

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Δ. ΣΑΡΑΒΑΚΟΥ  
ΚΑΘΗΓΗΤΟΥ Ε. Μ. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ

# ΤΕΧΝΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Β' ΕΚΔΟΣΙΣ

ΑΘΗΝΑΙ 1979



## ΠΙΝΑΞ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

|   | Σελίς |
|---|-------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....   | 9     |
| 1. ΜΕΤΑΔΟΣΙΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ.....                                  | 15    |
| A. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΗ.....   | 16    |
| α) Θερμική 'Αγωγή κατά Μόνιμον Κατάστασιν.....                | 16    |
| β) Θερμική 'Αγωγή κατά μή Μόνιμον Κατάστασιν.....             | 21    |
| γ) Θερμική 'Αγωγιμότης τῶν 'Υλικῶν.....                       | 27    |
| B. ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟ-<br>ΤΗΤΟΣ |       |
| α) Συντελεσταί Μεταφοῶς θερμότητος.....                       | 33    |
| β) Φυσική Κυκλοφορία.....                                     | 39    |
| γ) 'Εξηναγασμένη Κυκλοφορία.....                              | 43    |
| δ) Πίπτοντα Λεπτά Στρώματα.....                               | 46    |
| ε) Συμπύκνωσις 'Ατμῶν.....                                    | 47    |
| στ) Ζέοντα 'Υγρά.....   | 51    |
| ζ) 'Αναλογία Μεταφοῶς θερμότητος καί 'Ορμῆς.....              | 53    |
| Γ. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ  |       |
| α) 'Εκπομπή καί 'Απορρόφησις τῆς 'Ακτινοβολίας... ..          | 57    |
| β) Μετάδοσις θερμότητος δι' 'Ακτινοβολίας.....                | 60    |
| γ) Θερμική 'Ακτινοβολία 'Αερίων.....                          | 64    |
| δ) Συνδυασμός Μεταφοῶς καί 'Ακτινοβολίας θερμό-<br>τητος..... | 65    |
| ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....   | 67    |

## 2. ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ

|   |     |
|---|-----|
| α) Ρυθμός Έναλλαγής Θερμότητας.....                     | 75  |
| β) Συντελεσταί Μεταφοράς Θερμότητας.....                | 80  |
| γ) Συντελεσταί Αποθέσεων.....                           | 83  |
| δ) Αριθμός Μονάδων Μεταφοράς-Θερμική Αποδοτικότητα..... | 86  |
| ε) Έναλλάται Θερμότητας Κελύφους και Σωλήνων...         | 91  |
| στ) Έναλλάται Θερμότητας μετά Πλακών.....               | 100 |
| ζ) Σπειροειδείς Έναλλάται Θερμότητας.....               | 102 |
| η) Αναδευόμενοι Έναλλάται Θερμότητας.....               | 102 |
| θ) Έναλλάται Θερμότητας μετά Πτερυγίων.....             | 106 |
| ι) Θερμαντικά Ρευστά.....                               | 109 |
| ια) Θερμαντικοί Κλίβανοι.....                           | 111 |
| ιβ) Σωλήνες Θερμότητας.....                             | 114 |
| ιγ) Έναλλάται Θερμότητας Άσυνεχούς Λειτουργίας.....     | 115 |
| ιδ) Προγράμματα Υπολογισμού Έναλλακτών Θερμότητας.....  | 117 |
| ιε) Βιομηχανική Ψύξις και Κατάψυξις.....                | 118 |
| 1. Συμπιέσεις Ατμών Ψυκτικού Μέσου.....                 | 120 |
| 2. Απορρόφησις Ατμών Ψυκτικού Μέσου.....                | 125 |
| 3. Δευτερογενή Ψυκτικά Μέσα.....                        | 126 |
| 4. Ζέσις Ψυκτικών Μέσων.....                            | 127 |
| 5. Ψύξις διά Κενού.....                                 | 129 |
| ιστ) Θερμική Παστερίωσις και Αποστείρωσις.....          | 131 |
| 1. Θερμική Καταστροφή των Μικροοργανισμών.....          | 132 |
| 2. Μετάδοσις Θερμότητας εις Κονσέρβας.....              | 134 |
| 3. Υπολογισμός Χρόνου Αποστείρωσεως.....                | 137 |
| 4. Αποστείρωσις εις Ύψηλās Θερμοκρασίας.....            | 146 |
| 5. Βιομηχανικοί Παστεριωτήρες και Αποστειρωτήρες.....   | 147 |
| ιζ) Υλικά Κατασκευής Έναλλακτών Θερμότητας.....         | 149 |
| ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....   | 152 |

## 3. ΕΞΑΤΜΙΣΙΣ

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| α)  | Ίδιότητες τῶν Ρευστῶν.....                     | 163 |
| β)  | Ήξατμιστῆρες μιᾶς Βαθμίδος.....                | 167 |
|     | 1. Ήξατμιστῆρες, Βραχέων Σωλήνων.....          | 167 |
|     | 2. Ήξατμιστῆρες Ήξηναγκασμένης Κυκλοφορίας..   | 169 |
|     | 3. Ἀτμογόνα καί Ἀναβραστῆρες.....              | 170 |
|     | 4. Ήξατμιστῆρες Μακρῶν Σωλήνων.....            | 172 |
|     | 5. Ήξατμιστῆρες Μετά Πλακῶν.....               | 173 |
|     | 6. Ήξατμιστῆρες Ἀναδευομένου Λειπτοῦ Στρώματος | 173 |
|     | 7. Φυγοκεντρικοί Ήξατμιστῆρες.....             | 176 |
|     | 8. Χρόνος Παραμονῆς εἰς Ήξατμιστήρας.....      | 176 |
| γ)  | Ίσοζύγια Μάζης καί Ἐνθαλπίας.....              | 178 |
| δ)  | Μεταφορά Θερμότητος εἰς Ήξατμιστήρας.....      | 180 |
| ε)  | Ἀνασυμπίσεις Ἀτμῶν.....                        | 183 |
| στ) | Ήξατμιστῆρες Πολλαπλῶν Βαθμίδων.....           | 185 |
| ζ)  | Ήξατμιστῆρες Πολτῶν.....                       | 192 |
| η)  | Ήξατμιστῆρες τύπου Ἀντλίας Θερμότητος.....     | 194 |
| θ)  | Ήξατμιστῆρες Ἐξατμιστῆρων.....                 | 195 |
|     | 1. Διαχωριστῆρες Ἀτμῶν/Ύγροῦ.....              | 196 |
|     | 2. Συμπυκνωτῆρες Ἀτμῶν.....                    | 197 |
|     | 3. Συστήματα Κενοῦ.....                        | 200 |
| ι)  | Ἀφαλάτωσης τοῦ Ὑδατος.....                     | 200 |
|     | ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....                                | 205 |

## 4. ΥΓΡΑΝΣΙΣ ΚΑΙ ΑΦΥΓΡΑΝΣΙΣ

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| α)  | Ύγρομετρία.....                             | 216 |
| β)  | Ψυχομετρικός Χάρτης.....                    | 222 |
| γ)  | Μέτρησις Ὑγρασίας τοῦ Ἀέρος.....            | 224 |
| δ)  | Διεργασίαι Ὑγράνσεως καί Ἀφυγράνσεως.....   | 225 |
| ε)  | Ἀνάλυσις Μεταφοῶς Θερμότητος καί Μάζης..... | 228 |
| στ) | Ψυκτικοί Πύργοι.....                        | 230 |
| ζ)  | Δεξαμεναί Ψύξεως τοῦ Ὑδατος.....            | 237 |
|     | ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....                             | 239 |

## 5. ΞΗΡΑΝΣΙΣ ΤΩΝ ΞΤΕΡΕΩΝ

|      |  |     |
|------|--|-----|
| α)   | Ύγρασία Ξτερεών.....                               | 243 |
| β)   | Καμπύλαι Ξηράνσεως.....                            | 247 |
| γ)   | Περίοδος Σταθεροῦ Ρυθμοῦ Ξηράνσεως.....            | 248 |
| δ)   | Περίοδος Ήλαττουμένου Ρυθμοῦ Ξηράνσεως.....        | 251 |
| ε)   | Μηχανισμός Ξηράνσεως Ξτερεῶν.....                  | 254 |
| στ)  | Ξήρανσις Κρυσταλλικῶν Ήνώσεων.....                 | 257 |
| ζ)   | Ήδιαβατικοί Ξηραντῆρες.....                        | 259 |
| η)   | Ξήρανσις εἰς Ρεῦμα Ήέρος.....                      | 261 |
|      | 1. Ξηραντῆρες μετά Ραφιῶν.....                     | 262 |
|      | 2. Ξηραντῆρες τύπου Σήραγγος.....                  | 263 |
|      | 3. Ξηραντῆρες μετά Μεταφορικῆς Ταϊνίας.....        | 264 |
|      | 4. Περιστροφικοί Ξηραντῆρες.....                   | 265 |
|      | 5. Ξηραντῆρες μετά Περιστρεφομένων Δίσκων.....     | 268 |
| θ)   | Ξήρανσις δι΄ Αἰωρήσεως εἰς Ήέρα.....               | 270 |
|      | 1. Ξηραντῆρες Στιγμαϊάς Δράσεως.....               | 270 |
|      | 2. Ξηραντῆρες διὰ Διασκορπισμοῦ.....               | 271 |
|      | 3. Ξηραντῆρες Ρευστοποιημένης Κλίνης.....          | 277 |
| ι)   | Ξήρανσις Λεπτῶν στρωμάτων καί Φύλλων.....          | 279 |
|      | 1. Ξηραντῆρες μετά Τυμπάνων.....                   | 279 |
|      | 2. Ξηραντῆρες μετά Κυλίνδρων.....                  | 282 |
| ια)  | Ξήρανσις εἰς Ράφια δι΄ Ήμμέσου Ήερμάνσεως.....     | 283 |
| ιβ)  | Ξήρανσις δι΄ Ήμμέσου Ήερμάνσεως ὑπό Ήνάδευσιν..... | 284 |
|      | 1. Ξηραντῆρες τύπου Ήναδευομένου Λέβητος.....      | 284 |
|      | 2. Περιστροφικοί Ξηραντῆρες Κενοῦ.....             | 285 |
|      | 3. Ξηραντῆρες τύπου Διπλοῦ Κώνου.....              | 285 |
|      | 4. Ξηραντῆρες μετά Μεταφορικῆς Ήελικος.....        | 286 |
|      | 5. Ξηραντῆρες Ήναδευομένου Λεπτοῦ Ξτρώματος... ..  | 286 |
| ιγ)  | Ξήρανσις δι΄ Ήφρισμοῦ.....                         | 287 |
| ιδ)  | Ξήρανσις διὰ Καταψύξεως.....                       | 288 |
| ιε)  | Ήπέρυθρος καί Διηλεκτρική Ξήρανσις.....            | 293 |
| ιστ) | Ήλιακή Ξήρανσις.....                               | 294 |
|      | ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....                                    | 296 |

|   |       |
|---|-------|
| 6. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΙΣ ΤΑΣ ΘΕΡΜΙΚΑΣ<br>ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ     | Σελίς |
| α) Διαθέσιμος Ένέργεια.....                                   | 302   |
| β) Έξοικονόμησις Ένεργείας είς τάς Θερμικάς Διεργασίας.....   | 305   |
| γ) Ανάκτησις Βιομηχανικής Θερμότητος.....                     | 308   |
| ΣΥΜΒΟΛΑ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΕΣ.....                                      | 313   |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....   | 316   |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ   |       |
| ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ.....                               | 325   |
| Π-1 Μετατροπή Μονάδων Τεχνικοῦ Συστήματος είς SI....          | 325   |
| Π-2 Μετατροπή Μονάδων Άγγλοσαξωνικοῦ Συστήματος είς SI.....   | 326   |
| ΠΙΝΑΚΕΣ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ                                |       |
| Π-3 Θερμοδυναμικά Ιδιότητες Άτμοῦ.....                        | 328   |
| Π-4 Θερμοφυσικά Ιδιότητες Ύδατος.....                         | 331   |
| Π-5 Θερμοφυσικά Ιδιότητες Άέρος.....                          | 332   |
| Π-6 Θερμοφυσικά Ιδιότητες διαφόρων Ύγρῶν.....                 | 333   |
| Π-7 Είδικά Θερμότητες διαφόρων Ρευστῶν.....                   | 334   |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΩΛΗΝΩΝ  |       |
| Π-8 Διαστάσεις Χαλυβδίνων Σωλήνων (Pipes).....                | 335   |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ   |       |
| Σ-1 Διάγραμμα Gurney-Lurie διά πλάκας.....                    | 337   |
| Σ-2 " " " " κυλίνδρους.....                                   | 337   |
| Σ-3 " " " " σφαίρας.....                                      | 338   |
| Σ-4 Συντελεσταί μεταφοράς θερμότητος διαφόρων διεργασιῶν..... | 339   |
| Σ-5 Φυσική κυκλοφορία ἀέρος είς κατακορύφους πλάκας..         | 340   |
| Σ-6 Θερμική ἀποδοτικότητα ἀπλῶν ἐναλλακτῶν ἀντιρροῆς..        | 341   |
| Σ-7 " " ἐναλλακτῶν 1-2, 1-4, κλπ....                          | 342   |
| Σ-8, " " ἐναλλακτῶν 2-4, 2-6, κλπ....                         | 343   |
| Σ-9 Διάφοροι ἐναλλάκται θερμότητος κελύφους καί σωλήνων.....  | 344   |
| Σ-10 Συντελεσταί διορθώσεως ἐναλλακτῶν ἐγκαρσίας ροῆς         | 348   |
| ΑΛΦΑΒΗΤΙΚΟΝ ΕΥΡΕΤΗΡΙΟΝ.....                                   | 349   |





## ΠΡΟΛΟΓΟΣ Β' ΕΚΔΟΣΕΩΣ

Ἡ ἐξάντλησις τῆς πολυγραφημένης Α' Ἐκδόσεως τοῦ βιβλίου "Τεχνική Θερμικῶν Διεργασιῶν" κατέστησε ἀναγκαίαν τὴν παρούσαν βελτιωμένην νέαν ἔκδοσιν. Ἡ διάταξις τῆς ὕλης δι-ετηρήθη βασικῶς ἡ ἴδια. Εἰς τὸ τέλος τοῦ βιβλίου προσετέθη σύντομον Κεφάλαιον ἐπὶ τῆς Ἐξοικονομήσεως Ἐνεργείας εἰς τὰς Θερμικὰς Διεργασίας, λόγω τῆς μεγάλης σημασίας τὴν ὁποίαν ἀπέκτησε τὸ θέμα τοῦτο κατὰ τὰ τελευταῖα ἔτη.

Διὰ τὴν καλυτέραν κατανόησιν τῶν διαφορῶν θερμικῶν διεργασιῶν προσετέθησαν ὠρισμένα νέα Διαγράμματα καὶ Πίνακες εἰς τὸ Παράρτημα. Ἐπίσης προσετέθησαν μερικά νέα προβλήματα καὶ διωρθώθησαν τὰ παροράματα τὰ ὁποῖα ἐπεσημάνθησαν εἰς τὴν Α' ἔκδοσιν. Ἡ βιβλιογραφία ἐνημερώθη ἐπὶ τῶν τελευταίων δημοσιευμάτων καὶ εἰς τὸ τέλος τοῦ βιβλίου προσετέθη Ἀλφαβητικὸν Εὔρετήριον διὰ τὴν ταχυτέραν ἐντόπισιν τῶν κυριωτέρων θεμάτων τοῦ βιβλίου.

Ἡ νέα ἔκδοσις τῆς "Τεχνικῆς Θερμικῶν Διεργασιῶν" ἐλπίζεται ὅτι θὰ ἀποβῆ χρήσιμος εἰς τοὺς σπουδαστὰς τοῦ Ε.Μ. Πολυτεχνείου καὶ τοὺς τεχνικοὺς τοὺς ἐργαζομένους εἰς διαφόρους βιομηχανικὰς ἐφαρμογὰς. Ὁ ὀρθὸς τεχνικοοικονομικὸς σχεδιασμὸς καὶ ἡ βελτιωμένη λειτουργία τῶν θερμικῶν ἐγκαταστάσεων τῆς βιομηχανίας θὰ συμβάλουν ἀσφαλῶς εἰς τὴν ἀνάπτυξιν τῆς Ἐθνικῆς Οἰκονομίας τῆς Χώρας μας.

Εὐχαριστοῦμεν τὸν βοηθὸν τῆς Ἐδρας κ. Π. Δημητριάδην διὰ τὴν ἐπεξεργασίαν τῶν προβλημάτων καὶ τὴν διόρθωσιν τοῦ δακτυλογραφημένου κειμένου.

Ἀθῆναι, Ἰανουάριος 1979

Γ.Δ.Σ.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ Α' ΕΚΔΟΣΕΩΣ

Αἱ Θερμικαί Διεργασίαι ἀποτελοῦν τό σημαντικώτερον μέρος τῶν Βασικῶν Φυσικῶν Διεργασιῶν (Unit Operations, Verfahrenstechnik) τῆς Χημικῆς Μηχανικῆς. Αὗται βασίζονται εἰς τήν Μετάδοσιν θερμότητος καί περιλαμβάνουν τήν Ἐναλλαγὴν θερμότητος, τήν Ἐξάτμισιν, τήν Ὑγρανσιν καί τήν Ξήρανσιν. Ἡ Ἀπόσταξις θεωρεῖται βασικῶς ὡς διεργασία μεταφορᾶς μάζης καί μελετᾶται εἰς τήν Τεχνικὴν Φυσικῶν Διαχωρισμῶν, ἡ δέ Κρυστάλλωσις ἐξετάζεται εἰς τήν Τεχνικὴν τῶν Σωματιδίων.

Τό παρὸν σύγγραμμα ἀποτείνεται κυρίως πρὸς τοὺς σπουδαστάς τῆς Ἀνωτάτης Σχολῆς Χημικῶν Μηχανικῶν τοῦ Ε.Μ. Πολυτεχνείου. Τό μάθημα τῆς Τεχνικῆς Φυσικῶν Διεργασιῶν εἰσήχθη εἰς τό Ε.Μ. Πολυτεχνεῖον τό ἔτος 1971-1972 καί ἀποτελεῖ διδάσχο- καὶ ἐπέκτασιν τοῦ μαθήματος τῆς Γενικῆς Τεχνολογίας τοῦ ὁμοτίμου Καθηγητοῦ κ. Α. Δεληγιάννη. Εἰς τοὺς τριτοετείς χημικούς μηχανικούς καί μηχανικούς μεταλλείων-μεταλλουργούς διδάσκονται ἡ Τεχνικὴ τῶν Ρευστῶν, αἱ Θερμικαί Διεργασίαι καί ἡ Τεχνικὴ τῶν Σωματιδίων. Εἰς τοὺς τεταρτοετείς καί πεμπτοετείς χημικούς μηχανικούς διδάσκονται λεπτομερέστερον οἱ Φυσικοὶ Διαχωρισμοί (Διεργασίαι Μεταφορᾶς Μάζης).

Ἡ Ἑλληνικὴ βιβλιογραφία ἐπὶ τῶν θερμικῶν διεργασιῶν εἶναι περιορισμένη. Τό βιβλίον "Ἐναλλαγὴ θερμότητος" τοῦ ὁμ. Καθηγητοῦ κ. Α. Δεληγιάννη ἐκάλυπτε κυρίως τοὺς ἐναλλάκτας θερμότητος. Ἡ Ἑλληνικὴ μετάφρασις (Τ.Ε.Ε.) τοῦ βιβλίου "Βασικαὶ Φυσικαὶ Διεργασίαι Χημικῆς Μηχανικῆς" τῶν Καθηγητῶν McCabe καί Smith ὑπῆρξε τό πρῶτον πλήρες σύγγραμμα εἰς τόν θεμελιώδη τοῦτο τομέα τῆς Χημικῆς Μηχανικῆς. Τό βιβλίον τοῦτο ἐχρησιμοποιήθη ὡς διδακτικόν βοήθημα εἰς τό Ε.Μ.Π. κατὰ τήν διετίαν 1971-1973. Αἱ σημαντικαὶ ὅμως ἐξελίξεις τῆς τελευταίας δεκαετίας εἰς τήν Ἐπιστήμην καί τήν Τεχνικὴν τῆς Χημικῆς Μηχανικῆς κατέστησαν ἀναγκαίαν τήν οὐσιώδη ἀναπροσαρμογὴν τῆς διδασκομένης ὕλης καί τῶν χρησιμοποιουμένων βιβλίων. Κατόπιν τούτου, καταβάλλεται προσπάθεια πρὸς συγ-

γραφὴν νέου βιβλίου Τεχνικῆς Φυσικῶν Διεργασιῶν μέ βάσιν τὰς συγχρόνους ἀνάγκας τῆς Ἑλληνικῆς Τεχνικῆς καί Βιομηχανίας, τὰ τελευταῖα δεδομένα τῆς Βιβλιογραφίας καί τὴν πείραν τοῦ συγγραφέως. Ἦδη ἐξεδόθη ἡ "Τεχνικὴ Φυσικῶν Διαχωρισμῶν" καί ἐλπίζεται ὅτι ὁ παρῶν τόμος θά καλύψῃ ἐπαρκῶς τὰς θερμικὰς διεργασίας.

Αἱ Θερμικαὶ Διεργασίαι βασίζονται εἰς τὴν Ἐφηρμοσμένην Θερμοδυναμικὴν καί τὰ Φαινόμενα Μεταφορᾶς, μαθήματα διδασκόμενα εἰς τὸ Ε.Μ.Π. ὑπὸ τοῦ Καθηγητοῦ κ.Ν. Κουμούτσου. Αἱ Φυσικαὶ Διεργασίαι γενικῶς εὐρίσκουν πολλάς ἐφαρμογὰς εἰς τὴν Τεχνικὴν Χημικῶν Διεργασιῶν, μάθημα διδασκόμενον εἰς τὸ Ε.Μ.Π. ὑπὸ τοῦ Καθηγητοῦ κ. Ι.Μαραγκόζη. Καθίσταται προφανῆς ἡ ἀνάγκη συντονισμοῦ καί συνεργασίας εἰς τοὺς συγγενεῖς τούτους τομεῖς τῆς Τεχνικῆς.

Εἰς τὴν Τεχνικὴν τῶν Θερμικῶν Διεργασιῶν δίδεται ἔμφασις εἰς τὸν ὑπολογισμόν, τὸν σχεδιασμόν καί τὴν λειτουργίαν τῶν βιομηχανικῶν συσκευῶν καί ἐγκαταστάσεων. Πρὸς καλυτέρα κατανόησιν καί ἐξοικείωσιν μέ τὰς πρακτικὰς ἐφαρμογὰς παρέχεται σημαντικὸς ἀριθμὸς τεχνικῶν δεδομένων. Ἐπίσης, εἰς τὸ τέλος ἐκάστου Κεφαλαίου δίδονται τυπικὰ λυμένα ὑπολογιστικὰ προβλήματα.

Αἱ Θερμικαὶ Διεργασίαι ἐφαρμόζονται εὐρύτατα εἰς τὰς βιομηχανίας ὡς μέρος συνθέτων διεργασιῶν, ὅπως οἱ Φυσικοὶ Διαχωρισμοί, αἱ Χημικαὶ καί Φυσιχοχημικαὶ Διεργασίαι καί αἱ Βιολογικαὶ Διεργασίαι. Αἱ ἐφαρμογαὶ αὗται περιλαμβάνουν τὰς χημικὰς βιομηχανίας, τὰς μεταλλουργικὰς βιομηχανίας, τὰς βιομηχανίας τροφίμων, τὰς γεωργικὰς βιομηχανίας, τὰς φαρμακευτικὰς βιομηχανίας καί τὴν τεχνολογίαν προστασίας τοῦ περιβάλλοντος.

Εἰς τὸν παρόντα τόμον χρησιμοποιοῦνται γενικῶς αἱ μονάδες τοῦ Διεθνοῦς Συστήματος (S.I.), ἡ χρῆσις τοῦ ὁποίου ἐπεκτείνεται τελευταίως καί εἰς τὴν Χημικὴν Μηχανικὴν. Ἐπειδὴ τὰ πλεῖστα δεδομένα τῆς Βιβλιογραφίας εὐρίσκονται εἰς τὸ Ἄγγλοσαξωνικόν Τεχνικόν Σύστημα καί τὸ Μετρικόν Τεχνικόν Σύστημα, καθίσταται ἀναγκαία ἡ μετατροπὴ τούτων εἰς μονάδας τοῦ S.I. διὰ τῶν Πινάκων τοῦ Παραρτήματος. Εἰς τὸ τέλος τοῦ

βιβλίου παρέχεται ἡ κυριωτέρα Βιβλιογραφία, ἡ σχετιζομένη μετὰ θέματα τοῦ κειμένου.

Ἐκφράζονται ἰδιαίτεροι εὐχαριστίαι εἰς τὴν ἐπιμελήτριαν τῆς Ἑδρας Καν Ε. Τσάμη καί τόν βοηθόν κ.Δ. Μαῖνον-Κουρῆν διὰ τὴν βοήθειάν των εἰς τὴν παρουσίασιν τῶν Προβλημάτων καί τῶν Διαγραμμάτων τοῦ παρόντος τόμου, καθὼς καί εἰς τὴν Δίδα Σ.Βογιατζῆ διὰ τὴν πρώτην δακτυλογράφησιν τοῦ χειρογράφου.

Ἀθῆναι, Ὀκτώβριος 1973

Γ.Δ.Σ.



## 1. ΜΕΤΑΔΟΣΙΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ

Ἡ κατανόησις τῶν στοιχείων Μεταδόσεως Θερμότητος θεωρεῖται ἀναγκαῖα διὰ τὴν μελέτην τῶν διαφόρων θερμικῶν διεργασιῶν καὶ ἐγκαταστάσεων, αἱ ὁποῖαι ἀναπτύσσονται εἰς τὰ ἐπόμενα Κεφάλαια. Εἰς τὸ παρὸν Κεφάλαιον παρέχονται αἱ ἀρχαὶ τῆς Μεταδόσεως Θερμότητος μέ ἰδιαιτέραν ἔμφασιν εἰς τὰς ἐφαρμογὰς τῆς Χημικῆς Μηχανικῆς.

Ἡ Μετάδοσις Θερμότητος εὐρίσκει πολλάς ἐφαρμογὰς εἰς τὴν Τεχνικὴν καὶ τὴν Ἐπιστήμην, αἱ ὁποῖαι ἐξετάζονται λεπτομερέστερον εἰς τοὺς εἰδικούς τομεῖς ἐφαρμογῆς. Ἡ θεωρία τῆς Μεταδόσεως Θερμότητος ἀναπτύσσεται εἰς τὰ φαινόμενα Μεταφορᾶς (Transport Phenomena), ὅπου ἐξετάζονται παραλλήλως ὁ μηχανισμὸς καὶ ἡ μαθηματικὴ ἀνάλυσις τῆς μεταφορᾶς ὀρμῆς, θερμότητος καὶ μάζης. Ἡ γνῶσις τῶν Φαινομένων Μεταφορᾶς διευκολύνει τὴν κατανόησιν ὄλων τῶν θερμικῶν διεργασιῶν καὶ συμβάλλει εἰς τὴν περαιτέρω ἀνάπτυξιν τῆς θεωρίας καὶ τῶν ἐφαρμογῶν.

Συμφώνως πρὸς τὸ δεύτερον θερμοδυναμικὸν ἀξίωμα ἡ θερμότης μεταδίδεται ἀπὸ ὑψηλοτέρας πρὸς χαμηλοτέραν θερμοκρασίαν. Πρακτικῶς, μεγάλην σημασίαν ἔχει ὁ ρυθμὸς μεταδόσεως θερμότητος, ὅστις ὑπεισέρχεται εἰς ὅλους τοὺς ὑπολογισμοὺς σχεδιασμοῦ καὶ λειτουργίας τῶν διαφόρων θερμικῶν ἐγκαταστάσεων. Δι' οἰκονομικοὺς λόγους, εἰς τὰς ἐγκαταστάσεις θερμάνσεως ἢ ψύξεως ὁ ρυθμὸς μεταδόσεως πρέπει νὰ εἶναι ὁ μέγιστος δυνατὸς διὰ τὰς δοθείσας συνθήκας. Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις ἐπιζητεῖται ἡ ἐλαχιστοποίησις τοῦ ρυθμοῦ μεταδόσεως θερμότητος (θερμικὴ μόνωσις).

Ἡ μετάδοσις θερμότητος λαμβάνει χώραν διὰ τριῶν βασι-

κων μηχανισμών, ήτοι δι'άγωγης, διά μεταφοράς ή έξ έπαφής και δι'άκτινοβολίας. Είς τήν πράξιν είναι δυνατή ή συνύπαρξις δύο ή και τριών μηχανισμών μεταδόσεως θερμότητας.

#### A. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΗ

Ἡ θερμική άγωγή (conduction) ορίζεται ώς ή μεταφορά θερμικής ένεργείας είς μοριακήν κλίμακα, άνεξαρτήτως τής μακροσκοπικής ροής τοϋ ύλικου. Αϋτη όφείλεται είς τήν κίνησιν τών μορίων τοϋ ύλικου, ή όποία είναι άνάλογος τής θερμοκρασίας αϋτου.

Ἡ θερμική άγωγή άποτελεϊ τόν κύριον μηχανισμόν μεταδόσεως θερμότητας είς τά στερεά, αλλά λαμβάνει χώραν και είς τά υγρά και τά άέρια, όπου όμως έπικρατούν οι άλλοι δύο μηχανισμοί (μεταφορά ή άκτινοβολία).

Αί πλείστοι θερμικά διεργασίαι τής βιομηχανίας είναι συνεχούς λειτουργίας και λαμβάνουν χώραν υπό συνθήκας μονίμου καταστάσεως (steady state). Είς τήν μόνιμον κατάστασιν αι θερμοκρασίαι είς τά διάφορα σημεία τοϋ συστήματος παραμένουν σταθεραί ώς πρός τόν χρόνον. Είς ώρισμένας περιπτώσεις ή άγωγή θερμότητας λαμβάνει χώραν υπό συνθήκας μη μόνιμου καταστάσεως (unsteady state) ή μεταβατικώς (transient conduction), ήτοι ή θερμοκρασία είς ώρισμένον σημείον τοϋ συστήματος μεταβάλλεται μετά τοϋ χρόνου.

##### α) Θερμική Ἄγωγή κατά Μόνιμον Κατάστασιν

Είς τάς πλείστας θερμικάς διεργασίας ή μετάδοσις θερμότητας δύναται νά θεωρηθῆ ώς μονοδιάστατος, ήτοι λαμβάνει χώραν κατά μίαν κατεύθυνσιν τοϋ χώρου, συμβολιζομένην διά τοϋ γράμματος  $x$ . Ὁ ρυθμός μεταδόσεως θερμότητας δι'άγωγής κατά μόνιμον κατάστασιν δίδεται υπό τής έξισώσεως Fourier:

$$\dot{q}/A = -k \frac{dT}{dx} \quad (1-1)$$

όπου  $\dot{q} = dq/dt$  ρυθμός μεταδόσεως θερμότητας κατά τήν κατεύθυνσιν  $x, W$ .



$A$  = έπιφάνεια μεταδόσεως θερμότητας, κάθετος προς τήν κατεύθυνσιν θερμικής ροής,  $m^2$ .

$dT/dx$  = βαθμής θερμοκρασίας (temperature gradient)  $K/m$

$k$  = θερμική άγωγιμότης (thermal conductivity) ή συντελεστής θερμικής άγωγιμότητος του ύλικου,  $W/mK$ .

Η θερμική άγωγιμότης άποτελεϊ χαρακτηριστικήν ιδιότητα μεταφορᾶς έκάστου ύλικου και προσδιορίζεται συνήθως πειραματικῶς, ὡς έξηγεϊται κατωτέρω (1Aγ).

Είς τήν έξίσωσιν (1-1) τό δεύτερον μέλος έχει άρνητικόν σημείον διότι ή βαθμής θερμοκρασίας ( $dT/dx$ ) είναι άρνητική ήτοι ή θερμοκρασία έλαττοῦται κατά τήν κατεύθυνσιν μεταδόσεως τής θερμότητος. Η έξίσωσις αὔτη ὀλοκληρουμένη μεταξύ τῶν σημείων  $x_1$  και  $x_2$  και τῶν άντιστοιχῶν θερμοκρασιῶν  $T_1$  και  $T_2$  δίδει:

$$\dot{q}/A = k \frac{\Delta T}{x} \quad (1-2)$$

ὅπου  $\Delta T = T_1 - T_2 > 0$   $x = x_2 - x_1 > 0$

Η θερμική άγωγιμότης ( $k$ ) λαμβάνεται ὡς σταθερά και άντιστοιχεϊ είς τήν μέσην θερμοκρασίαν  $(T_1 + T_2)/2$ .

Η έξίσωσις (1-2) γράφεται και ὡς:

$$\dot{q} = \Delta T/R \quad (1-3)$$

ὅπου  $R = x/kA$  θερμική άντίστασις του ύλικου,  $K/W$ .

Η έξίσωσις (1-3) είναι παρομοία προς τας έξισώσεις μεταδόσεως άλλων ποσοτήτων, ὡς ήλεκτρισμοῦ, μάζης ή ὀρμής. Ένταῦθα ὡς ὀρῶσα δύναμις (driving force) ή δυναμικόν ένεργεϊ ή διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) μεταξύ δύο σημείων του ύλικου ή του συστήματος. Η άναλογία ροής θερμότητος και ρεύματος δι' άγωγής καθίσταται περισσότερο έμφανής είς τήν μετάδοσιν θερμότητος, διά περισσοτέρων του ένός στρωμάτων (Σχ.1-1)

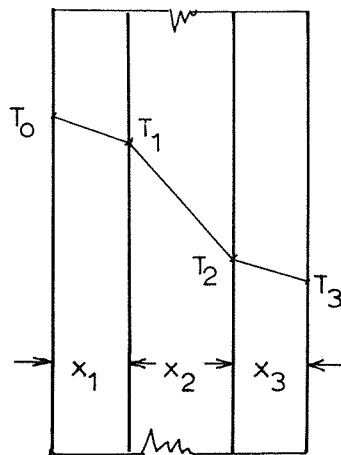
Τό Σχ. (1-1) παριστᾶ σύνθετον τοίχωμα άποτελούμενον άπό τρία παράλληλα έπίπεδα στρώματα πάχους  $x_1, x_2$  και  $x_3$  και θερμικῶν άγωγιμοτήτων  $k_1, k_2$  και  $k_3$  άντιστοιχῶς. Η έπιφάνεια μεταδόσεως θερμότητος ( $A$ ) δύναται νά ληφθῆ ὡς σταθερά και ὁ ρυθμός μεταδόσεως θερμότητος κατά μόνιμον κατάστασιν

δίδεται υπό τῶν ἐξισώσεων διά τὰς ἀντιστάσεις εἰς σειράν:

$$\dot{q} = \Delta T_1/R_1 = \Delta T_2/R_2 = \Delta T_3/R_3 = \Sigma \Delta T_j / \Sigma R_j \quad (1-4)$$

ὅπου  $\Delta T_j = T_{j-1} - T_j$ ,  $R_j = x_j / k_j A_j$

Ἐκ τῶν ἐξισώσεων (1-4) καθίσταται εὐχερῆς ὁ ὑπολογισμός τῶν ἐνδιαμέσων θερμοκρασιῶν (π.χ.  $T_1, T_2$ ) ἀπό τὰς ἀκραίας θερμοκρασίας (π.χ.  $T_0, T_3$ ) καί τὰς θερμικὰς ἀντιστάσεις τῶν στρωμάτων.

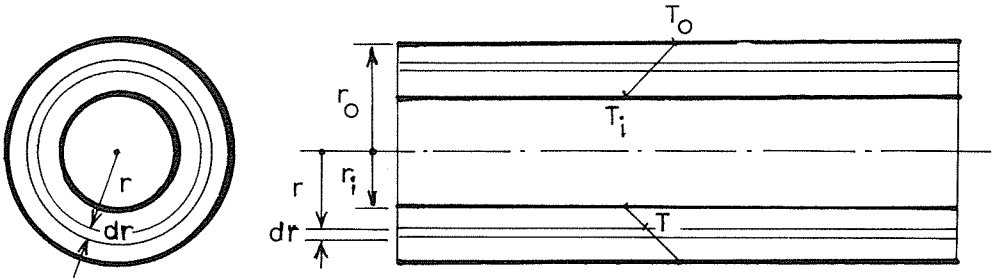


Σχ. 1-1. Ἀγωγή θερμότητος διά συνθέτου τοιχώματος

Ἰδιαιτέραν σημασίαν διά τήν Χημικήν Μηχανικήν ἔχει ἡ ἀγωγή θερμότητος διά κυλινδρικών τοιχωμάτων, ἡ ὁποία ἐκφράζεται διά τροποποίησιν τῆς βασικῆς ἐξισώσεως Fourier. Τό Σχ. (1-2) παριστᾷ κοῖλον κύλινδρον (π.χ. σωλήνα μέ παχύ τοίχωμα) ἐσωτερικῆς ἀκτίνοσ  $r_i$ , ἐξωτερικῆς ἀκτίνοσ  $r_o$  καί μήκοσ  $L$ .

Τό ἐσωτερικόν τοίχωμα εὐρίσκειται εἰς ὁμοιόμορφον θερμοκρασίαν  $T_i$  τό δέ ἐξωτερικόν τοίχωμα εἰς χαμηλοτέραν θερμοκρασίαν  $T_o$ . Συνεπῶσ θά ἐπέλθῃ μετάδοσις θερμότητος ἐκ τοῦ ἐσωτερικοῦ πρόσ τό ἐξωτερικόν τοῦ σωλήνοσ.

Διά λεπτόν στρῶμα τοιχώματοσ ( $dr$ ) δύναται νά ἐφαρμοσθῆ ἡ ἐξίσωσις (1-1) τῶν παραλλήλων ἐπιπέδων,



Σχ. 1-2. Άγωγη θερμότητας εις κοίλον κύλινδρον

ήτοι 
$$\dot{q} = -2\pi r L k \frac{dT}{dr} \quad (1-5)$$

Ἡ ἐξίσωσις (1-5) ὀλοκληρουμένη μεταξύ  $r_i$  καί  $r_o$  καί  $T_i$  καί  $T_o$  δίδει:

$$\dot{q}/L = \frac{2\pi k (T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)} \quad (1-6)$$

Ἡ ἐξίσωσις αὕτη δίδει τὸν ρυθμὸν μεταδόσεως θερμότητος δι' ἀγωγῆς ἀνά μονάδα μήκους τοῦ κυλίνδρου ἢ σωλῆνος (W/m).

Διὰ τὴν ἀγωγήν θερμότητος δι' ἐπαλλήλων (εἰς σειρὰν) κυλινδρικών τοιχωμάτων, ἡ ἐξίσωσις (1-6) γράφεται ὡς:

$$\begin{aligned} \dot{q}/L &= \frac{2\pi (T_i - T_1)}{\ln(r_1/r_i)/k_1} = \frac{2\pi (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)/k_2} = \dots \\ &= \frac{2\pi (T_i - T_o)}{\sum \ln(r_j/r_{j-1})/k_j} \end{aligned} \quad (1-7)$$

Ἡ ἐξίσωσις (1-6) δύναται νὰ γραφῆ μετὰ βᾶσιν τὴν λογαριθμικήν μέσην ἐπιφάνειαν ( $A_L$ ), ὡς:

$$\dot{q}/A_L = k \frac{\Delta T}{x} \quad (1-8)$$

ὅπου 
$$A_L = \frac{A_o - A_i}{\ln(A_o/A_i)} \quad \Delta T = T_i - T_o$$

$x=r_0-r_i$  = πάχος του τοιχώματος.

Σημειωτέον ότι  $A_L=2\pi r_L L$

όπου 
$$r_L = \frac{r_0 - r_i}{\ln(r_0/r_i)}$$

Ἡ λογαριθμική μέση ἐπιφάνεια ( $A_L$ ) ἢ ἡ λογαριθμική μέση ἀκτίς ( $r_L$ ) χρησιμοποιοῦνται εἰς περιπτώσεις παχέων κυλινδρικών τοιχωμάτων (π.χ. μονώσεις σωλήνων).

Ἐάν πρόκειται περί λεπτοῦ τοιχώματος (π.χ. συνήθεις μεταλλικοί σωλήνες) λαμβάνονται μέ καλήν προσέγγισιν αἱ μέσαι ἀριθμητικά τιμαί  $\bar{r} = (r_0+r_i)/2$  ἢ  $\bar{A}=(A_0+A_i)/2$ . Διὰ  $r_0/r_i = 2$  ὑφίσταται μία διαφορά 4% μεταξὺ  $r_L$  καί  $\bar{r}$ , διὰ δέ  $r_0/r_i = 1,4$  ἡ διαφορά αὕτη καθίσταται 1% (βλέπε Κεφ. 2α).

Ἡ ἀγωγή θερμότητος εἰς κέλυφος κοίλης σφαίρας ἐσωτερικῆς ἀκτίνοσ  $r_1$  καί ἐξωτερικῆς  $r_2$  δίδεται ὑπὸ τῆς ἐξισώσεως

$$\dot{q} = 4\pi k \frac{\Delta T}{(1/r_1 - 1/r_2)} \quad (1-9)$$

Ἡ ἐξίσωσις (1-9) γράφεται καί ὡς:

$$q/A_G = k \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (1-10)$$

όπου  $A_G =$  γεωμετρική μέση ἐπιφάνεια  $= (A_1 A_2)^{1/2}$

$$\Delta T = T_1 - T_2, \quad \Delta r = r_2 - r_1$$

Διὰ τὴν περίπτωσιν σφαίρας ἡ χρῆσις τῆς ἀριθμητικῆς ἀντὶ τῆς γεωμετρικῆς μέσης ἐπιφανείας συνεπάγεται μεγαλύτερον σφάλμα ἐν συγκρίσει μέ τόν κύλινδρον. Π.χ. διὰ  $A_2/A_1=2$  ἢ  $\bar{A}$  εἶναι μεγαλύτερα τῆς  $A_G$  κατὰ 25%.

Ἡ ἀγωγή θερμότητος δι' ἐπαλλήλων κελυφῶν σφαίρας δίδεται ὑπὸ τῆς ἐξισώσεως:

$$\dot{q} = \frac{\Sigma \Delta T}{\Sigma (\Delta r / k A_G)} \quad (1-11)$$

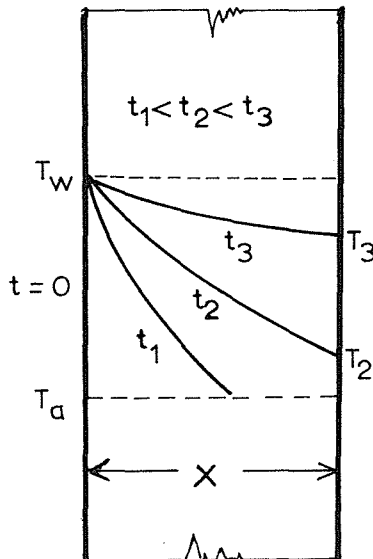
Εἰς τὰ σύνθετα τοιχώματα ὑφίστανται ἐνίοτε ἀτέλειαι ἐπαφῆς μεταξὺ τῶν διαφόρων στρωμάτων. Εἰς ὠρισμένας περιπτώ-

σεις, εις τὰς ἐπιφανείας ἐπαφῆς ὑφίστανται διάκενα ἀέρος τὰ ὅποια ἐπιδροῦν σημαντικῶς ἐπὶ τοῦ ρυθμοῦ θερμικῆς ἀγωγῆς τοῦ συστήματος. Αἱ ἀτέλειαι ἐπαφῆς ἐκφράζονται εἴτε ὡς ἰσοδύναμα πάχη στρώματος ἀέρος ἢ ὡς συντελεσταὶ ἐπαφῆς.

Εἰς τὰ λεπτά στρώματα ἀέρος ἡ μετάδοσις θερμότητος γίνεται κυρίως δι' ἀγωγῆς καὶ ἀκτινοβολίας, ἐλάχιστα δέ διὰ μεταφοῶς. Ἐπειδὴ ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότης τοῦ ἀέρος εἶναι λίαν χαμηλὴ, ἡ ὑπαρξίς λεπτῶν στρωμάτων ἀέρος μειώνει σημαντικῶς τοὺς ρυθμοὺς μεταδόσεως θερμότητος.

### β) Θερμικὴ Ἀγωγή κατὰ μὴ Μόνιμον Κατάστασιν

Κατὰ τὴν μετάδοσιν θερμότητος δι' ἀγωγῆς εἰς μὴ μόνιμον κατάστασιν ἡ θερμοκρασία εἰς τὰ διάφορα σημεῖα τοῦ ὑλικοῦ μεταβάλλεται μετὰ τοῦ χρόνου. Τὸ σχ. (1-3) παριστᾷ τὴν κατανομὴν τῶν θερμοκρασιῶν εἰς στερεόν σῶμα σχήματος πλακός, πάχους ( $x$ ), εἰς διαφόρους χρόνους.



