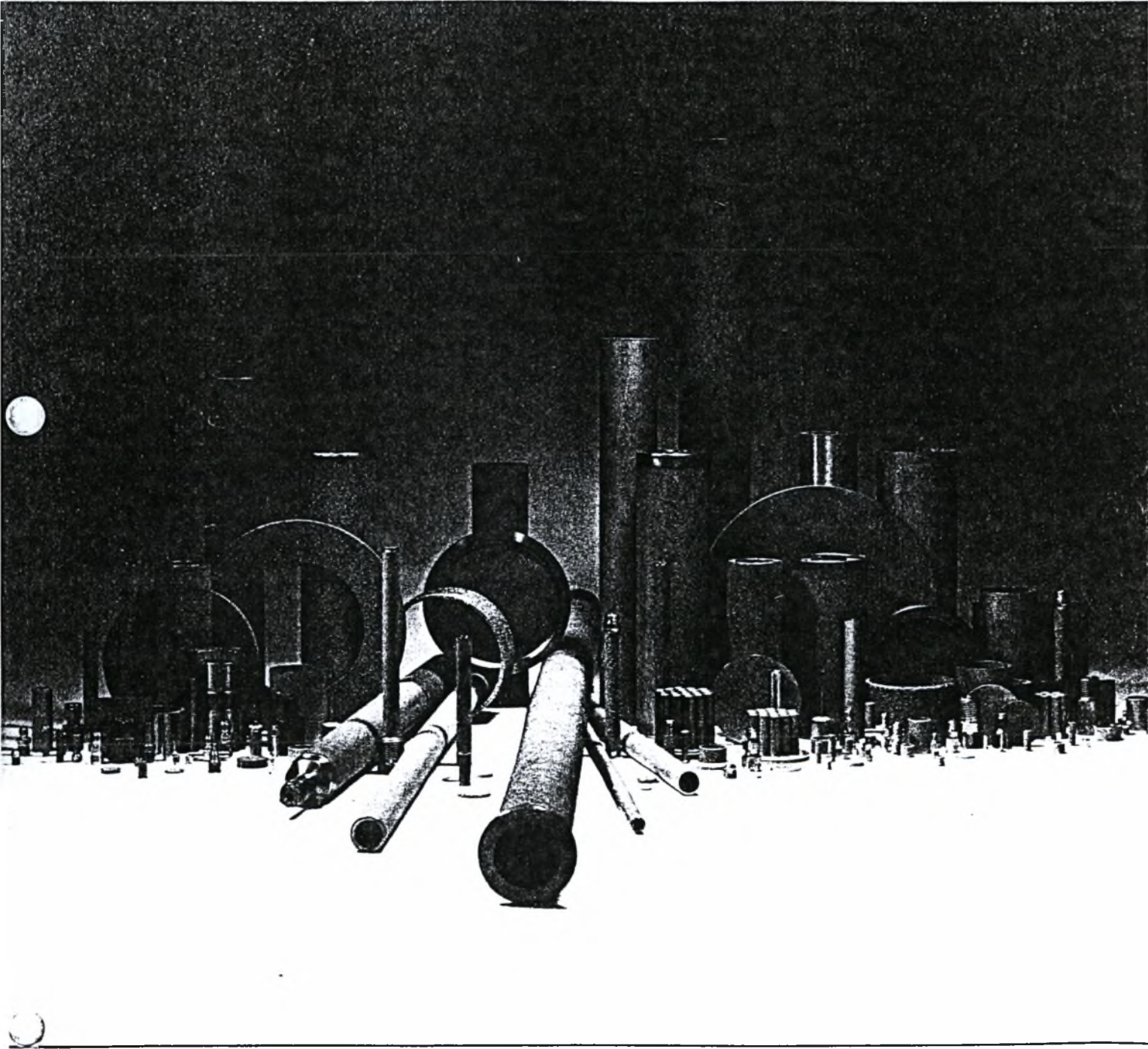
m ³ /h	Volumenstrom	Capacity	Volume engendre	Portata volumetrica
bar	Überdruck	Pressure rating	Surpression	Sovrapressione
3 ~/1 ~	Motorausführung	Motor version	Execution moteur	Esecuzione motore
kW	Motorleistung	Motor rating	Puissance moteur	Potenza motore
A	Stromaufnahme	Current drawn	Intensité absorbee	Corrente nominale
min ⁻¹	Drehzahl	Speed	Vitesse rotation	Numero giri
dB(A)	mittlerer Schallpegel	Average noise level	Niveau sonore moyen	Rumorosità media
kg	max. Gewicht	Weight max.	Poids maxi.	Peso massimo
ZRD	Zubehör	Optional extras	Accessoires	Accessori
ZRK	Druck-Regulierventil	Pressure regulating valve	Valve de réglage pression	Valvola regolazione pressione
ZMS	Rückschlagventil	Non return valve	Clapet anti-retour	Valvola di non ritorno
	Motorschutzschalter	Motor starter	Disjoncteur moteur	Interruttore magnetotermico



*Der Volumenstrom bezieht sich auf freie atmosphärische Luft von 1 bar (abs.) und 20° C. / The capacity refers to free atmospheric air at 1 bar (abs.) and 20° C. / Le débit est mesuré à l'atmosphère de 1 bar (abs.) à 20° C. / La portata si riferisce alla pressione atmosferica di 1 bar (abs.) e 20° C.
 Kennlinien und Tabellenangaben beziehen sich auf betriebswarme Verdichter. / Curves and tables refer to compressor at normal operating temperature. / Les courbes et tableaux sont établis, compresseur à température de fonctionnement. / Le curve caratteristiche ed i dati riportati nelle tabelle si riferiscono ai compressori con funzionamento a regime.
 Technische Änderungen vorbehalten! / We reserve the right to alter technical information! / Sous réserve de modification technique! / Salvo modifiche tecniche!

Precision Porous Metals

ENGINEERING GUIDE



mott



MOTT METALLURGICAL CORPORATION

Controlled Porosity For Precision Products

Engineering With Precision Porous Metals

Introduction

The advent of controlled porosity manufacturing processes has presented to the design engineer a whole new dimension in materials technology. It offers the designer unique properties of pore volume, pore size, particle retentivity, vibration suppression, noise suppression, capillary attraction, electrical resistivity, specific surface, gas permeability, liquid permeability, abrasability, or conversely wear resistance, differential permeability and low specific weight, all in a variety of metallic alloys. A few typical industrial applications resulting from engineering ingenuity in the application of one or more of these unique properties of porous material are shown in later pages of this brochure.

The common denominator of all of these applications is the porosity within the porous wall. Porosity is a physical constant of a porous wall and should not be confused with the permeability of the porous wall. By definition, porosity is a percentage of void volume within a porous structure, but this definition does not relate to the intercommunication of the individual pores, nor does it relate to the size of the individual pores. The extremes can be represented by a block of metal with a single hole contrasted to the same block of metal with an infinite number of minute holes, with both blocks having exactly the same percentage void volume. The permeability, however, of the two blocks would be totally different if we define permeability as the resistance to passage of a specific flow of fluid per unit of area. Furthermore, the capillary attraction, specific surface, electrical resistivity, thermal conductivity, noise suppression, vibration suppression and mechanical properties would be vastly different between the two structures.