Σχ. 1-3. Ἀγωγή θερμότητος εἰς μὴ μόνιμον κατάστασιν

Έστω ότι τό στερεόν εύρίσκεται αρχικώς είς όμοιόμορφον θερμοκρασίαν  $T_a$ . Είς χρόνον  $t=0$  ή μία πλευρά τής πλακός θερμαίνεται στιγμιαίως είς τήν θερμοκρασίαν  $T_w$  ή όποία θεωρείται ότι παραμένει σταθερά, π.χ. δι' έπαφής μέ ρευστόν όμοιόμορφου σταθεράς θερμοκρασίας.

Ός δεικνύεται είς τό Σχ. (1-3) ή κατανομή τών θερμοκρασιών έξαρτάται από τόν χρόνον έπαφής. Η θερμοκρασία τής έτέρας πλευράς τής πλακός μετά χρόνον  $t_1, t_2$  καί  $t_3$  είναι  $T_a, T_2$  καί  $T_3$  άντιστοιχως. Υπό τάς συνθήκας ταύτας ίσχύει ή έξίσωσις Fourier διά τήν μή μόνιμον κατάστασιν, ή όποία, προκειμένου περί μονοδιαστάτου άγωγής, άπλοποιείται είς τήν μορφήν:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1-12)$$

όπου  $\alpha = k/\rho C_p =$  θερμική διαχυτότης,  $m^2/s$

$k =$  θερμική άγωγιμότης,  $W/mK$

$\rho =$  πυκνότης,  $kg/m^3$

$C_p =$  είδική θερμότης  $J/kgK$

Είς τήν έξίσωσιν (1-12) ή θερμική διαχυτότης ( $\alpha$ ) λαμβάνεται ως σταθερά. Η τρισδιάστατος θερμική άγωγή έκφράζεται δι' άναλόγου έξισώσεως ή όποία μελετάται είς τά φαινόμενα μεταφοράς.

Η μερική διαφορική έξίσωσις (1-12) έχει λυθή άναλυτικώς διά σταθεράν θερμικήν διαχυτότητα ( $\alpha$ ) καί δι' ώρισμένες όριακάς συνθήκας. Είς τήν Χημικήν Μηχανικήν χρησιμοποιείται εύρύτητα ή έννοια τής έπιπέδου πλακός ώρισμένου πάχους καί άπείρου μήκους (slab). Τό σχήμα τοϋτο προσεγγίζεται είς τήν πρᾶξιν από πλάκας μικροϋ πάχους καί σχετικώς μεγάλου μήκους καί πλάτους.

Διά τήν θέρμανσιν ή ψύξιν πλακός πάχους ( $2x_0$ ) έξ άμφοτέρων τών πλευρών, ή λύσις τής έξισώσεως (1-12) δίδεται υπό μορφήν σειράς ως άκολούθως:

$$Y = \frac{8}{\pi^2} \left[ \exp\left(-\frac{\pi^2 X}{4}\right) + \frac{1}{9} \exp\left(-\frac{9\pi^2 X}{4}\right) + \frac{1}{25} \exp\left(-\frac{25\pi^2 X}{4}\right) + \dots \right] \quad (1-13)$$

όπου:  $\bar{Y} = \frac{\bar{T} - T_w}{T_a - T_w}$  = μή συμπληρωθεῖσα μεταβολή τῆς θερμοκρασίας (unaccomplished temperature change).

$\bar{T}$  = μέση θερμοκρασία τῆς πλακός μετά χρόνον  $t$

$T_w$  = σταθερά θερμοκρασία τῆς ἐπιφανείας τῆς πλακός.

$T_a$  = ἀρχική ὁμοιόμορφος θερμοκρασία τῆς πλακός.

$X = \alpha t / x_0^2$  = ἀριθμός Fourier

$x_0$  = τό ἥμισυ τοῦ πάχους τῆς πλακός

$\alpha = k / \rho C_p$

Διά σχετικῶς μεγάλους χρόνους, ἦτοι διά τιμὰς τοῦ  $X$  μεγαλύτερας τοῦ 0,1, ἡ ἐξίσωσις (1-13) ἀπλοποιεῖται διά παραλείψεως ὄλων τῶν ὄρων τῆς σειρᾶς ἐκτός τοῦ πρώτου, ὁπότε λαμβάνεται:

$$t = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{2x_0}{\pi} \right)^2 \ln \frac{8(T_a - T_w)}{\pi^2(\bar{T} - T_w)} \quad (1-14)$$

Διά τῆς ἐξίσωσεως (1-14) ὑπολογίζεται ὁ χρόνος ( $t$ ) ὁ ἀπαιτούμενος διά τήν ἐπίτευξιν μιᾶς μέσης θερμοκρασίας ( $\bar{T}$ ) εἰς τό θεωρούμενον σῶμα.

Λύσεις ἀνάλογοι πρός τήν ἐξίσωσιν (1-13) ὑπάρχουν καί δι' ἄλλα συνήθη γεωμετρικά σχήματα. Ἡ ἀπλοποιημένη λύσις διά τόν κύλινδρον εἶναι:

$$t = \frac{r_0^2}{5,78\alpha} \ln \frac{0,692(T_a - T_w)}{\bar{T} - T_w} \quad (1-15)$$

Διά τήν σφαίραν:

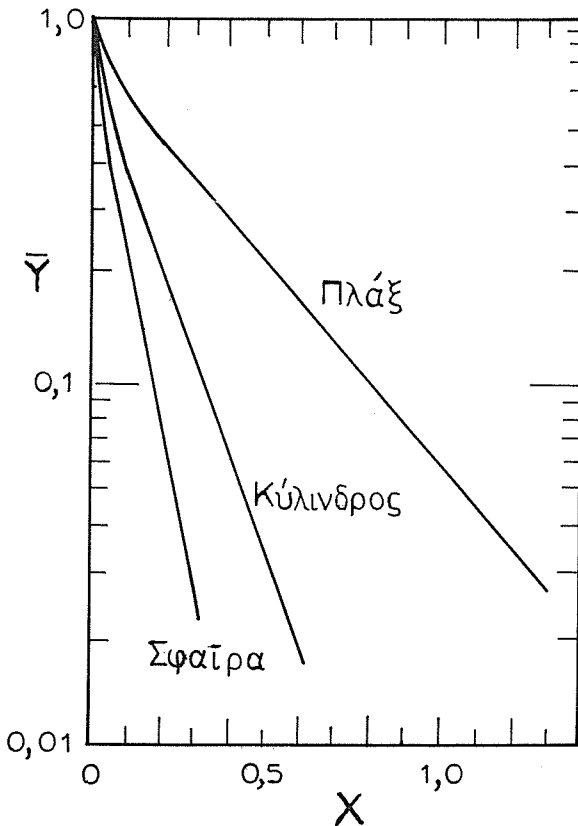
$$t = \frac{r_0^2}{9,87\alpha} \ln \frac{0,608(T_a - T_w)}{\bar{T} - T_w} \quad (1-16)$$

όπου  $r_0$  = ἀκτίς τοῦ κυλίνδρου ἢ τῆς σφαίρας.

Ἐντὶ τῶν ἀνωτέρω ἀναλυτικῶν λύσεων δύνανται νά χρησιμοποιηθοῦν τὰ Διαγράμματα Gurney-Lurie τῆς Βιβλιογραφίας (π.χ. Φαινόμενα Μεταφορᾶς, Mc Adams). Τὰ διαγράμματα ταῦτα δίδουν γραφικῶς τὰς λύσεις τῆς μονοδιαστάτου ἐξίσωσεως θερμικῆς ἀγωγῆς (1-12) διά τὰ κύρια σχήματα τῆς πλακός, τοῦ κυλίνδρου καί τῆς σφαίρας. Διά τούτων ὑπολογίζεται ἡ θερμοκρασία ( $T$ ) εἰς δοθέν σημεῖον ( $x$ ) τοῦ σώματος μετά δοθέντα χρόνον ( $t$ ). Ὡς συντεταγμέναι χρησιμοποιοῦνται οἱ ἀδιάστατοι ἀριθμοί  $Y$

καί  $X$  τῆς ἐξισώσεως (1-13) μέ τὰς παραμέτρους θέσεως ( $x/x_0$  ἢ  $r/r_0$ ) καί θερμικῆς ἀντιστάσεως ( $k/x_0h$ ). Ὁ ἀδιάστατος ἀριθμός ( $k/x_0h$ ) παριστᾷ τόν λόγον τῆς θερμικῆς ἀντίστασεως τῆς ἐπιφανείας τοῦ σώματος ( $1/h$ ) πρὸς τήν θερμικὴν ἀντίστασιν τοῦ ἐσωτερικοῦ τοῦ στερεοῦ ( $x_0/k$ ). Σημειωτέον ὅτι ὁ ἀντίστροφος τοῦ ἀνωτέρω ἀριθμοῦ καλεῖται ἀριθμός Biot, ἤτοι  $N_B = hx_0/k$ , ὅπου  $h$  = συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητος (βλέπε κατωτέρω).

Διὰ τὴν εὕρεσιν τῆς μέσης θερμοκρασίας πλακός, κυλίνδρου ἢ σφαίρας χρησιμοποιεῖται τὸ διάγραμμα τοῦ Σχ. (1-4). Εἰς τὸ διάγραμμα τοῦτο ἡ θερμικὴ ἀντίστασις τῆς ἐπιφανείας θεωρεῖται ἀμελητέα, ἤτοι ἡ θερμοκρασία τῆς ἐπιφανείας

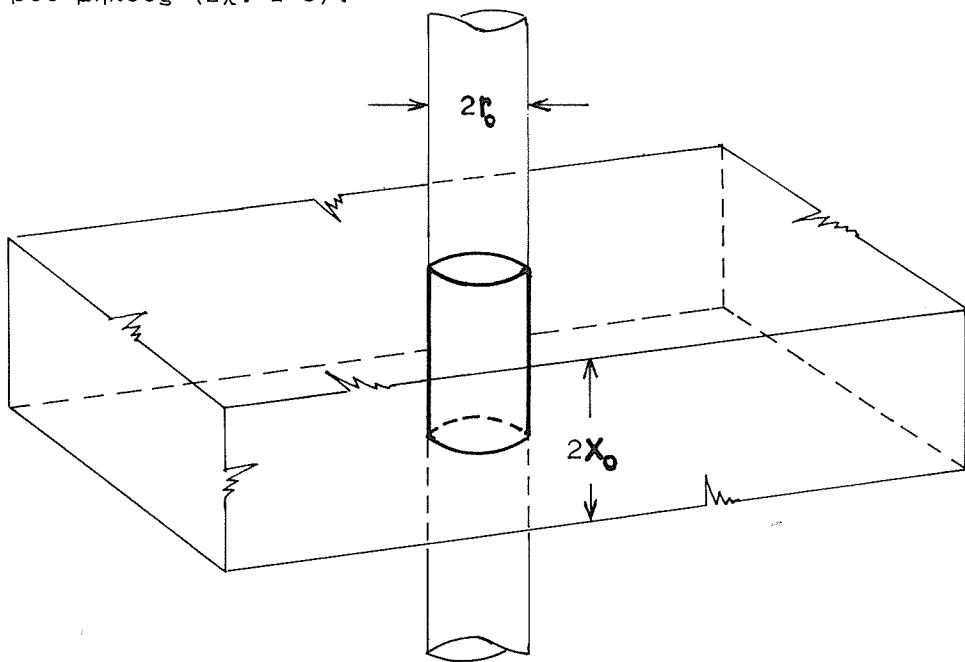


Σχ. 1-4. Μέση θερμοκρασία σωμάτων κατὰ μὴ μόνιμον κατάστασιν.  
'Αμελητέα θερμικὴ ἀντίστασις ἐπιφανείας



του σώματος είναι η αυτή με την θερμοκρασίαν του περιβάλλοντος ρευστού. Τά Σχήματα (Σ-1), (Σ-2) και (Σ-3) του Παραρτήματος δεικνύουν αναλυτικά διαγράμματα Gurney-Lurie διά στερεά σχήματος πλακός, κυλίνδρου και σφαίρας αντίστοιχως.

Η κατανομή των θερμοκρασιών ή η μέση θερμοκρασία εις στερεά ώρισμένων πρακτικῶν σχημάτων δύναται νά υπολογισθῆ διά τῆς μεθόδου Newman: Τό στερεόν θεωρεῖται ὅτι σχηματίζεται διά τομῆς δύο ἢ τριῶν στερεῶν βασικοῦ σχήματος (πλακός κυλίνδρου ἢ σφαίρας). Οὕτω, κύλινδρος διαμέτρου ( $2r_0$ ) καί μήκους ( $2x_0$ ) θεωρεῖται ὅτι σχηματίζεται διά καθέτου τομῆς πλακός πάχους ( $2x_0$ ) καί κυλίνδρου διαμέτρου ( $2r_0$ ) καί ἀπείρου μήκους (Σχ. 1-5).



Σχ. 1-5. Σχηματισμός κυλίνδρου καθωρισμένων διαστάσεων (μέθοδος Newman)

Η μέση θερμοκρασία τοῦ ὀρισμένου κυλίνδρου τοῦ Σχ. (1-5) μετά χρόνον ( $t$ ) εὐρίσκεται ὡς ἀκολουθῶς: Διά τόν δοθέντα χρόνον υπολογίζονται οἱ ἀριθμοί Fourier ( $X$ ) διά τήν πλάκα καί τόν κύλινδρον καί ἐκ τοῦ διαγράμματος (1-4) εὐρίσκονται αἱ ἀντίστοιχοι τιμαί τῶν  $\bar{Y}_{x_0}$  καί  $\bar{Y}_{r_0}$ . Ἀκολουθῶς υπολογίζεται ἡ μέση τιμή τοῦ ὀρισμένου κυλίνδρου  $\bar{Y} = \bar{Y}_{x_0} \bar{Y}_{r_0}$  ἐκ τῆς ὁποίας

εὐρίσκεται ἡ μέση θερμοκρασία ( $\bar{T}$ ).

Κατ'ἀνάλογον τρόπον στερεόν σχήματος πλίνθου (ὀρθογώνιου παραλληλεπίπεδου) θεωρεῖται ὡς τομὴ τριῶν καθέτων πλακῶν, πάχους  $2x_0$ ,  $2y_0$  καὶ  $2z_0$  ἀντιστοίχως καὶ τὸ  $\bar{Y}$  ὑπολογίζεται ὡστὸ γινόμενον  $\bar{Y} = \bar{Y}_{x_0} \bar{Y}_{y_0} \bar{Y}_{z_0}$ .

Ἡ ἐξίσωσις θερμοκῆς ἀγωγῆς (1-12) δέν δύναται νά λυθῆ ἀναλυτικῶς ἐάν ἡ θερμοκῆ διαχυτότης ( $\alpha$ ) μεταβάλλεται, μετὰ τοῦ χρόνου ἢ τῆς ἀποστάσεως (ἀνομοιογενῆ σώματα). Εἰς τήν περίπτωσιν ταύτην χρησιμοποιοῦνται ἀριθμητικά ἢ γραφικά μέθοδοι ἐπιλύσεως, ὡς ἡ μέθοδος χαλαρώσεως καὶ ἡ μέθοδος Schmidt. Αἱ ἀριθμητικά λύσεις διευκολύνονται μέ τήν χρῆσιν τῶν ἠλεκτρονικῶν ὑπολογιστῶν.

Ἡ μετάδοσις τῆς θερμότητος δι'ἀγωγῆς εἰς μὴ μόνιμον κατάσταση ἀναλύεται καὶ διὰ τῆς θεωρίας διεισόδου (penetration theory) κατὰ τρόπον ἀνάλογον πρὸς τήν μεταφοράν μάζης (βλέπε Τεχνικὴ Φυσικῶν Διαχωρισμῶν). Ὡς χαρακτηριστικὴ περίπτωσις τῆς θεωρίας τῆς διεισόδου ἐξετάζεται ἡ ἀγωγή θερμότητος εἰς ἡμιᾶπειρον στερεόν (semi-infinite solid), ἥτοι στερεόν τοῦ ὁποίου ἡ μία διάστασις εἶναι πολὺ μεγάλη.

Τὸ ἡμιᾶπειρον στερεόν εὐρίσκεται ἀρχικῶς εἰς ὁμοίομορφον θερμοκρασίαν ( $T_a$ ) καὶ ἡ ἐπιφάνεια αὐτοῦ θερμαίνεται (ἢ ψύχεται) στιγμιαίως εἰς ( $T_w$ ). Μετὰ βραχὺ χρόνον ( $t$ ) ἡ θερμότης ἔχει διεισδύση μικράν ἀπόστασιν ( $x$ ) πέραν τῆς ὁποίας ἡ θερμοκρασία ἐξακολουθεῖ νά παραμένῃ σταθερά ( $T_a$ ). Ὑπὸ τὰς συνθήκας ταύτας ὁλοκληρώσις τῆς ἐξισώσεως (1-12) ἐντὸς τῶν καταλλήλων ὀριακῶν τιμῶν δίδει:

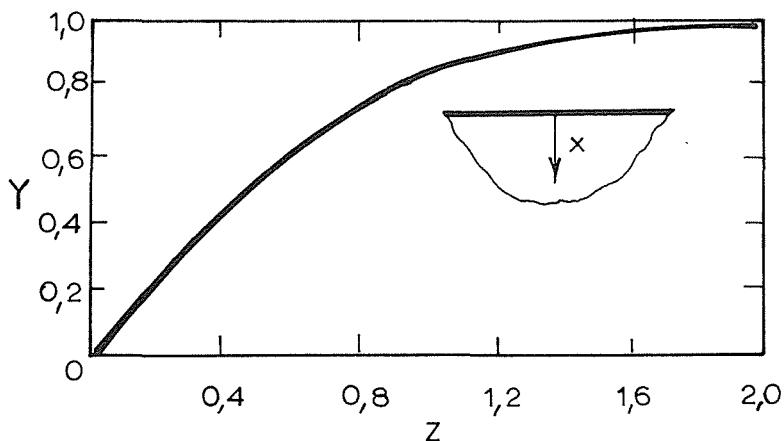
$$\bar{Y} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-z^2) dz \quad (1-17)$$

$$\text{ὅπου } Y = \frac{T - T_w}{T_a - T_w}$$

$T$  = θερμοκρασία εἰς ἀπόστασιν ( $x$ ) μετὰ χρόνον ( $t$ )

$$z = x / 2\sqrt{\alpha t}.$$

Ἡ ἐξίσωσις (1-17) ἰσχύει δι'ἀμελητέαν θερμοκῆν ἀντίστασιν τῆς ἐπιφανείας καὶ παρίσταται γραφικῶς εἰς τὸ Σχ.(1-6).



Σχ. 1-6. Μετάδοση θερμότητας εις ήμισυσφαιρικό στερεόν

Τό δεύτερον μέλος τῆς ἐξισώσεως (1-17) γράφεται καί ὡς  $\text{erf}(Z)$  καί ὀνομάζεται ὀλοκλήρωμα πιθανότητος ἢ συνάρτησις σφάλματος (error function). Τό ὀλοκλήρωμα πιθανότητος δίδεται εἰς πίνακα τῆς Βιβλιογραφίας ὡς συνάρτησις τοῦ ( $Z$ ).

Ἡ ἀπόστασις διεισοδύσεως ( $x_p$ ) ὀρίζεται ὡς ἡ ἀπόστασις ἀπό τήν ἐπιφάνειαν εἰς τήν ὁποίαν ἐπέρχεται μεταβολή τῆς θερμοκρασίας κατά 1%, ἤτοι διά  $Y = 0,99$ . Εἰς τήν περίπτωσιν ταύτην ὑφίσταται ἡ σχέση  $Z = 1,82$  ἤτοι  $x_p = 3,64\sqrt{at}$ .

### γ) Θερμική Ἀγωγιμότης τῶν Ὑλικῶν

Εἰς τοὺς ὑπολογισμούς τῶν θερμικῶν Διεργασιῶν εἶναι ἀναγκαῖα ἡ γνῶσις τῆς θερμικῆς ἀγωγιμότητος τῶν συστατικῶν τοῦ συστήματος, ὡς τῶν ἀντιδρώντων σωμάτων, τῶν προϊόντων τῆς διεργασίας, τῶν ὑλικῶν κατασκευῆς τῶν ἐγκαταστάσεων καί τῶν θερμαντικῶν ἢ ψυκτικῶν μέσων.

Ἡ θερμική ἀγωγιμότης προσδιορίζεται κατὰ κανόνα πειραματικῶς καί ὑφίστανται ἐκτενεῖς πίνακες διά τὰ διάφορα ὑλικά εἰς τήν Βιβλιογραφίαν.

Διά τὰ ἀέρια εἶναι δυνατή ἡ πρόβλεψις τῆς θερμικῆς ἀγωγιμότητος ( $k$ ) εἰς χαμηλὰς πιέσεις ἀπό ἐξισώσεις βασίζο-

μένας είς τήν κινητικήν θεωρίαν τῶν ἀερίων, ὡς τοῦτο συμβαίνει καί μέ τό ἰξῶδες καί τόν συντελεστήν διαχύσεως. Διά μονοατομικά ἀέρια είς χαμηλάς πιέσεις ἐφαρμόζεται ἡ ἐξίσωσις Chapman-Eskog:

$$k = 8,31 \cdot 10^{-2} \frac{(T/M)^{1/2}}{\sigma^2 \Omega_k} \quad (1-18)$$

ὅπου  $k$  = θερμική ἀγωγιμότης, W/mK

$T$  = ἀπόλυτος θερμοκρασία, K

$M$  = μοριακόν βάρος

$\Omega_k$  = ὀλοκλήρωμα συγκρούσεως (collision integral) διά θερμικήν ἀγωγήν

$\sigma$  = διάμετρος συγκρούσεως, Å

Αἱ μοριακαί ιδιότητες  $\sigma$  καί  $\Omega_k$  εἶναι ἀνάλογοι τῶν ἀντιστοίχων τιμῶν τοῦ ἰξῶδους (Τεχνική Ρευστῶν) καί τοῦ συντελεστοῦ διαχύσεως (Τεχνική Φυσικῶν Διαχωρισμῶν) καί παρέχονται εἰς πίνακα τῆς Βιβλιογραφίας.

Διά μονοατομικά ἀέρια ἡ θερμική ἀγωγιμότης ( $k$ ) συνδέεται μέ τό ἰξῶδες ( $\eta$ ) διά τῆς ἐξισώσεως Maxwell:

$$k = \frac{5}{2} C_v \eta \quad (1-19)$$

ὅπου  $k$  = θερμική ἀγωγιμότης, W/m K

$C_v$  = εἰδική θερμότης ὑπό σταθερόν ὄγκον, J/kg K

$\eta$  = ἰξῶδες, kg/ms

Διά πολυατομικά ἀέρια ἐφαρμόζεται ἡ ἐξίσωσις Eucken:

$$k = \left( C_p + \frac{5R}{4M} \right) \eta \quad (1-20)$$

ὅπου  $C_p$  = εἰδική θερμότης ὑπό σταθεράν πίεσιν, J/kg K

$R$  = σταθερά ἀερίων, 8,314 kJ/kmol K

Ἡ θερμική ἀγωγιμότης μίγματος ἀερίων ( $k_m$ ) ὑπολογίζεται προσεγγιστικῶς διά τῆς ἐξισώσεως:

$$k_m = \frac{\sum Y_i k_i (M_i)^{1/3}}{\sum k_i (M_i)^{1/3}} \quad (1-21)$$

όπου  $y_i, k_i, M_i =$  μοριακόν κλάσμα, θερμική αγωγιμότης καί μοριακόν βάρος τοῦ συστατικοῦ ( $i$ ) ἀντιστοιχῶς.

Ἡ ἐπίδρασις τῆς θερμοκρασίας καί τῆς πιέσεως ἐπί τῆς θερμικῆς αγωγιμότητος τῶν ἀερίων παρέχεται εἰς διαγράμματα ἀνηγμένων ἰδιοτήτων (Ἐφηρ. θερμοδυναμική). Τά διαγράμματα ταῦτα δίδουν τοὺς λόγους  $k/k_c$  ὡς συνάρτησιν τῶν λόγων  $T/T_c$  καί  $P/P_c$ , ὅπου  $T_c, P_c, k_c$  αἱ ἀντίστοιχοι κρίσιμοι ἰδιότητες τοῦ ἀερίου.

Ἡ θερμική αγωγιμότης τῶν ἀερίων αὐξάνει σημαντικῶς μετὰ τῆς θερμοκρασίας ὡς τοῦτο προκύπτει ἐκ τῆς κινητικῆς θεωρίας. Ἡ ἐπίδρασις τῆς πιέσεως ἐπί τοῦ ( $k$ ) τῶν ἀερίων εἶναι σχετικῶς μικρά, καθισταμένη σημαντική εἰς τὴν περιοχὴν τοῦ ὑψηλοῦ κενοῦ.

Ἡ θερμική αγωγιμότης τῶν ὑγρῶν καί τῶν ἀμόρφων στερεῶν αὐξάνει μετὰ τῆς πιέσεως. Εἰς τὰ μέταλλα καί τὰ κρυσταλλικὰ στερεὰ τὸ ( $k$ ) κατὰ κανόνα ἐλαττοῦνται αὐξανομένης τῆς πιέσεως.

Ἡ θερμική αγωγιμότης τῶν στερεῶν προσδιορίζεται πειραματικῶς εἰς συσκευὰς βασιζομένας εἰς τὴν ἐξίσωσιν (1-2). Γενικῶς μετᾶται ὁ ρυθμὸς ροῆς θερμότητος διὰ δοκιμίου γνωστοῦ πάχους ὑπὸ δεδομένην διαφορὰν θερμοκρασίας. Ὡς λίαν ἀκριβῆς θεωρεῖται ἡ μέθοδος τοῦ προστατευτικοῦ θερμικοῦ δακτυλίου (Guarded Conductivity Apparatus) εἰς τὴν ὁποίαν ἐπιτυγχάνεται θερμική αγωγή κάθετος πρὸς τὰς κυρίας ἐπιφανείας ἐπαφῆς δοκιμίου/θερμαντικῆς πλακός. Ἡ αγωγή πρὸς τὰ πλάγια ἐμποδίζεται δι' εἰδικοῦ δακτυλίου, διατηρουμένου εἰς τὴν αὐτὴν θερμοκρασίαν μετὰ τὰς πλευράς τοῦ δοκιμίου.

Ἡ θερμική αγωγιμότης τῶν ὑγρῶν δύναται νὰ ὑπολογισθῇ προσεγγιστικῶς δι' ἐμπειρικῶν ἐξισώσεων τῆς Βιβλιογραφίας. Ἐπίσης, αὕτη δύναται νὰ προσδιορισθῇ πειραματικῶς δι' ἐφαρμογῆς μικρᾶς διαφορᾶς θερμοκρασίας εἰς λεπτόν στρῶμα ὑγροῦ (πάχους π.χ. 0,35 mm) καί μετρήσεως τῆς μεταδιδομένης θερμότητος. Τὸ μικρὸν πάχος τοῦ ὑγροῦ εἶναι ἀναγκαῖον, διότι οὕτως ἐπιτυγχάνεται μόνον θερμική αγωγή καί ἀποφεύγεται ἡ

μεταφορά θερμότητας διά κινήσεως της μικρᾶς μάζης τοῦ ὑγροῦ.

Εἰς τόν Πίνακα 1-1 δίδονται τυπικαί τιμαί τῆς θερμικῆς ἀγωγιμότητος διαφόρων τεχνικῶν ὑλικῶν εἰς μονάδας τοῦ Διεθνοῦς Συστήματος (S.I.). Εἰς τήν Βιβλιογραφίαν συναντῶνται αἱ μονάδες τοῦ Τεχνικοῦ Μετρικοῦ Συστήματος καί τοῦ Ἀγγλικοῦ Τεχνικοῦ Συστήματος, διά τὰς ὁποίας ἰσχύουν αἱ ἀκόλουθοι σχέσεις μετατροπῆς:

$$1 \text{ kcal/h m}^{\circ}\text{C}=1,16 \text{ W/m K}, \quad 1 \text{ KJ/h m}^{\circ}\text{C}=0,28 \text{ W/m K} \text{ καί}$$

$$1 \text{ Btu/hft}^{\circ}\text{F}=1,73 \text{ W/m K}.$$

Πίναξ 1-1

Θερμικαί Ἀγωγιμότητες (k) Διαφόρων Ὑλικῶν

| Ὑλικόν                         | Θερμοκρασία, K | k, W/m K |
|--------------------------------|----------------|----------|
| <u>Ἀέρια</u>                   |                |          |
| Ἀήρ                            | 273            | 0,0232   |
| Αἰθάνιον                       | 273            | 0,0174   |
| Ὑδρογόνον                      | 273            | 0,0162   |
| CO <sub>2</sub>                | 273            | 0,0151   |
| SO <sub>2</sub>                | 273            | 0,0093   |
| Ἀμμωνία                        | 273            | 0,0209   |
| Ὑδρατμός                       | 273            | 0,0232   |
| <u>Υγρά</u>                    |                |          |
| Ὑδωρ                           | 293            | 0,580    |
| Ὑδατικόν διάλυμα σακχάρους 15% | 293            | 0,550    |
| Ὑδατικόν διάλυμα σακχάρους 60% | 293            | 0,400    |
| Αἰθανόλη                       | 293            | 0,174    |
| Βενζίνη                        | 303            | 0,128    |
| Ὄρυκτέλαια                     | 303            | 0,139    |
| Αἰθυλενο-γλυκόλη               | 303            | 0,278    |
| Ὑδράργυρος                     | 303            | 8,236    |
| <u>Στερεά</u>                  |                |          |
| Χαλκός                         | 293            | 383      |
| Ἀλουμίνιον                     | 373            | 320      |

| Υλικόν                             | Θερμοκρασία, K | k, W/m K |
|------------------------------------|----------------|----------|
| Χάλυψ                              | 293            | 44       |
| Άνοξειδωτος χάλυψ<br>(SS316 ή 304) | 373            | 16       |
| Πάγος                              | 273            | 2,20     |
| Πλίνθοι πήλινοι                    | 773            | 1,60     |
| Ύαλος                              | 393            | 0,76     |
| Ξύλον όξυαs                        | 293            | 0,21     |
| Άμιάντος, Μαγνησία                 | 373            | 0,058    |
| Φελλός                             | 303            | 0,0197   |

Ἡ θερμική ἀγωγιμότηs τῶν ἀερίων εἶναι λίαν χαμηλή, ἐνῶ τῶν ὑγρῶν εἶναι περίπου δεκαπλασία τῆs τῶν ἀερίων.

Εἰs τὰ στερεά παρατηροῦνται μεγάλαι διαφοραὶ εἰs τὴν θερμικὴν ἀγωγιμότητα ὀφειλόμεναι εἰs τὴν φυσικὴν δομὴν αὐτῶν. Τὰ καθαρὰ μέταλλα ἔχουν μεγάλαs θερμικὰs ἀγωγιμότηταs π.χ. Χαλκός καὶ Ἄλουμίνιον. Εἰs τὰ καθαρὰ μέταλλα ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότηs εἶναι ἀνάλογος τῆs ἡλεκτρικῆs ἀγωγιμότητοs (νόμος Wiedermann-Franz).

Ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότηs (k) τῶν κράματων εἶναι σημαντικῶs χαμηλοτέρα τῆs (k) τῶν συστατικῶν καθαρῶν μετάλλων. Οὕτωs ἡ (k) τοῦ ἀνοξειδῶτου χάλυβοs (SS 316) εἶναι 16 W/m K ἐνῶ ἡ (k) τοῦ χάλυβοs εἶναι 44 W/m K. Ἐπίσης ἡ (k) τοῦ κράματοs Constantan (60 % Cu καὶ 40 % Ni) εἶναι 23 W/m K ἐνῶ ἡ (k) τοῦ χαλκοῦ ἀνέρχεται εἰs 383 W/m K τοῦ δέ νικελίου εἰs 90 W/m K. Ἐκ τῶν παραδειγμάτων τούτων ἔπεται ὅτι, ἀπὸ ἀπόψεωs ἀγωγῆs θερμότητοs, τὰ κράματα μειονεκτοῦν ἐναντι τῶν καθαρῶν μετάλλων.

Εἰs τὰ μονωτικὰ ὑλικά ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότηs ἐλαττοῦται, αὐξανομένου τοῦ πορώδουs αὐτῶν καὶ αὐξάνει, αὐξανομένηs τῆs ὑγρασίαs. Ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότηs τῶν κόνεων καὶ τῶν στερεῶν σωματιδίων μελετᾶται εἰs τὴν Τεχνικὴν τῶν Σωματιδίων.

Ἐἰs τὰ ἀνισοτροπικά στερεά ἡ (k) μεταβάλλεται μετὰ τῆs κατευθύνσεωs τῆs θερμικῆs ἀγωγῆs. Οὕτωs εἰs ἰνώδη στερεά (Ξύλον, ὑφαντά) ἡ (k) εἶναι μεγαλυτέρα 2-3 φοράs κατὰ μῆκοs παρά καθέτωs τῶν ἰνῶν.

Ἡ ἐπίδρασις τῆς θερμοκρασίας ἐπὶ τῆς θερμικῆς ἀγωγιμότητος τῶν ὑγρῶν καὶ τῶν στερεῶν εἶναι πολὺπλοκος καὶ δὲν ὑφίσταται ἐπ' αὐτῆς γενικὸς νόμος. Ἡ μεταβολὴ τῆς (k) μετὰ τῆς θερμοκρασίας εἶναι συνάρτησις τῆς δομῆς τοῦ ὕλικου καὶ τῶν ἀτομικῶν ἢ μοριακῶν κινήσεων αὐτοῦ. Παραδείγματα τῶν κυριωτέρων περιπτώσεων μεταβολῆς τῆς (k) μετὰ τῆς θερμοκρασίας δίδονται εἰς τὸν Πίνακα (1-2).

Εἰς τὰ ὑγρά γενικῶς ἡ (k) ἐλαττοῦται ἀύξανομένης τῆς θερμοκρασίας ἐκτός τοῦ ὕδατος καὶ τῶν ὕδατικῶν διαλυμάτων, τὰ ὁποῖα συμπεριφέρονται ἀνωμάλως.

Εἰς τὰ καθαρὰ μέταλλα ἡ (k) ἐλαττοῦται ἀύξανομένης τῆς θερμοκρασίας ἐξαιρέσει τοῦ ἀλουμινίου. Ἀντιθέτως εἰς τὰ κράματα ἡ (k) αὐξάνει μετὰ τῆς θερμοκρασίας. Εἰς τὰ ἄμορφα στερεὰ καὶ τὰ μονωτικὰ ὕλικα ἡ (k) αὐξάνεται μετὰ τῆς θερμοκρασίας.

## Πίναξ 1-2

Ἐπίδρασις τῆς θερμοκρασίας ἐπὶ τῆς θερμικῆς Ἀγωγιμότητος (k)

| Ὑλικά                    | Περιοχὴ (k), W/m K | Αὐξησις τῆς θερμοκρασίας ἐπιφέρει                              |
|--------------------------|--------------------|--|
| <u>Ἀέρια</u>             | 0,0162-0,174       | Αὐξησιν τῆς (k)  |
| <u>Ὑγρά</u>              | 0,116-1,16         | Γενικῶς ἐλάττωσιν τῆς (k)                                      |
| <u>Ὑδωρ, Ὑδατικά</u>     |                    |  |
| <u>Διαλύματα</u>         | 0,50-0,68          | Αὐξησιν τῆς (k) μέχρι 100°C<br>Ἐλάττωσιν τῆς (k) ἄνω τῶν 100°C |
| <u>Στερεὰ</u>            |                    |  |
| Μονωτικὰ Ὑλικά           | 0,035-0,116        | Αὐξησιν τῆς (k) ἐξαιρέσει τοῦ μαγνησίτου                       |
| Ἄμορφα ὕλικα             | 0,116-3,5          | Ἐλάττωσιν τῆς (k)  |
| Κρυσταλλικὰ μὴ μεταλλικὰ | 1 - 15             | Ἐλάττωσιν τῆς (k)  |
| Κράματα                  | 1 - 250            | Αὐξησιν τῆς (k)  |
| Μέταλλα                  | 17- 406            | Ἐλάττωσιν τῆς (k), ἐξαιρέσει τοῦ ἀλουμινίου.                   |



Είς τά στερεά, διά μικράς περιοχάς θερμοκρασιών, ή θερμική άγωγιμότης μεταβάλλεται γραμμικώς μετά τής θερμοκρασίας καί εφαρμόζεται ή έξίσωσις:

$$k=k_0(1+\alpha T) \quad (1-22)$$

όπου  $k_0$ ,  $\alpha$  = έμπειρικά σταθεράί, προσδιοριζόμεναι πειραματικώς.

## **Β. ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ - ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ**

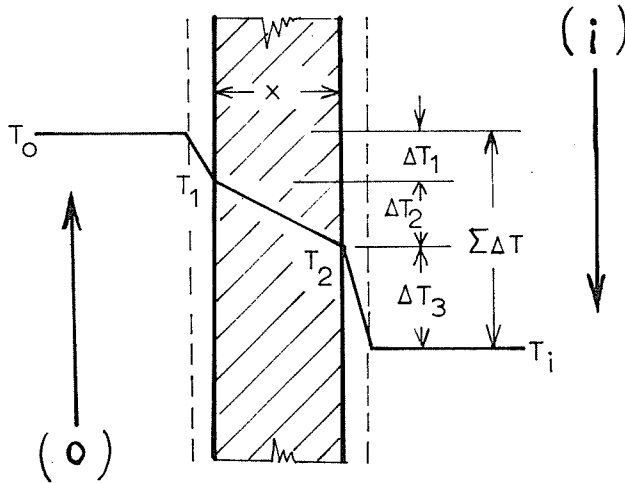
Ή μετάδοσις θερμότητος διά μεταφοράς ή έξ έπαφής (convection) έπιτυγχάνεται δι' έπαφής τών ρευστών μέ τήν έπιφανειαν θερμάνσεως ή ψύξεως καί άναμίξεως μέ τήν κυρίαν μάζαν αύτών. Ή ροή τών ρευστών δυνατόν νά είναι φυσικής ή βεβιασμένης κυκλοφορίας, ώς έξηγεΐται κατωτέρω. Ή μέθοδος αύτη μεταδόσεως θερμότητος εύρίσκει πλείστας εφαρμογάς είς τάς βιομηχανικάς διεργασίας τής Χημικής Μηχανικής.

### **α) Συντελεσταί Μεταφοράς Θερμότητος**

Είς τάς θερμικάς διεργασίας ό πλέον συνήθης τρόπος μεταδόσεως θερμότητος λαμβάνει χώραν μεταξύ ρευστών καί στερεών έπιφανειών. Ούτως, είς πολλάς εφαρμογάς, ή θερμότης έναλλάσσεται μεταξύ δύο ρευστών χωριζομένων διά στερεοΰ (συνήθως μεταλλικοΰ) τοιχώματος.

Τό Σχ. (1-7) παριστά θέρμανσιν τοΰ ρευστοΰ (i) υπό τοΰ ρευστοΰ (o) διά μέσου τοΰ στερεοΰ τοιχώματος πάχους (x). Τά δύο ρευστά κινούνται είς τήν παροΰσαν περίπτωσην κατ' άντιρροήν καί ίσχύουν αι άρχαί καί τά δεδομένα τής Τεχνικής τών Ρευστών.

Κατ' άναλογίαν πρός τήν ροήν τών ρευστών, δεχόμεθα ότι ή κυρία άντίστασις είς τήν μεταφοράν θερμότητος μεταξύ ρευστοΰ καί στερεάς έπιφανείας εύρίσκεται είς έν λεπτόν στρώμα ρευστοΰ πλησίον τής έπιφανείας έπαφής. Είς τό λεπτόν τοΰτο στρώμα θεωρούμεν ότι ή θερμότης μεταδίδεται δι' άγωγής ένώ είς τήν κυρίαν μάζαν τοΰ ρευστοΰ έπικρατεΐ ή μεταφορά διά μαζικής ροής.



Σχ. 1-7. Μετάδοση θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών χωρισμένων διά στερεού τοιχώματος

Είς τό Σχ. (1-7) ή μετάδοση θερμότητας γίνεται έκ του ρευστού (ο) πρός τό ρευστόν (i), δεδομένου ότι ή θερμοκρασία  $T_0$  είναι ύψηλοτέρα της  $T_i$ . Υπό συνθήκας μονίμου καταστάσεως, ό ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ρευστού (ο) καί της έξωτερικης έπιφανείας του τοιχώματος παρέχεται υπό της έξιώσεως:

$$\dot{q}/A = h_0 \Delta T_1 \quad (1-23)$$

όπου  $h_0$  = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της έξωτερικης έπιφανείας/ρευστού,  $W/m^2K$

$$\Delta T_1 = T_0 - T_1, K$$

$T_0$  = θερμοκρασία κυρίας μάζης ρευστού (ο), K

$T_1$  = θερμοκρασία έξωτερικης έπιφανείας του τοιχώματος, K

Η έξιώσις (1-23) καλεΐται καί "νόμος ψύξεως του Newton. Αυτή όρίζει τον συντελεστήν μεταφοράς θερμότητας (h), ό όποιος καλεΐται καί "μερικός" ή "έπιφανειακός" συντελε-

στής μεταφοράς θερμότητας. Είς τήν Βιβλιογραφίαν ὁ συντελεστής (h) δίδεται καί εἰς τὰς μονάδας:  $1 \text{ kcal/hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C} = 1,16 \text{ W/m}^2\text{K}$  ἢ  $1 \text{ Btu/h}^0 \text{ sqft } ^\circ\text{F} = 5,68 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Ἡ ροή θερμότητος διὰ μέσου τοῦ λεπτοῦ στρώματος ρευστοῦ (ο) πρὸς τήν ἐξωτερικὴν ἐπιφάνειαν τοῦ τοιχώματος δύναται νὰ ἐκφρασθῇ καί διὰ τῆς ἐξισώσεως θερμικῆς ἀγωγῆς

(1-2), διὰ συγκρίσεως τῆς ὁποίας μετὰ τῆς (1-23) ἔπεται ὅτι  $h=k/x$  ὅπου (x) τὸ πάχος τοῦ λεπτοῦ στρώματος καί (k) ἡ θερμικὴ ἀγωγιμότης τοῦ ρευστοῦ. Ἡ χρῆσις τῆς ἐξισώσεως θερμικῆς ἀγωγῆς εἶναι δυσχερῆς διότι δέν εἶναι γνωστόν ἐπακριβῶς τὸ πάχος τοῦ λεπτοῦ στρώματος τοῦ ρευστοῦ.

Ἡ ροή θερμότητος διὰ μέσου τοῦ στερεοῦ τοιχώματος λαμβάνει χώραν διὰ θερμικῆς ἀγωγῆς καί ἰσχύει ἡ ἐξίσωσις:

$$\dot{q}/A = k \frac{\Delta T_2}{x} \quad (1-24)$$

ὅπου  $\Delta T_2 = T_1 - T_2$

$T_2$  = θερμοκρασία ἐσωτερικῆς ἐπιφανείας τοῦ τοιχώματος

$k$  = θερμικὴ ἀγωγιμότης τοῦ τοιχώματος

$x$  = πάχος τοῦ τοιχώματος

Κατ'ἀνάλογον τρόπον, ὁ ρυθμὸς μεταφοράς θερμότητος μετὰ τῆς ἐσωτερικῆς ἐπιφανείας καί τοῦ ρευστοῦ (i) δίδεται ὑπὸ τῆς ἐξισώσεως:

$$\dot{q}/A = h_i \Delta T_3 \quad (1-25)$$

ὅπου  $h_i$  = συντελεστής μεταφοράς θερμότητος τῆς ἐσωτερικῆς ἐπιφανείας/ρευστοῦ

$\Delta T_3 = T_2 - T_i$

$T_i$  = θερμοκρασία τῆς κυρίας μάζης τοῦ ρευστοῦ (i)

Κατὰ τήν μετάδοσιν θερμότητος διὰ μέσου ἐπιπέδου πλακῶς ὁ ρυθμὸς μεταδόσεως  $\dot{q}/A$  θεωρεῖται σταθερὸς, ἥτοι δεχόμεθα μονοδιάστατον μετάδοσιν θερμότητος ἄνευ ἀπωλειῶν μέ βάσιν σταθεράν ἐπιφάνειαν (A). Ὑπὸ τὰς συνθήκας ταύτας αἱ ἐξισώσεις (1-23), (1-24) καί (1-25) δίδουν:

$$\dot{q}/A = U \Delta T \quad (1-26)$$

όπου  $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = T_0 - T_i$

$U$  = συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (overall heat transfer coefficient) είς  $W/m^2K$ .

Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, ορίζεται είς τήν περίπτωσιν του Σχ. (1-7) ως:

$$1/U = 1/h_0 + x/k + 1/h_i \quad (1-27)$$

ή υπό μορφήν θερμικών αντίστασεων:

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Καθίσταται προφανές ότι η συνολική θερμική αντίστασις ίσοῦται μέ τό άθροισμα τών επί μέρους θερμικών αντίστασεων καί η έξίσωσις (1-27) δύναται νά εφαρμοσθῆ είς τήν μετάδοσιν θερμότητας διά περισσοτέρων επιπέδων τοιχωμάτων.

Κατά τόν ύπολογισμόν του ρυθμού μεταδόσεως θερμότητος του παραδείγματος του Σχ. (1-7) έγένητο δεκτόν ότι αι επιφάνειαι έναλλαγῆς εἶναι καθαραί, ήτοι δέν υφίστανται αποθέσεις. Είς τήν πράξιν συναντῶνται συνήθως αποθέσεις αι όποῦ-αι πρέπει νά ληφθοῦν υπ'όψιν, ως έξηγεῖται είς τό κεφάλαιον Έναλλαγῆς θερμότητος.

Έάν τό τοίχωμα είς τό Σχ. (1-7) εἶναι κυλινδρικόν (π.χ. σωλήν έναλλαγῆς θερμότητος πάχους  $x$ ), η επιφάνεια μεταδόσεως θερμότητος δέν εἶναι σταθερά καί έπομένως δέν δύναται νά εφαρμοσθῆ η εξίσωσις (1-27) διά τόν ύπολογισμόν του συντελεστοῦ ( $U$ ). Συμφώνως πρός τά προηγούμενα θά ίσχύουν αι εξισώσεις (διά καθαρά τοιχώματα):

$$\dot{q}/A_0 = h_0 \Delta T_1 \quad (1-28)$$

$$\dot{q}/A_L = k \frac{\Delta T_2}{x} \quad (1-29)$$

$$\dot{q}/A_i = h_i \Delta T_3 \quad (1-30)$$

$$\dot{q}/A_0 = U_0 \Delta T \quad \eta \quad \dot{q}/A_i = U_i \Delta T \quad (1-31)$$

όπου  $A_0, A_i$  = έξωτερική καί έσωτερική έπιφάνεια του τοιχώματος αντίστοιχως.

$$A_L = \frac{A_0 - A_i}{\ln(A_0/A_i)} = \text{λογαριθμική μέση έπιφάνεια τοιχώματος}$$

$U_0, U_i$  = συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέ βάση τήν έξωτερικήν ή έσωτερικήν έπιφάνειαν του τοιχώματος αντίστοιχως.

Διά συνδυασμού τών άνωτέρω έξι σώσεων προκύπτει :

$$1/U_0 = 1/h_0 + (A_0/A_L) (x/k) + (A_0/A_i) (1/h_i) \quad (1-32)$$

$$\text{ή} \quad 1/U_i = 1/h_i + (A_i/A_L) (x/k) + (A_i/A_0) (1/h_0)$$

Αντί τών λόγων  $(A_0/A_i)$  κλπ. δύνανται νά χρησιμοποιηθοῦν οί αντίστοιχοι λόγοι τών διαμέτρων  $(D_0/D_i)$  ή τών ακτίνων  $(r_0/r_i)$ .

Αί έξι σώσεις (1-31) καί (1-32) εφαρμόζονται καί εἰς τήν γενικήν των μορφήν, ήτοι εἰς τήν μετάδοσιν θερμότητας διά μέσου έπαλλήλων κυλινδρικών τοιχωμάτων. Εἰς τήν γενικήν περίπτωσηιν ισχύει ή έξι σώσεις :

$$1/U_i = 1/h_i + \Sigma (D_i/D_L) (x/k) + (D_i/D_0) (1/h_0) \quad (1-33)$$

ή ή ανάλογος έκφρασις διά τόν  $(U_0)$ ,

$$\text{όπου} \quad D_L = \frac{D_0 - D_i}{\ln(D_0/D_i)} = \text{λογαριθμική μέση διάμετρος}$$

Εἰς πολλές περιπτώσεις οί μεταλλικοί σωλήνες έναλλαγῆς θερμότητας έχουν λεπτά τοιχώματα καί σχετικῶς μεγάλας διαμέτρους, ὅποτε δύναται νά ληφθῆ κατά προσέγγισιν  $A_0 = A_i = A_L$  ή  $D_0 = D_L = D_i$  καί νά χρησιμοποιηθῆ ή ἀπλουστερά έξι σώσεις τών έπιπέδων τοιχωμάτων (1-27).

Οί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας  $(h)$  έξαρτῶνται ἀπό πολλούς παράγοντας ὡς αἱ φυσικάί ιδιότητες καί ή ταχύτης του ρευστοῦ, ή θερμοκρασία καί ή γεωμετρική διάταξις του συστήματος. Εἰς πολλές περιπτώσεις αἱ συντελεσταί οὔτοι ὑπολογίζονται δι' έμπειρικών έξι σώσεων, αἱ ὁποῖαι έξετάζονται κατω-

τέρω. Είς τόν Πίνακα (1-3) καί τό Σχ. (Σ-4) τοῦ Παραρτήματος δίδονται αἱ περιοχαί τῶν τιμῶν τῶν συντελεστῶν ( $h$ ) διά τυπικᾶς ἐφαρμογᾶς τῆς Χημικῆς Μηχανικῆς.

## Π Ι Ν Α Κ Ε 1-3

Συντελεσταί Μεταφορᾶς Θερμότητος, ( $h$ )

| Σ ὄ σ τ η μ α                 | $h$ , $W/m^2K$  |
|-------------------------------|-----------------|
| Ἄηρ, Θέρμανσις ἢ Ψύξις        | 2 - 58          |
| Ἐπέρθερμος Ἄτμος              | 30 - 116        |
| Ὀρυκτέλαια, Θέρμανσις ἢ Ψύξις | 58 - 1.740      |
| Ἐδωρ, Θέρμανσις               | 170 - 17.000    |
| Ὀργανικαί Οὐσίαι, Συμπύκνωσις | 1.100 - 2.300   |
| Ἐδωρ, Ζέσις                   | 1.700 - 46.000  |
| Ἐδρατμοί, Συμπύκνωσις         | 5.800 - 100.000 |

Ὁ συνολικός συντελεστής μεταφορᾶς θερμότητος ( $U$ ) ἐξαρτᾶται ἀπό τούς μερικούς συντελεστάς ( $h$ ), τήν ἀγωγιμότητα καί τό πάχος τῶν τοιχωμάτων.

Εἰς τὰς πλείστας βιομηχανικᾶς ἐφαρμογᾶς χρησιμοποιοῦνται μεταλλικά τοιχώματα μικροῦ σχετικῶς πάχους καί ἐπομένως ἡ ἀντίστασις τοῦ τοιχώματος ( $x/k$ ) εἶναι σχετικῶς μικρά συγκρινομένη μέ τὰς ἀντιστάσεις τῶν δύο ρευστῶν ( $1/h_0$  καί  $1/h_1$ ). Ἡ μεγαλύτερα (ἐπικρατοῦσα) θερμική ἀντίστασις ἐξαρτᾶται ἀπό τό εἶδος τοῦ ρευστοῦ, τὰς ιδιότητας καί τήν ταχύτητα αὐτοῦ κλπ. Ὡς δεικνύεται εἰς τόν Πίνακα (1-3) αἱ θερμικαί ἀντιστάσεις ἀκολουθοῦν τήν σειράν μεγέθους: ἀέρια > ὑγρά > ὑγροποιούμενοι ἄτμοι.

Κατά κανόνα ὁ συνολικός συντελεστής ( $U$ ) ὑπολογίζεται βάσει τῆς μεγαλυτέρας θερμικῆς ἀντιστάσεως ( $1/h_1$  ἢ  $1/h_0$ ) καί συνοδεύεται ὑπό τῆς ἀντιστοίχου ἐπιφανείας μεταδόσεως θερμότητος. Σημειωτέον ὅτι, ἐξ ὀρισμοῦ, ἰσχύει ἡ σχέση  $U_1 A_1 = U_0 A_0$  (βλέπε ἐξίσωσιν 1-31).

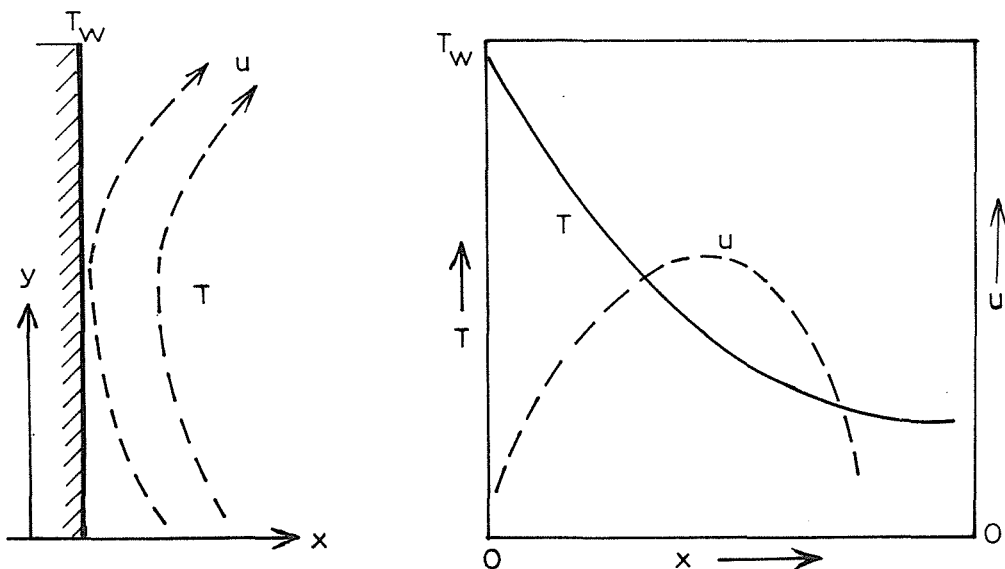
Εἰς ὀρισμένας περιπτώσεις ἡ θερμική ἀντίστασις δεδομένης ἐπιφανείας εἶναι τόσον ὑψηλή, ἐν σχέσει πρὸς τὰς ὑπολοίπους, ὥστε νά δύναται κατά προσέγγισιν νά ληφθῆ  $U=h$ . Ὡς

παραδείγματα αναφέρονται ή θέρμανσις όρυκτελαίου ύψηλοϋ ίξώδους είς μεταλλικόν σωλήνα διά συμπυκνώσεως κεκορεσμένου άτμου έξωτερικώς του σωλήνος ( $U_i \approx h_i$ ) καί ή θέρμανσις ύδατος έντός μεταλλικοϋ σωλήνος διά καυσαερίων έξωτερικώς του σωλήνος ( $U_0 \approx h_0$ ).

### β) Φυσική Κυκλοφορία

Η μεταφορά θερμότητας διά φυσικής κυκλοφορίας (natural convection) εύρίσκει περιωρισμένας βιομηχανικάς εφαρμογάς λόγω των χαμηλών ρυθμών ροής θερμότητας. Είς τήν φυσικήν κυκλοφορίαν ή θερμότης μεταφέρεται διά φυσικής ροής ένός αερίου ή ύγρου πλησίον θερμαινομένης ή ψυχομένης έπιφανείας. Η φυσική ροή προκαλείται από διαφοράς πυκνότητος, αί όποίται όφείλονται είς διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των διαφόρων σημείων του ρευστοϋ.

Η συνηθεστέρα περίπτωσης φυσικής κυκλοφορίας άφορά τήν θέρμανσιν άέρος δι' έπαφής μετά θερμαινομένης έπιφανείας. Το Σχ. (1-8) παριστά θέρμανσιν άέρος μέσης θερμοκρασίας ( $T$ ) δι' έπαφής μετά θερμαινομένης κατακόρυφου έπιφανείας θερμοκρασίας ( $T_w$ ).



Σχ. 1-8. Θέρμανσις ρευστοϋ έξ έπαφής μέ θερμαινομένην κατακόρυφον έπιφάνειαν

Ἄηρ ἐρχόμενος εἰς ἐπαφήν μέ τήν θερμήν ἐπιφάνειαν κινεῖται πρὸς τὰ ἄνω συνεπεία τῆς διαφορᾶς πυκνότητος μεταξὺ τοῦ θερμοῦ καί τοῦ ψυχροῦ ἀέρος. Ἡ θερμοκρασία τοῦ ἀέρος ἐλαττοῦται συνεχῶς αὐξανομένης τῆς ἀποστάσεως ἀπὸ τήν ἐπιφάνειαν ἐπαφῆς καί προσεγγίζει τελικῶς τήν θερμοκρασίαν τῆς κυρίας μάζης τοῦ ἀέρος. Ἡ ταχύτης τοῦ ἀέρος ( $u$ ) ἀρχικῶς αὐξάνει μετά τῆς ἀποστάσεως ( $x$ ) ἀπὸ τῆς ἐπιφανείας ἐπαφῆς καί διέρχεται διὰ μιᾶς μεγίστης τιμῆς μετά τήν ὁποίαν ἐλαττοῦται συνεχῶς μέχρι μηδενισμοῦ. Ἡ μεγίστη ταχύτης τοῦ ἀέρος παρατηρεῖται εἰς μικράν σχετικῶς ἀπόστασιν ἀπὸ τῆς ἐπιφανείας ἐπαφῆς (2-4 mm).

Αὐξανομένης τῆς ἀποστάσεως ( $y$ ) ἀπὸ τό κάτω ἄκρον τῆς ἐπιφανείας ἐπαφῆς αὐξάνεται σημαντικῶς ἡ ταχύτης καί ἡ θερμοκρασία τοῦ ἀέρος, τὰ δέ σχήματα τῶν ἀντιστοιχῶν καμπυλῶν ὁμοιάζουν πρὸς τὰς καμπύλας τοῦ Σχ. (1-8), αἱ ὁποῖαι ἀναφέρονται εἰς ὠρισμένον ( $y$ ).

Ἐάν ἡ θερμοκρασία τῆς ἐπιφανείας ἐπαφῆς εἶναι μικροτέρα τῆς θερμοκρασίας τοῦ ἀέρος, θά ἐπέλθῃ προφανῶς ψύξις τοῦ ἀέρος διὰ μηχανισμοῦ ἀναλόγου πρὸς τόν παριστώμενον εἰς τό Σχ. (1-8). Συνεπεία ὁμως τῆς διαφορᾶς πυκνοτήτων, ἡ ροή τοῦ ἀέρος θά εἶναι ἀντίθετος, ἥτοι ἐκ τῶν ἄνω πρὸς τὰ κάτω.

Ἡ φυσική κυκλοφορία εἰς ἄλλα γεωμετρικά σχήματα ἐξηγεῖται δι' ἀναλόγων μηχανισμῶν. Πλέον πολὺπλοκα φαινόμενα ροῆς παρατηροῦνται εἰς ἀέρια ἢ ὑγρά περιβάλλοντα θερμαινόμενον ἢ ψυχόμενον σωλῆνα (π.χ. ὀριζόντιος ἀτμαγωγός σωλῆν περιβαλλόμενος ἀπὸ ἀέρα).

Ὁ ρυθμός μεταφορᾶς θερμότητος διὰ φυσικῆς κυκλοφορίας, δίδεται ἀπὸ τήν βασικὴν ἐξίσωσιν,

$$\dot{q}/A = h \Delta T \quad (1-34)$$

ὅπου  $\Delta T = T_w - T$  (Σχ. 1-8).

$h$  = Συντελεστής μεταφορᾶς θερμότητος

Ἡ πρόβλεψις τοῦ συντελεστοῦ μεταφορᾶς θερμότητος ( $h$ ) γίνεται δι' ἐμπειρικῶν ἐξισώσεων λαμβανομένων διὰ διαστατικής ἀναλύσεως τῶν κυριωτέρων παραμέτρων μεταφορᾶς θερμότη -



τος (Φαινόμενα Μεταφοράς).

Είς τήν φυσικήν κυκλοφορίαν δεχόμεθα ὅτι ὁ συντελεστής μεταφοράς θερμότητος ( $h$ ) διά κυκλοφορίας ἑνός ρευστοῦ περί θερμαινόμενον ἢ ψυχόμενον σωλήνα ἐξαρτᾶται ἀπό τὰς ἐξῆς κυρίας παραμέτρους: Ἐξωτερικὴν διάμετρον σωλήνος ( $D$ ), μῆκος σωλήνος ( $L$ ), ἰξῶδες ( $\eta$ ), θερμικὴν ἀγωγιμότητα ( $k$ ), εἰδικὴν θερμότητα ( $C_p$ ), πυκνότητα ( $\rho$ ), διαφορὰν θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ), συντελεστήν θερμικῆς διαστολῆς ( $\beta$ ) καὶ ἐπιτάχυνσιν τῆς βαρύτητος ( $g$ ). Οὕτως ἰσχύει ἡ σχέση:

$$f(D_0, L, \eta, k, C_p, \rho, \Delta T_0, \beta, g, h) = 0 \quad (1-35)$$

Διά διαστατικῆς ἀναλύσεως τῆς ἐξίσωσως (1-35), προκύπτουν ἀδιάστατοι ἐξισώσεις δι'εἰδικὰς περιπτώσεις φυσικῆς κυκλοφορίας. Οὕτω, δι'ἀπλοῦν ὀριζόντιον σωλήνα (κύλινδρον) προκύπτει ἡ ἐξίσωσις:

$$N_{Nu} = f(N_{Gr}, N_{Pr}) \quad (1-36)$$

ὅπου  $N_{Nu} = hD_0/k =$  ἀριθμὸς Nusselt

$$N_{Gr} = \frac{D_0^3 \rho^2 \beta g \Delta T_0}{\eta^2} = \text{ἀριθμὸς Grashof}$$

$$N_{Pr} = C_p \eta / k = \text{ἀριθμὸς Prandtl}$$

Οἱ ἀδιάστατοι ἀριθμοὶ Nusselt, Prandtl καὶ Reynolds συναντῶνται εἰς τὰς πλείστας ἐξισώσεις μεταφοράς θερμότητος. Ὁ ἀδιάστατος ἀριθμὸς Grashof συναντᾶται μόνον εἰς τήν φυσικήν κυκλοφορίαν καὶ περιέχει δύο χαρακτηριστικὰ μεγέθη τῆς φυσικῆς ροῆς, ἥτοι τὸν συντελεστήν μεταβολῆς ὄγκου ( $\beta$ ) καὶ τήν ἐπιτάχυνσιν τῆς βαρύτητος ( $g$ ).

Ὁ συντελεστής ( $\beta$ ) ὀρίζεται ὡς  $\beta = (\Delta V / \Delta T) / V$  καὶ εἰς τὰ τέλεια ἀέρια ἰσοῦται μέ τὸ ἀντίστροφον τῆς ἀπολύτου θερμοκρασίας, ἥτοι  $\beta = 1/T$ .

Ἡ διαφορὰ  $\Delta T$  λαμβάνεται ὡς ἡ διαφορὰ θερμοκρασίας μεταξὺ τῆς ἐπιφανείας ἐπαφῆς ( $T_s$ ) καὶ τῆς κυρίας μάζης τοῦ ρευστοῦ ( $T$ ).

Ὅλαι αἱ φυσικαὶ ἰδιότητες τοῦ ρευστοῦ λαμβάνονται εἰς τήν μέσην θερμοκρασίαν τοῦ λεπτοῦ στρώματος ( $T_f$ ), κειμένην

μεταξύ ( $T_s$ ) και ( $T$ ) και λαμβανομένην κατά προσέγγισιν ως,  
 $T_f = (T_s + T) / 2$ .

Διά πειραματικών μετρήσεων και συσχετίσεων φυσικής κυκλοφορίας διαφόρων συστημάτων ή γενική έξιωσις (1-36) δίδει τήν σχέσιν:

$$N_{Nu} = \alpha (N_{Gr} N_{Pr})^m \quad (1-37)$$

Οι συντελεσταί ( $\alpha$ ) και ( $m$ ) λαμβάνονται ως ακόλουθως:

- 1)  $N_{Gr} N_{Pr} > 10^9$       όριζόντιοι κύλινδροι,  
κατακόρυφοι πλάκες:  $\alpha = 0,13$  και  $m = 1/3$
- 2)  $10^3 < N_{Gr} N_{Pr} < 10^9$       όριζόντιοι κύλινδροι:  $\alpha = 0,53$  και  $m = 1/4$   
κατακόρυφοι πλάκες:  $\alpha = 0,59$  και  $m = 1/4$
- 3)  $N_{Gr} N_{Pr} < 10^3$       χρήσις διαγραμμάτων βιβλιογραφίας, π.χ.  
Σχ. (Σ-5) Παραρτήματος.

Διά τόν άερα ό  $N_{Pr}$  κυμαίνεται μεταξύ 0,6-1,0, ό δέ  $N_{Gr}$  μεταξύ  $10^3-10^9$ . Έπομένως τό γινόμενον  $N_{Gr} N_{Pr}$  διά τόν άερα, μεταβάλλεται μεταξύ  $10^3-10^9$  (περίπτωσης (2) τής έξιώσεως (1-37)). Είς τήν περιοχήν ταύτην ή κίνησις του άέρος θεωρείται ως τυρβώδης, ένώ είς μικροτέρας τιμάς του γινομένου τούτου έπικρατεί ή στρωτή ροή.

Είς τάς κατακόρυφους πλάκας ως χαρακτηριστική διάστασις χρησιμοποιείται τό ύψος ( $L$ ) άντί τής έξωτερικής διαμέτρου ( $D_0$ ) του κυλίνδρου.

Διά τήν φυσικήν κυκλοφορίαν τοϋ άέρος είς άτμοσφαιρικήν πίεσιν και συνήθεις θερμοκρασίας εφαρμόζονται αι ακόλουθοι άπλοποιημένοι διαστατικάί έξιώσεις, προκύπτουσαι από τήν γενικήν έξιώσιν (1-37):

$$\text{Όριζόντιοι σωλήνες: } h = 1,42 (\Delta T / D_0)^{1/4} \quad (1-38)$$

$$\text{Κατακόρυφα επίπεδα: } h = 1,42 (\Delta T / L)^{1/4} \quad (1-39)$$

$$\text{Όριζόντιαι θερμαινόμεναι πλάκες, έστραμμέναι πρός τά άνω: } h = 2,48 (\Delta T)^{1/4} \quad (1-40)$$

$$\text{έστραμμέναι πρός τά κάτω: } h=1,3 (\Delta T)^{1/4} \quad (1-41)$$

$h$  = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας,  $W/m^2K$   
 $\Delta T$  = διαφορά θερμοκρασίας επιφανείας/άέρος,  $K$   
 $D_0$  = έξωτερική διάμετρος σωλήνος,  $m$   
 $L$  = ύψος πλακός,  $m$

### γ) Ύξηναγκασμένη Κυκλοφορία

Είς τας πλείστας θερμικάς διεργασίας χρησιμοποιεῖται ἐξηναγκασμένη ἢ βεβιασμένη κυκλοφορία (forced convection), ἥτοι ταχεῖα ροή προκαλουμένη διὰ μηχανικῶν μέσων, π.χ., δι' ἀντλιῶν καὶ ἀνεμιστήρων. Διὰ τῆς βεβιασμένης κυκλοφορίας ἐπιτυγχάνονται ὑψηλοὶ συντελεσταὶ μεταφοράς θερμότητος, ἐπιτυγχανομένης οὕτως οἰκονομικώτερας ἐναλλαγῆς θερμότητος.

Ἐκ τῶν διαφόρων τύπων ροῆς τὰς περισσοτέρας ἐφαρμογὰς εὐρίσκει ἡ βεβιασμένη κυκλοφορία μονοφασικῶν ρευστῶν ἐντὸς ἀγωγῶν. Ὁ τύπος τῆς ροῆς μονοφασικῶν ρευστῶν ἐκφράζεται διὰ τοῦ ἀδιαστάτου ἀριθμοῦ Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{D\bar{u}\rho}{\eta} = \frac{DG}{\eta} \quad (1-42)$$

$D$  = ἐσωτερικὴ διάμετρος ἀγωγοῦ,  $m$   
 $\bar{u}$  = μέση ταχύτης ρευστοῦ,  $m/s$   
 $\rho$  = πυκνότης ρευστοῦ,  $kg/m^3$   
 $\eta$  = ἰξῶδες ρευστοῦ,  $kg/ms$   
 $G = \bar{u}\rho =$  μαζικὴ ταχύτης ρευστοῦ,  $kg/m^2s$

Διακρίνονται τρεῖς περιοχαὶ ροῆς: 1) Γραμμικὴ ἢ στρωτὴ ροή (Laminar flow) διὰ  $N_{Re} < 2.100$ . 2) Ἐνδιάμεσος ροή διὰ  $2.100 < N_{Re} < 8.000$  καὶ 3) Τυρβώδης ροή (turbulent flow) διὰ  $N_{Re} > 8.000$ .

Εἰς τὴν Τεχνικὴν τῶν Ρευστῶν ἡ ροή θεωρεῖται τυρβώδης διὰ τιμὰς τοῦ  $N_{Re}$  ἄνω τοῦ 2.100. Εἰς τὴν πρᾶξιν ὅμως ἡ ροή καθίσταται πλήρως τυρβώδης εἰς τιμὰς τοῦ  $N_{Re}$  ἄνω τῶν 8.000 περίπου.

Διὰ τυρβώδη ροὴν ἐντὸς μικρῶν σωλήνων ἰσχύει ἡ ἐμπειρική ἐξίσωσις Dittus-Boelter:

$$N_{Nu} = 0,023 N_{Re}^{0,8} N_{Pr}^m \quad (1-43)$$

όπου  $m = 0,4$  όταν τό ρευστόν θερμαίνεται

$m = 0,3$  όταν τό ρευστόν ψύχεται

Ἡ ἐξίσωσις (1-43) γράφεται καί ὡς:

$$N_{St} N_{Pr}^{2/3} = 0,023 N_{Re}^{-0,2} \quad (1-44)$$

όπου  $N_{St} = \frac{h}{C_p G} = N_{Nu} / N_{Re} N_{Pr} =$  ἀριθμός Stanton

Διά τόν ὑπολογισμόν τῶν ἀδιαστάτων ἀριθμῶν τῶν ἀνωτέρω ἐξισώσεων αἱ φυσικαί ἰδιότητες ( $\eta, k, C_p, \rho$ ) λαμβάνονται εἰς τήν μέσην θερμοκρασίαν τοῦ ρευστοῦ ἐντός τοῦ σωλήνος.

Διά τόν ὑπολογισμόν τοῦ συντελεστοῦ ( $h$ ) εἰς τήν τυρβώδη ροήν χρησιμοποιεῖται καί ἡ ἐξίσωσις Sieder-Tate, εἰς τήν ὁποίαν λαμβάνεται ὑπ' ὄψιν ἡ μεταβολή τοῦ ἰξώδους:

$$N_{Nu} = 0,023 N_{Re}^{0,8} N_{Pr}^{1/3} (\eta/\eta_w)^{0,14} \quad (1-45)$$

όπου  $\eta =$  ἰξώδες εἰς τήν μέσην θερμοκρασίαν τοῦ ρευστοῦ

$\eta_w =$  ἰξώδες τοῦ ρευστοῦ εἰς τήν μέσην θερμοκρασίαν τοῦ τοιχώματος τοῦ σωλήνος.

Αἱ ἐξισώσεις (1-43) καί (1-45) ἰσχύουν διά μακροῦς σωλήνας, ἥτοι διά  $L/D > 60$ . Διά σωλήνας μικροῦ μήκους ( $L/D < 60$ ) αἱ ἀνωτέρω ἐξισώσεις διορθοῦνται διά πολλαπλασιασμόν τῶν δευτέρων μελῶν αὐτῶν ἐπί τόν παράγοντα  $[1 + (L/D)^{0,7}]$

Αἱ ἀνωτέρω ἐξισώσεις δέν ἰσχύουν διά τά ὑγρά μέταλλα (π.χ. τετηγμένα Na ἢ Pb), τά ὁποῖα ἔχουν χαμηλοῦς ἀριθμούς Prandtl (κάτω τοῦ 0,1). Διά τήν μεταφοράν θερμότητος εἰς ὑγρά μέταλλα εἰς τυρβώδη ροήν (ἐφαρμογαί π.χ. εἰς πυρηνικούς ἀντιδραστήρας) χρησιμοποιεῖται ἡ ἐμπειρική ἐξίσωσις:

$$N_{Nu} = 5 + 0,016 N_{Pe}^{0,8} \quad (1-46)$$

όπου  $N_{Pe} = N_{Re} N_{Pr} = \frac{DG C_p}{k} =$  ἀριθμός Peclet

Διά στρωτήν ροήν ἐντός σωλήνων ἰσχύει ἡ ἐμπειρική ἐξίσωσις Sieder-Tate:

$$N_{Nu} = 1,86 [N_{Re} N_{Pr} (D/L)]^{1/3} (\eta/\eta_w)^{0,14} \quad (1-47)$$

Ὡς καί προηγουμένως, αἱ φυσικαί ἰδιότητες προσδιορίζονται εἰς τὴν μέσην θερμοκρασίαν τοῦ ρευστοῦ ἐκτός τοῦ ἰξώδους  $\eta$ , τὸ ὁποῖον λαμβάνεται εἰς τὴν μέσην θερμοκρασίαν τοῦ ἐσωτερικοῦ τοιχώματος τοῦ σωλῆνος.

Ἡ ἐξίσωσις (1-47) γράφεται καί ὡς

$$N_{Nu} = 2 N_{Gz}^{1/3} (\eta/\eta_w)^{0,14} \quad (1-48)$$

ὅπου  $N_{Gz} = \frac{\dot{m}Cp}{kL} =$  ἀριθμὸς Graetz

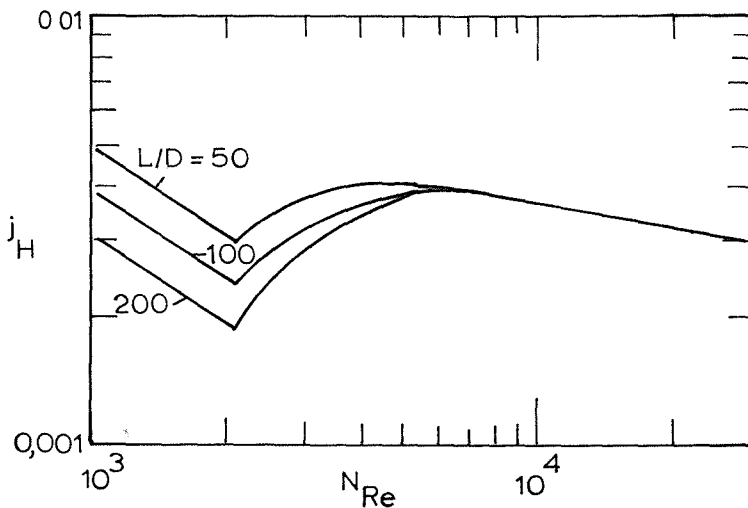
$\dot{m} = GA =$  ρυθμὸς μαζικῆς ροῆς, kg/s

$A =$  ἐπιφάνεια ἐγκαρσίας διατομῆς σωλῆνος,  $m^2$

Διὰ τὴν ἐνδιάμεσον περιοχὴν ροῆς ἐντὸς σωλῆνος δέν ὑφίσταται ἀκριβῆς ἐξίσωσις ὑπολογισμοῦ τοῦ συντελεστοῦ (h) καί χρησιμοποιεῖται τὸ διάγραμμα τοῦ Σχ. (1-9).

Ὡς τεταγμένη τοῦ Σχ. (1-9) χρησιμοποιεῖται ὁ παράγων μεταφορᾶς θερμότητος ( $j_H$ ) ὀριζόμενος ὡς:

$$j_H = \frac{h}{CpG} N_{Pr}^{2/3} (\eta_w/\eta)^{0,14} \quad (1-49)$$



Σχ. 1-9. Μεταφορά θερμότητος ἐντὸς σωλῆνων εἰς τὴν ἐνδιάμεσον περιοχὴν ροῆς

Διά τὰ ψευδοπλαστικά ρευστά (μὴ Νευτονικά) εἰς στρωτὴν ροὴν ἐντὸς σωλήνος χρησιμοποιεῖται ἡ ἐξίσωσις:

$$N_{Nu} = 2 \left( \frac{3n+1}{4n} \right) N_{Gz}^{1/3} (m/m_w)^{0,14} \quad (1-50)$$

ὅπου  $n$  = δείκτης ροῆς, ἀδιάστατος.

$$m = 8^{n-1} K$$

$$K = \text{ρεολογικὴ σταθερά, dyn s}^n/\text{sm}^2$$

$m, m_w$  = σταθεραὶ ὑπολογιζόμεναι εἰς τὴν μέσην θερμοκρασίαν τοῦ ρευστοῦ καὶ τὴν μέσην θερμοκρασίαν τοῦ τοιχώματος ἀντιστοίχως.

Διὰ τὸν ὑπολογισμόν τῶν συντελεστῶν μεταφορᾶς θερμότητος ἐντὸς ἀγωγῶν διαφόρων σχημάτων (π.χ. δακτυλιοειδεῖς διατομαί, ἑλικοειδεῖς ἀγωγοί) ἢ εἰς τὸ ἐξωτερικόν σωλήνων χρησιμοποιοῦνται εἰδικαί ἐμπειρικαί ἐξισώσεις καὶ διαγράμματα τῆς Βιβλιογραφίας. Ἡ μεταφορά θερμότητος μεταξύ ρευστῶν καὶ σφαιρῶν ἢ ἄλλων ἐμβαπτισμένων στερεῶν ἐξετάζεται εἰς τὴν Τεχνικὴν τῶν Σωματιδίων.

#### δ) Πίπτοντα Λεπτὰ Στρώματα

Ἡ μεταφορά θερμότητος εἰς πίπτοντα λεπτά στρώματα ὑγροῦ (falling films) ἐφαρμόζεται εἰς ὠρισμένους ἐναλλάκτας θερμότητος καὶ ἐξατμιστήρας (Κεφάλαια 2 καὶ 3). Εἰς τὰς περιπτώσεις ταύτας τὸ ὑγρὸν πίπτει διὰ τῆς βαρύτητος, ἐρχόμενον εἰς ἐπαφὴν μὲ θερμαινόμενα ἢ ψυχόμενα κατακόρυφα τοιχώματα σωλήνων ἢ πλακῶν. Ἐπιτυγχάνονται οὕτως ὑψηλοὶ συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητος χωρὶς μεγάλην πῶσιν πιέσεως (μικρά δαπάνη μηχανικῆς ἐνεργείας).

Εἰς τοὺς σωλήνας ὁ σχηματισμὸς τοῦ λεπτοῦ στρώματος δύναται νὰ γίνῃ εἰς τὸ ἐσωτερικόν ἢ τὸ ἐξωτερικόν τοίχωμα. Ἡ πλήρης διαβροχὴ τῶν τοιχωμάτων ἐπιτυγχάνεται δι' εἰδικῶν κατανομέων ροῆς τοποθετημένων εἰς τὴν κορυφὴν τῶν σωλήνων (π.χ. ὑπερχειλιστήρες, βαλβίδες διασπορᾶς).

Διὰ στρωτὴν ροὴν λεπτοῦ στρώματος ὑγροῦ, πάχους  $(\delta)$ , εἰς κατακόρυφον ἐπιφάνειαν ἰσχύει ἡ ἐξίσωσις:

$$N_{Nu} = 0,008 N_{Re}^{2/3} N_{Pr}^{1/3} \quad (1-51)$$

όπου  $N_{Nu} = h\delta/k$ ,  $N_{Re} = 4\Gamma/\eta$ ,  $N_{Pr} = C_p\eta/k$

$\delta = (3\Gamma\eta/\rho^2g)^{1/3}$  = πάχος λεπτού στρώματος, m

$\Gamma = \dot{m}/b$  = ρυθμός ροής ανά μονάδα μήκους διαβρεχομένης περιμέτρου, kg/sm

$b$  = μήκος διαβρεχομένης επιφανείας, m. Διά κυκλικόν σωλήνα  $b = \pi D$ .

Αι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται εις τήν μέσην θερμοκρασίαν του λεπτού στρώματος ( $T_f$ ).

Ἡ ἐξίσωσις (1-51) γράφεται καί ὡς:

$$h/\varphi = 0,01 (N_{Re} N_{Pr})^{1/3} \quad (1-52)$$

όπου  $\varphi = (k^3\rho^2g/\eta^2)^{1/3}$  εις μονάδας του (h), W/m<sup>2</sup>K

Αι τιμαί τῆς παραμέτρου ( $\varphi$ ) διά τό ὕδωρ εις διαφόρους θερμοκρασίας δίδονται εις τήν Βιβλιογραφίαν (π.χ. McAdams).

Διά ροήν λεπτού στρώματος ὕδατος εις ὑψηλούς ἀριθμούς Reynolds ( $4\Gamma/\eta > 1.000$ ) ἐφαρμόζεται ἡ κατωτέρω διαστατική ἐξίσωσις:

$$h = 9130\Gamma^{1/3} \quad (1-53)$$

όπου (h) εις W/m<sup>2</sup>K καί (Γ) εις kg/sm

#### ε) Συμπύκνωσις Ἀτμῶν

Ἡ συμπύκνωσις ἀτμῶν εις ψυχομένας ἐπιφανείας λαμβάνει χώραν ὑπό μορφήν εἴτε λεπτοῦ στρώματος (film condensation) ἢ σταγόνων (dropwise condensation). Κατά τήν συμπύκνωσιν τῶν ἀτμῶν ὑπό μορφήν σταγόνων ἐπιτυγχάνονται λίαν ὑψηλοί συντελεσταί μεταφορᾶς θερμότητος (58.000-100.000 W/m<sup>2</sup>K) διότι αι σχηματιζόμεναι σταγόνες ἀφίινουν ἀκάλυπτον μέγα μέρος τῆς ἐπιφανείας, ἐπί τῆς ὁποίας δύναται νά συμπυκνωθῇ νέα ποσότης ἀτμῶν. Κατά τήν συμπύκνωσιν ὑπό μορφήν λεπτοῦ στρώματος ἐπιτυγχάνονται μικρότεροι συντελεσταί μεταφορᾶς θερμότητος (π.χ. 11.000 W/m<sup>2</sup>K) λόγω καλύψεως τῆς ἐπιφανείας ὑπό στρώματος

ύγρου τό όποϊον έμποδίζεϊ τήν περαιτέρω ταχείαν συμπύκνωσιν.

Τά πλεϊστα μέταλλα κατασκευής συμπυκνωτήρων, όταν εϊ-  
ναι καθαρά, διαβρέχονται ύπό τοϋ ύδατος καί έπομένως συμπυ-  
κνώνουν τούς άτμούς ύπό μορφήν λεπτοϋ στρώματος. Τά μέταλλα  
καθίστανται ύδρόφοβα, ήτοι σχηματίζουσι σταγόνας τών συμπυ-  
κνουμένων ύγρων, εάν ή έπιφάνεια αύτάν περιέχει διαφόρους  
όργανικάς ουσίας ώς λιπαρά όξέα, Teflon, κλπ. Έπικάλυψις  
τών μεταλλικών έπιφανειών συμπυκνώσεως διά τοιούτων ύδρο-  
φόβων ένώσεων βελτιώνει σημαντικώς τούς συντελεστάς μεταφο-  
ράς θερμότητος. Όρισμένα εύγενή μέταλλα, όπως ο χρυσός, συμ-  
πυκνώνουν τούς άτμούς ύπό μορφήν σταγόνων.

Εϊς τήν πράξιν ή διατήρησις συνθηκών συμπυκνώσεως ύπό  
μορφήν σταγόνων εϊναι λίαν δυσχερής καί ο σχεδιασμός τών συμ-  
πυκνωτήρων βασίζεται εϊς τήν συμπύκνωσιν ύπό μορφήν λεπτοϋ  
στρώματος. Ός βάσις τών έξισώσεων σχεδιασμοϋ χρησιμοποϊ-  
εϊται ή θεωρία τοϋ Nusselt.

Η αύξησις τών συντελεστών μεταφοράς θερμότητος έπιτυγ-  
χάνεται καί διά κατασκευής συμπυκνωτήρων μέ αύλακωτάς έπι-  
φανείας. Σύστημα αύλακωτών σωλήνων (fluted tubes) χρησιμο-  
ποιεϊται έπιτυχώς εϊς τούς έξατμιστήρας άφαλατώσεως τοϋ ύ-  
δατος (Κεφ. 31),

Διά κατακορύφους σωλήνας ή συμπύκνωσις άτμών ύπό μορ-  
φήν λεπτοϋ στρώματος διά στρωτήν ροήν δίδεται ύπό τής έξι-  
σώσεως:

$$h/\varphi = 1,47 N_{Re}^{-1/3} \quad (1-54)$$

όπου  $h$  = μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητος

$\varphi$  = συνάρτησις φυσικών ιδιοτήτων ύγρου (έξισωσις 1-52)

$$N_{Re} = 4\Gamma_b / \eta$$

$\Gamma_b$  = ρυθμός ροής συμπυκνώματος έν τοϋ πυθμένος τοϋ σω-  
λήνος, ανά μονάδα μήκους περιμέτρου, kg/sm

Αϊ φυσικαί ιδιότητες τοϋ συμπυκνώματος ύπολογίζονται  
εϊς τήν μέσην θερμοκρασίαν τοϋ λεπτοϋ στρώματος ( $T_f$ ), ή ο-  
ποία λαμβάνεται ώς,

$$T_f = T_s - 0,75 \Delta T \quad (1-55)$$



όπου  $\Delta T = T_s - T_w =$  διαφορά θερμοκρασίας κεκορεσμένων ατμών ( $T_s$ ) και επιφανείας συμπυκνώσεως επί του τοιχώματος ( $T_w$ ).

Ἡ ἐξίσωσις (1-54) γράφεται καί ὡς:

$$h = 0,943 \left( \frac{k^3 \rho^2 g \lambda}{\Delta T L \eta} \right)^{1/4} \text{ εἰς } W/m^2K \quad (1-56)$$

όπου  $\lambda =$  θερμότης ἐξατμίσεως, J/kg

$L =$  μήκος κατακορύφου σωλήνος, m

$\Delta T =$  διαφορά θερμοκρασίας κεκορεσμένου ατμοῦ- ἐπιφανείας συμπυκνώσεως.

Διὰ τυρβώδη ροήν συμπυκνώματος εἰς κατακορύφους σωλήνας ( $N_{Re} > 2.100$ ) ἰσχύει ἡ ἐξίσωσις:

$$h/\varphi = 0,0077 N_{Re}^{0,4} \quad (1-57)$$

Δι' ὁριζοντίους σωλήνας ἡ συμπύκνωσις ατμῶν ὑπό μορφήν λεπτοῦ στρώματος ἐπί τοῦ ἐξωτερικοῦ τοιχώματος δίδεται ὑπό τῆς ἐξισώσεως:

$$h/\varphi = 1,51 N_{Re}^{-1/3} \quad (1-58)$$

$$\eta \quad h = 0,725 \left( \frac{k^3 \rho^2 g \lambda}{N \Delta T D_0 \eta} \right)^{1/4} \text{ εἰς } W/m^2K \quad (1-59)$$

όπου  $N_{Re} = 4\Gamma'/\eta$

$\Gamma' = \dot{m}/L =$  ρυθμός ροῆς συμπυκνώματος ἀνά μονάδα μήκους σωλήνος

$D_0 =$  ἐξωτερική διάμετρος σωλήνος

$N =$  ἀριθμός σωλήνων εἰς δοθέν κατακόρυφον ἐπίπεδον.

Εἰς τούς ἀπλούς ὀριζοντίους σωλήνας δέν εἶναι δυνατή ἡ δημιουργία τυρβώδους ροῆς διότι τό συμπλήρωμα ρέει διὰ τῆς βαρύτητος καθ' ὅλον τό μήκος αὐτῶν. Ἀντιθέτως εἰς τούς κατακορύφους σωλήνας ἡ συσσώρευσις συμπυκνώματος δύναται νά δημιουργήσῃ τυρβώδη ροήν εἰς τό κάτω τμήμα αὐτῶν.

Εἰς τούς κατακορύφους σωλήνας ἡ ροή τοῦ ὑγροῦ συμπυκνώματος εἶναι τελείως στρωτή διὰ μικρούς  $N_{Re}$ . Αὐξανομένου

τοῦ  $N_{Re}$ , καί πολύ πρὶν δημιουργηθῆ τυρβώδης ροή, παρατηρεῖται σχηματισμός πτυχῶν ἢ κυμάτων (ripples) ἐπὶ τοῦ πίπτοντος στρώματος τοῦ ὑγροῦ. Ὁ σχηματισμός πτυχῶν ἔχει ὡς ἀποτέλεσμα τὴν ἐπίτευξιν συντελεστῶν μεταφορᾶς θερμότητος σημαντικῶς ὑψηλοτέρων ἀπὸ τοὺς προβλεπομένους ὑπὸ τῶν ἐξισώσεων λεπτῶν στρωμάτων.