Pore Interconnection

Departing now from the theoretical model to a more practical porous structure as produced from metallic powder, the important consideration becomes the interconnection of the various pores comprising the total porosity. Where fluid flow is important, the ideal porous material will contain no "blind porosity" defined as a pore which originates and terminates within the pore structure, thus contributing nothing to fluid transport through the porous wall. The ideal porous material, therefore, must be constructed of completely spherical, uniformly sized particles where it is geometrically impossible to generate blind porosity short of compressing the structure to 100% relative density. Whereas spherical particles are commonly used in the nonferrous alloys such as bronze, they are much more difficult to fabricate in the ferrous alloys such as stainless steel. Therefore, they are used only in special applications in stainless steel technology, where application requirements are stringent enough to support the additional costs of an all-spherical porous structure.

Pore Size Uniformity

Having defined the porosity per se, we must now examine the pore size uniformity in the porous structure. In general, porous structures fabricated from metallic powder always exhibit a distribution of pore sizes, this distribution being generated by the statistical

packing of particles as they are consolidated into a porous matrix. During the packing phenomenon, particles tend to "bridge" and form pores within the structure that are larger than those formed by geometrically perfectly spaced particles in the lattice. Various manufacturing techniques can be employed to minimize the bridging effect, but it is virtually impossible to eliminate it entirely, even when completely spherical metallic particles comprise the matrix. By analysis and experimentation over the last 30 years, Mott Metallurgical Corporation engineers have developed processes which create controlled porous structures to yield predetermined characteristics to a high degree of precision. This is the meaning of controlled porosity for precision products.

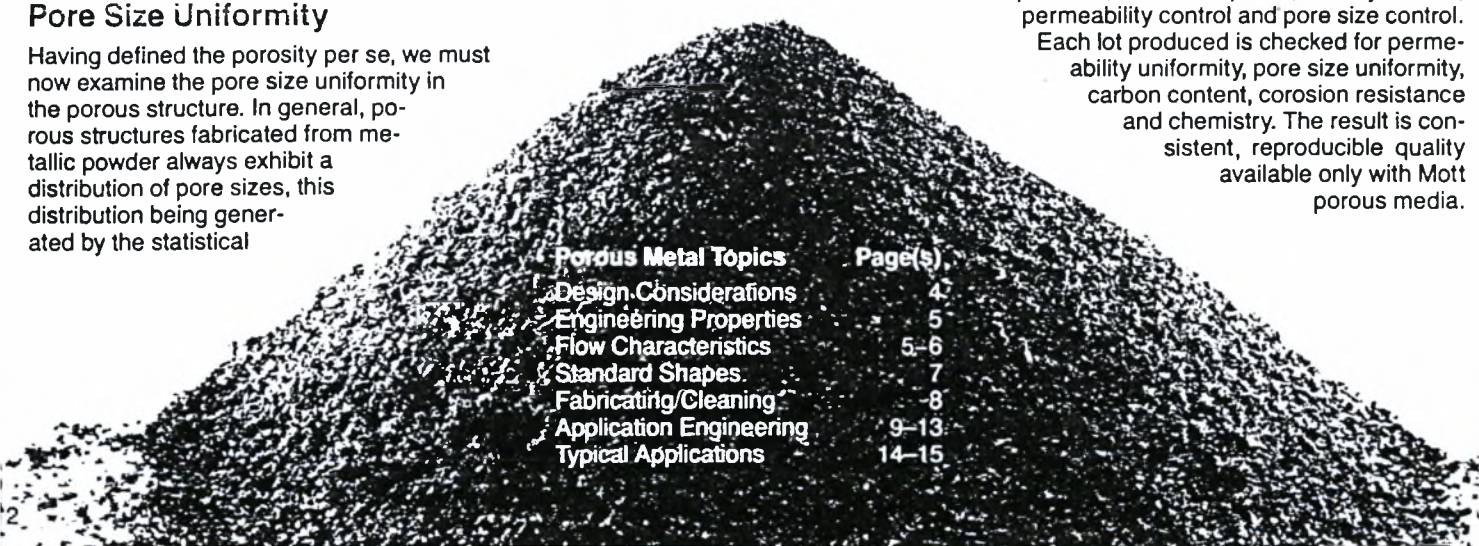
Manufacturing Controlled Porosity Media

Consolidation of pregraded powder into a porous aggregate can be accomplished by heat alone, in what is known as the "no pressure sintering process"; or the powder can be precompressed into a form by the application of controlled pressure and subsequently heated to the sintering temperature. When one is manufacturing porous sheet stock for example, which is to be later formed into a cylinder and welded to create a filter element, the precompression technique is preferred because it offers:

- Precise thickness control ($\pm .005$ ").
- Reorientation of loose powder to minimize the bridging effect mentioned above and produce a more uniform porous structure and permeability.
- Precompression of all particles in the aggregate so that each particle is bonded to several of its neighbors, leaving no particles free to break loose and migrate into the effluent stream.

The sintering process is carried out at temperatures approaching the melting point of the particular alloy being used and in a controlled atmosphere. The atmosphere is usually reducing in nature and serves to remove surface oxide films from the powder particles and protect these surfaces throughout the sintering cycle. While the porous structure is at the sintering temperature and under the influence of the reducing sintering atmosphere, individual particles metallurgically bond to their neighbors by the process of solid state diffusion, thus transforming the precompact form into a coherent matrix with interconnected porosity.

It is obvious that reproducibility of permeability and pore size must be a direct function of the powder particle size and size distribution and precise control over the processing stages. Mott Metallurgical processes involve pregrading of all powder to precise sieve analyses (particle size distributions) and stringent monitoring of the processing variables such as compacting pressure, sintering time, temperature, and atmosphere; density control, permeability control and pore size control. Each lot produced is checked for permeability uniformity, pore size uniformity, carbon content, corrosion resistance and chemistry. The result is consistent, reproducible quality available only with Mott porous media.



Porous Metal Topics	Page(s)
Design Considerations	4
Engineering Properties	5
Flow Characteristics	5-6
Standard Shapes	7
Fabricating/Cleaning	8
Application Engineering	9-13
Typical Applications	14-15

Properties of Porous Media

The principal useful properties of porous materials are: degree of porosity (usually expressed as a weight percentage), pore size, pore size distribution and permeability of the porous media to fluid flow (expressed as a flow vs. differential pressure characteristic curve).

The most convenient way to measure the pore size of a porous structure is known as the bubble point method. This method involves immersing the porous component in a fluid which completely wets the porous surface (one which forms a zero angle of contact with the porous surface) and then slowly pressurizing the porous structure. If one notes the pressure at which the first stream of bubbles forms, one can compute the approximate pore diameter by the equation $R = 2 \sigma / \Delta P$ where R is the radius of an equivalent capillary, sigma is the surface tension between the fluid and the metal and ΔP represents the measured differential pressure.