Διὰ συμπύκνωσιν ὑδρατμῶν εἰς σωλήνας ὑπὸ ἀτμοσφαιρικῆν πίεσιν δύνανται νὰ χρησιμοποιηθοῦν αἱ κατωτέρω ἀπλοποιημέναι διαστατικά ἐξισώσεις, προκύπτουσαι ἀπὸ τὰς (1-56) καί (1-59) ἀντιστοίχως:

Κατακόρυφοι σωλήνες ἢ πλάκες:

$$h=13900/[L^{1/4}\Delta T^{1/3}] \quad \text{εἰς } W/m^2K \quad (1-60)$$

Ὅριζόντιοι σωλήνες (ἐξωτερικῶς):

$$h=10800/[(ND_0)^{1/4}\Delta T^{1/3}] \quad \text{εἰς } W/m^2K \quad (1-61)$$

Ἡ συμπύκνωσις ὑπερθέρμων ἀτμῶν λαμβάνει χώραν εἰς δύο στάδια, ἥτοι οἱ ἀτμοὶ ψύχονται πρῶτον εἰς τὴν θερμοκρασίαν κορεσμοῦ, εἰς τὴν ὁποίαν ἐν συνεχείᾳ συμπυκνοῦνται. Ἡ μεταφορὰ θερμότητος μεταξὺ ὑπερθέρμων ἀτμῶν καὶ ξηρῶν τοιχωμάτων, ὁμοιάζει μὲ τὴν μεταφορὰν θερμότητος μεταξὺ ἀερίων καὶ τοιχωμάτων, οἱ δὲ ἐπιτυχχανόμενοι συντελεσταὶ εἶναι κατὰ πολὺ χαμηλότεροι τῶν συντελεστῶν συμπυκνώσεως τῶν ἀτμῶν.

Εἰς τὴν πρᾶξιν, διὰ μικρὰν σχετικῶς ὑπερθέρμανσιν χρησιμοποιεῖται ἡ βασικὴ ἐξίσωσις μεταφορᾶς θερμότητος μὲ τὸν συντελεστὴν μεταφορᾶς ( $h$ ) τῶν συμπυκνουμένων ἀτμῶν καὶ ( $\Delta T$ ) τὴν διαφορὰν θερμοκρασίας κεκορεσμένου ἀτμοῦ - τοιχώματος.

Ἡ παρουσία μὴ συμπυκνουμένου ἀερίου εἰς τοὺς ἀτμούς προκαλεῖ σημαντικὴν ἐλάττωσιν τῶν συντελεστῶν μεταφορᾶς θερμότητος λόγω τῆς συσσωρεύσεως ἐνός στρώματος δυσθερμαγωγοῦ ἀερίου πλησίον τῆς ἐπιφανείας συμπυκνώσεως. Καθίσταται ἐπομένως ἀναγκαῖα ἡ ἀπομάκρυνσις τῶν μὴ συμπυκνουμένων ἀερίων ἀπὸ τοὺς ἀτμούς εἰς τοὺς διαφόρους τύπους συμπυκνωτήρων δι' ἐξαερισμοῦ (venting).

στ) Ζέοντα Ύγρᾶ

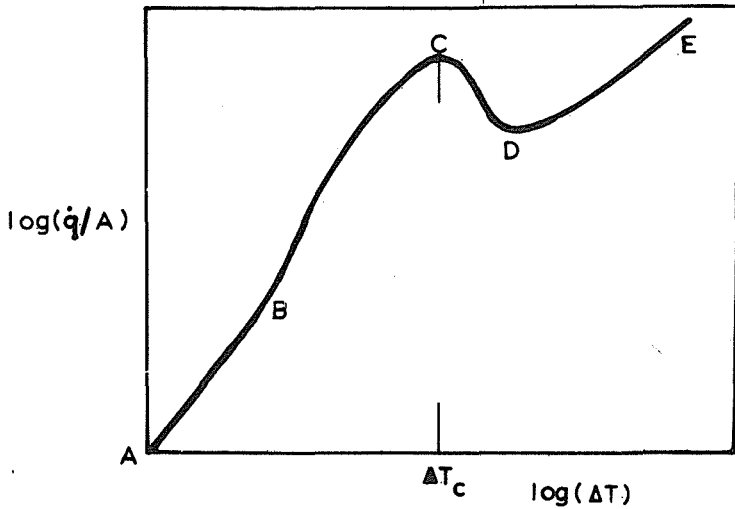
Ἡ μεταφορᾶ θερμότητος εἰς ζέοντα ὑγρά εὐρίσκει πολλές βιομηχανικὰς ἐφαρμογὰς, ὡς ἡ ἐξάτμισις, ἡ ἀπόσταξις, ἡ ἀτμο- παραγωγή καὶ ἡ ψύξις. Ἡ ἀπλουστέρα περίπτωσις ἀφορᾷ τὴν μεταφορᾶν θερμότητος εἰς κεκορεσμένα ὑγρά, ἥτοι συστήματα εἰς τὰ ὅποια οἱ σχηματιζόμενοι ἀτμοὶ εὐρίσκονται εἰς ἰσορροπίαν μὲ τὸ ὑγρὸν εἰς τὸ σημεῖον βρασμοῦ αὐτοῦ.

Κατὰ τὸν συνήθη βρασμὸν ἐνὸς ὑγροῦ σχηματίζονται μικραὶ φυσαλλίδες (πυρῆνες βρασμοῦ) ἐπὶ τῆς θερμαινομένης ἐπιφανείας, αἱ ὅποια ἀνερχόμεναι μεταφέρουν θερμότητα εἰς τὴν κυρίαν μάζαν τοῦ ὑγροῦ καὶ αὐξάνουν εἰς μέγεθος. Εἰς ὠρισμένας θερμικὰς διεργασίας ὁ βρασμὸς λαμβάνει χώραν ὑπὸ διαφορετικὰς συνθήκας, ὡς π.χ. δι' ἐκτονώσεως ὑπερθέρμου ὑγροῦ.

Λόγω τοῦ πολυπλόκου μηχανισμοῦ δέν εἶναι εὐχερῆς ἡ ἔκφρασις τοῦ βρασμοῦ δι' ἀναλυτικῶν ἐξισώσεων. Ὁ συντελεστής μεταφορᾶς θερμότητος ζεόντων ὑγρῶν προσδιορίζεται συνήθως διὰ πειραματικῶν μετρήσεων. Ὁ φαινομενικὸς μηχανισμὸς βρασμοῦ ἐνὸς ὑγροῦ παρίσταται εἰς πειραματικὰ διαγράμματα τοῦ ρυθμοῦ ροῆς θερμότητος ( $\dot{q}/A$ ) ὡς πρὸς τὴν διαφορᾶν θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ). Τὰ πλεῖστα τῶν διαγραμμάτων τούτων λαμβάνονται διὰ βρασμοῦ δοθέντος ὑγροῦ διὰ θερμάνσεως μὲ ἐμβαπτισμένον σῦρμα ἡλεκτρικῆς ἀντιστάσεως. Ὡς ( $\Delta T$ ) λαμβάνεται ἡ διαφορὰ μεταξὺ τῆς θερμοκρασίας τῆς ἐξωτερικῆς ἐπιφανείας θερμάνσεως (σύρματος) καὶ τῆς θερμοκρασίας τοῦ ζέοντος ὑγροῦ (Σχ. 1-10).

Ἐκ τοῦ Σχ. (1-10) προκύπτει ὅτι αὐξανομένης τῆς ( $\Delta T$ ) αὐξάνεται λογαριθμικῶς ὁ ρυθμὸς ροῆς θερμότητος (περιοχὴ ABC) μέχρι μιᾶς μεγίστης τιμῆς (C). Πέραν τοῦ σημείου (C), παρατηρεῖται ἐλάττωσις τοῦ ρυθμοῦ ροῆς καὶ ἀκολούθως συνεχῆς αὔξησις αὐτοῦ μετὰ τῆς ( $\Delta T$ ).

Εἰς τὴν περιοχὴν (ABC) λαμβάνει χώραν πυρηνογενῆς βρασμὸς ἥτοι βρασμὸς διὰ σχηματισμοῦ φυσαλλίδων (nucleate boiling). Εἰς τὴν περιοχὴν (CD) ὁ βρασμὸς λαμβάνει χώραν δι' ἀγωγῆς θερμότητος μέσω λεπτοῦ στρώματος ἀτμῶν (film boiling),



Σχ. 1-10. Μεταφορά θερμότητας εις ζέοντα υγρά

τό όποϊον καλύπτει τήν θερμαντικήν έπιφάνειαν καί έλαττώνει σημαντικώς τόν ρυθμόν μεταφοράς θερμότητας. Ό βρασμός ύ- γρου διά σχηματισμού δυσθερμαγωγού στρώματος άτμών εις έπι- φάνειαν θερμάνσεως είναι γνωστός ώς "Φαινόμενον Leidenfrost" καί τό σημείον έλαχίστου ρυθμού ροής θερμότητας (D) καλεϊ- ται "Σημείον Leidenfrost".

Αύξανόμενης τής ( $\Delta T$ ) πέραν του σημείου (D) ό ρυθμός ( $\dot{q}/A$ ) αύξάνει λογαριθμικώς καί ή θερμότης μεταφέρεται διά συνδυασμού θερμικής άγωγής καί άκτινοβολίας μέσω του στρώ- ματος άτμών. Η άκτινοβολία καθίσταται σημαντικωτέρα εις τάς ύψηλές θερμοκρασίας (βλέπε Κεφ. 1Γ).

Ό συντελεστής μεταφοράς θερμότητας διά βρασμού ( $h$ ) αύ- ξάνει λογαριθμικώς μετά τής ( $\Delta T$ ) εις τήν περιοχήν πυρηνογε- νούς βρασμού μέχρι του σημείου (C) πέραν του όποϊου παρα- τηρεϊται συνεχής έλάττωσις του ( $h$ ) αύξανόμενης τής διαφοράς θερμοκρασίας.

Εις τήν πράξιν είναι προτιμώτερον δι'οϊκονομικήν λει- τουργίαν νά έχωμεν πυρηνογενή βρασμόν, ήτοι μικράς ( $\Delta T$ ). Διά τόν βρασμόν ύδατος εύρέθησαν πειραματικώς αι τιμαί ( $\Delta T_c$ ) = 20 - 30°C καί ( $\dot{q}/A$ ) =  $9,3 \cdot 10^5$  W/m<sup>2</sup>. Εις τόν ύψηλόν τουτον ρυθμόν ροής θερμότητας άντιστοιχοϋν συντελεσταί μεταφοράς θερμότη-

τος  $h=40.000 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Ὁ συντελεστής μεταφοῶς θερμότητος αὐξάνει σημαντικῶς μετὰ τῆς θερμοκρασίας βρασμοῦ καί οὕτως ὁ βρασμός καθίσταται ταχύτερος εἰς τὰς ὑψηλὰς θερμοκρασίας. Ἀντιθέτως, κατὰ τὸν βρασμόν ὑπὸ κενόν (χαμηλαί πιέσεις) ὁ συντελεστής ( $h$ ) ἐλαττοῦται σημαντικῶς. Αἱ μεταβολαί αὗται ἔχουν σημασίαν εἰς τὴν διεργασίαν τῆς Ἐξάτμισεως (Κεφάλαιον 3).

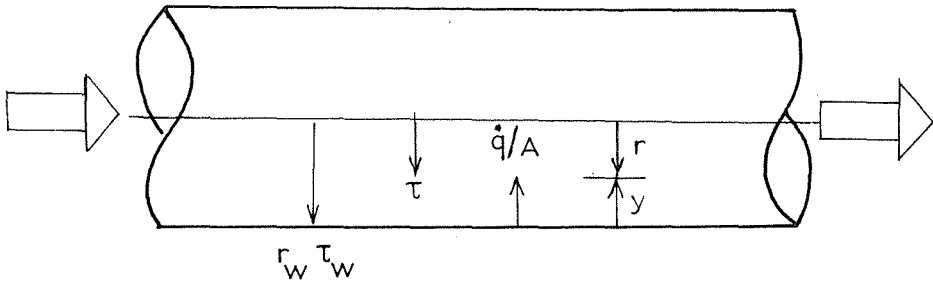
Ὑπόψυκτος Βρασμός (Subcooled boiling) καλεῖται ὁ βρασμός εἰς τμήμα ὑγροῦ, ἡ κυρία μάζα τοῦ ὁποίου εὐρίσκεται εἰς θερμοκρασίαν χαμηλοτέραν τοῦ σημείου ζέσεως διὰ τὴν πίεσιν τοῦ συστήματος. Ὁ τοπικός οὗτος βρασμός λαμβάνει χώραν εἰς μεγάλην μάζαν ὑγροῦ ἢ εἰς ὑγρὸν κινούμενον μέ μεγάλην ταχύτητα πλησίον ἐπιφανείας ὑψηλῆς θερμοκρασίας. Τυπικόν παράδειγμα ὑποψύκτου βρασμοῦ ἀποτελεῖ ἡ μεταφορά θερμότητος εἰς πυρηνικούς ἀντιδραστήρας εἰς τοὺς ὁποίους ὕδωρ ὑψηλῆς πιέσεως κυκλοφορεῖ πλησίον πυρηνικῶν στοιχείων εὐρισκομένων εἰς ὑψηλὴν θερμοκρασίαν.

Ὁ ὑπόψυκτος βρασμός τοῦ ὕδατος λαμβάνει χώραν εἰς διαφοράς θερμοκρασίας τῆς περιοχῆς  $\Delta T=50^\circ\text{C}$  ἄνω τῆς ὁποίας ὀρυθμός ροῆς θερμότητος ( $\dot{q}/A$ ) αὐξάνει ἀποτόμως καί ἐπιτυγχάνονται λίαν ὑψηλαί τιμαί τοῦ ( $\dot{q}/A$ ), π.χ.  $2,3 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ .

### ζ) Ἀναλογία Μεταφοῶς Θερμότητος καί Ὄρμης

Ἡ μεταφορά θερμότητος καί ἡ μεταφορά ὀρμῆς (ροή ρευστῶν) διὰ τυρβώδους ροῆς παρουσιάζουν πολλὰς ὁμοιότητας καί ὑφίστανται ἀναλυτικά σχέσεις μεταξὺ τῶν δύο τούτων φαινομένων. Ἀνάλογοι σχέσεις ὑφίστανται μεταξὺ μεταφοῶς θερμότητος-μάζης-ὀρμῆς (βλέπε Τεχνικὴν Φυσικῶν Διαχωρισμῶν). Αἱ σχέσεις αὗται εἶναι χρησιμώταται διότι δι' αὐτῶν εἶναι δυνατός π.χ. ὁ ὑπολογισμός τῆς μεταφοῶς θερμότητος ἀπὸ δεδομένα ροῆς ρευστῶν, τὰ ὁποῖα δυνατόν νά ληφθοῦν πειραματικῶς εὐκολώτερον.

Ἡ ἀπλουστερά ἀναλογία μεταφοῶς θερμότητος καί ὀρμῆς εἶναι ἡ ἀναλογία Reynolds ἡ ὁποία ἐξετάζεται ἐνταῦθα διὰ τὴν περίπτωσιν τυρβώδους ροῆς ἐντὸς μακρῶν σωλῆνων (Σχ. 1-11).



Σχ. 1-11. Αναλογία μεταφοράς θερμότητας και όρμης

Είς τό Σχ. (1-11) ή θερμότης θεωρείται ότι μεταφέρεται ακτινικῶς ἐκ τοῦ τοιχώματος πρὸς τὸ κέντρον τοῦ σωλήνος (κατεύθυνσις  $y$ ) ἐνῶ ή ὀρμή μεταφέρεται κατὰ τήν ἀντίθετον κατεύθυνσιν. Ἐπομένως, εἰς ἀμφοτέρας τάς περιπτώσεις ή μεταφορά θεωρεῖται ότι ἔχει κατεύθυνσιν κάθετον πρὸς τήν κατεύθυνσιν ροῆς τοῦ ρευστοῦ ἐντός τοῦ σωλήνος.

Εἰς ἀμφοτέρας τάς περιπτώσεις ή μεταφορά γίνεται διά συνδυασμοῦ μοριακῆς καί τυρβῶδους διαχύσεως καί ἰσχύουν αἱ ἐξισώσεις:

$$\dot{q}/A = -(k + \rho c_p E_H) \frac{dT}{dy} \quad (1-62)$$

$$\tau = (\eta + \rho E_M) \frac{du}{dy} \quad (1-63)$$

ὅπου  $E_H$  = συντελεστής τυρβῶδους διαχύσεως (eddy diffusivity) τῆς θερμότητος,  $m^2/s$ .

$E_M$  = συντελεστής τυρβῶδους διαχύσεως τῆς ὀρμῆς,  $m^2/s$

$\tau$  = διατμητικὴ τάσις,  $N/m^2$

Εἰς πλήρως ἀνεπτυγμένην τυρβῶδη ροήν ή διατμητικὴ τάσις ( $\tau$ ) εἶναι ἀνάλογος τῆς ἀποστάσεως ( $r$ ) ἀπὸ τὸ κέντρον τοῦ σωλήνος, ἥτοι:

$$\tau/\tau_w=r/r_w \quad (1-64)$$

όπου  $\tau_w$  = διατμητική τάσις εις τό τοίχωμα σωλήνος (ήτοι εις  $r=r_w$ )

Κατά προσέγγισιν ισχύει καί ἡ παρομοία σχέσις διά τήν μεταφοράν θερμότητος, ήτοι:

$$\frac{(\dot{q}/A)}{(\dot{q}/A)_w} = r/r_w \quad (1-65)$$

Δι' ἀντικαταστάσεως τῶν τιμῶν τῶν ἐξισώσεων (1-65), καί (1-64) εις τάς (1-62) καί (1-63) καί λαμβάνοντες ὑπ' ὄψιν ὅτι  $r=r_w-y$ , ἔχομεν:

$$\frac{\dot{q}_w}{A_w \rho C_p} (1-y/r_w) = - \left( \frac{k}{\rho C_p} + E_H \right) \frac{dT}{dy} \quad (1-66)$$

$$\frac{\tau_w}{\rho} (1-y/r_w) = \left( \frac{\eta}{\rho} + E_M \right) \frac{du}{dy} \quad (1-67)$$

όπου  $k/\rho C_p$  = συντελεστής μοριακῆς διαχύσεως τῆς θερμότητος  $m^2/s$

$\eta/\rho$  = συντελεστής μοριακῆς διαχύσεως τῆς ὀρμῆς,  $m^2/s$

Ὑπό συνθήκας τυρβώδους ροῆς εις μακροῦς σωλήνας δεχόμεθα ὅτι τό ἄθροισμα τῶν συντελεστῶν διαχύσεως τῆς θερμότητος ἰσοῦται μέ τό ἄθροισμα τῶν συντελεστῶν διαχύσεως τῆς ὀρμῆς, ήτοι:

$$k/\rho C_p + E_H = \eta/\rho + E_M \quad (1-68)$$

Διά διαιρέσεως τῶν ἐξισώσεων (1-66) καί (1-67) κατά μέλη, καί λαμβάνοντες ὑπ' ὄψιν τήν ἐξίσωσιν (1-68), ἔχομεν:

$$\frac{\dot{q}_w du}{A_w C_p \tau_w} = -dT \quad (1-69)$$

Ἡ ἐξίσωσις (1-69) ὀλοκληρουμένη μεταξύ  $u=0$  καί  $u=\bar{u}$  ἀφ' ἑνός καί  $T=T_w$  καί  $T=T$  ἀφ' ἑτέρου, δίδει:

$$\frac{\dot{q}_w \bar{u}}{A_w C_p \tau_w} = T_w - T \quad (1-70)$$

έξ ὀρισμοῦ ὄμως:  $\dot{q}/A_w = h(T_w - T)$

Συμφώνως πρὸς τὴν ἐξίσωσιν Fanning, ἡ ἐνέργεια τριβῶν εἰς σωλῆνα μήκους (L) καὶ διαμέτρου (D) δίδεται ὡς:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = 4f \frac{L}{D} \cdot \frac{\bar{u}^2}{2} \quad (1-71)$$

ὅπου  $\Delta P$  = πτώσις πιέσεως, N/m<sup>2</sup>.

$f$  = συντελεστής τριβῶν Fanning, ἀδιάστατος

Ὁ συντελεστής τριβῶν ( $f$ ) προσδιορίζεται ἀπὸ διαγράμματα τῆς Βιβλιογραφίας ὡς συνάρτησις τοῦ ἀριθμοῦ Reynolds. Σημειωτέον ὅτι: συντελεστής  $f$  (Fanning) =  $\frac{1}{4}$  συντελεστοῦ  $f$  (Mooday).

Δι' εὐθυγράμμους σωλῆνας ἡ διατμητικὴ τάσις εἰς τὸ τοίχωμα δίδεται ὑπὸ τῆς σχέσεως:

$$\tau_w = \frac{D \Delta P}{4L} \quad (1-72)$$

Ἐπομένως ἡ ἐξίσωσις Fanning γράφεται καὶ ὡς:

$$\tau_w = \frac{f}{2} \rho \bar{u}^2 \quad (1-73)$$

Οὕτως ἡ ἐξίσωσις (1-70) ἀπλοποιεῖται πρὸς τὴν ἀναλογίαν Reynolds (1-74):

$$N_{St} = \frac{h}{C_p G} = f/2 \quad (1-74)$$

ὅπου  $N_{St}$  = ἀριθμὸς Stanton

$$G = \bar{u} \rho$$

Ἡ ἀναλογία μεταφορᾶς θερμότητος καὶ ὀρμῆς ἐκφράζεται καὶ διὰ τῆς γενικωτέρας ἀναλογίας Chilton - Colburn:

$$j_H = N_{St} N_{Pr}^{2/3} = f/2 \quad (1-75)$$



όπου  $j_H$  = παράγων μεταφοράς θερμότητας

Ἡ ἐξίσωσις (1-75) ἐφαρμόζεται εἰς τὰ πλεῖστα ρευστά, ἐκτός τῶν ὑγρῶν μετάλλων, καί συμπίπτει μέ τήν ἀναλογίαν Reynolds (1-74) διὰ τὰ ἀέρια, διὰ τὰ ὅποια  $N_{pr} = 1$ .

### Γ. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Ἐκ τῶν διαφόρων μορφῶν ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας εἰς τήν Χημικήν Μηχανικήν ἐφαρμόζεται κυρίως ἡ θερμική ἀκτινοβολία. Ἡ θερμική ἀκτινοβολία καθίσταται σημαντική εἰς τὰς ὑψηλὰς θερμοκρασίας καί δύναται νά ἐπικρατήσῃ τῶν ἐτέρων δύο μηχανισμῶν μεταδόσεως θερμότητος. Ἡ ἀκτινοβολία γενικῶς μεταδίδεται διὰ ἠλεκτρομαγνητικῶν κυμάτων ἀνευ μοριακῆς κινήσεως ἢ ροῆς ρευστῶν.

#### α) Ἐκπομπή καί ἀπορρόφησης τῆς Ἀκτινοβολίας

Ἡ ἀκτινοβολία μεταδίδεται μέ τήν ταχύτητα τοῦ φωτός συμφῶνως πρός τήν βασικὴν ἐξίσωσιν:

$$c = \lambda \nu \quad (1-76)$$

ὅπου  $c$  = ταχύτης τοῦ φωτός  $3 \cdot 10^8 \text{ km/s}$

$\lambda$  = μῆκος κύματος, m

$\nu$  = συχνότης ἀκτινοβολίας, 1/s

Ἡ θερμική ἀκτινοβολία ἀντιστοιχεῖ εἰς τήν περιοχὴν τῆς ὑπερύθρου ἀκτινοβολίας τοῦ ἠλεκτρομαγνητικοῦ φάσματος, ἥτοι εἰς μῆκη κύματος 1μ ἕως 1 mm. Ἡ ἀκτινοβολία αὕτη ἐκπέμπεται ἀπὸ σώματα εὐρισκόμενα εἰς ὑψηλὰς θερμοκρασίας.

Ἡ κατανομή τῆς ἀκτινοβολουμένης ἐνεργείας εἰς διάφορα μῆκη κύματος ἐξαρτᾶται ἀπὸ τήν θερμοκρασίαν τοῦ θερμοῦ σώματος. Κατὰ κανόνα, ἀξανομένης τῆς θερμοκρασίας ἐλαττοῦται τὸ μῆκος κύματος, δηλαδή εἰς ὑψηλὰς θερμοκρασίας ἐπιτυγχάνεται ὑψηλοτέρα ἐνέργεια τῆς ἀκτινοβολίας.

Ἡ ἀκτινοβολία ἢ προσπίπτουσα ἐπὶ τινος ἐπιφανείας δύναται νά ἀπορροφηθῇ, νά ἀνακλασθῇ ἢ νά μεταδοθῇ διὰ τοῦ σώματος. Τὰ φαινόμενα ταῦτα ἐκφράζονται διὰ τῆς ἐξίσωσεως:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1-77)$$

όπου  $\alpha$  = συντελεστής απορροφήσεως (absorptivity)  
 $\rho$  = συντελεστής ανακλάσεως (reflectivity)  
 $\tau$  = συντελεστής διαβιβάσεως (transmissivity)

Οι συντελεσταί οἱ τοὶ ὀρίζονται ὡς τὰ κλάσματα τῆς προσπιπτούσης ἀκτινοβολίας ἢ ὁποῖα ἀπορροφᾶται, ἀνακλάται ἢ διαβιβάζεται διὰ τοῦ σώματος ἀντιστοίχως.

Τὰ πλεῖστα τεχνικά ὑλικά εἶναι ἀδιαφανῆ (opaque), ἦτοι ἀνακλοῦν καὶ ἀπορροφοῦν τὴν θερμότητα πλήρως ἀλλὰ δέν διαβιβάζουν αὐτήν ( $\tau=0$ ). Ὄρισμένα ὑλικά ὡς ἡ ὕαλος καὶ μερικά πλαστικά εἶναι διαφανῆ (transparent) καὶ διαβιβάζουν σημαντικόν ποσόν τῆς προσπιπτούσης θερμότητος.

Ἡ ἀπορρόφησης καὶ ἀνάκλασις τῆς ἀκτινοβολουμένης ἐνεργείας λαμβάνει χώραν εἰς τὴν ἐπιφάνειαν τοῦ ὑλικοῦ, ἐκ τῆς ὁποίας αὕτη μεταδίδεται πρὸς τὸ ἐσωτερικόν τοῦ σώματος διὰ θερμικῆς ἀγωγῆς.

Κατὰ τὸν νόμον τοῦ Kirchhoff ὁ λόγος τῆς ἐκπεμπομένης ἐνεργείας πρὸς τὸν συντελεστήν ἀπορροφήσεως εἶναι σταθερὸς δι' ὅλα τὰ σώματα εἰς δοθείσαν θερμοκρασίαν, εὐρισκόμενα εἰς θερμικὴν ἰσορροπίαν, ἦτοι:

$$w_1/a_1 = w_2/a_2 = \dots = w/a = w_B \quad (1-78)$$

όπου  $w = \dot{q}/A =$  ἐνέργεια ἐκπομπῆς,  $W/m^2$

$w_B =$  ἐνέργεια ἐκπομπῆς μέλανος σώματος

Εἰς τὸ μέλαν σῶμα (black body) ἅπασα ἡ προσπίπτουσα ἐνέργεια ἀπορροφᾶται, ἦτοι  $\alpha_B = 1$ .

Ὁ συντελεστής ἰκανότητος ἐκπομπῆς (emissivity,  $\epsilon$ ) ὀρίζεται ὡς ὁ λόγος τῆς ἀκτινοβολουμένης ἐνεργείας ὡς πρὸς τὴν ἀκτινοβολουμένην ἐνέργειαν τοῦ μέλανος σώματος διὰ τὴν αὐτὴν θερμοκρασίαν, ἦτοι:

$$\epsilon = w/w_B \quad (1-79)$$

Κατὰ τὴν θερμικὴν ἰσορροπίαν ἰσχύει ὁ νόμος τοῦ Kirchhoff (1-78), ὁ ὁποῖος συνδυαζόμενος μὲ τὴν ἐξίσωσιν (1-79) δίδει:

$$\alpha = \varepsilon$$

Είς τό τεφρόν σώμα (gray body) οί συντελεσταί άπορροφήσεως καί ικανότητος έμπομπής εΐναι ίσοι, άνεξαρτήτως του μήκους κύματος τής άκτινοβολίας.

Τά πλείστα τεχνικά ύλικά λαμβάνονται κατά προσέγγισιν ώς τεφρά σώματα, δηλαδή ο συντελεστής (ε) λαμβάνεται σταθερός ώς πρός τήν άκτινοβολίαν καί τήν θερμοκρασίαν καί άπλοποιούνται ούτως οί άναλυτικοί ύπολογισμοί.

Είς τήν πραγματικότητα, ο συντελεστής ικανότητος έμπομπής (ε) τών μετάλλων αύξάνει έλαφρώς μετά τής θερμοκρασίας ένώ είς τά μή μεταλλικά ύλικά παρατηρείται ή αντίθετος έπίδρασις τής θερμοκρασίας.

#### Π Ι Ν Α Ε 1-5

Συντελεσταί Ίκανότητος Ήμπομπής Διαφόρων Ήπιφανειών

| Ήπιφάνεια                | Θερμοκρασία °C | ε             |
|--------------------------|----------------|---------------|
| Χαλκός στιλπνός          | 100            | 0,022         |
| Ήλουμίνιον, στιλπνόν     | 200 - 500      | 0,04 - 0,06   |
| Νικέλιον, στιλπνόν       | 25             | 0,045         |
| Σίδηρος, στιλπνός        | 450 - 1.000    | 0,144 - 0,377 |
| Χυτοσίδηρος, στιλπνός    | 200            | 0,21          |
| Χυτοσίδηρος, όξειδωμένος | 200 - 600      | 0,64 - 0,78   |
| Χάλυψ, όξειδωμένος       | 200 - 600      | 0,79          |
| Ήδράργυρος               | 100            | 0,12          |
| Αίθάλη                   | 100            | 0,95          |
| Ήμίαντος                 | 25             | 0,96          |
| Πλίνθοι δομικοί          | 25             | 0,93          |
| Ήαλος                    | 25             | 0,94          |
| Χάρτης                   | 20             | 0,92          |
| Γύψος                    | 20             | 0,92          |
| Ήλαιοχρώματα             | 100            | 0,92 - 0,96   |
| Χρώματα Ήλουμινίου       | 100            | 0,30 - 0,52   |
| Ήδωρ                     | 0 - 100        | 0,95 - 0,96   |

Οι συντελεσταί (ε) εξαρτώνται κυρίως από τό είδος τής επιφανείας. Κατά κανόνα ή ικανότης έκπομπής είναι ύψηλοτέρα είς τας άνωμάλους καί όξειδωμένας επιφανείας παρά είς τας λείας καί στιλπνάς επιφανείας. Ούτως ό συντελεστής (ε) είναι τής τάξεως τοϋ 0,10 είς τά μέταλλα καί ύπερβαίνει τό 0,90 είς τά μή μεταλλικάς άνωμάλους επιφανείας. Τυπικάί τιμαί τοϋ (ε) δίδονται είς τόν Πίνακα (1-5).

## β) Μετάδοσις Θερμότητος δι' Άκτινοβολίας

Ή άκτινοβολία τοϋ μέλανος σώματος παρέχεται υπό τής έξισώσεως Stefan-Boltzmann:

$$w_B = \sigma T^4 = 5,675 \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (1-81)$$

όπου  $w_B = \dot{q}/A =$  ρυθμός άκτινοβολίας τοϋ μέλανος σώματος,  $W/m^2$

$T =$  άπόλυτος θερμοκρασία επιφανείας έκπομπής,  $K$

$\sigma =$  σταθερά Stefan-Boltzmann =  $5,675 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$

Ή ρυθμός έναλλαγής θερμότητος  $\dot{q}_{12}$  μεταξύ δύο μελανών επιφανειών  $A_1$  καί  $A_2$ , εύρισκομένων είς θερμοκρασίαν  $T_1$  καί  $T_2$  άντιστοιχώς, δίδεται υπό τής έξισώσεως:

$$\dot{q}_{12} = 5,675 A_1 F_{12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1-82)$$

όπου  $F_{12} =$  παράγων μορφής τών επιφανειών  $A_1, A_2$ , άδιάστατος,

Ή παράγων μορφής ή γεωμετρικός παράγων (view factor)  $F_{12}$  όρίζεται ως τό κλάσμα τής άκτινοβολίας τής έκπεμπομένης υπό τής επιφανείας ( $A_1$ ) καί προσπιπτούσης επί τής ( $A_2$ ), λαμβάνει δέ τιμάς μεταξύ (0) καί (1).

Ή παράγων μορφής  $F_{11}$  σημαίνει τό κλάσμα τής άκτινοβολίας τό όποϊον προσπίπτει επί τής ίδιας επιφανείας ( $A_1$ ), ως είς τήν περίπτωσιν κοίλων επιφανειών. Διά τας επίπεδους επιφανείας είναι προφανές ότι  $F_{11} = 0$ .

Ή άν ή επιφάνεια  $A_2$  περιβάλη τελείως τήν  $A_1$  ίσχύει ή σχέσις  $F_{12} = 1$ . Ή αύτή σχέσις ίσχύει καί όταν αι επιφάνειαι

$A_1$  και  $A_2$  είναι παράλληλοι άπειρων διαστάσεων, κείμενοι πλησίον άλλήλων. Εάν  $F_{21}$  ο παράγων μορφής τών επιφανειών,  $A_2$  και  $A_1$ , καθίσταται προφανές εκ τής εξέλιξής (1-82) ότι:

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (1-83)$$

Είς δοθείσαν επιφάνειαν τό άθροισμα τών παραγόντων μορφής πρέπει νά ίσοϋται, έξ όρισμοϋ, προς τήν μονάδα, ήτοι:

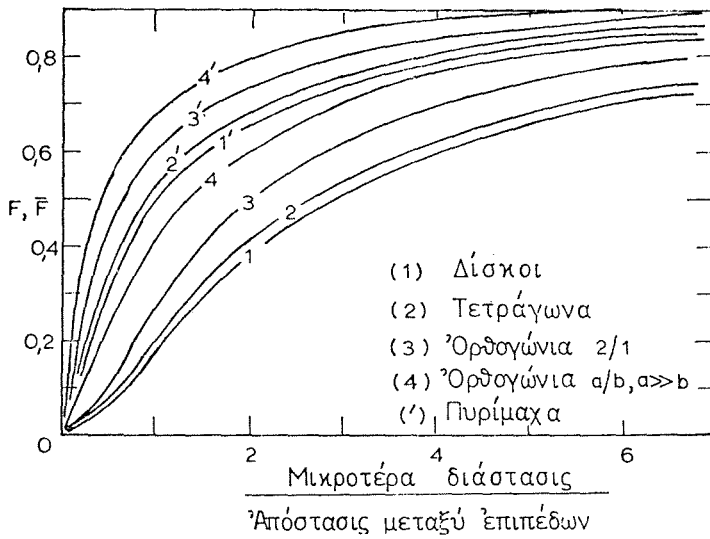
$$F_{11} + F_{12} + F_{13} + \dots = 1 \quad (1-84)$$

Οί παράγοντες μορφής (F) τών μελανών επιφανειών διαφόρων γεωμετρικών σχημάτων δύνανται νά υπολογισθοϋν διά μαθηματικής αναλύσεως. Είς τήν πράξιν όμως χρησιμοποιοϋνται τά Διαγράμματα Hotte1 τά όποια δίδουν τούς παράγοντας (F) διά τά πλέον συνήθη συστήματα. Παραδείγματα τοιούτων διαγραμμάτων δίδονται είς τά Σχ. (1-12) και (1-13).

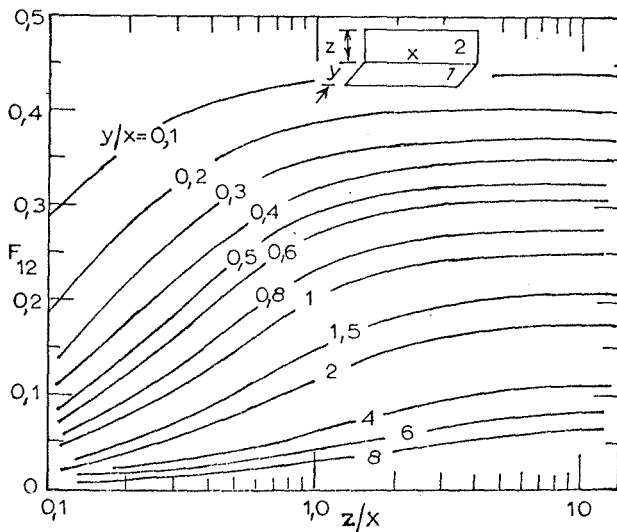
Τό Σχ. (1-12) δίδει τούς παράγοντας (F) διαφόρων παραλλήλων και ίσων επιφανειών, τοποθετημένων άκριβώς έναντι άλλήλων. Αί διατάξεις αϋται σχηματίζουν όρθογώνια παραλληλεπίπεδα ή κυλίνδρους. Διά τά συστήματα ταϋτα ίσχύει ή σχέσις  $F_{12} = F_{21} = F$  διότι  $A_1 = A_2$ . Αύξανομένης τής μεταξύ των άποστάσεως έλαττοϋται ό παράγων (F), τείνων προς τήν μονάδα δι' άπειρα επίπεδα ή διά μηδενικήν άπόστασιν.

Είς τό αύτό Σχ. (1-12) δίδονται και οι παράγοντες μορφής ( $\bar{F}$ ) μεταξύ ίσων παραλλήλων επιπέδων συνδεομένων μεταξύ των διά καθέτων πυριμάχων τοιχωμάτων. Τά πυρίμαχα (refractory) τοιχώματα έκπέμπουν εκ νέου όλην τήν προσπίπτουσαν θερμικήν ενέργειαν αλλά δέν μεταδίδουν αϋτήν είς τό έσωτερικόν δι' άγωγιής. Η παρουσία τών πυριμάχων τοιχωμάτων έχει ως αποτέλεσμα τήν αύξησιν τοϋ ρυθμοϋ μεταδόσεως θερμότητος μεταξύ τών επιφανειών  $A_1$  και  $A_2$ , δεδομένου ότι  $\bar{F}_{12} > F_{12}$ . Είς τήν περίπτωσιν ταϋτην εφαρμόζεται ή αύτή εξέλιξις (1-82) έναλλαγής θερμότητος μεταξύ τών επιφανειών  $A_1$  και  $A_2$  μέ τήν διαφοράν ότι αντί τοϋ παράγοντος ( $F_{12}$ ) χρησιμοποιειϋται ό ( $\bar{F}_{12}$ ).

Ο παράγων μορφής ( $\bar{F}$ ) μεταξύ τών παραλλήλων επιφανειών



Σχ. 1-12. Παράγοντες μορφῆς ( $F$ ) ἴσων παραλλήλων ἐπιπέδων εὐ-  
ρισκομένων ἔναντι ἀλλήλων



Σχ. 1-13. Παράγοντες μορφῆς ( $F$ ) μεταξύ ὀρθογωνίων καθέτων ἐπιπέδων

$A_1 A_2$  συνδεομένων διὰ πυριμάχων τοιχωμάτων, δύναται νά υπολογισθῆ καί διὰ τῆς ἐξισώσεως:

$$\bar{F}_{12} = F_{12} + \frac{F_{1R} F_{R2}}{1 - F_{RR}} \quad (1-85)$$

ὅπου  $R$  = πυρίμαχον τοίχωμα.

Εἰς τὴν ἐξίσωσιν (1-85) ἡ ἐπιφάνεια τοῦ πυριμάχου τοιχώματος θεωρεῖται ὅτι ἔχει σταθεράν θερμοκρασίαν.

Εἰς τό Σχ. (1-13) δίδονται οἱ παράγοντες μορφῆς  $F_{12}$  ἢ  $F_{21}$  δι' ὀρθογωνίους ἐπιφανείας καθέτους ἐπ' ἀλλήλας. Γενικῶς εἰς τὴν μετάδοσιν θερμότητος δι' ἀκτινοβολίας ἐκλέγεται ὡς βάσις τῆς ἐναλλαγῆς θερμότητος ἡ κατάλληλος ἐπιφάνεια, οὕτως ὥστε νά εἶναι εὐχερῆς ἡ ἀναλυτικὴ ἔκφρασις τοῦ ρυθμοῦ μεταφορᾶς θερμότητος.

Ἡ ἐναλλαγή θερμότητος μεταξὺ δύο τεφροῦν ἐπιφανειῶν,  $A_1$  καί  $A_2$  δίδεται ὑπὸ τῆς ἐξισώσεως:

$$\dot{q}_{12} = 5,675 A_1 \Phi_{12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1-86)$$

ὅπου  $\Phi_{12}$  = συνολικὸς παράγων ἐναλλαγῆς, ἀδιάστατος

Ὁ παράγων  $\Phi_{12}$  περιέχει τοὺς γεωμετρικοὺς παράγοντας μορφῆς καί τοὺς συντελεστάς ἰκανότητος ἐκπομπῆς τῶν δύο ἐπιφανειῶν καί δίδεται ὑπὸ τῆς γενικῆς ἐξισώσεως:

$$1/\Phi_{12} = 1/\bar{F}_{12} + (1/\varepsilon_1 - 1) + (A_1/A_2)(1/\varepsilon_2 - 1) \quad (1-87)$$

ὅπου  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  = συντελεσταί ἰκανότητος ἐκπομπῆς τῶν ἐπιφανειῶν  $A_1$  καί  $A_2$  ἀντιστοίχως.

Ἐκ τῆς γενικῆς ἐξισώσεως (1-87) προκύπτουν διάφοροι ἀπλοποιημένοι μορφαί τοῦ συνολικοῦ παράγοντος ἐναλλαγῆς ( $\Phi_{12}$ ) ὡς ἀκολούθως:

Διὰ δύο παράλληλα ἐπίπεδα ἀπείρων διαστάσεων, ἀλλὰ πεπερασμένης ἀποστάσεως μεταξὺ των, ἰσχύει ἡ σχέση  $\bar{F} = F = 1$  καί ἐπομένως:

$$1/\Phi_{12} = 1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1 \quad (1-88)$$

Διά τεφράν επιφάνειαν ( $A_1$ ) περιβαλλομένην πλήρως υπό έτέρας τεφράς επιφανείας ( $A_2$ ) ίσχύει ή έξίσωσις:

$$1/\Phi_{12} = 1/\epsilon_1 + (A_1/A_2) (1/\epsilon_2 - 1) \quad (1-89)$$

Διά τεφράν επιφάνειαν  $A_1$  περιβαλλομένην πλήρως υπό μελανής επιφανείας, προκύπτει ή έξίσωσις:

$$\Phi_{12} = \epsilon_1 \quad (1-90)$$

Η τελευταία περίπτωσις συναντάται είς τήν πράξιν όταν π.χ. σωλήν περιβάλλεται τελείως υπό αέριου ή άέρος, ό όποιος θεωρείται κατά προσέγγισιν ώς μέλαν σώμα.

### γ) Θερμική Άκτινοβολία Άερών

Τά μονοατομικά καί διαατομικά άέρια ( $O_2, N_2, H_2$  κλπ.) δέν άπορροφούν τήν συνήθη θερμικήν άκτινοβολίαν. Άντιθέτως τά πολυατομικά άέρια ( $H_2O, CO_2, SO_2$  κλπ.) άπορροφούν (καί έκπέμπουν) θερμικήν άκτινοβολίαν είς ώρισμένα μήκη κύματος.

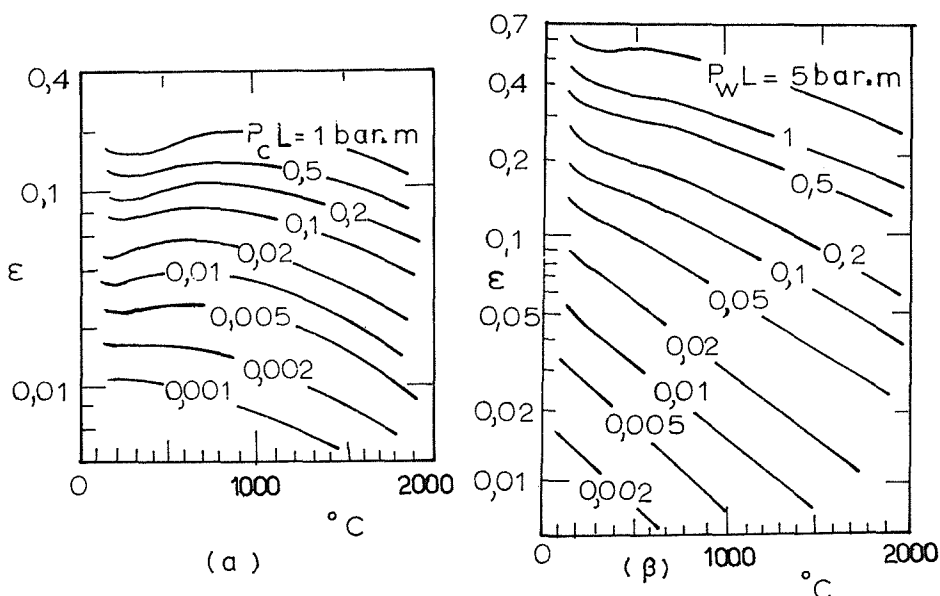
Η άπορρόφησις θερμικής ένεργείας δι' άκτινοβολίας υπό τών αερίων έξαρτάται σημαντικώς άπό τήν θερμοκρασίαν καί τήν πίεσιν. Οί συντελεσταί ικανότητος έκπομπής ώρισμένων βιομηχανικών αερίων δίδονται είς τήν Βιβλιογραφίαν.

Τό Σχ. (1-14) δίδει άπλοποιημένα διαγράμματα τών συντελεστών ( $\epsilon$ ) διά τό διοξειδίων τοϋ άνθρακος καί τούς υδρατμούς ώς συνάρτησιν τής θερμοκρασίας, είς συνολικήν πίεσιν 1 atm.

Είς τά διαγράμματα τοϋ Σχ. (1-14) χρησιμοποιείται ώς παράμετρος τό γινόμενον (PL) όπου  $P$  = μερική πίεσις τοϋ αερίου (bar) καί  $L$  = μέσον πάχος τοϋ στρώματος τοϋ αερίου (m), έξαρτώμενον έκ τής γεωμετρικής διατάξεως τοϋ συστήματος.

Διά τήν μετατροπήν τών δεδομένων τοϋ Σχ. (1-14) είς συνολικήν πίεσιν διάφορον τής 1 atm, χρησιμοποιούνται ώρισμένοι συντελεσταί διορθώσεως, οί όποιοι παρέχονται είς διαγράμματα τής Βιβλιογραφίας.





Σχ. 1-14. Συντελεσταί έκπομπής αερίων. (α) Διοξειδίου του άνθρακος, (β) ύδατος

#### δ) Συνδυασμός Μεταφοράς και Ἀκτινοβολίας Θερμότητας

Εἰς πολλές περιπτώσεις ἡ μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώραν διὰ συνδυασμοῦ μεταφοράς ἐξ ἐπαφῆς καὶ ἀκτινοβολίας. Χαρακτηριστικόν παράδειγμα συνθέτου μεταδόσεως ἀποτελεῖ ἡ ἀπώλεια θερμότητος ἀπὸ βιομηχανικὰς ἐγκαταστάσεις πρὸς τὸ περιβάλλον.

Οὕτως, ὁ ρυθμὸς συνολικῶν ἀπωλειῶν θερμότητος ἐξ ἐπιφανείας, εὐρισκομένης εἰς θερμοκρασίαν  $T_w$ , πρὸς τὸν περιβάλλοντα ἀέρα, εὐρισκόμενον εἰς θερμοκρασίαν  $T$ , δίδεται ὑπὸ τῆς ἐξισώσεως:

$$\dot{q}/A = \dot{q}_c/A + \dot{q}_r/A \quad (1-91)$$

$$\text{ὅπου } \dot{q}_c/A = h_c \Delta T \quad (1-92)$$

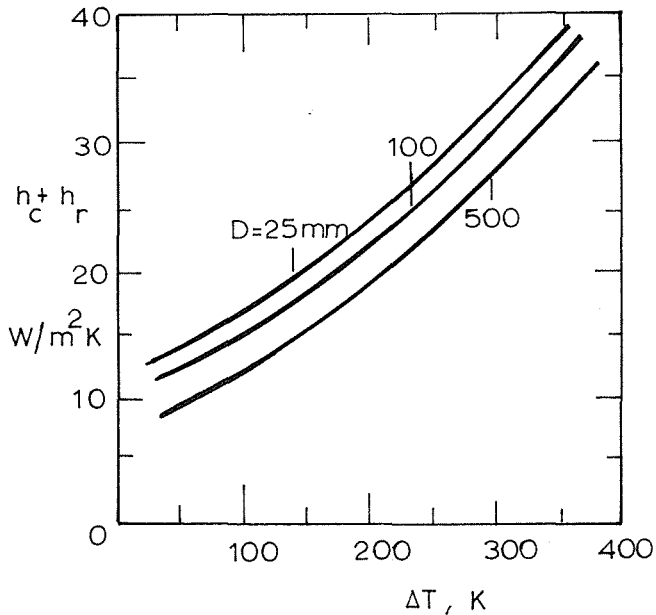
$$\dot{q}_r/A = 5,675 \Phi \left[ \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] = h_r \Delta T \quad (1-93)$$

$$\text{ὅπου } \Delta T = T_w - T.$$

Οι δείκται (c) καί (r) αντίστοιχοῦν εἰς τήν μεταφοράν ἐξ ἐπαφῆς καί τήν μετάδοσιν δι' ἀκτινοβολίας.

Ἐπομένως ,

$$\dot{q}/A = (h_c + h_r) \Delta T \quad (1-94)$$



Σχ. 1-15. Σύνθετος μετάδοσις θερμότητος δι' ἀκτινοβολίας καί μεταφορᾶς εἰς ὀριζοντίους σωλήνας (διαμέτρου D) ἐντὸς ἀτμοσφαιρικοῦ ἀέρος θερμοκρασίας 20 °C

Ὁ συντελεστής ( $h_c$ ) δύναται νά ὑπολογισθῆ ἀπό τὰς ἐμπειρικές ἐξισώσεις ἢ διαγράμματα τῆς μεταφορᾶς θερμότητος, ὁ δέ ( $h_r$ ) ἀπό τήν ἐξίσωσιν ἀκτινοβολίας (1-93). Εἰς τήν πρᾶξιν χρησιμοποιοῦνται καί ἐμπειρικοί Πίνακες ἢ Διαγράμματα, ὅπως τό διάγραμμα τοῦ Σχ. (1-15), τό ὁποῖον παρέχει τό ἄθροισμα τῶν συντελεστῶν ( $h_c + h_r$ ) δι' ὀριζοντίους σωλήνας εἰς ἀτμοσφαιρικόν ἀέρα θερμοκρασίας 20 °C.

## ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΔΟΣΕΩΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ

1. Ἡ θερμοκρασία τῶν ἀερίων εἰς τὸ ἐσωτερικὸν καμίνου εἶναι  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , τοῦ δὲ περιβάλλοντος ἀέρος  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ἡ κάμινος ἔχει κατακόρυφα ἐπίπεδα τοιχώματα ἀποτελούμενα ἀπὸ τρία στρώματα: ἐσωτερικῶς πυρίμαχοι πλίνθοι πάχους  $20\text{ cm}$ , ἐνδιαμέσως μόνωσις μαγνησίας καὶ ἐξωτερικῶς δομικοὶ πλίνθοι πάχους  $25\text{ cm}$ . Ὑπὸ συνθήκας μονίμου καταστάσεως ἡ θερμοκρασία τῆς ἐξωτερικῆς ἐπιφανείας τῶν δομικῶν πλίνθων εἶναι ἴση πρὸς  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ζητοῦνται:

- α) Ἡ ἀπώλεια θερμότητος διὰ τοῦ τοιχώματος τῆς καμίνου.
- β) Τὸ πάχος τῆς μόνωσης μαγνησίας.
- γ) Αἱ θερμοκρασίαι τῶν ἐπιφανειῶν ἐπαφῆς τῶν τοιχωμάτων.

Δεδομένα:

Θερμικαὶ ἀγωγιμότητες (σταθεραί): δομικῶν πλίνθων  $1,0$ , πυριμάχων πλίνθων  $0,25$  καὶ μαγνησίας  $0,05\text{ W/mK}$ . Συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητος ἐσωτερικοῦ καμίνου  $h_i=40$ , ἐξωτερικοῦ καμίνου  $h_0=20\text{ W/m}^2\text{K}$ .

Λύσεις:

- α) Ἐκ τῆς ἐξισώσεως (1-23) προκύπτει:

$$\begin{aligned}\dot{q}/A &= 20(323-298) \\ &= 500\text{ W/m}^2\end{aligned}$$

- β) Διὰ συνδυασμοῦ τῶν ἐξισώσεων (1-4), (1-26) καὶ (1-27), λαμβάνομεν:

$$\frac{1}{U} = \frac{1073-298}{500} = \frac{1}{40} + \frac{0,20}{0,25} + \frac{x}{0,05} + \frac{0,25}{1} + \frac{1}{20}$$

$x=2,12$  cm (ζητούμενον πάχος του στρώματος μαγνησίας).

γ) Έκ τῶν ἐξισώσεων (1-4) καί (1-27) προκύπτουν τὰ κάτωθι:

$$500 = \frac{(T_3 - 50) \cdot 1}{0,25}, \quad T_3 = 175 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$500 = \frac{(T_2 - 175) \cdot 0,05}{0,0212}, \quad T_2 = 387,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$500 = \frac{(T_1 - 387,5) \cdot 0,25}{0,2}, \quad T_1 = 787,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Πυρίμαχος πλίνθος σχήματος ὀρθογωνίου παραλληλεπίπεδου, διαστάσεων  $5 \times 8 \times 6$  cm καί ἀρχικῆς θερμοκρασίας  $20^\circ\text{C}$ , τοποθετεῖται ταχέως ἐντὸς καμίνου, τὰ ἀέρια τῆς ὁποίας εὐρίσκονται εἰς σταθεράν θερμοκρασίαν  $1000^\circ\text{C}$ . Ἐάν ἡ θερμικὴ ἀντίστασις εἰς τὴν διεπιφάνειαν πλίνθου-ἀερίων θεωρηθῇ ὡς ἀμελητέα, νὰ ὑπολογισθῇ ἡ θερμοκρασία εἰς τὸ κέντρον τοῦ πλίνθου μετὰ παρέλευσιν χρόνου 1 h.

Δ ε δ ο μ έ ν α:

Πυκνότης πλίνθου  $2500 \text{ kg/m}^3$ , θερμικὴ ἀγωγιμότης  $k=0,1 \text{ W/mK}$  καί εἰδικὴ θερμότης  $C_p=0,836 \text{ kJ/kg K}$ .

Λ ύ σ ι ς

Θεωροῦμεν τὸ δοθέν ὑλικὸν ὡς τομὴν τριῶν καθέτων πλακῶν πάχους  $2x_0=0,15 \text{ m}$ ,  $2y_0=0,08 \text{ m}$ , καί  $2z_0=0,06 \text{ m}$  ἀντιστοίχως. Ἀκολουθῶς ἐκ τοῦ διαγράμματος (1-4) ὑπολογίζονται τὰ  $\bar{Y}_{x_0}$ ,  $\bar{Y}_{y_0}$  καί  $\bar{Y}_{z_0}$ .

$$X_{x_0} = \frac{0,1 \cdot 3600}{2500 \cdot 836 \cdot 0,075^2} = 0,031 \quad \text{καί} \quad \bar{Y}_{x_0} = 0,85$$

$$X_{y_0} = \frac{0,1 \cdot 3600}{2500 \cdot 836 \cdot 0,03^2} = 0,1 \quad \text{καί} \quad \bar{Y}_{y_0} = 0,6$$

$$X_{z_0} = \frac{0,1 \cdot 3600}{2500 \cdot 836 \cdot 0,03^2} = 0,19 \quad \text{καί} \quad \bar{Y}_{z_0} = 0,5$$

Κατά συνέπειαν  $\bar{Y}=0,85 \cdot 0,6 \cdot 0,5=0,255$  ή

$$\frac{\bar{T}-1000}{20-1000}=0,255 \quad \text{καί}$$

$$\bar{T}=750 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3. Όριζόντιος μεταλλικός σωλήν όνομαστικῆς διαμέτρου 2 in ( $D_0=0,06$  m) μεταφέρει κεκορεσμένον άτμόν θερμοκρασίας 150  $^\circ\text{C}$ . Ό σωλήν είναι μονωμένος μέ στρώμα άμιάντου, πάχους 5 cm καί μέσης θερμικής άγωγιμότητας  $k=0,05$  W/m K. Η θερμοκρασία τοῦ περιβάλλοντος άέρος θεωρεΐται ότι παραμένει σταθερά είς 20  $^\circ\text{C}$  καί ή άκτινοβολία θερμότητας δύναται νά άμεληθῆ.

Ζ η τ ο ὕ ν τ α ι :

- α) Η άπώλεια θερμότητας ανά μέτρον μήκους σωλήνος
- β) Τό πάχος μονώσεως είς τό όποϊον άντιστοιχεΐ ή μεγίστη άπώλεια θερμότητας ανά μέτρον μήκους σωλήνος.

Λ ύ σ ι ς

α) Υπό συνθήκας μονίμου καταστάσεως ό ρυθμός μεταδόσεως θερμότητας μέσω τῆς μονώσεως πρέπει νά ίσοῦται μέ τόν ρυθμόν μεταφοράς θερμότητας έξ έπαφῆς τοῦ άέρος μέ τήν έξωτερικήν έπιφάνειαν τῆς μονώσεως.

Η θερμοκρασία έπαφῆς σωλήνος/μονώσεως δύναται νά ληφθῆ ως ίση πρός 150  $^\circ\text{C}$  δεδομένου ότι ή θερμική άντίστασις τοῦ μεταλλικοῦ τοιχώματος τοῦ σωλήνος είναι άμελητέα έν σχέσει πρός τήν άντίστασιν τῆς μονώσεως.

Διά τήν επίλυσιν τοῦ προβλήματος άπαιτεΐται ό προσδιορισμός τῆς θερμοκρασίας τῆς έξωτερικῆς έπιφανείας τῆς μονώσεως (T).

Ό συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μονωμένου σωλήνος/άέρος δίδεται από τήν έξίσωσιν (1-38), ἤτοι :

$$h=1,42 \left( \frac{T-20}{0,16} \right)^{1/4} = 2,2 (T-20)^{1/4}$$

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας εκ του σωλήνος προς τόν άέρα θά είναι:

$$\dot{q}/A=2,2(T-20)^{5/4} \quad \eta \quad \dot{q}/L=1,11(T-20)^{5/4}$$

όπου:  $A=\pi D_0 L=3,14 \cdot 0,16 L=0,5 L$

$L$ =μήκος του σωλήνος, m

Ο ρυθμός άγωγής θερμότητας μέσω της μονώσεως θά είναι:

$$\dot{q}/L = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,05 (150-T)}{2,3 \log(0,16/0,06)} = 0,32(150-T)$$

Δι'έξιώσεως τών ρυθμών μεταδόσεως θερμότητας προκύπτει:  $1,11(T-20)^{5/4}=0,32(150-T)$  η  $T+3,45(T-20)(T-20)^{1/4}=150$ .

Η τελευταία έξιωσις έπιλυομένη διά δοκιμής και σφάλματος η άριθμητικώς (π.χ. μέθοδος Newton) δίδει:

$$T = 36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας θά είναι:

$$h=2,2(36-20)^{1/4}=4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Και ο ρυθμός άπωλείας θερμότητας:

$$\dot{q}/L=0,32(150-36)=36,4 \text{ W/m}$$

β) Η αντίστασις της μεταδόσεως θερμότητας από τό τοίχωμα του σωλήνος προς τόν περιβάλλοντα άέρα (R) ίσοϋται μέ τό άθροισμα της αντίστάσεως της μονώσεως ( $R_1$ ) και της αντίστάσεως του στρώματος του άέρος ( $R_2$ ). Είς τούς σωλήνας, ως βάσις ύπολογισμού λαμβάνεται συνήθως ο ρυθμός μεταδόσεως θερμότητας ανά μέτρον μήκους ( $\dot{q}/L$ ) και έπομένως αι δύο αντίστασεις θά είναι:

$$R_1=\Delta T/(\dot{q}/L)=\frac{1}{2\pi k} \ln \frac{r}{r_1} \quad \text{και} \quad R_2=\Delta T/(\dot{q}/L)=\frac{1}{2\pi r h}$$

και έπομένως

$$R=\frac{1}{2\pi k} \ln \frac{r}{r_1} + \frac{1}{2\pi r h}$$

όπου:  $r_1, r$  = έσωτερική και έξωτερική ακτίς τής μονώσεως άντιστοιχώς.

Ή μεγίστη άπώλεια θερμότητας λαμβάνει χώραν όταν  $dR/dr = 0$  ήτοι:

$$\frac{1}{2\pi kr} - \frac{1}{2\pi hr^2} = 0 \text{ και έπομένως } r = k/h$$

Δηλαδή ή μεγίστη άπώλεια θερμότητας λαμβάνει χώραν όταν ή έξωτερική ακτίς τής μονώσεως  $r$  (είς m) ίσοϋται μέ τόν λόγο  $k/h$ . Ένταϋθα, διά μίαν μέσην τιμήν  $h=5$ , θά είναι κρισιμος ακτίς  $r=0,05/5=0,01$  m.

Έπειδή όμως ή ακτίς του μεταλλικοϋ σωλήνος είναι  $r_1 = 0,03$  m, ήτοι μεγαλύτερα τής κρισίμου ακτίνος, είς τήν παροϋσαν περίπτωσιν οιαδήποτε αύξησις του πάχους τής μονώσεως θά έπιφέρη έλάττωσιν τών άπωλειών θερμότητας.

4. Άήρ άτμοσφαιρικής πιέσεως διαβιβάζεται με ρυθμόν 100 kg/h δι' όριζοντίου σωλήνος έσωτερικής διαμέτρου 3cm και μήκους 10 m.

Ζ η τ ο υ ν τ α ι :

- α) Ό συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
- β) Ή πτώσις πιέσεως.
- γ) Αί τιμαί τών (α) και (β) όταν διπλασιασθή ή παροχή άέρος.

Δ ε δ ο μ έ ν α :

Φυσικάί ιδιότητες άέρος (σταθεραί):  $\rho=1,2$  kg/m<sup>3</sup>,  $\eta=0,02$  cP,  $C_p=1$  kJ/kg K,  $k=0,02$  W/m K.

Λ ύ σ ι ς

- α) Έκ τών έξιλώσεων (1-36) και (1-42) λαμβάνομεν:

$$N_{Re} = \frac{4 \cdot 100}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,03 \cdot 2 \cdot 10^{-5}} = 58946$$

$$N_{Pr} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{0,02} = 1$$

Κατόπιν αντικαταστάσεων είς τήν ἐξίσωσιν (1-43) προκύπτει

$$N_{Nu} = 0,023 \cdot 58946^{0,8} \cdot 1^{0,4} = 150$$

καί 
$$h = \frac{150 \cdot 0,02}{0,03} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$$

β) Ἐκ τῆς ἐξισώσεως (1-71) λαμβάνομεν (διά λείους σωλήνας  $f=0,005$  ἀπό τό διάγραμμα Fanning.  $\bar{u}=32,7 \text{ m/s}$

$$\Delta P = 1,2 \cdot 4 \cdot 0,005 \cdot \frac{10}{0,03} \cdot \frac{32,7^2}{2} = 4290 \text{ N/m}^2 = 0,043 \text{ bar}$$

γ) Διπλασία παροχή συνεπάγεται διπλάσιον  $N_{Re}$ . Οὕτω προκύπτει ἡ σχέση:  $h'/h=2^{0,8}$  ὅπου τό  $h'$  ἀναφέρεται είς τήν διπλασίαν παροχήν:

$$h' = 100 \cdot 1,74 = 174 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ὅμοίως διά διπλασίαν παροχήν ἔχομεν διπλασιασμόν τῆς ταχύτητος καί οὕτω λαμβάνομεν:  $\Delta P'/\Delta P = 2^2$ , ὅπου  $\Delta P'$  ἡ ἀντίστοιχοῦσα είς τήν διπλασίαν παροχήν πρῶσις πιέσεως:

$$\Delta P' = 17160 \text{ N/m}^2 = 0,17 \text{ bar}$$

5. Ὅριζόντιος χαλύβδινος σωλήν ἐξωτερικῆς διαμέτρου 150 mm εὐρίσκεται είς σταθεράν θερμοκρασίαν  $150^\circ\text{C}$  καί ἡ θερμοκρασία τοῦ περιβάλλοντος ἀέρος εἶναι  $20^\circ\text{C}$ .

Ζ η τ ο ὕ ν τ α ι :

α) Ἡ ἀπώλεια θερμότητος ἀνά (m) μήκους σωλήνος λόγω μεταφορᾶς καί ἀκτινοβολίας.

β) Ἡ ἀπώλεια θερμότητος ἐάν ὁ σωλήν βαφῆ ἐξωτερικῶς μέ χροῶμα ἀλουμινίου. Ἡ θερμοκρασία τοῦ σωλήνος παραμένει σταθερά ( $150^\circ\text{C}$ ).

γ) Εἰς ποίαν θερμοκρασίαν ἡ ἀπώλεια θερμότητος δι' ἀ-



κτινοβολίας ίσοϋται με την απώλειαν δια μεταφορας δια τον  
αβαφον και τον βαμμενον σωληνα;

Απαντησεις:

α)  $\dot{q}/L=472+520=992 \text{ W/m}$ ,

β)  $\dot{q}/L=750 \text{ W/m}$ ,

γ)  $129^{\circ}\text{C}$ ,  $222^{\circ}\text{C}$

## 2. ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ

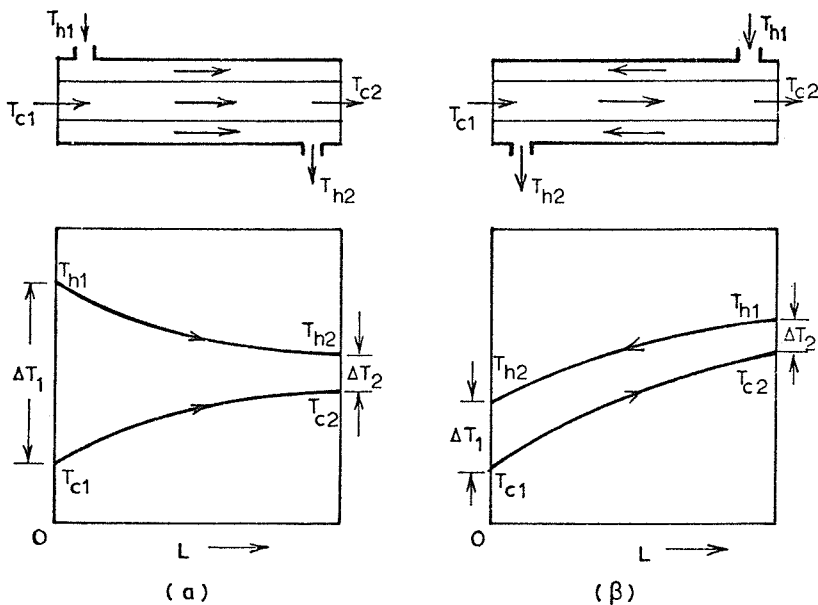
Ἡ μετάδοσις θερμότητος εἰς τὰς θερμικὰς διεργασίας τῆς Χημικῆς Μηχανικῆς πραγματοποιεῖται διὰ τῶν Ἐναλλακτῶν θερμότητος (Heat Exchangers), οἱ κυριώτεροι τύποι τῶν ὁποίων ἐξετάζονται εἰς τό παρὸν Κεφάλαιον. Οἱ εἰδικοί τύποι ἐναλλακτῶν θερμότητος, οἱ χρησιμοποιούμενοι εἰς τὴν Ἐξάτμισιν, τὴν Ὑγρανσιν καί τὴν Ξήρανσιν ἐξετάζονται εἰς τὰ οἰκεῖα Κεφάλαια.

Εἰς τὰς πλείστας βιομηχανικὰς ἐγκαταστάσεις ἡ μετάδοσις θερμότητος λαμβάνει χώραν μεταξὺ δύο ρευστῶν, χωριζομένων δι' ἑνὸς τοιχώματος (συνήθως μεταλλικοῦ). Τό κυριώτερον μέγεθος ὑπολογισμοῦ τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος εἶναι ἡ ἐπιφάνεια ἐναλλαγῆς, ἥτοι ἡ ἐπιφάνεια διὰ τῆς ὁποίας μεταδίδεται ἡ ἀπαιτουμένη ποσότης θερμότητος. Διὰ τόν ὑπολογισμόν τῆς ἐπιφανείας ἐναλλαγῆς ἀπαιτεῖται ἡ γνῶσις τῆς διαφορᾶς θερμοκρασίας καί τοῦ συνολικοῦ συντελεστοῦ μεταφορᾶς θερμότητος.

Ἡ μελέτη τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος περιλαμβάνει καί ὑπολογισμούς τῆς πτώσεως πιέσεως, ἡ ὁποία, δι' οἰκονομικούς λόγους, δέν πρέπει νά εἶναι ὑψηλή διὰ δοθέν σύστημα ροῆς. Ἡ ροή ρευστῶν μελετᾶται λεπτομερέστερον εἰς τὰ Φαινόμενα Μεταφορᾶς καί τὴν Τεχνικὴν τῶν Ρευστῶν.

## α) Ρυθμός Έναλλαγής Θερμότητας

Διά την κατανόησιν τών βασικῶν σχέσεων έναλλαγῆς θερμότητος ἐξετάζεται πρῶτον ἡ ἀπλουστέρα μορφή ἐναλλάκτου, ἥ-τοι δύο ὁμοαξονικοὶ σωλῆνες διὰ τῶν ὁποίων διέρχονται τὰ δύο ρευστά, τό ἓν εἰς τόν ἐσωτερικόν σωλῆνα καί τό ἕτερον εἰς τόν δακτυλιοειδή χῶρον. Ὁ ἐναλλάκτης διπλοῦ σωλῆνος δύναται νά λειτουργήσῃ εἴτε καθ' ὁμορορῆν (παράλληλον ροήν) ἢ κατ' ἀντιρορῆν (Σχ. 2-1).



Σχ. 2-1. Ἀπλοὶ ἐναλλάκται θερμότητος (α) ὁμορορῆς καὶ (β) ἀντιρορῆς

Αἱ θερμοκρασίαι τῶν δύο ρευστῶν εἰς τὰ σημεῖα εἰσόδου καί ἐξόδου τοῦ ἐναλλάκτου εἶναι κατὰ κανόνα γνωσταί καί συμβολίζονται εἰς τόν Πίνακα 2-1. Τό ρευστόν τοῦ ἐσωτερικοῦ σωλῆνος θεωρεῖται αὐθαιρέτως ὡς ψυχρόν, τό δέ ρευστόν τοῦ δακτυλίου ὡς θερμόν.

Εἰς τούς ὑπολογισμούς έναλλαγῆς θερμότητος χρησιμοποιοῦνται αἱ μέσαι θερμοκρασίαι τῶν ρευστῶν, αἱ ὁποῖαι ἀντι-

## Π Ι Ν Α Ε 2-1

Σύμβολα Θερμοκρασιῶν Ἐναλλακτῶν Θερμότητας

| Σύμβολον     | Θερμοκρασία                                |
|--------------|--|
| $T_{C1}$     | Εἰσόδου ψυχροῦ ρευστοῦ                     |
| $T_{C2}$     | Ἐξόδου ψυχροῦ ρευστοῦ                      |
| $T_{h1}$     | Εἰσόδου θερμοῦ ρευστοῦ                     |
| $T_{h2}$     | Ἐξόδου θερμοῦ ρευστοῦ                      |
| $\Delta T_1$ | $T_{h1} - T_{C1}$ δι' ἐναλλάκτας ὁμορροῆς  |
| $\Delta T_1$ | $T_{h2} - T_{C1}$ δι' ἐναλλάκτας ἀντιρροῆς |
| $\Delta T_2$ | $T_{h2} - T_{C2}$ δι' ἐναλλάκτας ὁμορροῆς  |
| $\Delta T_2$ | $T_{h1} - T_{C2}$ δι' ἐναλλάκτας ἀντιρροῆς |

στοιχοῦν εἰς τὰς θερμοκρασίας μίξεως τῶν ρευστῶν εἰς δοθεί-  
σαν διατομήν. Εἰς τὴν πραγματικότητα ὑφίσταται σημαντικὴ δια-  
φορὰ θερμοκρασίας μεταξὺ τῶν διαφόρων στρωμάτων τοῦ ρευστοῦ  
ἐντὸς τῶν ἀγωγῶν.

Ὡς ἐξηγεῖται ἀναλυτικώτερον κατωτέρω (2δ), εἰς τοὺς ἐ-  
ναλλάκτας θερμότητος προτιμᾶται ἡ λειτουργία κατ' ἀντιρροήν  
(counter-current flow), διὰ τῆς ὁποίας ἐπιτυγχάνεται μεγα-  
λυτέρα ἀπόδοσις, ἀπὸ τὴν λειτουργίαν καθ' ὁμορροήν (cocur-  
rent flow). Εἰς τὴν διάταξιν ὁμορροῆς καθίσταται ἀδύνατος ἡ  
προσέγγισις τῆς θερμοκρασίας ἐξόδου τοῦ ἑνὸς ρευστοῦ πρὸς  
τὴν θερμοκρασίαν εἰσόδου τοῦ ἑτέρου καὶ ἐπομένως δέν γίνε-  
ται πλήρης ἐκμετάλλευσις τῆς διαφορᾶς θερμοκρασίας μεταξὺ  
τῶν δύο ρευστῶν.

Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις, π.χ. εἰς τοὺς ἐναλλάκτας πολ-  
λαπλῶν διαβάσεων, τμήματα τοῦ ἐναλλάκτου λειτουργοῦν καθ' ὁ-  
μορροήν διὰ τεχνικούς λόγους μὲ ἀποτέλεσμα τὴν ἀναγκαστικὴν  
μείωσιν τῆς ἀποδόσεως τοῦ συστήματος.

Οἱ ἐναλλάκται θερμότητος λειτουργοῦν συνήθως εἰς μόνι-  
μον κατ᾽στάσιν καὶ ἡ μεταβολὴ τῆς ἐνθαλπίας ἐκάστου ρευστοῦ  
δίδεται ὑπὸ τῆς ἐξισώσεως:

$$\dot{q} = \dot{m}(H_2 - H_1) \quad (2-1)$$

όπου  $\dot{q}$  = μεταβολή της ένθαλπιας του ρευστού, W

$\dot{m}$  = ρυθμός ροής του ρευστού, kg/s

$H_1, H_2$  = ένθαλπιαί του ρευστού είς τήν είσοδον καί τήν έξοδον του έναλλάκτου άντιστοιχως, J/kg.

Έάν ή είδική θερμότης του ρευστου δέν μεταβάλλεται αίσητηώς μετά της θερμοκρασίας, ή έξίσωσις (2-1) γράφεται ως:

$$\dot{q} = \dot{m} C_p (T_2 - T_1) \quad (2-2)$$

όπου  $C_p$  = είδική θερμότης του ρευστου, J/kg K

$T_1, T_2$  = μέσαι θερμοκρασίαι είσόδου καί έξόδου των ρευστων είς τον θεωρούμενον έναλλάκτην θερμότητος, K.

Η μέση θερμοκρασία ή θερμοκρασία μίξεως όρίζεται ως ή θερμοκρασία του ρευστου εάν τουτο άναμιχθή άδιαβατικώς είς δοθείσαν διατομήν του άγωγου.

Είς τούς έναλλάκτας θερμότητος αι άπώλειαι θερμότητος προς τό περιβάλλον είναι γενικώς μικραί έν συγκρίσει προς τάς μεταβολάς της ένθαλπιας των ρευστων καί δύνανται νά άμεληθοϋν. Ως άμελητέα θεωρεΐται επίσης καί ή ένέργεια των τριβών (θερμότης) λόγω ροής. Υπό τάς συνθήκας ταύτας αι μεταβολαί ένθαλπιας των δύο ρευστων ( $\dot{q}$ ), είναι ίσαι μεταξύ των.

Η έξίσωσις (2-2) ίσχύει διά θερμαινόμενα ή ψυχόμενα ρευστά άνευ άλλαγής φάσεως. Είς περιπτώσεις άλλαγής φάσεως (π.χ. συμπύκνωσις άτμών) ίσχύει ή έξίσωσις:

$$\dot{q} = \dot{m} [\lambda + C_p (T_b - T_2)] \quad (2-3)$$

όπου  $\lambda$  = θερμότης έξατμίσεως, J/kg

$T_b$  = θερμοκρασία συμπυκνώσεως

$T_2$  = θερμοκρασία έξόδου υποψύκτου συμπυκνώματος

Ο ρυθμός μεταδόσεως θερμότητος ( $d\dot{q}$ ) είς διαφορικήν έπιφάνειαν ( $dA$ ) έναλλάκτου θερμότητος δίδεται υπό της βασικης έξισώσεως έναλλαγής:

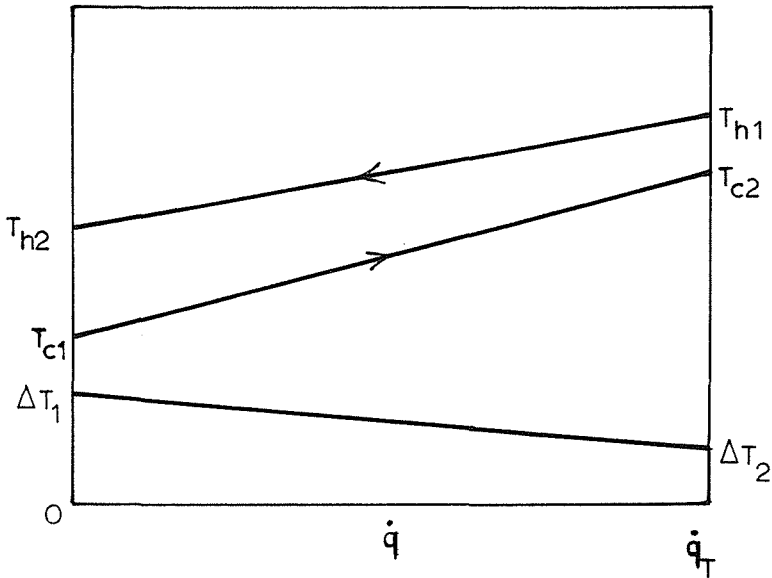
$$d\dot{q}/dA = U \Delta T \quad (2-4)$$

όπου  $U$  = συνολικός συντελεστής μεταφορής θερμότητος, W/m<sup>2</sup>K

$\Delta T$  = διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμού και ψυχρού ρευστού.

Δι' ολοκληρώσεως τῆς ἐξισώσεως (2-4) ὑπολογίζεται ἡ ἀπαιτούμενη ἐπιφάνεια ἐναλλαγῆς (A). Διακρίνονται τρεῖς περιπτώσεις:

1. Σταθερά  $U$ ,  $C_p$  καὶ ροή κατ' ἀντιροήν ἢ καθ' ὁμοροήν. Τό Σχ. (2-2) παριστᾷ τὰς θερμοκρασίας (T) ἐναλλάκτου θερμότητος κατ' ἀντιροήν ὡς πρὸς τὴν μεταφερομένην ποσότητα θερμότητος ( $\dot{q}$ ). Αἱ γραμμαὶ τῶν θερμοκρασιῶν εἶναι εὐθεῖαι διότι αἱ εἰδικαὶ θερμότητος ( $C_p$ ) ἐλήφθησαν σταθεραί.



Σχ. 2-2. Κατανομή θερμοκρασιῶν εἰς ἀπλοῦς ἐναλλάκτας θερμότητος ἀντιροῆς

Ἐπὶ τοῦ αὐτοῦ διαγράμματος δεικνύεται ὅτι ἡ διαφορά θερμοκρασίας τῶν δύο ρευστῶν ( $\Delta T$ ) μεταβάλλεται γραμμικῶς, ὡς πρὸς τὴν ποσότητα θερμότητος  $\dot{q}$ , ἥτοι:

$$-\frac{d(\Delta T)}{d\dot{q}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\dot{q}_T} \quad (2-5)$$

ὅπου  $\dot{q}_T$  = συνολικῶς μεταφερομένη θερμότης

Διά συνδυασμοῦ τῶν ἐξισώσεων (2-4) καί (2-5) λαμβάνεται :

$$\frac{d(\Delta T)}{U \Delta T} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\dot{q}_T} dA \quad (2-6)$$

Ἐάν ὁ συνολικός συντελεστής μεταφοῶς θερμότητος ( $U$ ) ληφθῆ ὡς σταθερός, προκύπτει ἡ γενικὴ ἐξίσωσις τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος :

$$\dot{q}/A = U \Delta T_L \quad (2-7)$$

ὅπου  $\Delta T_L = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)}$  = λογαριθμικὴ μέση διαφορά θερμοκρασίας (log mean temperature difference).

Ἡ ἐξίσωσις (2-7) προκύπτει καί διὰ μαθηματικῆς ἀναλύσεως ἀπὸ τὴν ἐξίσωσιν (2-4).

**2.** Γραμμικὴ μεταβολὴ τοῦ συντελεστοῦ ( $U$ ) μετὰ τῆς θερμοκρασίας, σταθερὰ  $C_p$  καί ροὴ κατ'ἀντιρορὴν ἢ καθ' ὁμορορὴν. Εἰς τὴν περίπτωσιν ταύτην ἐφαρμόζεται ἡ ἐξίσωσις :

$$\dot{q}/A = \frac{U_2 \Delta T_1 - U_1 \Delta T_2}{\ln(U_2 \Delta T_1 / U_1 \Delta T_2)} \quad (2-8)$$

ὅπου  $U_1, U_2$  = συνολικοὶ συντελεσταὶ μεταφοῶς θερμότητος εἰς τὰ δύο ἄκρα τοῦ ἐναλλάκτου θερμότητος.

**3.** Γενικὴ περίπτωσις, κατὰ τὴν ὁποίαν τὰ  $U$  καί τὰ  $C_p$  μεταβάλλονται καθ' ὅλον τὸ μῆκος τοῦ ἐναλλάκτου θερμότητος. Ἡ ἐξίσωσις (2-4) ὁλοκληρουμένη δίδει τὴν ἐπιφάνειαν ἐναλλαγῆς :

$$A = \int_0^{\dot{q}_T} \frac{d\dot{q}}{U \Delta T} \quad (2-9)$$

Τὸ ὁλοκλήρωμα τῆς ἐξισώσεως (2-9) προσδιορίζεται γραφικῶς εἰς διάγραμμα μέ συντεταγμένας ( $1/U \Delta T$ ) καί ( $\dot{q}$ ). Πρὸς τοῦτο προσδιορίζεται ὁ συντελεστής ( $U$ ), ἡ διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) καί ἡ μεταφερομένη θερμότης ( $\dot{q}$ ) εἰς διάφορα σημεῖα κατὰ μῆκος τοῦ ἐναλλάκτου θερμότητος. Ἡ μεταβολὴ τῶν

συντελεστών μεταφοράς θερμότητας ( $h$  και  $U$ ) όφείλεται εἰς τήν μεταβολήν τῶν φυσικῶν ἰδιοτήτων τῶν ρευστῶν (κυρίως τοῦ ἰξώδους) μετά τῆς θερμοκρασίας κατά μήκος τοῦ ἐναλλάκτου.

Ἐάν αἱ διαφοραὶ θερμοκρασίας  $\Delta T_1$  καὶ  $\Delta T_2$  ἔχουν παραπλησίας τιμὰς, ἐνδείκνυται ἡ χρῆσις τῆς μέσης ἀριθμητικῆς θερμοκρασίας  $\Delta T_M = (\Delta T_1 + \Delta T_2) / 2$  ἀντὶ τῆς λογαριθμικῆς μέσης διαφορᾶς θερμοκρασίας ( $\Delta T_L$ ), ὀριζομένης εἰς τήν ἐξίσωσιν (2-7). Ὁ λόγος τῶν δύο τούτων ποσοτήτων δίδεται ὑπὸ τῆς ἐξίσωσως:

$$\Delta T_M / \Delta T_L = \frac{(\Delta T_1 + \Delta T_2) / 2}{(\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = \frac{\Delta T_1 / \Delta T_2 + 1}{2(\Delta T_1 / \Delta T_2 - 1)} \ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right) \quad (2-10)$$

Ἡ ἐξίσωσις (2-10) παρίσταται γραφικῶς εἰς τό Σχ. (2-3).

Ἐκ τῆς γραφικῆς ταύτης παραστάσεως καθίσταται ἐμφανές ὅτι διὰ τιμὰς τοῦ λόγου ( $\Delta T_1 / \Delta T_2$ ) μεταξὺ 0,7 καὶ 1,0 ἀντικατάστασις τῆς  $\Delta T_L$  ὑπὸ τῆς  $\Delta T_M$  συνεπάγεται σφάλμα μικρότερον τοῦ 1%.

## β) Συντελεσταὶ Μεταφορᾶς Θερμότητας

Οἱ συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητας ἐντὸς ἀγωγῶν ( $h_i$ ) ὑπολογίζονται συνήθως ἀπὸ τὰς ἐμπειρικὰς ἐξισώσεις (1-43), (1-45) κλπ., ἐάν ὑπάρχουν ἐπαρκῆ δεδομένα ροῆς καὶ θερμοφυσικῶν ἰδιοτήτων τοῦ ρευστοῦ. Μὲ ἀναλόγους ἐξισώσεις τῆς Βιβλιογραφίας ὑπολογίζονται καὶ οἱ συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητας τοῦ ἐξωτερικοῦ τῶν ἀγωγῶν ( $h_o$ ). Ἡ ροὴ εἰς τό ἐξωτερικόν τῶν σωλήνων (κέλυφος) τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητας εἶναι συνήθως τυρβώδης λόγω τῶν μεταβολῶν τῆς διατομῆς καὶ τῶν ἀλλαγῶν κατευθύνσεως τοῦ ρευστοῦ (ἀνακλαστήρες), μὲ ἀποτέλεσμα οἱ συντελεσταὶ ( $h_o$ ) νὰ εἶναι κατὰ κανόνα μεγαλύτεροι τῶν ἀντιστοίχων ( $h_i$ ).

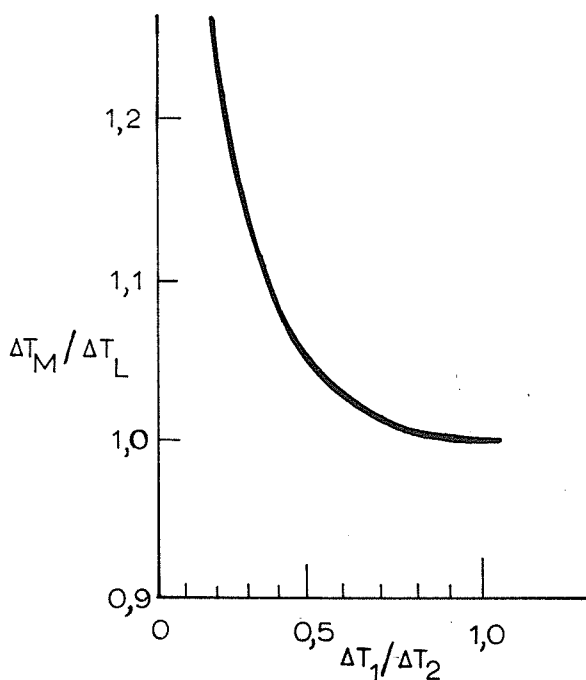
Οἱ συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητας ( $h_i$ ) καὶ ( $h_o$ ) δύνανται νὰ ὑπολογισθοῦν προσεγγιστικῶς ἀπὸ ἐμπειρικὰ διαγράμματα καὶ νομογραφήματα τῆς Βιβλιογραφίας ἀπὸ δεδομένα ρυθμοῦ ροῆς καὶ θερμοφυσικῶν ἰδιοτήτων τοῦ ρευστοῦ. Τό Σχ.



(Σ-4) του Παραρτήματος δεικνύει τās περιοχās μεγέθους τών διαφόρων συντελεστών μεταφοράς θερμότητας.

Οί μερικοί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας προσδιορίζονται πειραματικώς διά δύο κυρίων μεθόδων:

1. Δι'έκλογής καταλλήλου πειραματικού συστήματος είς τό όποϊον αϊ μερικάί θερμικάί άντιστάσεις είναι άμελητέαι έκτός μιās, ή όποία καί προσδιορίζεται. Τοιοϋτον σύστημα άποτελεϊ π.χ. ή θέρμανσις ύγρου ύψηλου ίξώδους ή αερίου έντός μεταλλικου άγωγου, θερμαινομένου έξωτερικώς διά συμπυκνώσεως άτμου. Είς τήν περίπτωσιν ταύτην ό μερικός συντελεστής του έσωτερικου του άγωγου ( $h_i$ ) ίσοϋται κατά προσέγγισιν πρός τόν συνολικόν συντελεστήν ( $U_i$ ), προσδιοριζομένου πειραματικώς έκ τής έξισώσεως (2-7).