It should be noted, however, that since the observation is made on the *surface* of the porous media, this method will yield only the pore size of that surface. (The magnified views of standard Mott porous media micron grades shown below illustrate surface pore size variations.) Where there is any depth to the porous structure, this measurement does not describe the pore structure immediately below the surface. In a filter application, for example, it is important to know the contaminant particle size that will be re-

tained by the filter membrane (its "degree of filtration"). Although the initial bubble formation pressure can be related to the degree of filtration as shown in the graph on page 5, the calculated degree of filtration at the same pressure would be many times that actually observed in empirical testing.

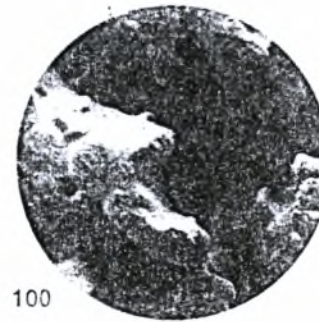
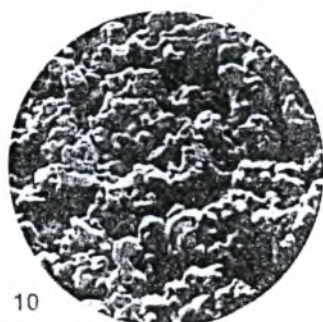
The difference between calculated and observed values for degree of filtration is attributed to the "depth effect" of a porous matrix and is related to the tortuosity of the flow path through a porous wall and the multiplicity of minute crevices which tend to entrain particulate matter in a flowing stream.

The liquid and gaseous permeability of porous media is a function of fluid viscosity and density, pore size and pore size distribution, and thickness of the porous wall. Experimental testing has proven that the differential pressure required to achieve any given flow is directly proportional to the thickness of the porous wall for an isopermeable structure. Graphs showing flow vs. differential pressure for air and liquids of various viscosities are given on pages 5 and 6.

The mechanical properties of porous metals are, of course, considerably lower than those of the same alloys in wrought or 100% dense form. A table of mechanical properties for type 316L stainless steel porous sheet is given on page 5.

Closely Controlled Powder Fractions Assure Uniformity and Precision Porosity of Mott Media

100X views of standard Mott micron grades.



○ 10 μ dia., 100X

100 μ dia., 100X



Designing With Mott Porous Metals

Mott Metallurgical Corporation manufactures precision porous metal products in sheet, rod, seamless tube and a variety of preformed configurations. These products are used in many diverse applications as demonstrated on later pages. It is interesting to note in these varied applications how particular properties such as pore size, pore volume and permeability can help perform such a wide scope of industrial functions. Design ingenuity, sound engineering and productive capacity are Mott hallmarks that make such innovations possible.

Design Considerations

When engineering porous products, designers should be aware of the basic capabilities and limitations of the alternative manufacturing processes. This will allow the fabrication of cost-effective finished products with the best combination of desired properties.

The prime consideration in a porous product is the porosity itself—characterized by pore size, pore size distribution, number of pores per unit of area and, to a lesser extent, pore shape.

Pore size can be controlled by the particle size of the powder and by the relative density established during manufacturing. Pore size distribution is controlled by the particle size distribution of the powder and the consolidation technique coupled with the sintering procedure.

Obviously, the finer the powder particle size, the finer the pore size in the finished product. Also, the higher the finished product density, the finer the pore size. However, if one attempts to achieve a fine pore structure by controlling particle size alone and allows the finished product to have a low density, there is a substantial sacrifice in mechanical strength.

It follows, therefore, that components fabricated by the "no pressure sintering" method are generally of lower structural integrity than components fabricated using precompression and subsequent sintering. Where permeability is the primary concern, as in the manufacture of air bearings, pore size is usually a minor consideration and permeability is best controlled by means of processing variables. Where strength is not a prime consideration, the "no pressure sintering" technique is usually less expensive and is normally employed in the manufacture of porous bronze and other nonferrous alloys. Porous components fabricated from stainless steel, Monel, Inconel and other ferrous or high temperature alloys, on the other hand, are normally preformed and subsequently sintered. Usually, the applications of these materials require high strength, corrosion resistance and/or temperature resistance.

When metallic powders are precompressed in dies, it should be understood that they compress only in the direction of applied pressure and do not flow hydrostatically as would be the case with plastic resins during injection molding. Therefore, in designing preformed porous metallic components, one should avoid undercuts, lateral holes, threads, double tapers, abrupt cross-sectional changes, fragile appendages, etc.

Porous structures can be machined by conventional techniques, but the machining operation will almost invariably close the surface pores due to metal flow. If an active surface of the porous material is to be machined, it is necessary to reactivate these pores upon completion. Mott Metallurgical Corporation has developed a proprietary technique for pore reactivation. Where unique structures are required, it is recommended that Mott perform the entire service of machining and pore reactivating.

By virtue of the Mott process for producing porous metallic structures, a significant degree of ductility is imparted to the structures. Therefore, subsequent forming operations may be performed within limits. Mott Series 1100 Type 316L stainless steel sheet, 1/16" thick, can be bent to a minimum radius of 5/8" or roll-formed into cylinders with a minimum 1-1/4" diameter. Mott seamless porous tubes can be bent or formed in generous arcs to make air bearings. All porous structures exhibit relatively poor fatigue life, however.

Design Properties of Porous Metals

- | | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| 1. Pore Volume | 8. Abradability |
| 2. Pore Size | 9. Specific surface |
| 3. Particle retentivity | 10. Gas permeability |
| 4. Vibration dampening | 11. Liquid permeability |
| 5. Low thermal conductivity | 12. Uniformity of permeability |
| 6. Capillary attraction | 13. Controlled non-uniformity |
| 7. Electrical resistivity | 14. Surface tension |

Porous Media Selection

When selecting porous metals for precision filter designs and other products, utilize the technical information and the comprehensive flow vs. pressure drop data on pages 5 and 6. First, determine the application conditions or requirements for:

1. Particle retention
2. Pressure drop
3. Flow rate
4. Operating fluid—type, density, viscosity
5. Process temperature
6. System pressure
7. Corrosive effects, if any

Then select the porous media and calculate required component sizes based on:

1. Metal or alloy
2. Active surface area
3. Component configuration
4. Available fluid flow and pressure
5. System conditions

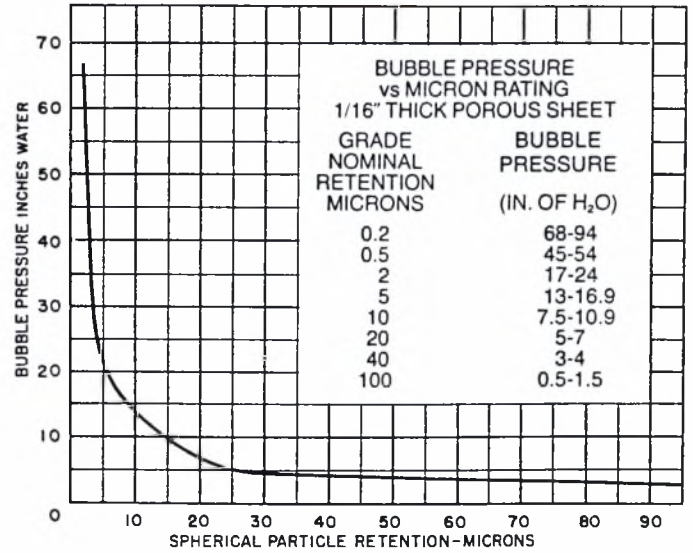
Engineering Properties of Porous Metal Media

All information is based on Mott porous stainless steel sheet. Particle retention data will apply to other metals and alloys, but mechanical properties may differ depending upon alloy.