Σχ. 2-3 Γραφική λύσις τής έξισώσεως (2-10)

2. Δι' έκλογής πειραματικού συστήματος εις τό όποιον μεταβάλλεται μόνον ή μελετωμένη θερμική αντίστασις, ένω αι έξτεραι αντίστασεις θεωρούνται σταθεραί. Ή περίπτωσης αύτη έξετάζεται κατωτέρω ώς ή γραφική μέθοδος Wilson.

Εις τήν πράξιν, χάριν άπλοποιήσεως, προσδιορίζονται οι μέσοι συντελεσταί μεταφοράς θερμότητος βάσει τής μέσης θερμοκρασίας τών ρευστών. Άκριβεστέρα άνάλυσις άπαιτεϊ τόν προσδιορισμόν τών τοπικών συντελεστών, βάσει τών ιδιοτήτων τών ρευστών τών αντιστοιχουσών εις τάς τοπικάς θερμοκρασίας καί τήν εύρεσιν τοϋ μέσου συντελεστοϋ δι' όλοκληρώσεως.

Ή γραφική μέθοδος Wilson εφαρμόζεται διá τυρβώδη ροήν έντός άγωγών, θερμαινομένων διá συμπυκνώσεως άτμου έξωτερικώς τοϋ άγωγού. Εις τήν περίπτωσην ισχύει ή έξίσωσις Dittus-Boelter (1-43). Έάν ή μεταβολή τής θερμοκρασίας δέν είναι μεγάλη, αι φυσικάί ιδιότητες τών ρευστών δύνανται νά ληφθούν κατά προσέγγισιν ώς σταθεραί, όποτε ή έξίσωσις αύτη γράφεται ώς:

$$h_i = \alpha G^{0,8} \quad (2-11)$$

όπου  $\alpha$  = σταθερά μέ καταλλήλους διαστάσεις

$G$  = ρυθμός ροής μάζης έντός τοϋ άγωγού,  $\text{kg/m}^2\text{s}$

Ή συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητος, βάσει τής έσωτερικης έπιφανείας ( $U_i$ ) δίδεται ύπό τής έξισώσεως (1-32) ή όποία γράφεται καί ώς:

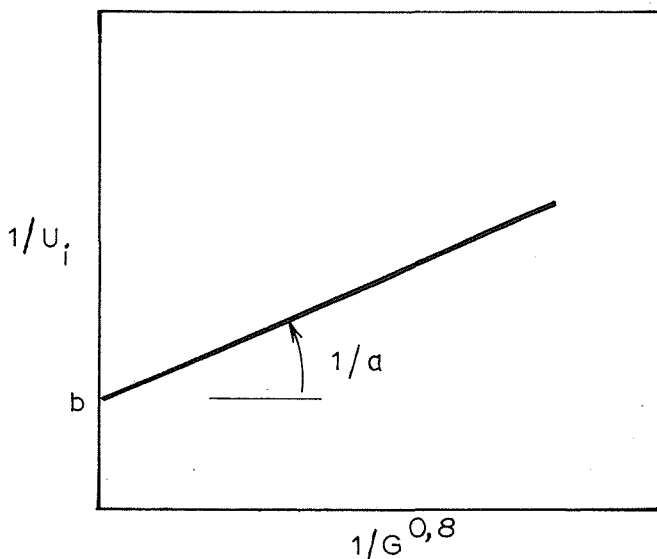
$$1/U_i = 1/\alpha G^{0,8} + b \quad (2-12)$$

όπου  $b = (A_i/A_L)(x/k) + (A_i/A_0)(1/h_0)$ .

Ή συντελεστής μεταφοράς θερμότητος τής έξωτερικης έπιφανείας ( $h_0$ ) είναι λίαν ύψηλός (συμπύκνωσις άτμών) καί δύνανται νά ληφθῆ ώς σταθερός ώς πρός τάς μεταβολάς τής ταχύτητος τοϋ ρευστοϋ έντός τοϋ άγωγού ( $G$ ). Έπομένως τό ( $b$ ) δύνανται νά θεωρηθῆ ώς σταθερόν καί ή έξίσωσις (2-12) παρίσταται γραφικώς ώς εύθεία γραμμή εις διάγραμμα μέ συντεταγμένους ( $1/U_i$ ) καί ( $1/G^{0,8}$ ).

Διά μετρήσεως τοϋ συνολικοϋ συντελεστοϋ μεταφοράς θερ-

μότητας ( $U_i$ ) εἰς διαφόρους ρυθμούς ροῆς τοῦ ρευστοῦ ( $G$ ) κατασκευάζεται τό διάγραμμα Wilson (Σχ. 2-4). Τό διάγραμμα τοῦτο παριστᾷ εὐθείαν κλίσεως ( $1/a$ ) καί ἀποτεμνουσῆς ( $b$ ). Ἐκ τῶν σταθερῶν ( $a$ ) καί ( $b$ ) καί τῶν ἐξισώσεων (2-11) καί (2-12) προσδιορίζονται οἱ συντελεσταί μεταφορᾶς θερμότητος  $h_i$  καί  $h_o$  ἀντιστοίχως.



Σχ. 2-4. Γραφικός προσδιορισμός τῶν συντελεστῶν μεταφορᾶς θερμότητος (μέθοδος Wilson)

### γ) Συντελεσταί Ἀποθέσεων

Εἰς τὰς πλείστας βιομηχανικάς ἐφαρμογὰς αἱ μεταλλικάι ἐπιφάνειαι ἐναλλαγῆς θερμότητος καλύπτονται ὑπό στρώματος ὀξειδίων, ἀλάτων, πολυμερῶν καί ἄλλων ἀποθέσεων, χαρακτηριζομένων ὑπό μικρᾶς θερμικῆς ἀγωγιμότητος, μέ ἀποτέλεσμα τήν ἐλάττωσιν τοῦ ρυθμοῦ μεταδόσεως θερμότητος.

Ὁ σχηματισμός ἀποθέσεων (fouling, scaling) ὀφείλεται εἰς τήν ἐλάττωσιν τῆς διαλυτότητος καί κρυστάλλωσιν τῶν ἀλάτων, τόν πολυμερισμόν, τήν συσσωμάτωσιν τῶν κολλοειδῶν σωματιδίων κλπ. Αἱ φυσικοχημικά αὐταί ἀντιδράσεις ἐπιταχύνονται εἰς τὰς ὑψηλάς θερμοκρασίας καί διά τοῦτο ἐμφανίζονται ἐντονώτεραι ἐπί τῶν θερμαινομένων τοιχωμάτων τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος. Σημαντικάι ἀποθέσεις σχηματίζονται ἐπί

τών επιφανειών έξατμίσεως καί τό πρόβλημα τοῦτο λαμβάνεται ὑπ' ὄψιν εἰς τόν σχεδιασμόν τῶν διαφόρων έξατμιστήρων.

Ὁ σχηματισμός ἀποθέσεων ἀντιμετωπίζεται διά διαφόρων μεθόδων, ὡς δι' αὐξήσεως τῆς ταχύτητος τοῦ ὑγροῦ, δι' ἐντόνου ἀναδεύσεως καί διά προσθήκης χημικῶν οὐσιῶν, αἱ ὁποῖαι παρεμποδίζουν τήν ἀπόθεσιν ἀλάτων εἰς τό ὕδωρ ψύξεως τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος (π.χ. πολυφωσφορικῶν ἀλάτων).

Κατά τόν σχεδιασμόν τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος αἱ ἀποθέσεις λαμβάνονται ὑπ' ὄψιν δι' εἰσαγωγῆς τῶν συντελεστῶν ἀποθέσεων (fouling factors) εἰς τάς ἐξισώσεις μεταδόσεως θερμότητος. Ἐπειδή δέν εἶναι εὐχερῆς ὁ προσδιορισμός τοῦ πάχους καί τῆς θερμικῆς ἀγωγιμότητος τῶν ἀποθέσεων, χρησιμοποιοῦνται οἱ ἐμπειρικοί συντελεσταί τῶν ἀποθέσεων ( $h_d$ ), οἱ ὁποῖοι ἀντιπροσωπεύουν τήν μεταφοράν θερμότητος μεταξύ τοῦ ρευστοῦ καί τῆς μεταλλικῆς ἐπιφανείας. Εἰς τήν Βιβλιογραφίαν συναντῶνται καί αἱ θερμικά ἀντιστάσεις τῶν διαφόρων ἀποθέσεων ( $r=1/h_d$ ) εἰς μονάδας  $m^2K/W$  ἢ  $h(sq.ft.)^0F/Btu$ .

Εἰς τήν γενικήν περίπτωσιν σχηματισμοῦ ἀποθέσεων εἰς ἀμφοτέρας τάς πλευράς τῆς ἐπιφανείας ἐναλλαγῆς θερμότητος, ὁ συνολικός συντελεστής μεταφορᾶς θερμότητος, βάσει τῆς ἐσωτερικῆς πλευρᾶς ( $U_i$ ), ὑπολογίζεται ἀπό τήν τροποποιημένην ἐξίσωσιν (1-32):

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{d_i}} + \frac{D_i}{D_L} \frac{x}{k} + \frac{D_i}{D_o} \left( \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{d_o}} \right) \quad (2-13)$$

ὅπου  $h_{d_i}$ ,  $h_{d_o}$  = συντελεσταί ἀποθέσεων ἐσωτερικῆς καί ἐξωτερικῆς πλευρᾶς τοῦ τοιχώματος ἀντιστοίχως,  $W/m^2K$ .

Ὁ ὑπολογισμός τοῦ συντελεστοῦ ( $U_o$ ) γίνεται ἀπό ἀνάλογον ἐξίσωσιν δι' ἀντικαταστάσεως (i)  $\rightarrow$  (o)  $\rightarrow$  (i).

Οἱ συντελεσταί ἀποθέσεων ( $h_d$ ) ἐξαρτῶνται ἀπό τό εἶδος, τήν ταχύτητα καί τήν θερμοκρασίαν τοῦ ρευστοῦ καί τήν γεωμετρικήν διάταξιν τοῦ ἐναλλάκτου. Εἰς τήν πρᾶξιν χρησιμοποιοῦνται ἐμπειρικοί συντελεσταί οἱ ὁποῖοι περιέχουν τόν ἀπαιτούμενον βαθμόν ἀσφαλείας διά τόν σχεδιασμόν τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος. Τυπικά τιμαί τῶν συντελεστῶν παρέχονται

είς τόν Πίνακα (2-2):

Π Ι Ν Α Κ Ε 2-2

Συντελεσταί 'Αποθέσεων 'Εναλλακτών Θερμότητας

| Εΐδος Ρευστοϋ               | Συντελεστής 'Αποθέσεως ( $h_d$ )<br>W/m <sup>2</sup> K |
|-----------------------------|--|
| Καθαρός άτμός               | 10.000   |
| 'Ατμός έκτονώσεως άκάθαρτος | 5.000  |
| 'Απεσταγμένον ύδωρ          | 10.000   |
| Θαλάσσιον ύδωρ              | 5.000 - 10.000   |
| Μαλακόν ύδωρ                | 2.500 - 6.000  |
| 'Υφάλμυρον ύδωρ             | 2.000 - 6.000  |
| Σκληρόν ύδωρ                | 1.000 - 1.500  |
| "Άλμη, ψυκτικά ύγρά         | 5.000  |
| 'Αποστάγματα πετρελαίου     | 2.500 - 5.000  |
| 'Ορυκτέλαια                 | 1.500  |
| Fuel oil                    | 1.000  |
| 'Αργόν πετρέλαιον           | 700 - 2.500  |
| "Ασφαλτος                   | 500 - 1.000  |
| 'Αήρ                        | 2.000  |
| Καυσαέρια                   | 500  |

Διά τόν προκαταρκτικόν σχεδιασμόν τών έναλλακτών χρησιμοποιούνται έμπειρικά τιμαί τοϋ συνολικοϋ συντελεστοϋ μεταφορας θερμότητος (U), ως αί παρεχόμεναι είς τόν Πίνακα (2-3).

## Π Ι Ν Α Κ 2-3

Συνολικοί Συντελεσταί Μεταφοράς Θερμότητας  
Είς Έναλλάκτης Θερμότητας

| Σύστημα Έναλλαγής Θερμότητας                        | Συντελεστής (U),<br>W/m <sup>2</sup> K |
|---|--|
| Ύδωρ/Ύδωρ   | 1.000 - 2.500                          |
| Συμπυκνούμενος ατμός/Όργανικόν Ύγρόν                | 250 - 2.000                            |
| Συμπυκνούμενος ατμός/Λεπτόν στρώμα ύδατος           | 2.000 - 10.000                         |
| Ύδωρ/Συμπυκνούμενος ατμός                           | 1.000 - 5.000                          |
| Ύδωρ/Πετρέλαιον                                     | 100 - 250                              |
| Ύδωρ/Συμπυκνούμενοι ατμοί κλασμάτων πε-<br>τρελαίου | 500 - 750                              |
| Τετηγμένον άλας/Πετρέλαιον                          | 250 - 400                              |
| Αέριον/Ύγρόν  | 5 - 50                                 |
| Αέριον/Αέριον                                       | 5 - 30                                 |

δ) Αριθμός Μονάδων Μεταφοράς - Θερμική Αποδοτικότητα

Τό ένεργόν μήκος διαδρομής (L) του θερμού ή ψυχρού ρευστού εις έναλλάκτην θερμότητας δίδεται από την έξιίσωσιν:

$$L = (NTU) (LTU) \quad (2-14)$$

όπου NTU = αριθμός μονάδων μεταφοράς (Number of Transfer Units)

LTU = μήκος μονάδος μεταφοράς (Length of Transfer Unit)

Η έξιίσωσις (2-14) είναι ανάλογος της έξιίσώσεως υπολογισμού του ύψους πύργων άπορροφήσεως ή άποστάξεως μετά πληρωτικών υλικών (Τεχνική Φυσικών Διαχωρισμών). Αύτη προκύπτει από τά ίσοζύγια θερμότητας του έναλλάκτου:

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας δίδεται από την έξιίσωσιν:

$$d\dot{q} = U \Delta T dA = \dot{m} C_p dT \quad (2-15)$$

Διά σωληνωτόν άγωγόν ρευστού  $dA = \pi D dL$  και έπομένως:

$$dL = \frac{\dot{m}C_p}{\pi DU} \frac{dT}{\Delta T} \quad (2-16)$$

Εάν η ειδική θερμότητα ( $C_p$ ) ληφθῆ ὡς σταθερά, ἔχομεν:

$$L = \frac{\dot{m}C_p}{\pi DU} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{\Delta T} \quad (2-17)$$

Ὁ ἀριθμὸς μονάδων μεταφορᾶς καὶ τὸ μῆκος μονάδος μεταφορᾶς ὀρίζεται ὡς ἀκολούθως:

$$NTU = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{\Delta T} \quad \text{καὶ} \quad L_{TU} = \frac{\dot{m}C_p}{\pi DU} \quad (2-18)$$

Διὰ  $NTU=1$  ἔπεται ὅτι  $L=L_{TU}$ , ἥτοι τὸ μῆκος μονάδος μεταφορᾶς ἰσοῦται πρὸς τὸ μῆκος τμήματος τοῦ ἐναλλάκτου θερμότητος εἰς τὸ ὁποῖον ἡ μεταβολὴ τῆς θερμοκρασίας τοῦ ἑνὸς ρευστοῦ ( $T_1 - T_2$ ) εἶναι ἀριθμητικῶς ἴση πρὸς τὴν μέσην διαφορὰν θερμοκρασίας τῶν δύο ρευστῶν ( $\Delta T$ ) εἰς τὸ ἐν λόγω τμήμα.

Ἐκ τῶν ἀνωτέρω ἔπεται ὅτι τὰ  $NTU$  καὶ  $L_{TU}$  τῶν δύο ρευστῶν δύνανται νὰ εἶναι διαφορετικά, ἀλλὰ τὸ γινόμενον αὐτῶν πρέπει νὰ εἶναι σταθερὸν καὶ ἴσον πρὸς τὸ μῆκος τοῦ ἀγωγοῦ ἐναλλαγῆς θερμότητος ( $L$ ).

Ὁ ἀριθμὸς μονάδων μεταφορᾶς παρέχεται καὶ ἀπὸ τὴν κατωτέρω ἐξίσωσιν, ἡ ὁποία προκύπτει διὰ συνδυασμοῦ τῶν (2-17) καὶ (2-18).

$$NTU = \frac{UA}{C} \quad (2-19)$$

ὅπου  $C = \dot{m}C_p$  = θερμοχωρητικότης τοῦ θεωρουμένου ρευστοῦ,  $W/K$

Ἡ ἀποδοτικότης ( $E$ ) ἑνὸς ἐναλλάκτου ὀρίζεται ὡς ὁ λόγος τοῦ πραγματικοῦ ρυθμοῦ μεταφορᾶς θερμότητος ( $\dot{q}$ ) ὡς πρὸς τὸν μέγιστον ρυθμὸν ( $\dot{q}_{\max}$ ) τὸν ἐπιτυγχανόμενον εἰς ἐναλλάκτην ἀπείρου ἐπιφανείας ἐναλλαγῆς, λειτουργοῦντα κατ' ἀντιρροήν, ἥτοι:

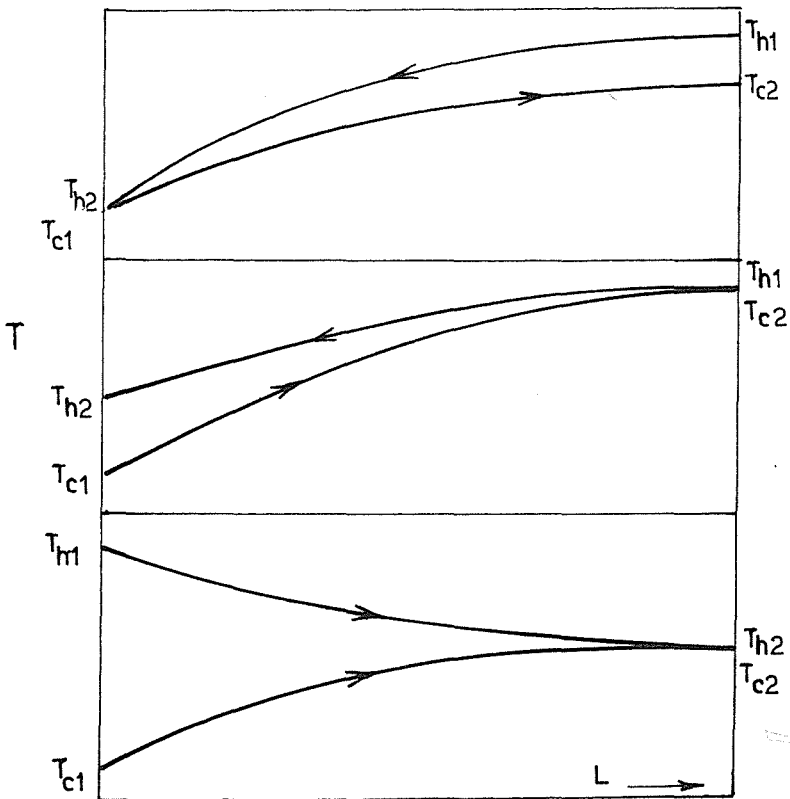
$$E = \dot{q} / \dot{q}_{\max} = \frac{(T_{h1} - T_{h2})}{(T_{h1} - T_{c1})} = \frac{C_c (T_{c2} - T_{c1})}{C_h (T_{h1} - T_{c1})} \quad (2-20)$$

ὅπου  $C_h, C_c$  = θερμοχωρητικότης θερμοῦ καὶ ψυχροῦ ρευστοῦ ἀν-

τιστοιχως, όπου  $C_h < C_c$ .

Τά υπόλοιπα σύμβολα εξηγούνται εις τόν Πίνακα (2-1).

Ὁ έναλλάκτης "ἀπείρου ἐπιφανείας" κατ'ἀντιρροήν προκύπτει εις τὰς ἀκολουθούς δύο περιπτώσεις: (α) Ἡ θερμοκρασία ἐξόδου τοῦ θερμοῦ ρεύματος ἰσοῦται μέ τήν θερμοκρασίαν εἰσόδου τοῦ ψυχροῦ ρεύματος ( $T_{h2} = T_{c1}$ ) καί (β) ἡ θερμοκρασία εἰσόδου τοῦ θερμοῦ ρεύματος ἰσοῦται μέ τήν θερμοκρασίαν ἐξόδου τοῦ ψυχροῦ ρεύματος ( $T_{h1} = T_{c2}$ ). Αἱ ὀριακαί αὐταί συνθήκαι προκύπτουν ἐάν τεθῆ ἡ θερμοκρασία ἐξόδου τοῦ ρευστοῦ μέ τήν μεγαλύτεραν μεταβολήν θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) ἴση μέ τήν θερμοκρασίαν εἰσόδου τοῦ ἄλλου ρευστοῦ (Σχ. 2-5). Εἰς τό Σχῆμα (2-5) δεικνύεται καί ὁ έναλλάκτης "ἀπείρου ἐπιφανείας" καθ' ὁμορροήν, εἰς τόν ὁποῖον θά πρέπει  $T_{h2} = T_{c2}$ .



Σχ. 2-5. Ὅριακαί συνθήκαι λειτουργίας ἐναλλακτῶν θερμότητος



Είς τήν παρούσαν περίπτωση λαμβάνεται αυθαίρετως  $C_h < C_c$ , δηλαδή ή θερμοκρασία του θερμού ρεύματος θεωρείται ότι μεταβάλλεται περισσότερο από τήν θερμοκρασίαν του ψυχρού ρεύματος.

Ἡ ἐξίσωσις μεταφορᾶς θερμότητος (2-7) γράφεται καί ὡς:

$$\dot{q} \ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right) = UA(\Delta T_1 - \Delta T_2) \quad (2-21)$$

$$C_h (T_{h1} - T_{h2}) \ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right) = UA(\Delta T_1 - \Delta T_2) \quad (2-22)$$

Δι' ἀντικαταστάσεως τῆς τιμῆς (NTU) τῆς ἐξισώσεως (2-19) λαμβάνομεν:

$$\Delta T_1 / \Delta T_2 = \exp\left[-NTU\left(\pm 1 - \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{h2}}\right)\right] \quad (2-23)$$

ὅπου  $\pm$  = σύμβολα διὰ τήν ἀντιρροήν καί ὁμορροήν ἀντιστοίχως.

Δι' ἐξισώσεως τῶν ρυθμῶν ροῆς θερμότητος προκύπτει:

$$C_h (T_{h1} - T_{h2}) = C_c (T_{c2} - T_{c1}) \quad (2-24)$$

Δι' ἀντικαταστάσεως τῆς τελευταίας ἐξισώσεως εἰς τήν (2-23) προκύπτει:

$$\Delta T_1 / \Delta T_2 = \exp[-NTU(\pm 1 - C_h / C_c)] \quad (2-25)$$

Διὰ συνδυασμοῦ τῶν ἐξισώσεων (2-25), (2-24) καί (2-20) ἔπεται ὅτι:

$$E(\text{ἀντιρροῆς}) = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_h / C_c)]}{1 - (C_h / C_c) \exp[-NTU(1 - C_h / C_c)]} \quad (2-26)$$

$$E(\text{ὁμορροῆς}) = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_h / C_c)]}{1 + C_h / C_c} \quad (2-27)$$

Οὕτως, ή ἀποδοτικότης (E) ἐνός ἐναλλάκτου θερμότητος δύναται νά προσδιορισθῆ μόνον ἀπό τά δεδομένα (NTU) καί  $(C_h / C_c)$ , ἄνευ γνώσεως τῶν θερμοκρασιῶν εἰσόδου καί ἐξόδου.

Διὰ τήν σύγκρισιν τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος ὁμορροῆς

άντιρροφής χρησιμοποιείται ο λόγος τών ρυθμών μεταφοράς θερμότητας  $\dot{q}$  (όμορροφής) /  $\dot{q}$  (άντιρροφής).

$$\begin{aligned} \text{Έξ ορισμού: } E(\text{όμορροφής}) &= \dot{q}(\text{όμορροφής}) / \dot{q}_{\max} \\ E(\text{άντιρροφής}) &= \dot{q}(\text{άντιρροφής}) / \dot{q}_{\max} \end{aligned}$$

Έκ τών οποίων έπεται ότι:

$$\frac{\dot{q}(\text{όμορροφής})}{\dot{q}(\text{άντιρροφής})} = \frac{E(\text{όμορροφής})}{E(\text{άντιρροφής})}$$

Η τελευταία σχέση εισαγομένη είς τας έξιισώσεις (2-27) καί (2-26) δίδει:

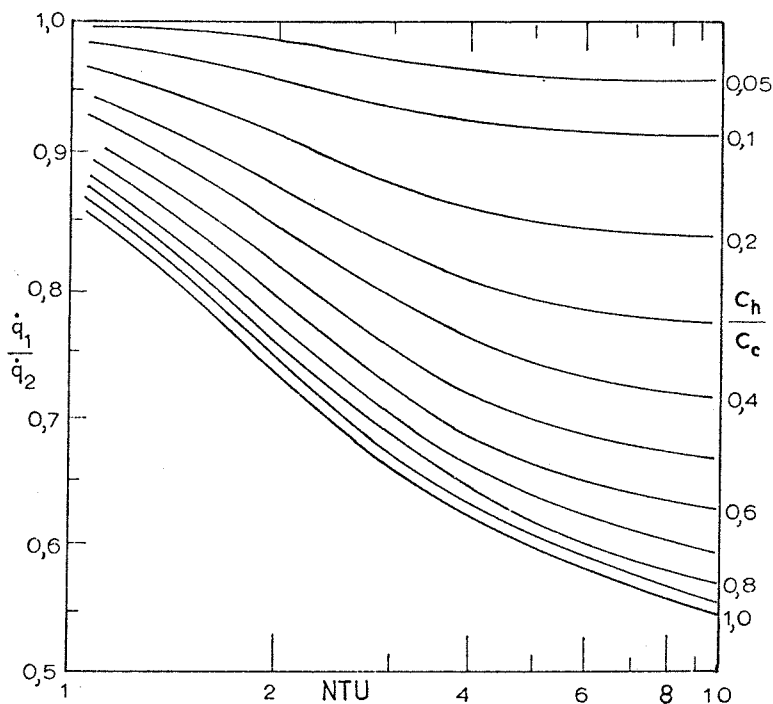
$$\begin{aligned} \frac{\dot{q}(\text{όμορροφής})}{\dot{q}(\text{άντιρροφής})} &= \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_h/C_c)]}{1 + C_h/C_c} \cdot \\ &\frac{1 - (C_h/C_c) \exp[-NTU(1 - C_h/C_c)]}{1 - \exp[-NTU(1 - C_h/C_c)]} \end{aligned} \quad (2-28)$$

Τό Σχ. (2-6) παριστᾶ γραφικῶς τήν λύσιν τῆς έξιισώσεως, (2-28), ἥτοι ο λόγος  $\dot{q}$  (όμορροφής) /  $\dot{q}$  (άντιρροφής) εὐρίσκεται συναρτήσει τών NTU καί  $C_h/C_c$ .

Είς τά Σχήματα (Σ-6), (Σ-7) καί (Σ-8) τοῦ Παραρτήματος δίδονται διαγράμματα ἀποδοτικότητας (E) διαφόρων τύπων έν-αλλακτῶν θερμότητας συναρτήσει τοῦ NTU καί τοῦ λόγου  $C_h/C_c$ .

Ὁ οίκονομική λειτουργία ένός έναλλάκτου θερμότητας χαρακτηρίζεται ἀπό τήν ε ί δ ι κ ή ν π τ ῶ σ ι ν π ι έ - σ ε ω ς ( $\Delta P/NTU$ ), δηλαδή τήν πτώσιν πιέσεως ἀνά μονάδα μεταφοράς. Ἡ ( $\Delta P/NTU$ ) εἶναι ἀνεξάρτητος τοῦ μήκους (L) τοῦ έναλλάκτου.

Ἡ ἰσχύς άντλήσεως τών ρευστῶν είς τούς έναλλάκτας θερμότητας εἶναι ἀνάλογος τῆς ( $\Delta P$ ) καί έπομένως τῆς ( $\Delta P/NTU$ ). Αὐξανομένης τῆς ταχύτητος ( $\bar{u}$ ) τοῦ ρευστοῦ αὐξάνεται ἡ ( $\Delta P$ ) καί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (h) μέ ἀποτέλεσμα τήν μείωσιν τῆς έπιφανείας έναλλαγῆς (A). Ἡ ἀρίστη ταχύτης τοῦ ρευστοῦ άντιστοιχεῖ είς τό έλάχιστον συνολικόν κόστος τῆς έπιφανείας (A) καί τῆς άντλήσεως ( $\Delta P/NTU$ ).



Σχ. 2-6. Σχέσις ρυθμού μεταφοράς εις έναλλάκτας θερμότητας όμορροής (1) καί άντιρροής (2)

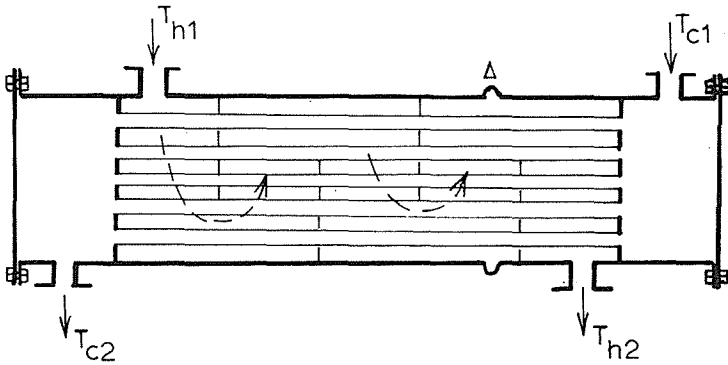
### ε) Έναλλάκται Θερμότητας Κελύφους καί Σωλήνων

Ό συνηθέστερος τύπος βιομηχανικού έναλλάκτου θερμότητας εΐναι ό έναλλάκτης κελύφους καί σωλήνων ή αύλων (shell and tube). Διά τουΐ έναλλάκτου τούτου έπιτυγχάνεται μεγάλη έπιφάνεια έναλλαγής θερμότητας (A) εις δοθέντα όγκον έγκαταστάσεως. Συγχρόνως έπιτυγχάνονται ύψηλοί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας λόγω τής μεγάλης ταχύτητος τών ρευστών έντός καί έκτός τών σωλήνων. Μειονέκτημα τών σωληνωτών έναλλακτών εΐναι ή σημαντική πτώσις πιέσεως, ή όποία πρέπει νά λαμβάνεται ύπ' όψιν εις τούς ύπολογισμούς τής οίκονομικής λειτουργίας τουΐ συστήματος.

Οι έναλλάκται τύπου κελύφους καί σωλήνων άποτελούνται άπό μίαν δέσμη παραλλήλων σωλήνων έντός τών όποιών διερχεται τό έν ρευστόν καί έν κέλυφος ή μανδύας, περιβάλλον τούς

σωλήνας, έντός του οποίου διέρχεται τό άλλον ρευστόν. Ἡ κατασκευή τῶν ἐναλλακτῶν τούτων εἶναι σχετικῶς ἀπλή καί τό κόστος αὐτῶν θεωρεῖται χαμηλόν. Ὁ καθαρισμός καί ἡ ἀντικατάστασις τῶν σωλήνων εἶναι σχετικῶς εὐχερής.

Τό Σχ. (2-7) παριστᾶ ἀπλοῦν ἐναλλάκτην κελύφους καί σωλήνων λειτουργοῦντα κατ'ἀντιρροήν. Ἡ διάταξις αὕτη καλεῖται ἐναλλάκτης (1-1) διότι τά δύο ρευστά διέρχονται ἀπαξ διά τῆς συσκευῆς.

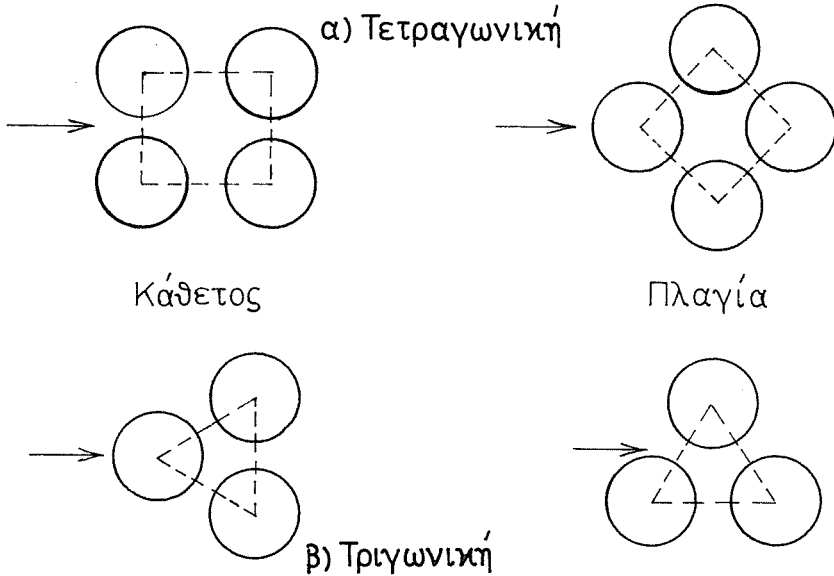


Σχ. 2-7. Ἀπλοῦς ἐναλλάκτης θερμότητος (1-1) κελύφους καί σωλήνων. ( $\Delta$ ) Δακτύλιος διαστολῆς

Τά ἄκρα τῶν σωλήνων προσαρμύζονται εἰς τὰς ὀπᾶς τῶν δύο μετωπικῶν ἐλασμάτων ἢ καθρεπτῶν (tubesheets) τοῦ ἐναλλάκτη διά συγκολλήσεως ἢ δι' ἐκτονώσεως. Ἡ διάνοιξις τῶν ὀπῶν τῶν σωλήνων ἐπί τῶν ἐλασμάτων γίνεται συμμετρικῶς καί ἀκολουθοῦνται δύο βασικάι διάταξεις, ἡ τετραγωνική καί ἡ τριγωνική, εἰς τὰς ὁποίας τά κέντρα τῶν σωλήνων σχηματίζουν τετράγωνα ἢ ἴσοσκελῆ τρίγωνα ἀντιστοίχως. (Σχ. 2-8).

Ὁ ἀριθμός τῶν σωλήνων εἰς δοθείσαν διατομήν εἶναι συνάρτησις τῆς διαμέτρου τῶν σωλήνων, τοῦ βήματος (ἀποστάσεως μεταξύ τῶν κέντρων τῶν σωλήνων, pitch) καί τῆς γεωμετρικῆς διατάξεως τῶν σωλήνων. Ὁ μεγαλύτερος ἀριθμός σωλήνων δίδεται ὑπό τῆς πυκνῆς τριγωνικῆς διατάξεως.

Ἡ τετραγωνική καί ἡ τριγωνική διάταξις χρησιμοποιοῦν-



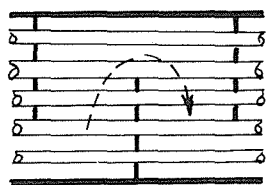
Σχ. 2-8. Διατάξεις σωλήνων εις έναλλάκτας θερμότητας

ται είτε υπό τήν κάθετον ή υπό τήν πλαγίαν μορφήν. Ἀμφότεραι αἱ τετραγωνικαί καί ἡ πλαγία (ἀραιά) τριγωνική διατάξεις ἐπιτρέπουσιν τόν καθαρισμόν τῶν ἐξωτερικῶν τοιχωμάτων τῶν σωλήνων.

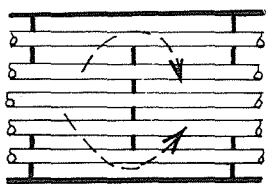
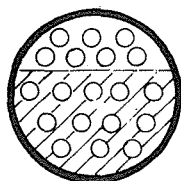
Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις, πρὸς ἀποφυγὴν διαρροῶν, ἐνδείκνυται ἡ χρῆσις διπλῶν μετωπικῶν ἐλασμάτων τῶν σωλήνων. Τὰ διπλά ἐλάσματα χρησιμοποιοῦνται διὰ μεγαλυτέραν ἀσφάλειαν ἔναντι ἐκρήξεως δι' ἀναμίξεως τῶν δύο ρευστῶν, ἢ πρὸς ἀποφυγὴν διαβρώσεων καὶ σχηματισμοῦ ἀποθέσεων.

Εἰς τὸ κέλυφος χρησιμοποιοῦνται διάφοροι ἀνακλαστήρες (baffles), ἥτοι ἐλάσματα ἀλλαγῆς κατευθύνσεως τῆς ροῆς, διὰ τῶν ὁποίων ἐπιτυγχάνεται καλυτέρα ἀνάμιξις τοῦ ρευστοῦ τοῦ κελύφους καὶ ὑψηλότερος συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητος. Εἰς τὸ Σχ. (2-9) δίδονται δύο τυπικαί διατάξεις ἀνακλαστήρων.

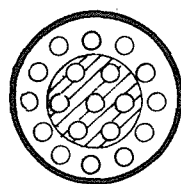
Δι' αὐξήσεως τῆς ταχύτητος τῶν ρευστῶν ἐντὸς τῶν σωλήνων ἢ εἰς τὸ κέλυφος ἐπιτυγχάνονται ὑψηλοὶ συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητος ( $U$ ), συγχρόνως ὅμως αὐξάνει σημαντικῶς



(α)



(β)



Σχ. 2-9. Διατάξεις ανακλαστήρων εις έναλλάκτας θερμότητος.  
(α) Τύπου τμήματος κύκλου, (β) τύπου δίσκου - δακτυλίου

καί ἡ πτώσις πιέσεως. Αἱ ὑψηλαί πτώσεις πιέσεως ἀπαιτοῦν σημαντικὰς δαπάνας μηχανικῆς ἐνεργείας (ἀντλήσεως) καί καθίσταται προφανές ὅτι ἡ αὔξησις τῆς ταχύτητος ροῆς πέραν ὠρισμένης τιμῆς καθιστᾷ ἀντιοικονομικὴν τὴν λειτουργίαν τοῦ συστήματος. Τυπικαί πτώσεις πιέσεως εἰς βιομηχανικούς ἐναλλάκτας θερμότητος ἀντιστοιχοῦν εἰς τὸ ἥμισυ τῆς μανομετρικῆς πιέσεως διὰ λειτουργίαν ἀνω τῆς ἀτμοσφαιρικῆς, ἢ εἰς τὸ 1/10 τῆς ἀπολύτου πιέσεως διὰ λειτουργίαν ὑπὸ κενόν.

Ἡ πτώσις πιέσεως ( $\Delta P$ ) ἐντὸς τῶν σωλῆνων τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος ὑπολογίζονται συνήθως ἀπὸ τὴν ἐξίσωσιν Fanning (1-71). Ἡ ( $\Delta P$ ) δύναται νὰ ὑπολογισθῇ καί ἀπὸ ἐμπειρικά διαγράμματα τῆς βιβλιογραφίας ἀπὸ δεδομένα ρυθμοῦ ροῆς, ἰξώδους καί εἰδικοῦ βάρους τοῦ ρευστοῦ. Ἡ ( $\Delta P$ ) τῆς πλευρᾶς τοῦ κελύφους ὑπολογίζεται ἀπὸ ἐμπειρικὰς ἐξισώσεις τῆς βιβλιογραφίας.

Ὡς δεικνύεται εἰς τὸ Σχ. (2-7) τὸ κέλυφος περιέχει καί δακτύλιον διαστολῆς πρὸς ἐξουδετέρωσιν τῶν ὑψηλῶν μηχανικῶν τάσεων τῶν προκαλουμένων εἰς τὰς ὑψηλὰς θερμοκρασίας. Ἐπί-

σης άπαραίτητοι είναι αϊ βαλβίδες έξαερισμού (vents), διά τών όποιών άπομακρύνονται τά μή συμπυκνούμενα άέρια, τά όποϊα περιέχονται είς τόν άτμόν καί έλαττώνουν τούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητος.

Οϊ σωλήνες ή αύλοϊ ή τοϋμπα (tubes) οϊ χρησιμοποιούμενοι είς τούς έναλλάκτας θερμότητος έχουν διαστάσεις διαφορετικάς από τούς συνήθεις σωλήνας (pipes) τής μεταφοράς τών ρευστών. Κατά κανόνα οϊ σωλήνες τών έναλλακτών έχουν λεπτότερα τοιχώματα, καί κατασκευάζονται από άντιδιαβρωτικά μέταλλα (π.χ. χαλκόν, άνοξειδωτον χάλυβα, τιτάνιον). Αϊ διάμετροι τών σωλήνων τούτων είναι σχετικώς μικραί, κυμαινόμεναι συνήθως μεταξύ 5/8 έως 2 inches (15-50 mm). Οϊ σωλήνες οϋτοι όρίζονται διά τής έξωτερικής διαμέτρου (O.D.) καί τοϋ πάχους τοϋ τοιχώματος ή άριθμού BWG (Πίναξ 2-4).

Οϊ έναλλάκται θερμότητος πολλαπλών διαβάσεων (multiple pass heat exchangers) είναι σύνθετοι έναλλάκται είς τούς όποιους τά δύο ρευστά διέρχονται από τούς σωλήνας καί τό κέλυφος περισσοτέρας τής μιās φοράς. Οϋτοι περιλαμβάνουν τάς διατάξεις 1-2, 2-4, 3-6 κλπ., ένθα ό πρώτος άριθμός άναφέρεται είς τάς διαβάσεις διά τοϋ κελύφους καί ό δεύτερος είς τάς διαβάσεις διά τών σωλήνων (Σχ. 2-10). Είς τό Σχήμα(Σ-9) τοϋ Παραρτήματος δεικνύονται καί ώρισμένοι άλλοι τύποι έναλλακτών.

Οϊ έναλλάκται πολλαπλών διαβάσεων είναι συμπαγοϋς κατασκευής καί οϊ έπιτυγχανόμενοι συντελεσταί μεταφοράς θερμότητος είναι σχετικώς ύψηλοί λόγω τών χρησιμοποιουμένων μεγάλων ταχυτήτων τών ρευστών έντός τών σωλήνων.

Είς τούς έναλλάκτας θερμότητος τών διατάξεων (1-2) καί (2-4) τοϋ Σχ. (2-10) χρησιμοποιειϊται διάταξις έλευθέρας διαστολής τοϋ ένός άκρου τών σωλήνων (floating head) πρός άντιμετώπισιν τών μηχανικών τάσεων τών προκαλουμένων είς μεγάλης διαφοράς θερμοκρασιών.

Ή μετάδοσις θερμότητος είς τούς έναλλάκτας πολλαπλών διαβάσεων δίδεται ύπό τής έξισώσεως:

$$\dot{q}/A=UY \Delta T_L \quad (2-29)$$

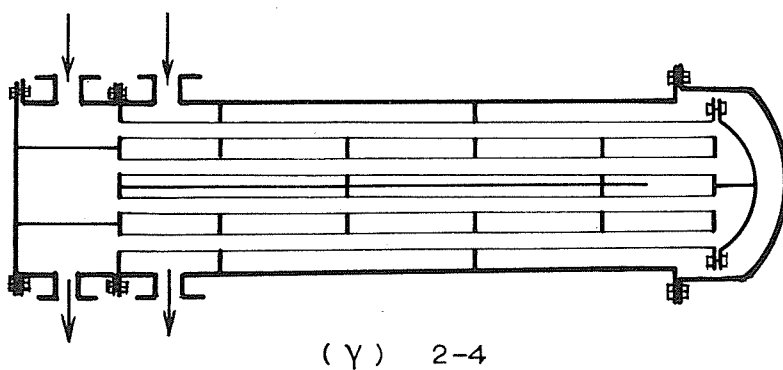
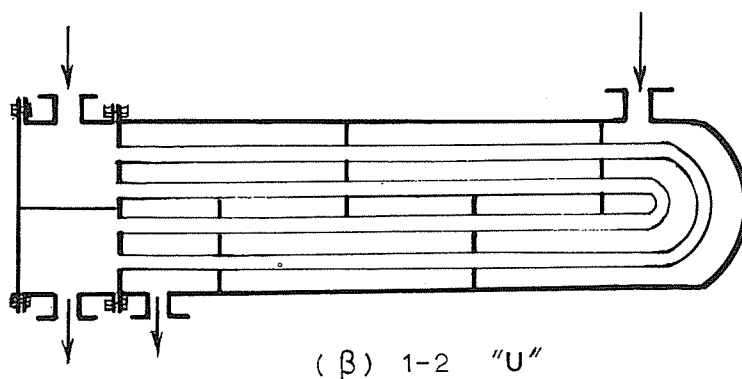
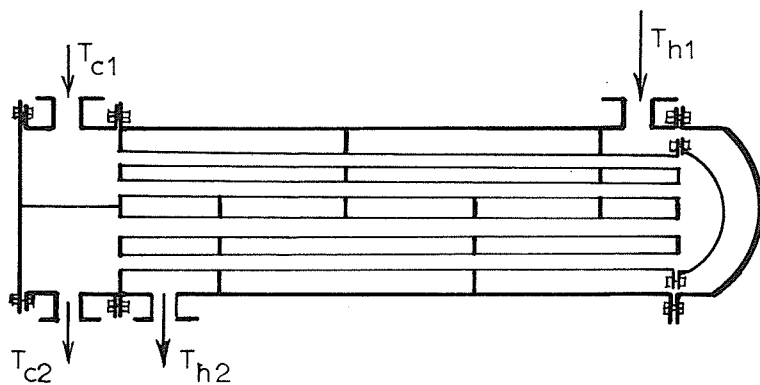
## Π Ι Ν Α Ε 2-4

Διαστάσεις Σωλήνων (Αύλων) Έναλλακτών Θερμότητας

| Έξωτερική διάμετρος |        | Πάχος τοιχώματος    |       | Έσωτερική διάμετρος | Έμβαδόν έσωτερικής διατομής |
|---------------------|--------|---------------------|-------|---------------------|-----------------------------|
| Inches              | mm     | N <sub>o</sub> BWG* | mm    | mm                  | m <sup>2</sup>              |
| 5/8                 | 15,875 | 12                  | 2,768 | 10,338              | 0,839 × 10 <sup>-4</sup>    |
|                     |        | 14                  | 2,108 | 11,658              | 1,067                       |
|                     |        | 16                  | 1,651 | 12,573              | 1,241                       |
|                     |        | 18                  | 1,244 | 13,386              | 1,407                       |
| 3/4                 | 19,050 | 12                  | 2,768 | 13,513              | 1,434                       |
|                     |        | 14                  | 2,108 | 14,833              | 1,728                       |
|                     |        | 16                  | 1,651 | 15,748              | 1,948                       |
|                     |        | 18                  | 1,244 | 16,561              | 2,154                       |
| 7/8                 | 22,225 | 12                  | 2,768 | 16,688              | 2,187                       |
|                     |        | 14                  | 2,108 | 18,008              | 2,547                       |
|                     |        | 16                  | 1,651 | 18,923              | 2,812                       |
|                     |        | 18                  | 1,244 | 19,736              | 3,059                       |
| 1                   | 25,400 | 10                  | 3,404 | 18,593              | 2,715                       |
|                     |        | 12                  | 2,768 | 19,863              | 3,098                       |
|                     |        | 14                  | 2,108 | 21,183              | 3,525                       |
|                     |        | 16                  | 1,651 | 22,098              | 3,836                       |
| 1 1/4               | 31,750 | 10                  | 3,404 | 24,943              | 4,887                       |
|                     |        | 12                  | 2,768 | 26,213              | 5,397                       |
|                     |        | 14                  | 2,108 | 27,533              | 5,954                       |
|                     |        | 16                  | 1,651 | 28,448              | 6,356                       |
| 1 1/2               | 38,100 | 10                  | 3,404 | 31,293              | 7,690                       |
|                     |        | 12                  | 2,768 | 32,563              | 8,329                       |
|                     |        | 14                  | 2,108 | 33,883              | 9,019                       |
|                     |        | 16                  | 1,651 | 34,798              | 9,611                       |
| 2                   | 50,800 | 10                  | 3,404 | 43,993              | 15,194                      |
|                     |        | 12                  | 2,768 | 45,263              | 16,091                      |

\*BWG = Birmingham Wire Gauge





Σχ. 2-10. Έναλλάκτης θερμότητας πολλαπλών διαβάσεων

όπου  $Y =$  συντελεστής διορθώσεως της  $\Delta T_L$ , αδιάστατος  
 $\Delta T_L =$  μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας της διατάξεως απλής αντίρροξης, ήτοι:

$$\Delta T_L = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

$$\Delta T_1 = T_{h1} - T_{c2}$$

$$\Delta T_2 = T_{h2} - T_{c1}$$

Ο συντελεστής  $Y$  είναι μικρότερος της μονάδος και τόν γινόμενον  $Y\Delta T_L$  παριστᾶ τήν φαινομένην μέσην λογαριθμικήν διαφοράν θερμοκρασίας τῶν συνθέτων ἐναλλακτῶν θερμότητος, ἡ ὁποία εἶναι μικρότερα τῆς  $\Delta T_L$  τοῦ ἀπλοῦ ἐναλλάκτου ἀντίρροξης. Τοῦτο συμβαίνει διότι εἰς τούς συνθέτους ἐναλλάκτας ὠρισμένα διαβάσεις γίνονται καθ' ὁμορροήν καί οὕτως ἡ ἀποδοτικότητα τοῦ ἐναλλάκτου ἐλαττοῦται ἐν σχέσει πρὸς τήν ἀπλήν λειτουργίαν κατ' ἀντίρροήν.

Ο συντελεστής  $Y$  δίδεται συνήθως εἰς διαγράμματα συναρτήσεως τοῦ εἴδους τοῦ ἐναλλάκτου καί τῶν παραμέτρων θερμοκρασίας  $X$  καί  $Z$ .

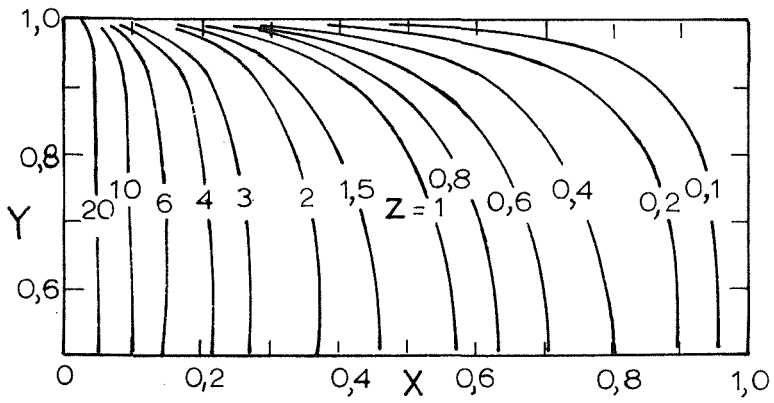
Τό Σχ. (2-11) δίδει τούς συντελεστάς ( $Y$ ) δι' ἐναλλάκτας 1-2, 1-4 κλπ. καί 2-4, 2-6 κλπ. Παρόμοια διαγράμματα τῆς Βιβλιογραφίας δίδουν τό ( $Y$ ) δι' ἐναλλάκτας 3-6, 3-9 κλπ.

Εἰς τά διαγράμματα ταῦτα αἱ τετμημένοι καί αἱ παράμετροι ὀρίζονται ὡς:

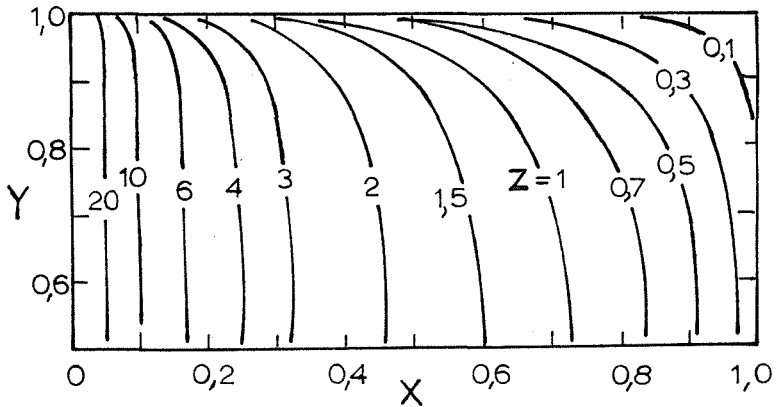
$$X = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad \text{καί} \quad Z = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}} \quad (2-30)$$

Ἡ παράμετρος  $X$  εἶναι ὁ λόγος τῆς πραγματικῆς αὐξήσεως τῆς θερμοκρασίας τοῦ ψυχροῦ ὑγροῦ ὡς πρὸς τήν μεγίστην δυνατήν αὐξήσιν τῆς διατάξεως ἀντίρροξης. Ἡ παράμετρος  $Z$  εἶναι ὁ λόγος τῆς πτώσεως τῆς θερμοκρασίας τοῦ θερμοῦ ρευστοῦ ὡς πρὸς τήν ἀνῶψωσιν τῆς θερμοκρασίας τοῦ ψυχροῦ ρευστοῦ.

Εἰς ἐναλλάκτας κελύφους καί σωλήνων μέ κεκορεσμένον ἀτμόν εἰς τό κέλυφος λαμβάνεται  $Y=1$ , ἀνεξαρτήτως τοῦ ἀριθμοῦ τῶν διαβάσεων.



(α) 1-2, 1.4....



(β) 2-4, 2.5....

Σχ. 2-11. Συντελεσταί διορθώσεως ( $Y$ ) έναλλακτῶν θερμότητος πολλαπλῶν διαβάσεων

Είς ώρισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται έναλλάκται θερμότητας έγκαρσίας ροής (cross flow) διά τούς όποιους ίσχύει ή έξίσωσις μεταφοράς θερμότητας (2-29) καί ό συντελεστής (Y) δίδεται είς τό διάγραμμα τοϋ Σχ. (Σ-10) τοϋ Παραρτήματος. Ό συντελεστής διορθώσεως (Y) δι'έναλλάκτας 1-2, 1-4, κλπ. δύναται νά ύπολογισθῆ καί από τήν έξίσωσιν:

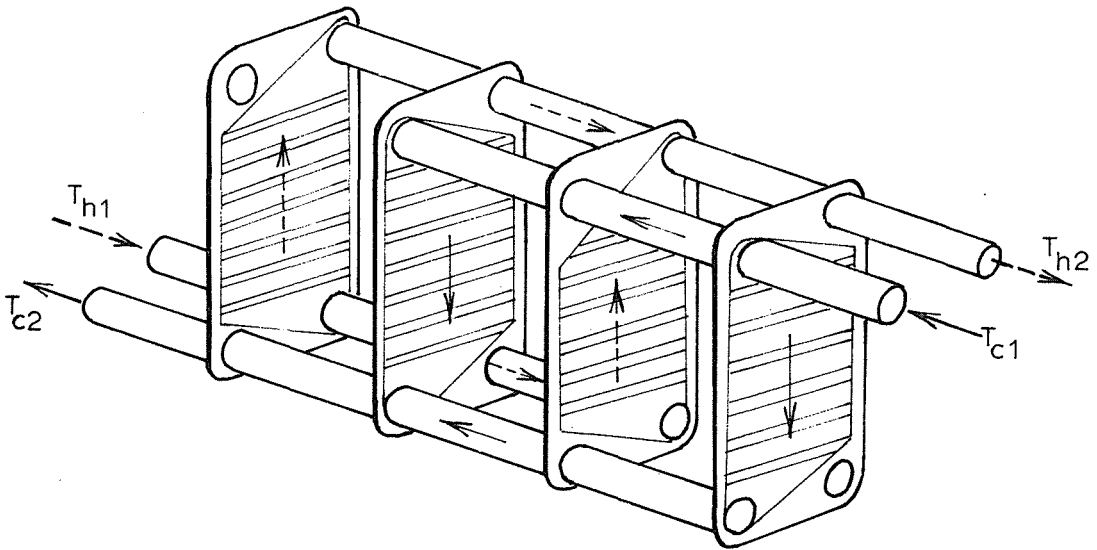
$$Y = \frac{\sqrt{(Z^2+1)} \ln[(1-X)/(1-XZ)]}{(Z-1) \ln \frac{2-X(Z+1-\sqrt{Z^2+1})}{2-X(Z+1+\sqrt{Z^2+1})}} \quad (2-31)$$

στ) Έναλλάκται Θερμότητας μετά Πλακῶν

Οί έναλλάκται θερμότητας μετά πλακῶν (plate heat exchangers) χρησιμοποιούνται διά τήν θέρμανσιν ή ψύξιν διαφόρων ύγρῶν καί παρουσιάζουν ώρισμένα πλεονεκτήματα έναντι τῶν σωληνωτῶν έναλλακτῶν. Οϋτοι παρέχουν μεγάλην έπιφάνειαν έναλλαγῆς θερμότητας είς δοθέντα όγκον έγκαταστάσεως καί άποσυνδέονται εύκόλως πρός καθαρισμόν.

Τά δύο ύγρά ρέουν κατ'άντιρροήν διά μέσου μικρῶν διακένων μεταξύ τῶν πλακῶν. Έκαστον ύγρόν κινεῖται έναλλάξ πρός τά άνω καί πρός τά κάτω ύπό τυρβώδη ροήν, έπιτυγχανομένων ύψηλῶν συντελεστῶν μεταφοράς θερμότητας. Αί πλάκες συνδέονται στεγανῶς μεταξύ των διά παρεμβυσμάτων (gaskets) συμπιεζόμεναι κατά τρόπον άνάλογον πρός τά διηθητικά πιεστήρια (φιλτροπρέσσας). Τό Σχ. (2-12) δεικνύει διαγραμματικῶς άπλοϋν έναλλάκτην θερμότητας μετά πλακῶν.

Αί πλάκες κατασκευάζονται από άντιδιαβρωτικά καί μηχανικῶς άνθεκτικά ύλικά, ὡς ό άνοξειδωτος χάλυψ. Έχουν πάχος 0,5-1 mm καί έπιφάνειαν κυμαινομένην μεταξύ 0,1-1,5 m<sup>2</sup>. Η έπιφάνεια έναλλαγῆς θερμότητας φθάνει μέχρι 600 m<sup>2</sup> καί ή πίεσις λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 5-10 bar. Η μεγίστη έπιτρεπομένη θερμοκρασία λειτουργίας έξαρτάται από τό είδος τοϋ ύλικοϋ κατασκευῆς τῶν παρεμβυσμάτων στεγανότητος, ὡς τό στυρένιον (μέχρι 70 °C), τό έλαστικόν βουτυλλίου (120 °C), τό πολυπροπυλένιον καί αί σιλικόναι (140 °C) καί αί ίνες άμιάντου (200 °C).



Σχ. 2-12. Έναλλάκτης θερμότητας μετά πλακών

Αι πλάκες φέρουν κυματοειδείς αύλακες διά τῶν ὁποίων ἐπιτυγχάνεται ἔντονος τυρβώδης ροή καί ὕψηλοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας. Οἱ συνολικοί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας εἶναι περίπου διπλάσιοι τῶν ἀντιστοίχων συντελεστῶν τῶν σωληνωτῶν ἐναλλακτῶν, κυμαινόμενοι μεταξύ  $5000 - 10000 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Οἱ συντελεσταί ἀποθέσεων εἶναι πολύ ὕψηλοί, ( $10000 - 100000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Ἡ ἀνάλυσις τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητας μετά πλακῶν δύναται νά γίνῃ διά τῆς μεθόδου τοῦ ἀριθμοῦ μονάδων μεταφοράς NTU, ἐφαρμοζομένης τῆς ἐξισώσεως (2-19). Ἡ ἀρίστη λειτουργία τῶν ἐναλλακτῶν μετά πλακῶν ἐπιτυγχάνεται ὅταν ἡ πτώσις πιέσεως ἀνά μονάδα μεταφοράς εἶναι περίπου  $\Delta P/\text{NTU} = 0,5 \text{ bar}$ .

Οἱ ἐναλλάκται θερμότητας μετά πλακῶν ἐνδείκνυνται ἰδιαιτέρως διά τὴν θέρμανσιν εὐπαθῶν προϊόντων λόγω τοῦ ὕψηλῳ ρυθμοῦ μεταφοράς θερμότητας καί τοῦ μικροῦ χρόνου παραμονῆς. Οὕτω χρησιμοποιοῦνται εὐρύτατα εἰς τὴν παστερίωσιν τοῦ γάλακτος, τῶν χυμῶν φρούτων κλπ. Διά κατασκευαστικούς λόγους οἱ ἐναλλάκται οὗτοι δέν ἐνδείκνυνται διά ἱξώδη ρευστά καί

αίωρήματα καί διά λειτουργίαν εἰς ὑψηλὴν πίεσιν ἢ θερμοκρασίαν.

### ζ) Σπειροειδεῖς Ἐναλλάται Θερμότητος

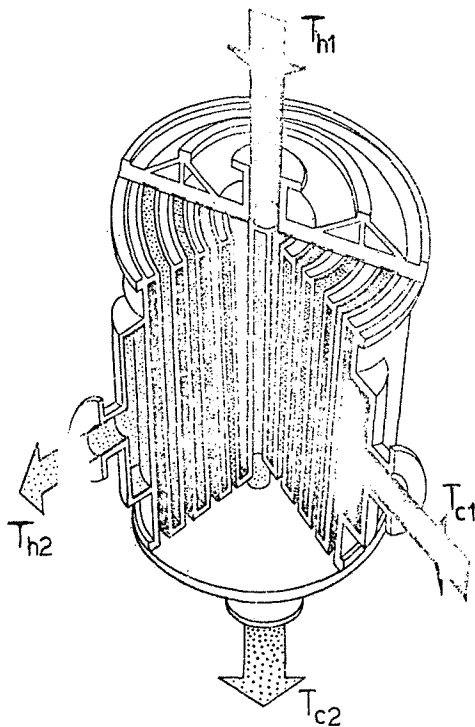
Οἱ σπειροειδεῖς ἐναλλάται θερμότητος (spiral heat exchangers) παρέχουν ἀνάλογα πλεονεκτήματα μέ τούς ἐναλλάκτας μετά πλακῶν, ἥτοι μεγάλην ἐπιφάνειαν ἐναλλαγῆς διά δοθέντα ὄγκον καί ὑψηλοῦς συντελεστάς μεταφορᾶς θερμότητος.

Οἱ σπειροειδεῖς ἐναλλάται μετ' ἐλασμάτων κατασκευάζονται διά περιελίξεως δύο μακρῶν ἐλασμάτων οὕτως ὥστε νά σχηματισθῇ ζευγος σπειροειδῶν ἀγωγῶν. Τά τοιχώματα χωρίζονται διά μεταλλικῶν στηριγμάτων καί ὑφίστανται διάφοροι διατάξεις ροῆς. Εἰς τό Σχ. (2-13) περίσταται ἐναλλάκτης μετά σπειροειδοῦς ροῆς ἀμφοτέρων τῶν ρευστῶν κατ' ἀντιροήν. Χρησιμοποιοῦνται ἐπίσης διατάξεις ἐγκαρσίας ροῆς (σπειροειδοῦς/ἀξονικῆς) καί διαφόρων συνδυασμῶν ροῆς. Ἡ μέγιστη ἐπιτρεπομένη πίεσις λειτουργίας εἶναι 10 bar καί οἱ συντελεσταί ἀποθέσεων εἶναι μικρότεροι τῶν ἀντιστοίχων συντελεστῶν τῶν σωληνωτῶν ἐναλλακτῶν.

Οἱ σπειροειδεῖς ἐναλλάται μετὰ σωλήνων ἀποτελοῦνται ἀπό δύο ὁμοκέντρους σπειροειδεῖς σωλήνας ἐντός τῶν ὁποίων κυκλοφοροῦν τά δύο ρευστά. Οἱ ἐναλλάται οὗτοι εἶναι σχετικῶς ἀπλῆς κατασκευῆς καί ἐφαρμόζονται κυρίως εἰς μικράς ἐγκαταστάσεις, δεδομένου ὅτι ἔχουν μικράν ἐπιφάνειαν ἐναλλαγῆς ἐν συγκρίσει πρός τά λοιπά συστήματα.

### η) Ἀναδευόμενοι Ἐναλλάται Θερμότητος

Ἰγυρά ὑψηλοῦ ἰξώδους, αἰωρήματα σωματιδίων καί πολλοί θερμαίνονται ἢ ψύχονται δυσχερῶς εἰς τούς συνήθεις ἐναλλάκτας θερμότητος μετά σωλήνων ἢ μετά πλακῶν. Τά ρευστά ταῦτα δημιουργοῦν ταχέως ἀποθέσεις ἐπί τῶν ἐπιφανειῶν ἐναλλαγῆς θερμότητος μέ ἀποτέλεσμα τήν ἐλάττωσιν τῶν συντελεστῶν μεταφορᾶς θερμότητος, τήν αὔξησιν τῆς πτώσεως πιέσεως ἢ καί τήν τελείαν ἀπόφραξιν τοῦ ἀγωγοῦ. Τά προβλήματα ταῦτα ἀντιμετωπίζονται διά τῶν ἀναδευομένων ἐναλλακτῶν θερμότητος, τυ-

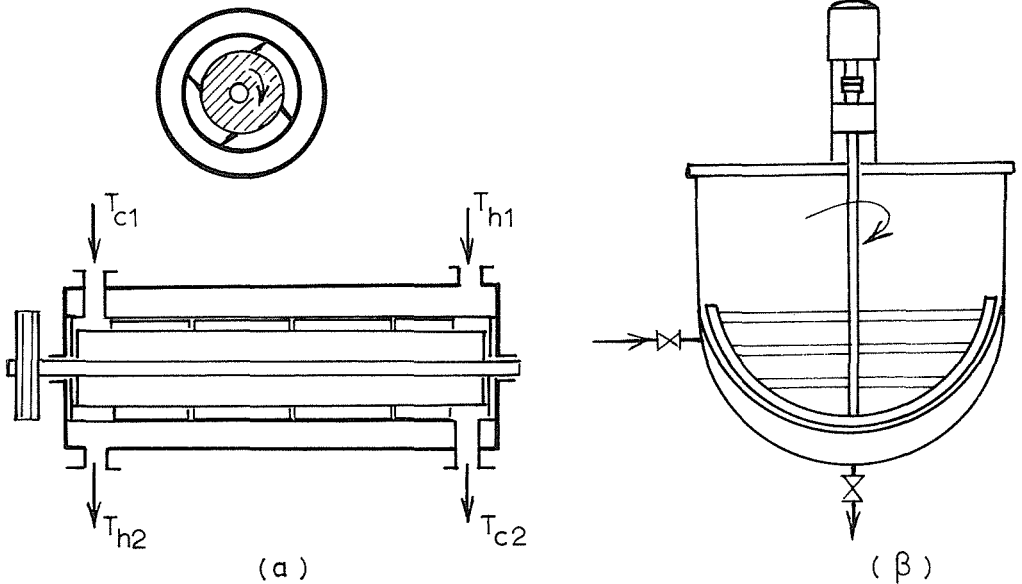


Σχ. 2-13. Σπειροειδής έναλλάκτης θερμότητας μετ'έλασμάτων

πικά παραδείγματα τών οποίων αναφέρονται κατωτέρω.

Τό Σχ. (2-14) δεικνύει δύο τύπους άναδευομένων έναλλακτών θερμότητας. Ό κυλινδρικός έναλλάκτης άποξεομένης έπιφανείας (scraped-surface heat exchanger) είναι συνεχούς λειτουργίας και έφαρμόζεται είς πολλές βιομηχανίας. Τό ρευστόν διαβιβάζεται δι'άντλίας είς τό έσωτερικόν του κυλίνδρου και ή μεταφορά θερμότητας βελτιούται δι'άναδεύσεως και άποξέσεως τής έπιφανείας έναλλαγής διά περιστρεφόμενων πτερυγίων. Τό θερμαντικόν ή ψυκτικόν ρευστόν διαβιβάζεται είς τόν περιβάλλοντα κυλινδρικόν μανδύαν.

Ή μετάδοσις θερμότητας είς τούς άναδευομένους κυλινδρικούς έναλλάκτας δύναται νά άναλυθί διά τής θεωρίας τής διεισδύσεως (Κεφ. 1-β). Ή μετάδοσις θερμότητας άπό τήν έπιφάνειαν έναλλαγής πρός τό ίξώδες ρευστόν λαμβάνει χώραν



Σχ. 2-14. Ἀναδευόμενοι ἑναλλάκται θερμότητας. (α) Κυλινδρικός ἀποξεομένης ἐπιφανείας, (β) ἀναδευόμενος λέβης

κατά μὴ μόνιμον κατάστασιν καί ἰσχύει ἡ ἐξίσωσις (1-17). Ἡ βαθμὴ θερμοκρασίας εἰς τὴν ἐπιφάνειαν τοῦ ρευστοῦ εὕρεσκειται διὰ διαφορίσεως τῆς ἐξισώσεως (1-17), ἡ ὁποία δίδει:

$$\left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = \frac{T_w - T_a}{\sqrt{\pi a t}} \quad (2-32)$$

Καὶ ὁ ρυθμὸς ροῆς θερμότητος εἰς τὴν ἐπιφάνειαν εἶναι:

$$\dot{q}/A = \frac{k(T_w - T_a)}{\sqrt{\pi a t}} \quad (2-33)$$

Δι' ὀλοκληρώσεως τῆς ἐξισώσεως (2-33) λαμβάνεται:

$$q_T/A = 2k(T_w - T_a) \sqrt{\frac{t_T}{\pi a}} \quad (2-34)$$

ὅπου  $q_T$  = συνολικῶς μεταφερομένη θερμότης μέχρι χρόνου  $t_T$

Τὰ ὑπόλοιπα σύμβολα ἐπεξηγοῦνται εἰς τὸ κεφ. (1-β).

Ὁ συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητος ὀρίζεται ὡς:



$$h = \frac{q_T}{A t_T (T_w - T_a)} \quad (2-35)$$

καί διά άντικαταστάσεως είς τήν έξίσωσιν (2-34) προκύπτει :

$$h = 2 \sqrt{\frac{k \rho C_p}{\pi t_T}} \quad (2-36)$$

Είς τούς άναδευομένους έναλλάκτας ό χρόνος  $t_T$  λαμβάνεται ώς ό χρόνος ό άπαιτούμενος διά τήν διέλευσιν δύο διαδοχικών πτερυγίων άπό δοθέν στοιχειόν έπιφανείας έναλλαγής θερμότητας καί δίδεται υπό τής έξισώσεως :

$$t_T = 1/NB \quad (2-37)$$

όπου  $N = \text{RPM}/60 =$  άριθμός στροφών άνά s

$B =$  άριθμός πτερυγίων του άναδευτήρος.

Έπομένως ό συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είς άναδευομένους κυλινδρικούς έναλλάκτας δίδεται υπό τής έξισώσεως :

$$h = 2 \sqrt{\frac{k \cdot \rho \cdot C_p \cdot N \cdot B}{\pi}} \quad (2-38)$$

Έκ τής έξισώσεως (2-38) έπεται ότι ό συντελεστής (h) έξαρτάται άπό τάς φυσικές ιδιότητες του ρευστου, τήν ταχύτητα περιστροφής καί τόν άριθμόν πτερυγίων του άναδευτήρος. Έν άντιθέσει προς τούς συνήθεις έναλλάκτας θερμότητας, ό συντελεστής (h) είναι άνεξάρτητος του ίξώδους του ρευστου έντός του κυλινδρικού άγωγού.

Τά άναδευόμενα δοχεΐα ή λέβητες (agitated vessels ή kettles) είναι συνήθως άσυνεχοϋς λειτουργίας καί χρησιμοποιούνται είς πολλάς βιομηχανίας διά θέρμανσιν ή ψύξιν μικρών σχετικώς ποσοτήτων ρευστών. Τό θερμαντικόν ή ψυκτικόν ρευστόν, διαβιβάζεται είτε είς μανδύα (Σχ. 2-14) ή είς σπειραν τοποθετημένην έντός του δοχείου.

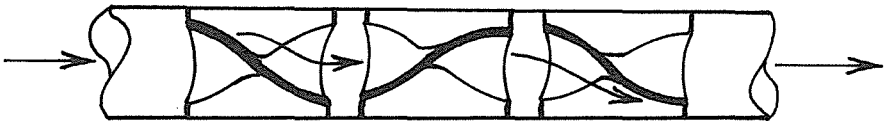
Διά τά άναδευόμενα δοχεΐα ίσχύει ή γενική έξίσωσις :

$$N_{Nu} = CN_{Re}^{2/3} N_{Pr}^{1/3} (\eta/\eta_w)^{0,14} \quad (2-39)$$

όπου  $C =$  σταθερά εξαρτωμένη έκ της γεωμετρικής διατάξεως του δοχείου και του άναδευτήρος. Διά κυλινδρικών δοχείων μετά μανδύου θερμάνσεως ή ψύξεως και άναδευτήρος σχήματος άγκύρας (Σχ. 2-14) λαμβάνεται  $C=0,46$ .

Είς τά άναδευόμενα δοχεΐα ο άριθμός Nusselt λαμβάνεται ως  $N_{Nu} = hD_T/k$ , όπου  $D_T =$  διάμετρος του δοχείου. Ο δέ άριθμός Reynolds λαμβάνεται ως  $N_{Re} = D^2 N \cdot \rho / \eta$ , όπου  $D =$  διάμετρος του άναδευτήρος και  $N =$  άριθμός στροφών ανά  $s$  του άναδευτήρος.

Οι άκίνητοι άναμικτήρες (motionless mixers) εΐναι έλικοειδείς διατάξεις άναμίξεως τοποθετούμεναι έντός των σωλήνων των έναλλακτών θερμότητας, έπιφέρουσαι σημαντική αύξησιν των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας. Τυπικός άκίνητος άναμικτήρ (τύπου Kenics) χρησιμοποιούμενος είς έναλλάκτας θερμότητας διαλυμάτων πολυμερών και πλαστικών, δεικνύεται διαγραμματικώς είς τό Σχ. (2-15).



Σχ. 2-15. Άκίνητος άναμικτήρ σωλήνος

Ή προσθήκη των άκινήτων άναμικτΐρων έντός των σωλήνων έπιφέρει σημαντική αύξησιν της πτώσεως πιέσεως (5-10 φορές), ή όποία πρέπει νά λαμβάνεται ύπ'όψιν είς τόν ύπολογισμόν του κόστους του συστήματος.

#### θ) Έναλλάκται Θερμότητας μετά Πτερυγίων

Οι έναλλάκται θερμότητας μετά πτερυγίων (fins) ή μετά έκτεταμένης έπιφανείας (extended surface) χρησιμοποιούνται εύρύτατα διά τήν θέρμανσιν ή ψύξιν του άέρος και των βιομηχανικών άερίων. Είς τούς έναλλάκτας τούτους ή θερμική αντί-

στασις τῆς ἐξωτερικῆς ἐπιφανείας (ἀέρος/μετάλλου) εἶναι πολύ μεγαλύτερα τῶν θερμικῶν ἀντιστάσεων τοῦ ἐσωτερικοῦ τῶν ἀγωγῶν (ὕγρου ἢ ἀτμῶν/μετάλλου) καί τοῦ μεταλλικοῦ τοιχώματος. Ὑπό τὰς συνθήκας ταύτας ὁ συνολικός συντελεστής μεταφοῶς θερμότητος ( $U_0$ ) ἰσοῦται κατά προσέγγισιν μέ τόν συντελεστήν μεταφοῶς θερμότητος μετάλλου/ἀέρος ( $h_0$ ).

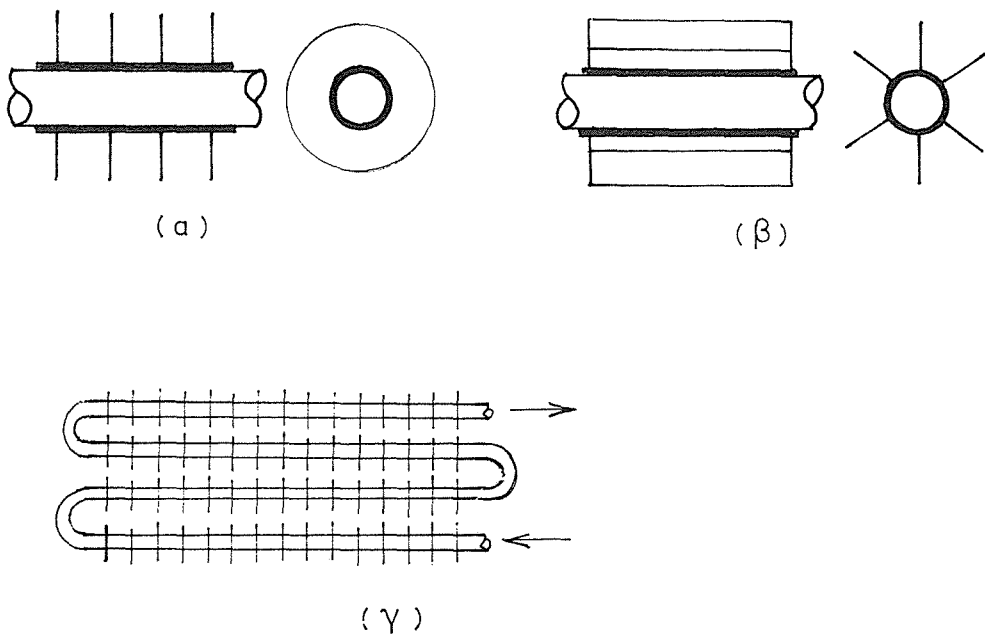
Τυπικόν παράδειγμα ἀποτελεῖ ἡ θέρμανσις ἀέρος, κινουμένου μέ ἐξηναγκασμένην κυκλοφορίαν, διὰ σωλήνος ἐντός τοῦ ὁποίου συμπυκνοῦται κεκορεσμένος ἀτμός. Εἰς τήν περίπτωσιν ταύτην ὁ συντελεστής μεταφοῶς θερμότητος ἀέρος/μετάλλου εἶναι περίπου  $h_0=100 \text{ W/m}^2\text{K}$  ἐνῶ ὁ συντελεστής συμπυκνώσεως τοῦ κεκορεσμένου ἀτμοῦ εἶναι τῆς τάξεως τοῦ  $h_1=10.000 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Διὰ μεταλλικούς σωλήνας μικροῦ πάχους καθίσταται προφανές ὅτι ὁ συνολικός συντελεστής μεταφοῶς θερμότητος θά εἶναι κατά προσέγγισιν  $U_0=100 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Ἐκ τῶν ἀνωτέρω προκύπτει ὅτι διὰ τήν μεταφοράν ὠρισμένης ποσότητος θερμότητος ( $\dot{q}$ ) ἀπαιτεῖται μεγάλη ἐξωτερική ἐπιφάνεια  $A_0$ , συμφώνως πρός τήν βασικήν ἐξίσωσιν ἐναλλαγῆς θερμότητος (2-7).

Ἡ αὔξησις τῆς ἐξωτερικῆς ἐπιφανείας δύναται νά ἐπιτευχθῇ διὰ προσθήκης ἐκτεταμένων μεταλλικῶν ἐπιφανειῶν ἐπί τοῦ κυρίου ἀγωγοῦ. Εἰς τήν πρᾶξιν χρησιμοποιοῦνται συνήθως ἐγκάρσια ( $\alpha$ ) ἢ ἐπιμήκη ( $\beta$ ) πτερυγία. (Σχ. 2-16).

Εἰς τήν πρᾶξιν χρησιμοποιοῦνται συμπαγεῖς ἐναλλάκται θερμότητος ἀποτελούμενοι ἀπό ὠρισμένον ἀριθμόν σπειροειδῶν σωλήνων ἐντός τῶν ὁποίων κυκλοφορεῖ τό θερμαντικόν ἢ ψυκτικόν ὑγρόν. Τά ἐγκάρσια πτερυγία εἶναι κυκλικῆς ἢ ὀρθογωνίου διατομῆς καί τοποθετοῦνται εἰς ὠρισμένας ἀποστάσεις μεταξὺ τῶν πτερυγίων ἀνά μονάδα μήκους τοῦ κυρίου ἀγωγοῦ. Συγχρόνως ὁμως αὐξάνει καί ἡ πτώσις πιέσεως τοῦ ἀέρος, ἡ ὁποία πρέπει νά λαμβάνεται ὑπ' ὄψιν.

Πρός ἐλάττωσιν τῆς πτώσεως πιέσεως τοῦ ὑγροῦ χρησιμοποιεῖται μικρός ἀριθμός διαβάσεων ἀνά σπείραν σωλήνος. Αἱ σπείραι αὗται συνδέονται διὰ κατανομέων σωλήνων, μεγάλης σχετικῶς διαμέτρου.



Σχ. 2-16. Έναλλάκτης θερμότητας μετά πτερυγίων

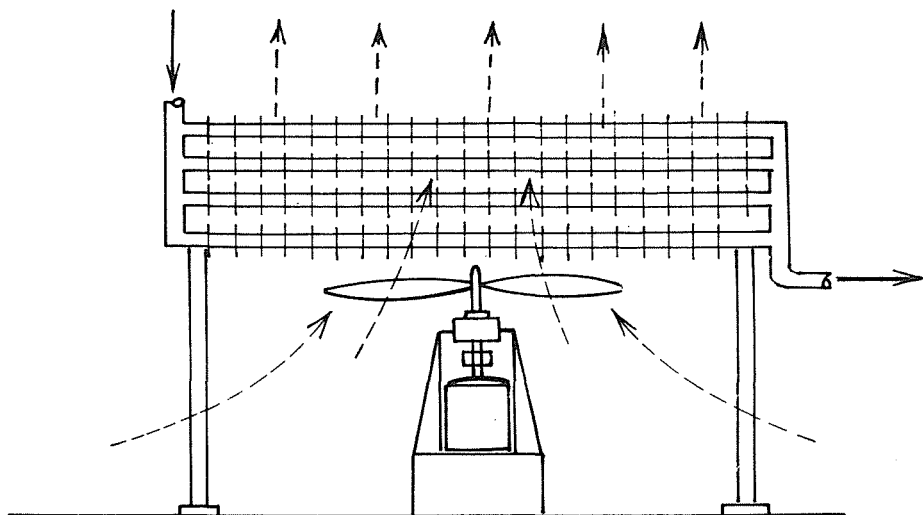
Οι συμπαγεῖς έναλλάκται θερμότητας μετά πτερυγίων υπολογίζονται ἐμπειρικῶς καὶ χρησιμοποιοῦνται εἰς ὠρισμένα πρότυπα μεγέθη διὰ τὴν θέρμανσιν ἢ ψύξιν ὠρισμένου φορτίου ὑπὸ δοθείσας συνθήκας θερμοκρασίας καὶ ταχύτητος ἀέρος καὶ ὑγροῦ. Ἡ ροὴ τοῦ ἀέρος εἶναι ἐγκαρσία ὡς πρὸς τὴν ροὴν τοῦ ὑγροῦ ἐντὸς τῶν σωλῆνων καὶ ἡ ἐπιφάνεια ἐναλλαγῆς αὐξάνεται διὰ προσθήκης περισσοτέρων σειρῶν σωλῆνων μετά πτερυγίων.

Οἱ έναλλάκται θερμότητας μετά πτερυγίων χρησιμοποιοῦνται εἰς εὐρεῖαν κλίμακα διὰ τὴν ψύξιν τοῦ βιομηχανικοῦ ὕδατος. Πρὸς τοῦτο, τὸ ὕδωρ κυκλοφορεῖ ἐντὸς τῶν σωλῆνων, ἐξωτερικῶς τῶν ὁποίων διαβιβάζεται δι' ἀνεμιστήρος ὁ ἀήρ ψύξεως (fin-fan cooler). Διὰ τῶν ἀεροψύκτων τούτων ἐγκαταστάσεων τὸ ὕδωρ ψύξεως ἀνακυκλοφορεῖ συνεχῶς εἰς τὴν ἐγκατάστασιν καὶ

δέν έπέρχονται άπώλειαι αύτου ή ρύπανσις του περιβάλλοντος, ώς τουτο συμβαίνει με τούς άνοικτούς ψυκτικούς πύργους (βλέπε Κεφ. 4). Τυπικός ψυκτήρ ύδατος δι'άέρος δεικνύεται είς τό Σχ. (2-17). Παρόμοιοι έναλλάκται χρησιμοποιούνται διά τήν ψύξιν με άέρα διαφόρων βιομηχανικών ύγρών, π.χ. είς τά διυλιστήρια πετρελαίου.

#### ι) Θερμαντικά Ρευστά

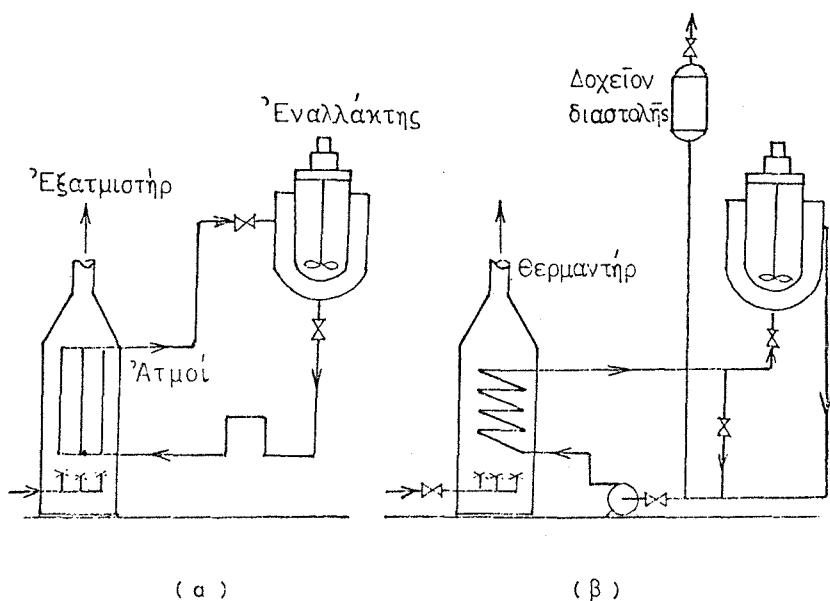
Τό ύδωρ, υπό μορφήν άτμου ή ύγρου, χρησιμοποιεΐται εύρύτατα ώς θερμαντικόν ή ψυκτικόν μέσον είς τούς πλείστους βιομηχανικούς έναλλάκταις θερμότητος. Τό ύδωρ προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως τό χαμηλόν κόστος, αι ύψηλαί τιμαί τής είδικής θερμότητος, τής θερμικής άγωγιμότητος και τής θερμότητος έξατμίσεως και ή ασφάλεια λειτουργίας. Δέν δύναται όμως νά χρησιμοποιηθή είς έφαρμογάς κάτω του 0°C (πήξις). Είς θερμοκρασίας άνω των 200°C ή πίεσις του ύδατος αύξάνει ύπερβολικώς και ή χρήσις αύτου ως θερμαντικού μέσου καθίστα-



Σχ. 2-17. 'Αερόψυκτος έναλλάκτης θερμότητος μετά πτερυγίων

ται αντιοικονομική και δυσχερής διά λόγους ασφαλείας της εγκαταστάσεως.

Διά τήν μεταφοράν θερμότητος εἰς ὑψηλᾶς θερμοκρασίας χρησιμοποιοῦνται ὠρισμένα θερμαντικά ρευστά, ὅπως τετηγμένα μέταλλα ἢ ἄλατα, ὀρυκτέλαια καί ἄτμοι ὀργανικῶν οὐσιῶν. Εἰς τόν Πίνακα (2-5) δίδονται αἱ θερμικαί ἰδιότητες μερικῶν τυπικῶν θερμαντικῶν ρευστῶν τῆς βιομηχανίας.



Σχ. 2-18. Συστήματα θερμαντικῶν ρευστῶν. (α) Κυκλοφορίας ἁτμῶν - ὑγροῦ, (β) ἐξηναγκασμένης κυκλοφορίας ὑγροῦ.

Τό Dowtherm E χρησιμοποιεῖται ὑπό μορφήν συμπυκνωμένων ἁτμῶν εἰς τήν περιοχὴν θερμοκρασιῶν 200-400°C. Τυπικὴ ἐγκατάστασις θερμάνσεως διά Dowtherm E δεικνύεται εἰς τό Σχ. (2-18α) καί ἀποτελεῖται ἀπό λέβητα ἔξατμίσεως καί σωληνώσεις ἁτμῶν καί ἐπιστροφῆς συμπυκνώματος. Εἰς τό δοχεῖον θερμάνσεως οἱ ἁτμοί συμπυκνοῦνται εἰς τόν μανδύα καί τό συμπύ-

κνωμα απομακρύνεται διά καταλλήλου διατάξεως.