Mechanical Properties

Filtration Grade microns	Standard Thickness inches	Minimum Ultimate Tensile Strength PSI	Yield Strength at 0.2% Offset PSI	Elongation %	Young's Modulus X 10 ⁶ PSI
0.2	.039	30,000	26,000	4.0	10.0
0.5	.047	23,500	21,000	3.3	7.5
2	.062	17,700	13,200	3.0	5.5
5	.062	13,300	9,200	3.0	4.0
10	.062	10,500	7,500	2.4	3.0
20	.062	7,000	5,700	2.1	2.3
40	.078	4,500	3,500	2.0	2.3
100	.093	3,900	3,000	1.9	2.2

Spherical Particle Retention



Corrosion Resistance

Mott porous products are available in a wide variety of metals and alloys, the most prevalent of which are listed below. Where corrosion poses a potential problem, the designer can easily specify materials with resistance to specific liquids or gases.

Material	Code	Material	Code
316L SS	A	Alloy 20	N
304L SS	C	310SS	P
347 SS	E	Gold	Q
430 SS	G	Platinum	R
Nickel 200	H	Silver	S
*Monel 400	J	Titanium	T
*Inconel 600	K	*Hastelloy B-2	U
*Hastelloy C-276	L	*Hastelloy C-22	V
*Hastelloy X	M		

*Registered Trademarks:

Monel, Inconel—International Nickel Co., Inc.

Hastelloy—Haynes International, Inc.

Recommended Maximum Service Temperatures

Oxidizing Atmospheres

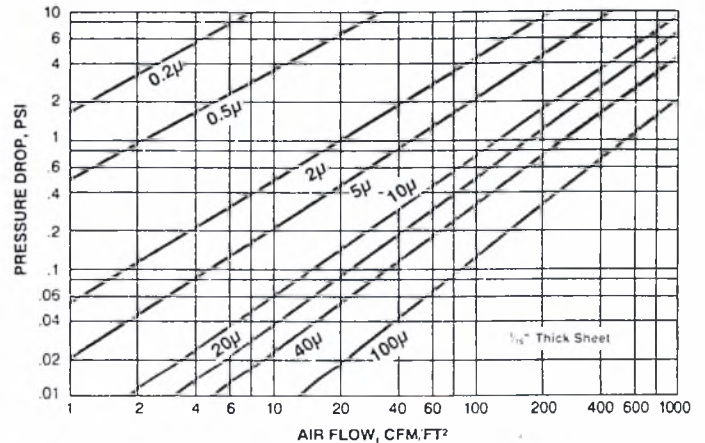
316L SS	750°F
Inconel	1100°F
Hastelloy X	1450°F

Reducing or Neutral Atmospheres

316L SS	1000°F
Inconel	1500°F
Hastelloy X	1700°F

Mott Porous Media Gas Flow Characteristics

These flow curves are presented as a design aid in the development of applications using Mott porous sheet media. The air flow graph has data for all micron grades determined under ambient conditions.



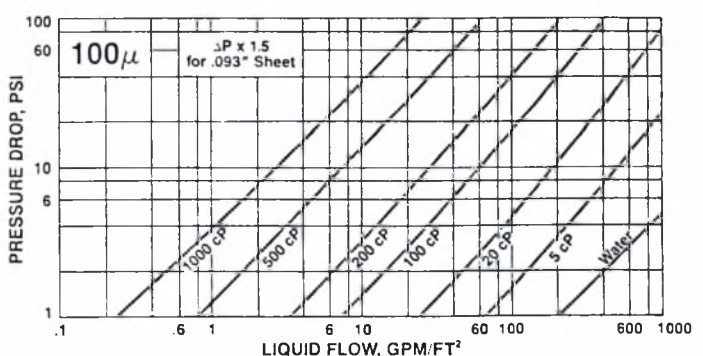
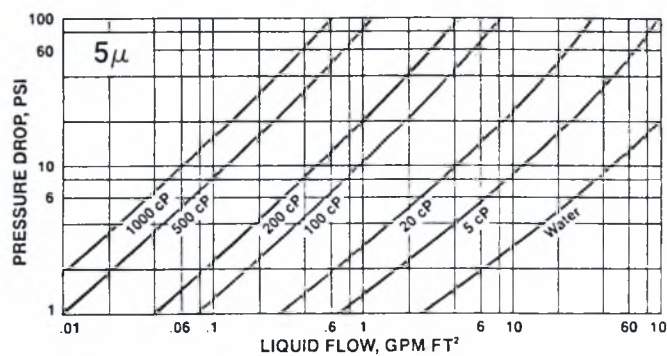
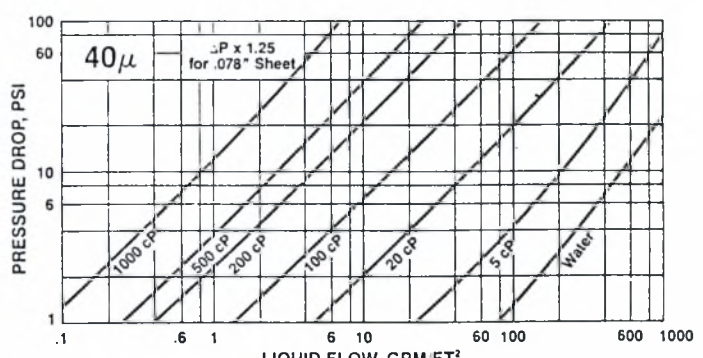
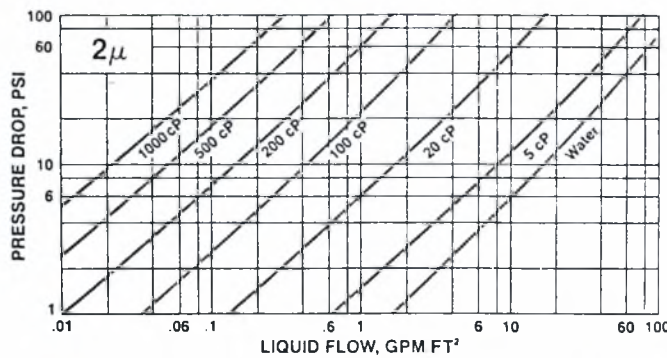
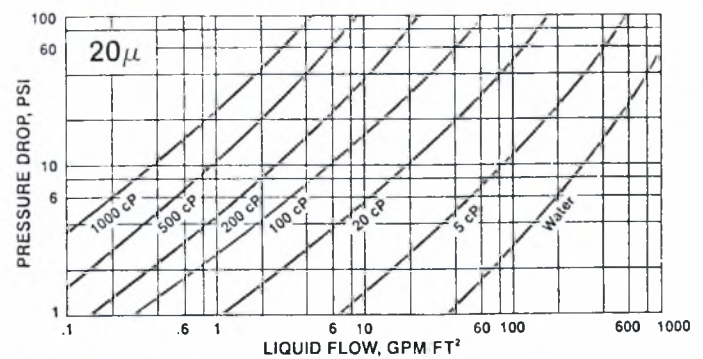
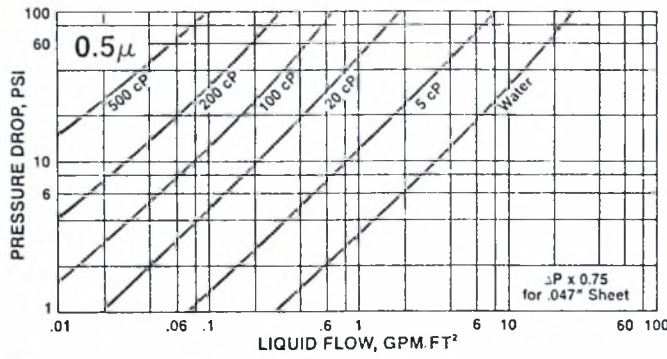
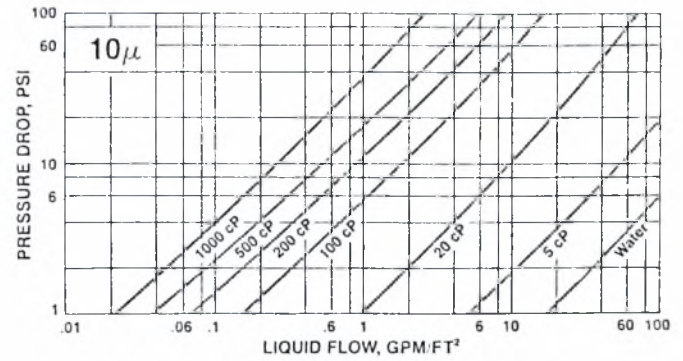
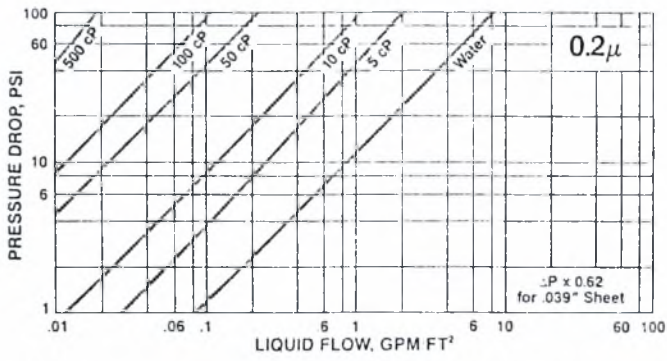
Notes to Flow Graph

- All data is normalized to .062 in. thickness. Differential pressure varies in direct proportion to sheet thickness. Standard sheet thickness varies with micron grade—see table of Mechanical Properties, page 5.
- Flow curves are presented in a log-log format; be sure to note correct numerical values for each log cycle.
- Flow characteristics given are for porous media only. To determine total pressure drop of a system, combine losses through media, fittings, housing, piping and valves as appropriate.
- These flow characteristics were derived using 316L SS porous media. They are structure-related, not material-related, hence they apply to all available alloys.
- These flow characteristics are typical and should be used for general reference only.

Mott Porous Media Liquid Flow Characteristics

These flow curves are presented as a design aid, to help in the development of applications using Mott porous sheet media. Flow

data for water and higher viscosity liquids are given in the graphs below, organized according to the eight standard micron grades:



Notes to Flow Graphs

1. All data is normalized to .062 in. thickness. Differential pressure varies in direct proportion to sheet thickness. Standard sheet thickness varies with micron grade—see table of Mechanical Properties, page 5.
2. Flow curves are presented in a log-log format; be sure to note correct numerical values for each log cycle.
3. Flow characteristics given are for porous media only. To determine total pressure drop of a system, combine losses through media, fittings, housing, piping and valves as appropriate.

4. These flow characteristics were derived using 316L SS porous media. They are structure-related, not material-related, hence they apply to all available alloys.
5. Liquid flow data were generated using water for viscosity of one centipoise and silicone oil for all higher viscosities.
6. These flow characteristics are typical and should be used for general reference only.

Standard Mott Porous Metal Shapes

Ordering Information, Stock Lists

Standard shapes of Mott precision porous media offer inexpensive means of satisfying application requirements. Mott normally stocks the items marked "*" for prompt shipment. Many other sizes are available, often from stock—consult Mott.

Order all items by catalog number as indicated. Standard material is 316L SS and does not require specification. A wide range of other materials is available; see table on page 5. To specify an alternate metal or alloy, add material code from table as a suffix (examples below). For standard tolerances see DB 1091.

Discs



Mott porous 316L SS discs, Series 1000.
Order by Catalog No.:
1000-D-T-Micron Grade

D, in.	T, in.	Micron Grade							
		0.2	0.5	2	5	10	20	40	100
.062	.039			*					
.062	.062		*	*	*	*	*	*	*
.093	.062		*	*	*	*	*	*	*
.125	.039		*	*					
.125	.062		*	*	*	*	*	*	*
.125	.125		*	*	*	*	*	*	*
.188	.062		*	*	*	*	*	*	*
.188	.125		*	*	*	*	*	*	*
.250	.031		*	*	*	*	*	*	*
.250	.039		*	*	*	*	*	*	*
.250	.062		*	*	*	*	*	*	*
.250	.125		*	*	*	*	*	*	*
.375	.039		*	*	*	*	*	*	*
.375	.062		*	*	*	*	*	*	*
.375	.125		*	*	*	*	*	*	*
.500	.039		*	*	*	*	*	*	*
.500	.062		*	*	*	*	*	*	*
.500	.125		*	*	*	*	*	*	*
.625	.062		*	*	*	*	*	*	*
.625	.125		*	*	*	*	*	*	*
.750	.062	*	*	*	*	*	*	*	*
.750	.125	*	*	*	*	*	*	*	*
.875	.062	*	*	*	*	*	*	*	*
.875	.125	*	*	*	*	*	*	*	*
1.000	.062	*	*	*	*	*	*	*	*
1.000	.125	*	*	*	*	*	*	*	*

Also available: discs from .031" to 8.375" dia., some in stock. Larger discs cut from porous sheet are also available.

Sheets



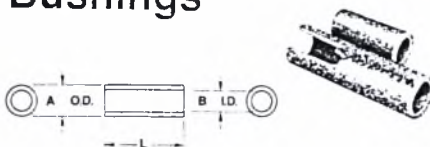
Mott porous 316L SS sheets, Series 1100.
Order by Catalog No.:
1100-W-L-T-Micron Grade

W, in.	L, in.	T, in.	Micron Grade							
			0.2	0.5	2	5	10	20	40	100
8½	10	.039	*							
8½	10	.047		*						
8½	10	.062		*	*	*	*	*	*	*
8½	10	.078		*	*	*	*	*	*	*
8½	10	.093		*	*	*	*	*	*	*
10	12	.039	*							
10	12	.047		*						
10	12	.062		*	*	*	*	*	*	*
10	12	.078		*	*	*	*	*	*	*
10	12	.093		*	*	*	*	*	*	*
10	12	.125		*	*	*	*	*	*	*

Other sizes and thicknesses also available, some in stock.

1100-10-12-.093-100

Bushings

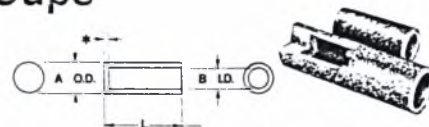


Mott porous 316L SS bushings, Series 1300.
Order by Catalog No.:
1300-A-B-L-Micron Grade

A, in.	B, in.	L, in.	Micron Grade							
			0.5	2	5	10	20	40	100	
.250	.125	1.000	*	*	*	*	*	*	*	*
.375	.250	1.000	*	*	*	*	*	*	*	*

Also available: bushings from .138" to 4.528" O.D., some in stock.

Cups

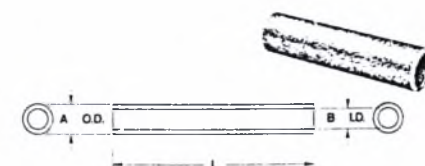


*Min. end thickness = wall thickness
Mott porous 316L SS cups, Series 1200.
Order by Catalog No.:
1200-A-B-L-Micron Grade

A, in.	B, in.	L, in.	Micron Grade							
			0.2	0.5	2	5	10	20	40	100
.125	.062	.125		*	*	*	*	*	*	*
.170	.070	.640		*	*	*	*	*	*	*
.250	.125	1.000		*	*	*	*	*	*	*
.317	.093	1.463	*	*	*	*	*	*	*	*
.375	.250	1.000		*	*	*	*	*	*	*
.500	.375	1.000		*	*	*	*	*	*	*
.678	.553	.840		*	*	*	*	*	*	*
.812	.641	1.060		*	*	*	*	*	*	*

Also available: cups from .078" to 1.310" O.D., some in stock.

Seamless Tubes



Mott porous 316L SS seamless tubing, Series 1400.
Order by Catalog No.:
1400-A-B-L-Micron Grade

A, in.	B, in.	L, in.	Micron Grade							
			0.5	2	5	10	20	40	100	
.250	.125	6	*	*	*	*	*	*	*	*
.375	.250	*	*	*	*	*	*	*	*	*
.500	.375	*	*	*	*	*	*	*	*	*
.625	.500	*	*	*	*	*	*	*	*	*
.750	.625	*	*	*	*	*	*	*	*	*
1.000	.750	*	*	*	*	*	*	*	*	*

*Lengths in stock 6", 12", 18", 24".
Also available: longer tubes and other diameters, some in stock.

Ordering Examples

1000-.750-.062-5 denotes a porous disc with .750" diameter, .062" thickness, 5 micron porosity, of 316L stainless steel.

1100-8½-10-.078-40-K denotes a porous sheet 8 1/2" wide, 10" long, .078" thick, with 40 micron porosity, of Inconel 600.

1300-.375-.250-1.000-10 denotes a porous bushing with .375" O.D., .250" I.D., 1" length, 10 micron porosity, of 316L SS.

1400-.750-.625-24-0.5-J denotes a porous seamless tube with .750" O.D., .625" I.D., 24" length, 0.5 micron porosity, of Monel 400.

Fabricating With Standard Shapes

Forming

Mott porous materials have significant ductility so that cold-forming operations are possible within certain limits. For example, Mott standard 316L SS porous sheet, 1/16" thick, can be roll-formed into cylinders with a minimum diameter of 1 1/4" to produce filter cartridges (smaller diameter tubes can be formed from thinner sheets). Mott seamless porous tubes can be bent in generous longitudinal arcs to form air film rolls or air bearings.

Machining

Although Mott porous metal can be machined by conventional techniques, the pressure and tearing action of the cutting tool will smear close the surface porosity, rendering the machined component virtually impermeable. More exotic electrical discharge machining will not close the surface pores.

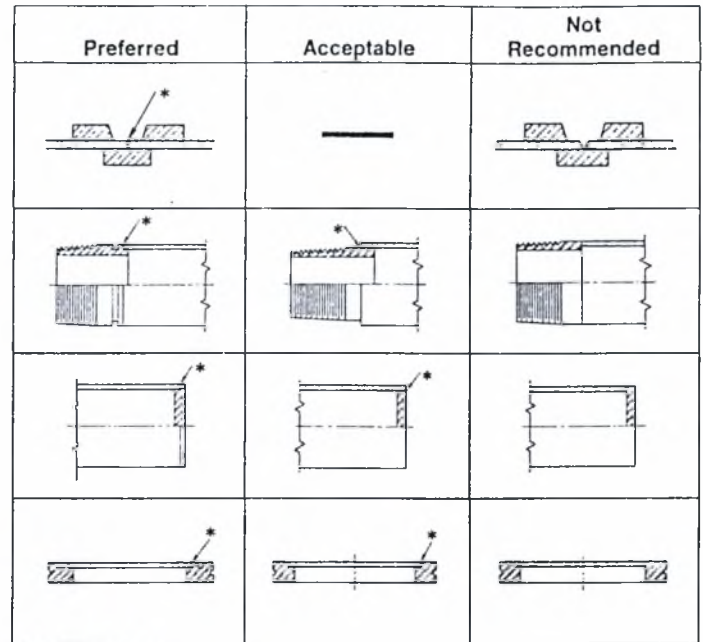
If conventional machining techniques are used, it is recommended that only water soluble oils be employed as lubricants during the machining operation. After machining, consult Mott Metallurgical Corporation for reactivation of closed pores.

Brazing

Brazing porous metal is extremely difficult. The porous material acts as a wick, so when the molten braze is applied, it is soaked up into the pores, filling the voids and destroying the porosity. Mott Metallurgical has a special brazing technology which avoids this problem—consult Mott for information.

Welding

Mott porous stainless steel products can be readily welded to themselves and to solid metal mating parts, provided certain precautions are taken. The most important thing to remember is the intrinsic porosity of the material. Approximately 50% of the apparent volume of porous metals is void space. When melted by a welding arc, the voids collapse; additional metal must be added to compensate for their volume. Metal can be added during the welding process with a filler rod or can be provided in the weld preparation of the mating solid component, as shown in the accompanying illustrations.



* Strike arc here.

Any standard shielded arc welder that will deliver 2-25 amperes may be used. The shielding gas is normally argon or helium; recommended flow rate is 15 standard cubic feet per hour at the torch. The welding electrode should be 2% thoroated tungsten, sharpened to a needle point. The most popular diameters are .060" and .040". Wherever possible, porous parts to be welded should be clamped in place; heat sinks or chills should be mounted as close as possible to the weld bead. When joining porous media to solid members, the "Preferred" designs in the illustration often provide the necessary heat sinks without requiring separate chills.

Cleaning Porous Media

The best cleaning procedure for a porous metal product depends on the nature of its application. If it has been used as a barrier filter and all the retained particulate matter is on the surface, a simple reverse flush with clean fluid or gas will normally restore its original permeability.

If the porous material has been used as a depth-type filter and particulates are entrained within its pores, ultrasonic cleaning is recommended. If there is a solvent for the contaminant and this solvent is nonreactive with the porous media, it is advisable to backflush with the solvent before ultrasonic cleaning.

During any blowback or backwash operation, intermittent pulses of gas or liquid are far more effective in cleaning porous media than a steady reverse flow. Also quite effective is alternately filling the pores with liquid and then blowing them open with either air or steam, using short pulse action.

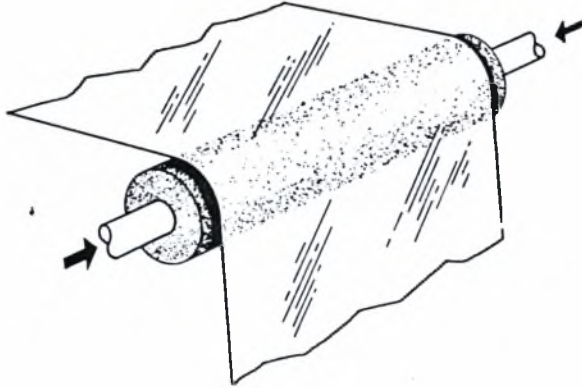
If the contaminant is combustible, it can quite often be removed from the pores by salt-bath cleaning at an elevated temperature. If the salt-bath temperature exceeds 750°F, however, the bath should be nitrogen-blanketed to avoid oxidation of the porous media upon removal from the protecting salt.

Conventional oven burning, preferably with a steam blanket, has also been used with good results, but some deterioration of the porous media may occur due to oxidation. Any combustion process should be followed by ultrasonic cleaning to remove combustion byproducts and other particulate matter.

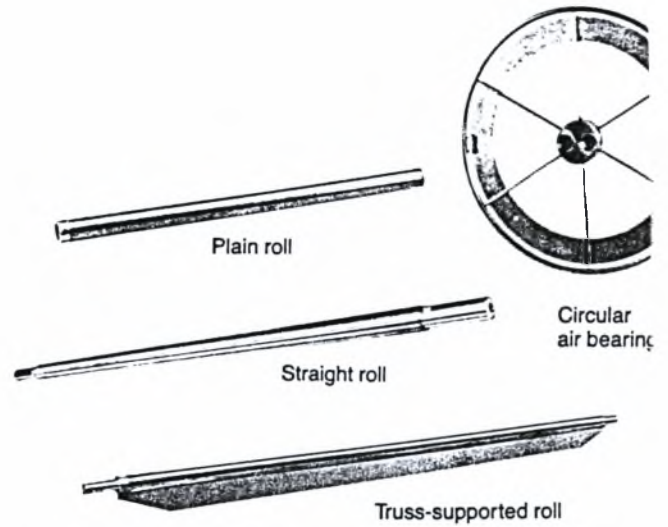
Detailed cleaning recommendations are available from Mott Metallurgical for specific applications.

Application Engineering With Mott Porous Products

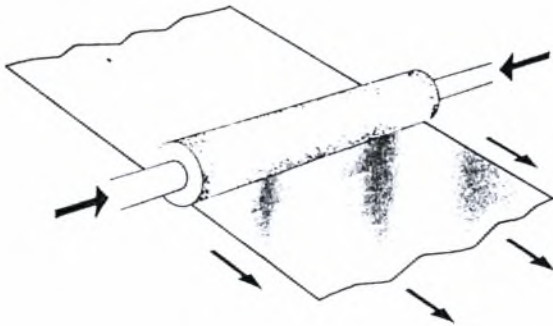
Air Film Rolls/Air Bearings



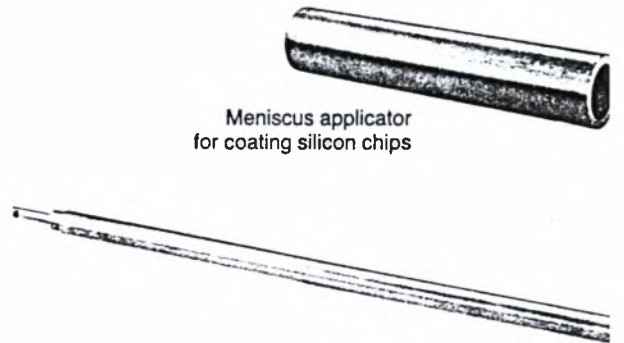
Design properties: pore size, air permeability.
Function: support moving webs on boundary layer of gas.



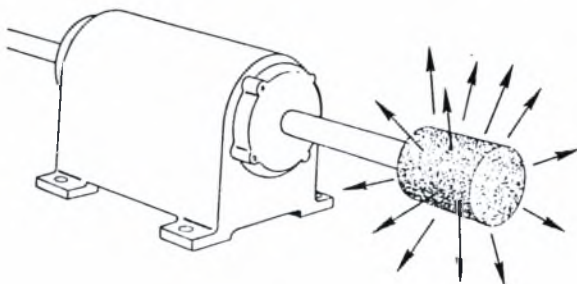
Applicators



Design property: liquid permeability.
Function: apply coatings on moving webs, oilers, photo developers.

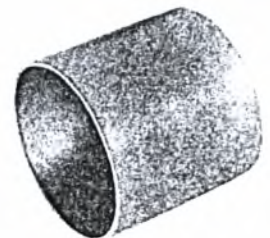


Atomizers

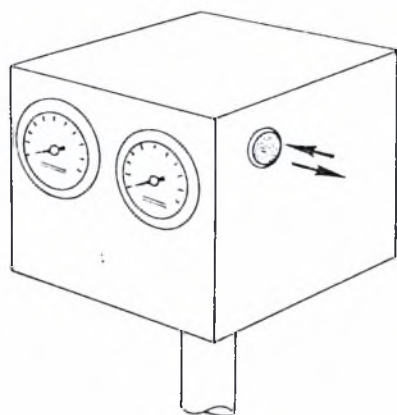


Design property: pore size.
Function: centrifugally disperse and dispense liquid in fine mist chemical spraying humidifiers.

Atomizer cylinder for aircraft crop spraying of insecticides and fertilizers



Breathers/Pressure Equalizers



Design properties: pore size, permeability.
Function: relieve vapor pressure, allow pressure equalization while excluding contaminants.



Breather assembly with surfactant-treated porous element

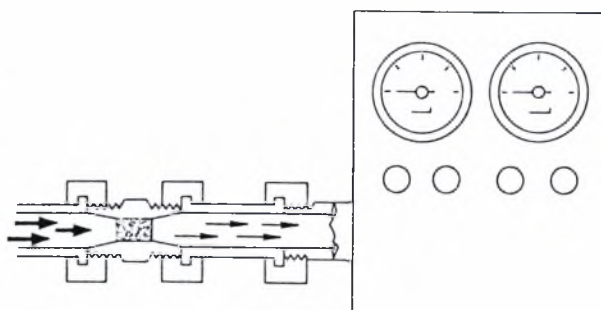


Threaded breather cups



Breather disc

Controlled Leaks/Flow Restrictors



Design property: pore size.
Function: control or meter small volumes of gas or liquid.



Restrictor mounted in tube union compression fitting



Restrictor mounted in male adaptor compression fitting



Restrictor mounted in hex nipple

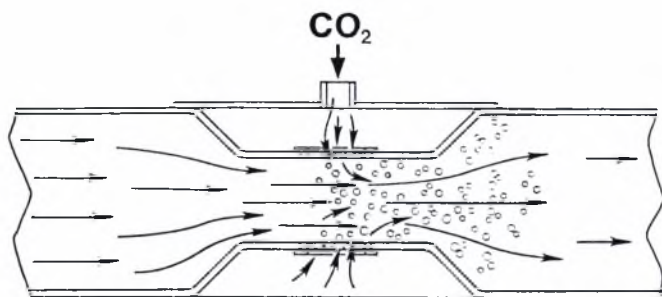


Controlled leak for spectrograph

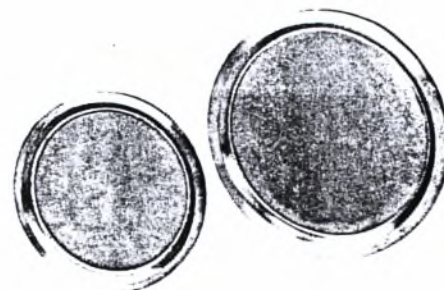


Encapsulated restrictor

Carbonators



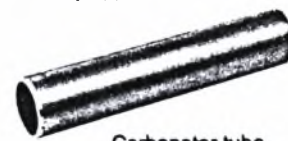
Design properties: pore size, gas permeability.
Function: inject fine dispersion of CO₂ into flowing liquid.



Carbonating discs for brewery applications

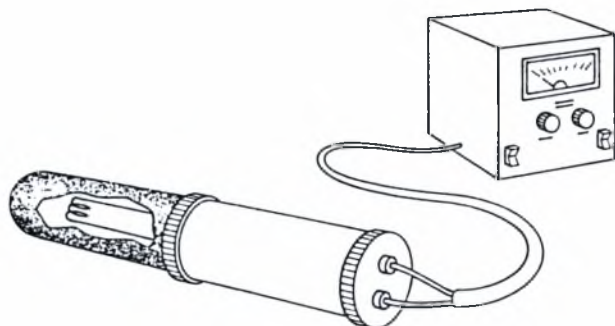


Carbonator "stone"



Carbonator tube

Sensor Protectors



Design properties: pore size, permeability, corrosion resistance.
Function: protect instrument sensors.



Analyzer flame arrester

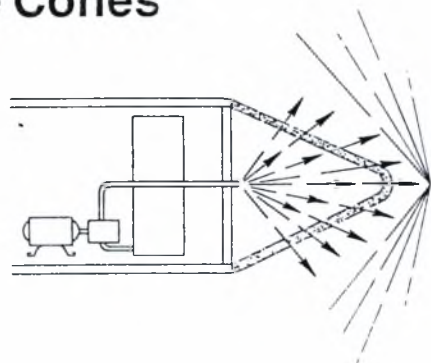


Dual sensor protector

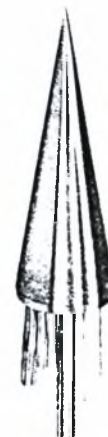


Flammable gas sensor protector

Nose Cones

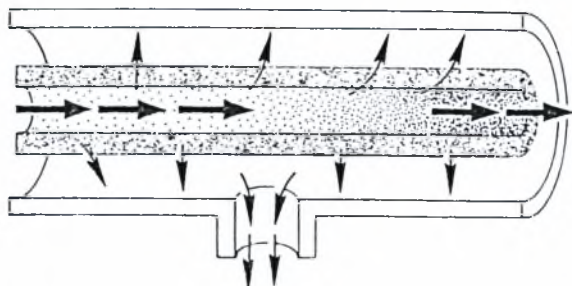


Design properties: controlled differential permeability, thermodynamic resistance, corrosion resistance.
Function: boundary layer displacement and control.



Nose cones for transpiration cooling studies

Inertial Filters/Concentrators



Design properties: pore size, permeability, interior smoothness.
Function: nonclogging inertial filtration and/or solids concentration.

Gaseous inertial sampling filter

Laboratory inertial filter

Pilot inertial filter system

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Λάζου Κ. Ε., "FORTRAN 77", Θεσσαλονίκη, 1991.
2. Λίτινας Γ., "Μέθοδος βελτίωσης του συντελεστή απόδοσης στις διεργασίες εξάτμισης", Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας, GR 1002436.
3. Μαρκόπουλου Ι. Ν., "Μεταφορά Μάζας", Εκδόσεις "University Studio Press", Θεσσαλονίκη, 1992.
4. Πασπαλά Κ. Γ., "Μετάδοση Θερμότητας", Εκδόσεις Σαλονικίδη, Θεσσαλονίκη, 1993.
5. Σαραβάκου Γ. Δ., "Τεχνική Φυσικών Διαχωρισμών", Αθήνα, 1976.
6. Σωτηρόπουλου Β. Α., "Εξατμιστήρες", Εκδόσεις "Σύγχρονη Παιδεία", Θεσσαλονίκη, 1996.
7. Brodkey R. S., Hersey H. C., "Φαινόμενα Μεταφοράς", Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 1990.
8. Clift, Grace & Weber, "Bubbles, Drops and Particles", Academic Press, INC. 1978.
9. Damm, Dr. Gaiser, Kowalzyk, Dr. Plantikow, "Windpowered MVC seawater desalination-Operating results and economical aspects", Proceedings of the Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production, (edited by CRES), p. 143-146, Santorini, June 1996.
10. Himmelblau D.M., " Βασικές αρχές και υπολογισμοί στην Χημική Μηχανική", Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1986.
11. Rodriguez-Girones, M. Rodrigues, J. Peres, J. Veza, "A systematic approach to desalination powered by solar, wind and geothermal energy sources", Proceedings of the Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production, (edited by CRES), p. 20-25, Santorini, June 1996.

12. Sayigh A. A. M., "Solar Energy Engineering", Academic Press, INC. 1977.
13. Smith J. M., Van Ness H. C., "Εισαγωγή στη Θερμοδυναμική", Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 1990.
14. VDI "Wärmeatlas" . Ελληνική μετάφραση. Τεχνοεκδοτική 1993.