## Π Ι Ν Α Ε 2-5

### Τυπικά Θερμαντικά Ρευστά

| Όνομασία     | Χημική Σύστασις                          | Περιοχή<br>Θερμοκρα-<br>σιών °C | $\kappa$<br>W/m K | C<br>kJ/kgK |
|--------------|--|---------------------------------|-------------------|-------------|
| Dowtherm E   | Διχλωροβενζένι-<br>ον (άτμός)            | 200 - 400                       | 0,085             | 1,72        |
| Dowtherm A   | Άρωματικών ό-<br>ρυκτέλαιον (ύ-<br>γρόν) | 150 - 400                       | 0,111             | 2,25        |
| Therminol 66 | Μίγμα Τερφαινου-<br>λίων (ύγρόν)         | 150 - 400                       | 0,110             | 2,38        |
| 56% Na+44% K | Υγρόν τήγμα                              | 400 - 800                       | 27,50             | 1,05        |

Τά θερμαντικά ύγρά (ώρισμένα όρυκτέλαια, τετηγμένα ά-  
λατα κλπ.) χρησιμοποιούνται δι'έξηναγκασμένης κυκλοφορίας  
κλειστού κυκλώματος μέσω λέβητος θερμάνσεως (Σχ. 2-18β).

Τά χρησιμοποιούμενα θερμαντικά ρευστά πρέπει νά είναι  
χημικώς καθαρά, νά μήν αναφλέγωνται καί νά μήν προκαλούνδιά-  
βρωσιν είς τά κατασκευαστικά ύλικά (π.χ. τόν χάλυβα).

#### ια) Θερμικοί Κλίβανοι

Οί θερμικοί κλίβανοι (furnaces) εύρίσκουν πολλές έφαρ-  
μογάς τόσον είς τήν Χημικήν Μηχανικήν όσον καί είς τήν Με-  
ταλλουργίαν καί τήν Μηχανολογίαν. Είς τούς βιομηχανικούς κλι-  
βάνους αναπτύσσονται λίαν ύψηλαί θερμοκρασίαι είτε διά καύ-  
σεως άνθρακος, πετρελαίου καί άερίων, ή δι'ήλεκτρικών άντι-  
στάσεων. Η μετάδοσις θερμότητος έκ τών φλογών, τών θερμών  
αερίων ή τών θερμών έπιφανειών προς τάς θερμαινομένας έπιφα-  
νειάς γίνεται δι'άκτινοβολίας καί διά μεταφοράς έξ έπαφής.

Ό σχεδιασμός τών κλιβάνων βασίζεται ως επί τό πλείστον  
είς τήν πείραν από παρομοίας βιομηχανικάς έγκαταστάσεις, δε-  
δομένου ότι είναι λίαν δυσχερής ή λεπτομερής ανάλυσις τών  
συστημάτων τούτων διά τών βασικών έξισώσεων μεταδόσεως θερ-

μότητα. Αι άρχαί τής θερμικής άκτινοβολίας καί τής μεταφοράς έξ έπαφής ευρίσκουν πολλές εφαρμογές εις τήν επίλυσιν ειδικών προβλημάτων του σχεδιασμού καί τής λειτουργίας των κλιβάνων.

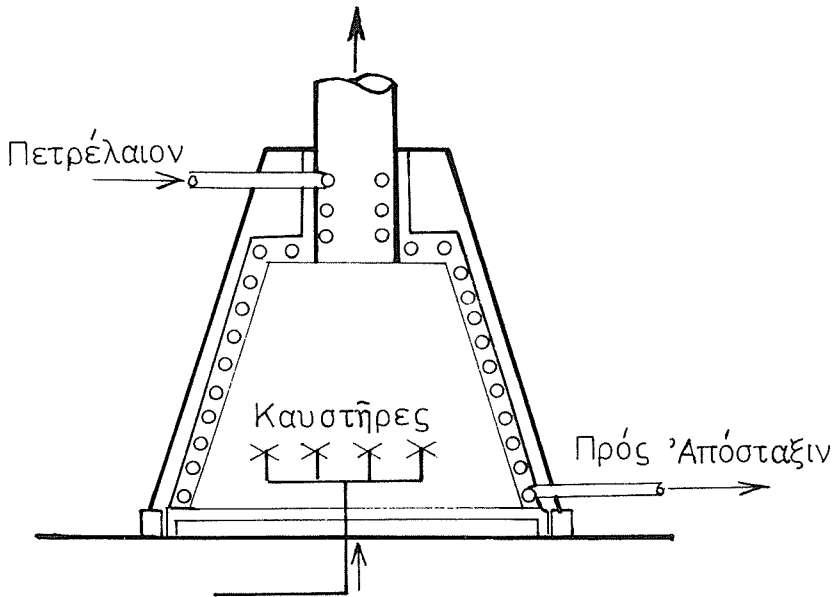
Η κυριωτέρα εφαρμογή των κλιβάνων άφορά τους άτμολέβητας, οι όποιοι έξετάζονται λεπτομερέστερον εις τήν Μηχανολογίαν. Χρησιμοποιούνται δύο βασικοί τύποι άτμολεβήτων 1) Μετά φλογοσωλήνων (fire tubes), οι όποιοι είναι μικράς σχετικώς πιέσεως (7-10 bar) καί άτμοπαραγωγής μέχρι περίπου 10.000 kg/h. Είς τους φλογοσωλήνας ή μετάδοσις θερμότητας γίνεται κυρίως διά μεταφοράς έκ των καυσαερίων τά όποια διέρχονται μέ μεγάλην ταχύτητα διά μέσου των σωλήνων. 2) Μετά ύδροσωλήνων (water tubes), οι όποιοι είναι ύψηλης πιέσεως (50-100 bar) καί μεγάλης άτμοπαραγωγής (π.χ. 200.000 kg/h). Είς τους κλιβάνους μετά ύδροσωλήνων ή μετάδοσις θερμότητας γίνεται διά συνδυασμού άκτινοβολίας καί μεταφοράς άπό τά καυσαέρια, τά όποια κινούνται έξωτερικώς των σωλήνων.

Οι κλίβανοι ευρίσκουν σημαντικές εφαρμογές εις τήν θέρμανσιν του άργου πετρελαίου. Τυπική διάταξις κλιβάνου θερμάνσεως πετρελαίου πρό τής άποστακτικής στήλης δεικνύεται εις τό Σχ. (2-19). Τό άργόν πετρέλαιο προθερμαίνεται άρχικώς διαβιβαζόμενον εις έναλλάκτας άνακτήσεως θερμότητας, όπως π.χ. συμπυκνωτήρας ή ψυκτήρας προϊόντων τής άποστακτικής στήλης. Τό προθερμανθέν πετρέλαιο εισέρχεται εις τους σωλήνας θερμάνσεως του κλιβάνου (pipe still) όπου λαμβάνει χώραν καυσις ύπολείμματος πετρελαίου (μαζούτ) δι' ειδικών καυστήρων.

Η διάταξις των σωλήνων, των καυστήρων καί τής καμίνου γενικώς είναι τοιαύτη ώστε νά έπέρχεται ή μεγαλυτέρα δυνατή χρησιμοποίησις τής θερμότητας καύσεως. Σημαντικόν τμήμα τής θερμότητας μεταδίδεται δι' άκτινοβολίας έκ των φλογών καί των καυσαερίων προς τους σωλήνας πετρελαίου. Τά έκπέποντα άκτινοβολίαν συστατικά των καυσαερίων είναι κυρίως τό διοξείδιον του άνθρακος καί οι ύδρατμοί, των όποιων οι συντελεσταί ικανότητας έκπομπής δίδονται εις τό Σχ. (1-14).

Ο ρυθμός άκτινοβολουμένης θερμότητας δύναται νά ύπολο-





Σχ. 2-19. Κλίβανος θερμάνσεως πετρελαίου

γισθή βάσει της έξιώσεως (1-86) εάν είναι γνωστή η θερμοκρασία των καυσαερίων και των σωλήνων πετρελαίου και ο συνολικός παράγων έναλλαγής δι'άκτινοβολίας ( $\Phi$ ). Ὡς έπιφάνεια έναλλαγής λαμβάνεται η ίσοδύναμος έπιφάνεια των θερμαινομένων σωλήνων.

Ὁ ρυθμός μεταφορᾶς θερμότητας έξ έπαφής υπολογίζεται βάσει ενός έμπειρικοῦ συντελεστοῦ μεταφορᾶς ( $h$ ), ο οποίος έξαρτάται από την θερμοκρασίαν και την ταχύτητα των αερίων και την διάταξιν των σωλήνων.

Είς τους κλιβάνους πετρελαίου έπιτυγχάνονται θερμοκρασίαι του πετρελαίου μέχρι 600 °C και πιέσεις μέχρι 100 bar. Ἡ θερμοκή απόδοσις αὐτῶν κυμαίνεται μεταξύ 70-75%, και θεωρεῖται γενικῶς κατωτέρα της απόδοσεως των κλιβάνων των ατμολεβήτων.

Αι φλόγες των καυστήρων δέν πρέπει να έρχονται είς έπαφήν μέ τους σωλήνας πετρελαίου, προς άποφυγήν τοπικῶν υπερθερμάνσεων και μηχανικῶν βλαβῶν. Οι συνήθεις ρυθμοί ροῆς θερμότητας ( $\dot{q}/A$ ), βάσει της έξωτερικῆς έπιφανείας των σωλή-

νων πετρελαίου, είναι της τάξεως των  $35.000 \text{ W/m}^2$ .

Τό υπέρθερμον πετρέλαιον εξέρχεται του κλιβάνου υπό μορφήν μίγματος ατμών και υγρού και χρησιμοποιείται ως τροφοδότησις της κυρίας αποστακτικής στήλης, όπου έκτονοῦται εἰς τὴν πίεσιν λειτουργίας τοῦ συστήματος (συνήθως τὴν ατμοσφαιρικὴν πίεσιν).

#### β) Σωληνες Θερμότητος

Οἱ σωληνες θερμότητος ἢ θερμοσωληνες (heat pipes) εἶναι εἰδικοί ἐναλλάκται θερμότητος μέ τούς ὁποίους ἐπιτυγχάνονται ὑψηλοί ρυθμοί μεταφοῶς θερμότητος ὑπό τὴν ἐπίδρασιν μικρᾶς διαφορᾶς θερμοκρασίας. Ἡ λειτουργία των βασίζεται εἰς τὴν μεταφοράν τῆς θερμότητος ἐξατμίσεως ἑνός καταλλήλου ρευστοῦ μεταξύ τῶν δύο ἄκρων τῆς διατάξεως καί τὴν ἀνακύκλωσιν τοῦ ὑγροποιηθέντος ρευστοῦ.

Οἱ σωληνες θερμότητος ἀποτελοῦνται ἀπό κλειστόν μεταλλικόν σωλήνα ὁ ὁποῖος περιέχει εἰδικόν πλέγμα καί ρευστόν μεταφοῶς θερμότητος, ὅπως τό ὕδωρ, τό διοξειδίου τοῦ θείου αἰ ἀλκοόλαι καί τὰ Freons. Τό ρευστόν ἐξατμίζεται εἰς τό ἕν ἄκρον τοῦ σωληνος δι' ἀπορροφήσεως θερμότητος καί οἱ αἰμοὶ αὐτοῦ μεταφέρονται καί συμπυκνοῦνται εἰς τό ἕτερον ἄκρον. Τό ὑγρόν ἐπιστρέφει εἰς τόν χῶρον ἐξατμίσεως τοῦ σωληνος, διὰ τριχοειδοῦς ροῆς μέσω εἰδικοῦ μεταλλικοῦ πλέγματος. Τό σύστημα τοῦτο καταλαμβάνει μικρόν ὄγκον, δέν περιέχει κινούμενα μέρη (ἀντλίας, συμπιεστάς κλπ.) καί δύναται νά ἐφαρμοσθῇ εἰς θερμοκρασίας  $-100$  ἕως  $1000^\circ\text{C}$ .

Οἱ σωληνες θερμότητος ἀνεπτύχθησαν ἀρχικῶς διὰ τὴν ταχείαν μεταφοράν θερμότητος εἰς τὰς ἀτομικὰς καί διαστημικὰς ἐφαρμογὰς. Μελετᾶται ἤδη ἡ ἐφαρμογή αὐτῶν εἰς διαφόρους διεργασίας θερμάνσεως καί ψύξεως. Ὡς παράδειγμα ἀναφέρεται ἡ δυνατότης χρησιμοποιήσεως εἰς τὴν ἀφαλάτωσιν τοῦ ὕδατος δι' ἡλιακῆς ἐνεργείας: Οἱ σωληνες θερμότητος δύναται νά ἀπορροφήσουν τὴν ἡλιακὴν ἀκτινοβολίαν πρὸς ἐξάτμισιν ἑνός καταλλήλου ρευστοῦ, ὅπως τό διοξειδίου τοῦ θείου. Ἡ θερμότης ἐξατμίσεως τοῦ ρευστοῦ μεταφέρεται διὰ τῶν ατμῶν αὐτοῦ εἰς

τό άλλον άκρον τών σωλήνων όπου χρησιμοποιείται διά τήν έξ-άτμισιν τοῦ άλατούχου ύδατος. Τό σύστημα τοῦτο χρησιμοποιεῖ πλέον άποδοτικῶς τήν ήλιακήν άκτινοβολίαν άπό τούς συνήθεις ήλιακοῦς άποστακτήρας (Κεφ. 3ι).

#### ιγ) Έναλλάκται Θερμότητος Άσυνεχοῦς Λειτουργίας

Κατά τήν άνάλυσιν τών διαφόρων έναλλακτῶν θερμότητος υπετέθη ὅτι οὔτοι εὑρίσκονται εἰς συνεχῆ λειτουργίαν, ὅπως πράγματι συμβαίνει εἰς τάς πλείστας βιομηχανικάς θερμικάς διεργασίας. Εἰς τήν πρᾶξιν ὑφίστανται ὅμως πολλάί διεργασίαι θερμάνσεως ἢ ψύξεως άσυνεχοῦς λειτουργίας, διά τάς ὁποίας άπαιτεῖται ἰδιαιτέρα άνάλυσις. Σημειωτέον ὅτι κατά τήν ἔναρξιν λειτουργίας διαφόρων θερμικῶν ἐγκαταστάσεων ἢ θέρμανσις ἢ ἡ ψύξις λαμβάνει χώραν ὑπό συνθήκας παρομοίας πρός τήν άσυνεχῆ λειτουργίαν, μέχρις άποκαταστάσεως τών σταθερῶν συνθηκῶν τῆς συνεχοῦς λειτουργίας.

Κατωτέρω ἐξετάζεται ἡ περίπτωσις θερμάνσεως (ἢ ψύξεως) ἑνός προϊόντος ὑπό συνθήκας άσυνεχοῦς λειτουργίας. Χάριν ἀπλοποιήσεως, τό θερμαντικόν (ἢ ψυκτικόν) μέσον θεωρεῖται ὅτι χρησιμοποιεῖται ὑπό συνεχῆ λειτουργίαν ἄνευ ἀλλαγῆς φάσεως. Κατ'ἀνάλογον τρόπον ἀναλύεται καί ἡ περίπτωσις συνεχοῦς λειτουργίας μετ'ἀλλαγῆς φάσεως τοῦ θερμαντικοῦ (ἢ ψυκτικοῦ) μέσου.

Ἔστω ὅτι ἐπιζητεῖται ἡ θέρμανσις  $B$  kg ἑνός προϊόντος εἰδικῆς θερμότητος  $C_p$  ἀπό θερμοκρασίαν  $T_1$  εἰς  $T$ . Τό προϊόν τοῦτο εὑρίσκειται ἐντός καλῶς ἀναδευομένου δοχείου, θερμαινομένου διά ρευστοῦ παροχῆς  $\dot{m}$  (kg/s), εἰδικῆς θερμότητος  $C_p'$  τοῦ ὁποίου ἡ θερμοκρασία μεταβάλλεται ἀπό  $T_1'$  εἰς  $T_2'$ . Ἡ ἐπιφάνεια έναλλαγῆς θερμότητος εἶναι  $A$  (m<sup>2</sup>) καί ὁ συνολικός συντελεστής μεταφορᾶς θερμότητος  $U$  (W/m<sup>2</sup>K).

Δι'ίσοζυγίου θερμότητος μεταξύ τών χρόνων ( $t$ ) καί ( $t + dt$ ) λαμβάνεται ὁ ρυθμός μεταφορᾶς θερμότητος κατά τό ἀπειροστόν χρονικόν διάστημα ( $dt$ ) ὡς:

$$\dot{q} = UA\Delta T_L = \dot{m}C_p'(T_1' - T_2') = BC_p(dT/dt) \quad (2-40)$$

Κατά τόν άπειροστόν χρόνον  $dt$  ή θερμοκρασία του προϊόντος Β θά αύξηθη κατά  $dT$ , ήτοι από  $T$  θά γίνη  $(T+dT)$ . Είς τό αυτό χρονικόν διάστημα, ή θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου θά μεταβληθῆ, ώς έγένητο δεκτόν, από  $T_1'$  είς  $T'$ . Έπομένως ή λογαριθμική μέση διαφορά θερμοκρασίας κατά τήν μεταβολήν ταύτην, θεωρουμένην καθ'όμορροήν, θά εἶναι:

$$\Delta T_L = \frac{(T_1' - T) - [T' - (T + dT)]}{\ln \left[ \frac{T_1' - T}{T' - (T + dT)} \right]} \quad (2-41)$$

Ἡ διαφορική μεταβολή τῆς θερμοκρασίας ( $dT$ ) θεωρεῖται άμελητέα ώς πρός τάς διαφοράς  $(T_1' - T')$  καί  $(T' - T)$  καί έπομένως ή έξιίσωσις (2-41) δύναται νά γραφῆ κατά προσέγγισιν ώς:

$$\Delta T_L = \frac{T_1' - T'}{\ln \left( \frac{T_1' - T}{T' - T} \right)} \quad (2-42)$$

Σημειωτέον ότι ή αύτή έκφρασις του  $\Delta T_L$  εύρίσκεται καί εάν ή μεταβολή θεωρηθῆ ότι λαμβάνει χώραν κατ'άντιρροήν.

Δι'άντικαταστάσεως τῆς τιμῆς του  $\Delta T_L$  έκ τῆς έξιίσώσεως, (2-42) είς τήν (2-40) λαμβάνεται:

$$\dot{q} = UA \frac{\frac{BC_p}{\dot{m}C_p'} (dT/dt)}{\ln \left[ \frac{T_1' - T}{T_1' - T - \frac{BC_p}{\dot{m}C_p} (dT/dt)} \right]} \quad (2-43)$$

Ἡ έξιίσωσις (2-43) γράφεται ώς:

$$\frac{BC_p}{\dot{m}C_p'} (dT/dt) = (T' - T) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{UA}{\dot{m}C_p'} \right) \right] \quad (2-44)$$

Δι'όλοκληρώσεως μεταξύ  $(0, t)$  καί  $(T_1, T)$  προκύπτει:

$$t = \frac{1}{K} \ln \left( \frac{T_1' - T_1}{T_1' - T} \right) \quad (2-45)$$

όπου

$$K = \frac{\dot{m}C_p'}{BC_p} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{UA}{\dot{m}C_p'} \right) \right]$$

Σημειωτέον ότι ο παράγων  $UA/\dot{m}C_p'$  ομοιάζει με τον αριθμό μονάδων μεταφοράς (NTU) της εξίσωσης (2-19). Ο NTU εφαρμόζεται κυρίως εις τας διεργασίας συνεχούς λειτουργίας.

Ἡ εξίσωσις (2-45) ἐπιλυομένη ὡς πρὸς  $T$ , δίδει:

$$T = T_1' - (T_1' - T_1) \exp(-Kt) \quad (2-46)$$

Διὰ διαφορίσεως τῆς εξίσωσης (2-46) ὡς πρὸς τὸν χρόνον καὶ δι' ἀντικαταστάσεως τοῦ διαφορικοῦ εἰς τὴν (2-40) προκύπτει:

$$\dot{q} = BC_p K (T_1' - T_1) \exp(-Kt) \quad (2-47)$$

Προκειμένου περί ψύξεως προκύπτει παρομοία εξίσωσις με τὴν μόνην διαφορὰν ὅτι χρησιμοποιεῖται τὸ ἀρνητικὸν σημεῖον εἰς τὸ δεύτερον μέλος.

#### ιβ) Προγράμματα Ὑπολογισμοῦ Ἐναλλακτῶν Θερμότητος

Ὁ λεπτομερὴς θερμικὸς καὶ μηχανολογικὸς σχεδιασμὸς τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος ἀπαιτεῖ πολλὰ δεδομένα καὶ πολλοὺς ὑπολογισμοὺς. Οἱ ὑπολογισμοὶ διευκολύνονται καὶ ἐπιταχύνονται μετὰ τὴν χρησιμοποίησιν εἰδικῶν προγραμμάτων ἠλεκτρονικῶν ὑπολογιστῶν.

Εἰς τὸν θερμικὸν σχεδιασμὸν (thermal design) ὡς βασικὰ δεδομένα χρησιμοποιοῦνται οἱ ρυθμοὶ ροῆς καὶ αἱ θερμοκρασίαι τῶν διαφόρων ρευστῶν. Ἀπαιτοῦνται ἐπίσης αἱ θερμοφυσικαὶ ἰδιότητες τῶν ρευστῶν ( $C_p, k, \eta, \rho$ ), αἱ ὁποῖαι λαμβάνονται συνήθως ἀπὸ τὴν βιβλιογραφίαν. Διὰ λεπτομερεῖς ὑπολογισμοὺς πρέπει νὰ λαμβάνεται ὑπ' ὄψιν ἡ μεταβολὴ τῶν θερμοφυσικῶν ἰδιοτήτων συναρτήσῃ τῆς θερμοκρασίας καὶ χρησιμοποιοῦνται ὑποπρογράμματα ὑπολογιστῶν μετὰ ἐμπειρικὰς εξισώσεις. Οἱ συντελεσταὶ μεταφοράς θερμότητος καὶ αἱ πτώσεις πιέσεως ὑπολογίζονται ἀπὸ τὰς γνωστὰς ἐμπειρικὰς εξισώσεις.

Διὰ τοὺς ἐναλλάκτας κελύφους καὶ σωλῆνων, μετὰ τὸν θερμικὸν σχεδιασμὸν ὑπολογίζονται τὰ ἀκόλουθα στοιχεῖα: (1) Τὸ μέγεθος, τὸ μήκος καὶ ὁ ἀριθμὸς τῶν σωλῆνων, (2) ὁ ἀριθμὸς τῶν διαβάσεων τῶν σωλῆνων, (3) αἱ διαστάσεις τοῦ κυλινδρικοῦ κελύφους, (4) τὸ εἶδος καὶ ἡ διάταξις τῶν ἀνακλαστήρων

καί (5) ή πίεσις καί ή θερμοκρασία λειτουργίας.

Ὁ μηχανολογικός σχεδιασμός (mechanical design) τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος εἶναι ἀναγκαῖος διὰ τήν ὀρθήν κατασκευήν καί κανονικήν λειτουργίαν αὐτῶν. Πρὸς τοῦτο ἐφαρμόζονται λεπτομερεῖς προδιαγραφαί ὠρισμένων κρατικῶν καί διεθνῶν κωδίκων. Οἱ συνήθεις κώδικες διὰ τοὺς ἐναλλάκτας κελύφους καί σωλῆνων εἶναι: (1) Ὁ κῶδιξ τῆς Ἀμερικανικῆς Ἐνώσεως Μηχανολόγων Μηχανικῶν ASME (Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division I, 1974) καί (2) τὰ πρότυπα τοῦ Ἀμερικανικοῦ Ὄργανισμοῦ Tubular Exchangers Manufacturers' Association (TEMA). Ἐπίσης χρησιμοποιοῦνται οἱ Γερμανικοὶ Κανονισμοὶ DIN καί οἱ Βρετανικοὶ Κανονισμοὶ - Πρότυπα BS 5500 καί BS 3274.

Ὁ λεπτομερῆς μηχανολογικός σχεδιασμός τῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος διευκολύνεται μέ εἰδικά προγράμματα ἠλεκτρονικῶν ὑπολογιστῶν, τὰ ὅποια χρησιμοποιοῦν ὡς δεδομένα (Input) τὰ ἀποτελέσματα τοῦ θερμικοῦ σχεδιασμοῦ. Ἐπί πλέον ἀπαιτοῦνται δεδομένα ἐπὶ τῶν κατασκευαστικῶν ὑλικῶν, τῆς ἐπιτρεπομένης διαβρώσεως, τῆς ἀντοχῆς τῶν ὑλικῶν, τῶν συντελεστῶν διαστολῆς καί τοῦ τύπου τῶν χρησιμοποιηθησομένων φλαντζῶν (flangers), παρεμβυσμάτων (gaskets) καί στομίων (nozzles).

Διὰ τοὺς ἐναλλάκτας κελύφους καί σωλῆνων μέ τόν μηχανολογικόν σχεδιασμόν καθορίζονται λεπτομερῶς αἱ διαστάσεις καί τὰ κατασκευαστικά σχέδια τοῦ κελύφους, τῶν καλυμμάτων τοῦ κελύφους, τῶν σωλῆνων, τῶν καθρεπτῶν (tubesheets), τῶν φλαντζῶν καί τῶν παρεμβυσμάτων, τῶν ἀνακλαστήρων, τῶν στομίων καί τῶν μπουλονιῶν (bolts).

#### ιε) Βιομηχανική Ψύξις καί Κατάψυξις

Ἡ βιομηχανική ψύξις (refrigeration) καί κατάψυξις (freezing) χρησιμοποιοῦνται εὐρύτατα εἰς τὰς βιομηχανίας γεωργικῶν προϊόντων, τροφίμων καί φαρμάκων. Τὰ θέματα ταῦτα ἐξετάζονται ἀπὸ πλευρᾶς συντηρήσεως καί τεχνολογίας εἰς τήν Τεχνολογίαν Τροφίμων καί ἀπὸ πλευρᾶς μηχανολογικῶν ἐγκαταστάσεων εἰς τήν Ἐφαρμοσμένην Θερμοδυναμικήν καί τήν Ψύξιν

καί κλιματισμόν. Ἐνταῦθα ἡ ψύξις καί ἡ κατάψυξις ἐξετάζονται ὡς εἰδικαί ἐφαρμογαί τῆς Ἐναλλαγῆς θερμοτήτος.

Διά τῆς ψύξεως ἐπιτυγχάνονται θερμοκρασίαι περίπου  $0^{\circ}\text{C}$ , αἱ ὁποῖαι χρησιμοποιοῦνται εἰς τοὺς θαλάμους ἀποθηκεύσεως καί μεταφορᾶς τῶν νωπῶν γεωργικῶν προϊόντων. Διά τῶν χαμηλῶν θερμοκρασιῶν μειοῦται σημαντικῶς ὁ ρυθμός τῶν χημικῶν, βιοχημικῶν καί μικροβιολογικῶν ἀλλοιώσεων τῶν εὐπαθῶν προϊόντων, τὰ ὁποῖα διατηροῦνται οὕτω νωπά ἐπὶ σημαντικόν χρονικόν διάστημα.

Αἱ ἀκριβεῖς συνθῆκαι ἀποθηκεύσεως, ἥτοι ἡ θερμοκρασία, καί ἡ σχετικὴ ὑγρασία τῶν ψυκτικῶν θαλάμων, ἐξαρτῶνται ἀπὸ τό εἶδος τοῦ προϊόντος. Κατὰ κανόνα ἡ θερμοκρασία ἀποθηκεύσεως πρέπει νά εἶναι κατὰ τι ὑψηλότερα τοῦ σημείου πήξεως τοῦ προϊόντος καί ἡ σχετικὴ ὑγρασία ἡ μεγαλύτερα δυνατὴ (ἄνω τῶν 90%) πρὸς ἀποφυγὴν τῶν ἀπωλειῶν δι' ἔξατμίσεως τοῦ ὕδατος. Εἰς ὠρισμένα προϊόντα (π.χ. μῆλα) ἐνδείκνυται τροποποιήσις τῆς συστάσεως τῆς ἀτμοσφαίρας τοῦ ἀποθηκευτικοῦ χώρου, πρὸς καλυτέραν συντήρησιν. Οὕτω χρησιμοποιεῖται ἀτμόσφαιρα μικροτέρας περιεκτικότητος εἰς Ὄξυγόνον καί μεγαλύτερας εἰς διοξειδίον τοῦ ἀνθρακος (controlled atmosphere storage), ἐπιτυγχανομένη δι' ἐλεγχομένης καύσεως πετρελαίου ἢ φυσικοῦ ἀερίου καί μερικῆς ἀπορροφήσεως τοῦ διοξειδίου τοῦ ἀνθρακος.

Ἡ κατάψυξις τῶν προϊόντων, ἥτοι ἡ μετατροπὴ τῆς ἐλευθέρας ὑγρασίας εἰς πάγον, ἐπιτυγχάνεται διὰ βεβιασμένης κυκλοφορίας ψυχροῦ ἀέρος εἰς εἰδικούς θαλάμους ἢ δι' ἀμέσου ἐπαφῆς τῶν προϊόντων μὲ κατάλληλα ψυκτικά ὑγρά (κρυογενῆ). Τὰ κατεψυγμένα προϊόντα ἀποθηκεύονται εἰς θαλάμους θερμοκρασίας  $-18^{\circ}\text{C}$  ( $0^{\circ}\text{F}$ ). Διά τῆς καταψύξεως ἐπιτυγχάνεται ἡ ἀδρανοποίησις τῶν μικροοργανισμῶν καί τῶν ἐνζύμων ἀλλοιώσεως καί τὰ προϊόντα διατηροῦνται ἐπὶ μακρόν χρονικόν διάστημα. Πρὸς ἀποφυγὴν ἀπωλειῶν ὑγρασίας δι' ἔξαχνώσεως τοῦ πάγου καί χημικῶν ἀλλοιώσεων δι' ἐπιδράσεως τοῦ ἀτμοσφαιρικοῦ ὀξυγόνου, τὰ κατεψυγμένα προϊόντα συσκευάζονται καταλλήλως.

Εἰς τοὺς θαλάμους ψύξεως καί καταψύξεως ἡ θερμοκρασία καί ἡ σχετικὴ ὑγρασία διατηροῦνται εἰς τὰ καθωρισμένα ὄρια

διά κυκλοφορίας ψυχρού αέρος μέ σύστημα άνεμιστήρων / έναλλακτών θερμότητας. Οί έναλλάκται θερμότητας (ψυκτήρες) ύπολογίζονται βάσει του συνολικού ρυθμού άπομακρυνόμενης θερμότητας, ή όποία περιλαμβάνει τήν θερμότητα προψύξεως του προϊόντος καί τών δοχείων συσκευασίας, τήν θερμότητα άναπνοής τών νωπών προϊόντων, τάς θερμικάς άπωλείας διά τών τοιχωμάτων καί τών θυρών του θαλάμου καί τάς διαφόρους τριβάς τών άνεμιστήρων, κινητήρων κλπ.

Ό σχεδιασμός τών άποθηκευτικών θαλάμων βασίζεται (είς τήν έλάττωσιν τών άπωλειών θερμότητας (ψύχους) καί ύγρασίας από τό σύστημα. Ή έλάττωσις του ρυθμού μεταδόσεως έπιτυγχάνεται διά καταλλήλου μονώσεως τών τοιχωμάτων, χρησιμοποιούμενων έπαλλήλων στρωμάτων μονωτικών καί δομικών ύλικών (Κεφ. 1). Είς τά τοιχώματα τών θαλάμων παρεμβάλλονται καί στρώματα παρεμποδίζοντα τήν διαφυγήν τής ύγρασίας, όπως λεπτά φύλλα άλουμινίου.

Ή θεωρία τής Ψύξεως βασίζεται είς τάς άρχάς τής Έφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής. Είς τήν πράξιν χρησιμοποιούνται τρία κύρια συστήματα βιομηχανικής παραγωγής του ψύχους, ήτοι ή συμπιέσις άτμών ψυκτικού μέσου, ή άπορρόφησις άτμών ψυκτικού μέσου καί ή ζέσις ψυκτικών μέσων.

#### 1. Συμπιέσις Άτμών Ψυκτικού Μέσου

Είς τάς πλείστας έφαρμογάς τής ψύξεως καί τής καταψύξεως χρησιμοποιείται τό σύστημα συμπιέσεως άτμών ώρισμένων ψυκτικών μέσων. Είς τό σύστημα τουτο τό ψύχος παράγεται διά μεταφοράς θερμότητας από περιοχής χαμηλής θερμοκρασίας είς περιοχήν ύψηλής θερμοκρασίας διά τής "άντλίας θερμότητας", ήτοι διά θερμοδυναμικού συστήματος έκτονώσεως/συμπιέσεως καταλλήλου ψυκτικού μέσου.

Ός ψυκτικά μέσα χρησιμοποιούνται κυρίως ή άμμωνία καί τό Freon 12 (διχλωροδιφθορομεθάνιον) καθώς καί άλλαι ένώσεις μέ άναλόγους θερμοδυναμικάς ιδιότητας. Αί ένώσεις αυτές είναι άέρια είς χαμηλάς θερμοκρασίας καί ύγροποιούνται εύχερως διά συμπιέσεως καί ψύξεως.

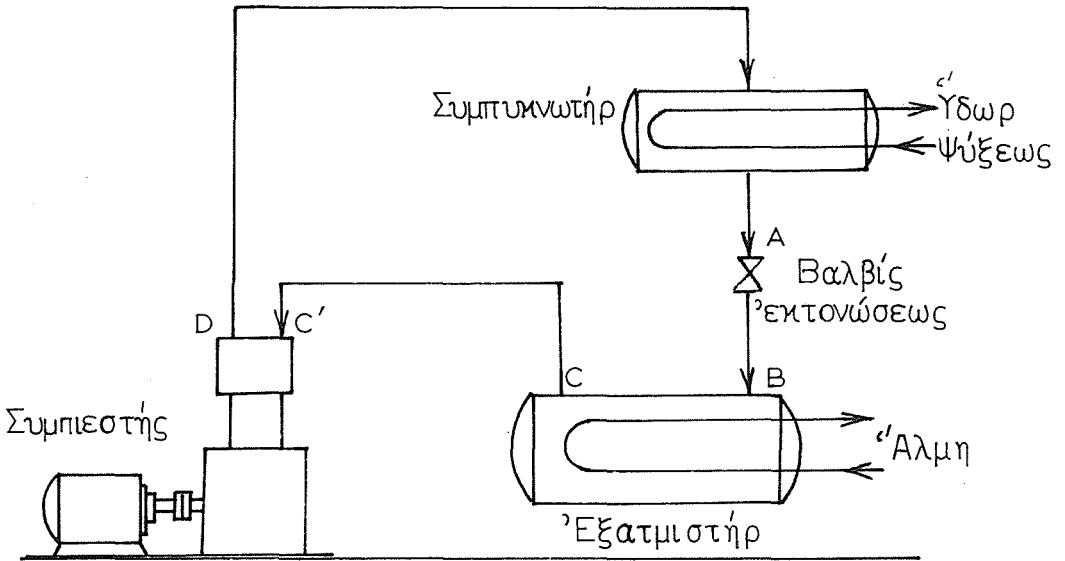


Τά ψυκτικά μέσα πρέπει νά ἔχουν μεγάλην θερμότητα ἔξατμίσεως, ὑψηλήν εἰδικήν θερμότητα καί μικρόν εἰδικόν ὄγκον ἀτμῶν, χαμηλήν εἰδικήν θερμότητα καί χαμηλόν ἰξῶδες ὑγροῦ. Ἐπίσης δέν πρέπει νά εἶναι δαπανηρά, ἀναφλέξιμα, τοξικά ἢ διαβρωτικά. Ἐπειδή ἡ ὑγροποίησης τῶν ἀτμῶν τοῦ ψυκτικοῦ μέσου γίνεται εἰς ἐναλλάκτας θερμότητος ψυχομένους δι' ὕδατος ἡ κρίσιμος θερμοκρασία τοῦ μέσου πρέπει νά εἶναι ὑψηλότερα τῆς θερμοκρασίας τοῦ ὕδατος (π.χ. 25 °C). Αἱ θερμοδυναμικά ἰδιότητες τῶν κυριωτέρων ψυκτικῶν μέσων δίδονται εἰς λεπτομερεῖς Πίνακας, Διαγράμματα καί Νομογραφήματα τῆς Βιβλιογραφίας.

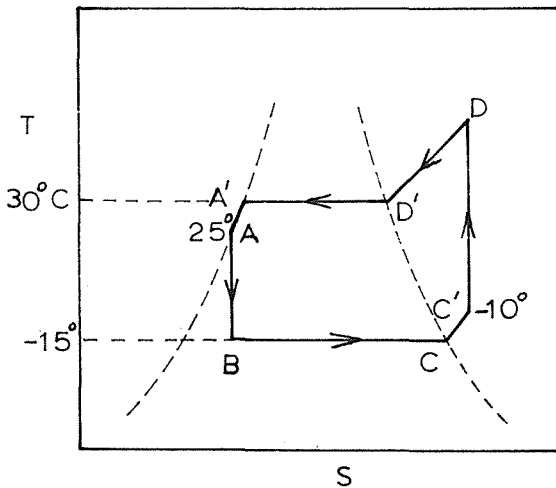
Τό Σχ. (2-20) δεικνύει διαγραμματικῶς σύστημα ψύξεως διὰ συμπίεσεως ἀτμῶν ἀμμωνίας, ἡ ὁποία προτιμᾶται εἰς μεγάλας ἐγκαταστάσεις λόγῳ τοῦ χαμηλοῦ κόστους καί τῆς μεγάλης θερμότητος ἔξατμίσεως. Εἰς μικροτέρας ἐγκαταστάσεις χρησιμοποιοῦνται κυρίως διάφοροι ἀλογονωμένοι ὑδρογονάνθρακες (Freon) οἱ ὁποῖοι ἄν καί δαπανηρότεροι, πλεονεκτοῦν τῆς ἀμμωνίας κυρίως εἰς τήν ἀσφάλειαν χρήσεως.

Ἐγγρά ἀμμωνία ἐκτονοῦται διὰ καταλλήλου βαλβίδος εἰς τόν ἐξατμιστήρα (ψυκτῆρα) ὅπου ἐπιτυχάνεται ψῦξις τοῦ ἀέρος ἢ τῆς ψυκτικῆς ἄλμης. Οἱ παραγόμενοι ἀτμοί συμπιέζονται μηχανικῶς εἰς ὑψηλήν πίεσιν καί συμπυκνοῦνται εἰς ἐναλλάκτην θερμότητος δι' ὕδατος. Ἡ ὑγροποιηθεῖσα ἀμμωνία ἐπαναλαμβάνει ἀκολούθως τό κύκλωμα ψύξεως.

Ἡ Ἀμερικανική Ἐνωσις Μηχανικῶν Ψύξεως (ASRE) χρησιμοποιεῖ τὰς ἀκολούθους προτύπους συνθήκας λειτουργίας τῶν συστημάτων ψύξεως διὰ συμπίεσεως ἀτμῶν ψυκτικοῦ μέσου: θερμοκρασία ἐξατμιστήρος -15 °C (5 °F), θερμοκρασία συμπυκνώσεως 30 °C (86 °F), ὑπερθέρμανσις ἀτμῶν μεταξύ ἐξατμιστήρος καί συμπυκνωτοῦ 5 °C (9 °F) καί ὑπόψυξις ὑγροῦ μεταξύ συμπυκνωτήρος καί βαλβίδος ἐκτονώσεως 5 °C (9 °F). Ὡς δεικνύεται εἰς τό Σχ. (2-20β) διὰ τήν ἀμμωνίαν ἡ ἀντίστοιχος ὑψηλή πίεσις (συμπυκνώσεως) εἶναι 11,2 bar, ἡ δέ χαμηλή πίεσις (ἐξατμίσεως) εἶναι 2,3 bar. Διὰ τό Freon 12 αἱ δύο αὗται πιέσεις εἶναι 7,2 bar καί 1,8 bar, ἥτοι τό ψυκτικόν τοῦτο μέσον ἀπαιτεῖ σημαντικῶς χαμηλοτέρας πιέσεις λειτουργίας ἀπό



( α )



( β )

Σχ. 2-20. (α) Διάγραμμα ψύξεως διά συμπίεσεως (β) Πρότυποι συνθήκαι λειτουργίας (ASRE)

τήν άμμωνίαν διά τήν έπίτευξιν τών αύτών θερμοκρασιών.

Ώς ψυκτική μονάς χρησιμοποιείται ο τόννος ψύξεως = 3,5 kW ή 200 Btu/min. Η μονάς αυτή άντιστοιχεί είς τήν θερμότητα τήν άπομακρυνομένην κατά τήν τήξιν ενός βραχέως τόννου (2.000 lb) πάγου ανά ημέραν, ήτοι  $2000 \cdot 144/24 \cdot 60 = 200$  Btu/min (θερμότης τήξεως τοϋ πάγου  $144$  Btu/lb = 336 kJ/kg).

Διά τήν σύγκρισιν τών διαφόρων συστημάτων ψύξεως διά συμπιέσεως χρησιμοποιείται ο συντελεστής λειτουργίας (coefficient of performance, cop), ο οποῖος ορίζεται ώς ο λόγος τής μεταφερομένης είς τόν έξατμιστήρα θερμότητος πρός τό μηχανικόν έργον τό άπαιτούμενον διά τήν μεταβολήν ταύτην. Ο μέγιστος δυνατός συντελεστής λειτουργίας άντιστοιχεί στον κώκλον Carnot (βλέπε Έφρημοσμένην θερμοδυναμικήν) καί δίδεται άπό τήν έξίσωσιν:

$$\text{cop} = T_2 / (T_1 - T_2) \quad (2-48)$$

όπου  $T_1$  = θερμοκρασία συμπυκνώσεως, K

$T_2$  = θερμοκρασία έξατμίσεως, K

Δέον νά σημειωθῆ ότι ο συντελεστής λειτουργίας είναι τελείως διάφορος τοϋ βαθμοϋ άποδόσεως ενός συστήματος ο οποῖος είναι πάντοτε μικρότερος τής μονάδος. Ο συντελεστής λειτουργίας λαμβάνει καί τιμές μεγαλυτέρας τής μονάδος π.χ. διά τά συστήματα άμμωνίας καί Freon 12 είναι περίπου  $\text{cop} = 4,7$ .

Η άπαιτούμενη ίσχύς τοϋ συμπιεστοϋ διά τήν παραγωγήν Ν τόννων ψύχους δίδεται άπό τήν έξίσωσιν:

$$P = 3,5 N / \text{cop} \quad (2-49)$$

όπου P = ίσχύς συμπιεστοϋ είς kW.

Έκ τής έξισώσεως (2-49) έπεται ότι διά τά συστήματα άμμωνίας ή Freon 12 ή ίσχύς τοϋ συμπιεστοϋ είς (HP) ίσοϋται κατά προσέγγισιν μέ τούς τόννους ψύξεως (N).

Είς τās ψυκτικές έγκαταστάσεις χρησιμοποιοϋνται διάφοροι τύποι παλινδρομικών καί φυγοκεντρικών συμπιεστών. Οί παλινδρομικοί συμπιεσταί χρησιμοποιοϋνται είς τās έγκαταστά -

σεις μικροῦ καί μετρίου μεγέθους, οἱ δέ φυγοκεντρικοί εἰς τὰς μεγάλας ἐγκαταστάσεις (ἄνω τῶν 100 τόννων). Διά τήν ἐπίτευξιν ὑψηλῶν πιέσεων χρησιμοποιοῦνται συμπιεσταί πολλῶν βαθμίδων.

Οἱ συμπυκνωτήρες τῶν ἀτμῶν τοῦ ψυκτικοῦ μέσου εἶναι παρόμοιοι πρός τούς σωληνωτούς ἐναλλάκτας θερμότητος μέ τούς ἀτμούς συμπυκνουμένους εἰς τό κέλυφος καί τό ὕδωρ ψύξεως διαβιβαζόμενον διά τῶν σωλήνων. Χρησιμοποιοῦνται ἐπίσης κατακόρυφοι συμπυκνωτήρες εἰς τούς ὁποίους τό ὕδωρ ψύξεως διαβιβάζεται ὡς λεπτόν στρώμα εἰς τό ἐσωτερικόν τῶν σωλήνων. Εἰς τούς συμπυκνωτήρας τούτους ἐπιτυγχάνονται ὑψηλοί συντελεσταί μεταφορᾶς θερμότητος καί μικρά πτώσις πιέσεως τοῦ ὕδατος ψύξεως.

Πρός ἐλάττωσιν τῆς ποσότητος τοῦ ὕδατος ψύξεως χρησιμοποιοῦνται συμπυκνωτήρες δι' ἐξατμίσεως ὕδατος (evaporative condensers) οἱ ὁποῖοι ὁμοιάζουν πρός τούς ψυκτικούς πύργους βεβιασμένης κυκλοφορίας (Σχ. 4-8) μέ τήν διαφοράν ὅτι εἰς τό τμήμα ἐξατμίσεως τοῦ ὕδατος διέρχονται αἱ σωληνώσεις συμπυκνώσεως τῶν ἀτμῶν τοῦ ψυκτικοῦ μέσου.

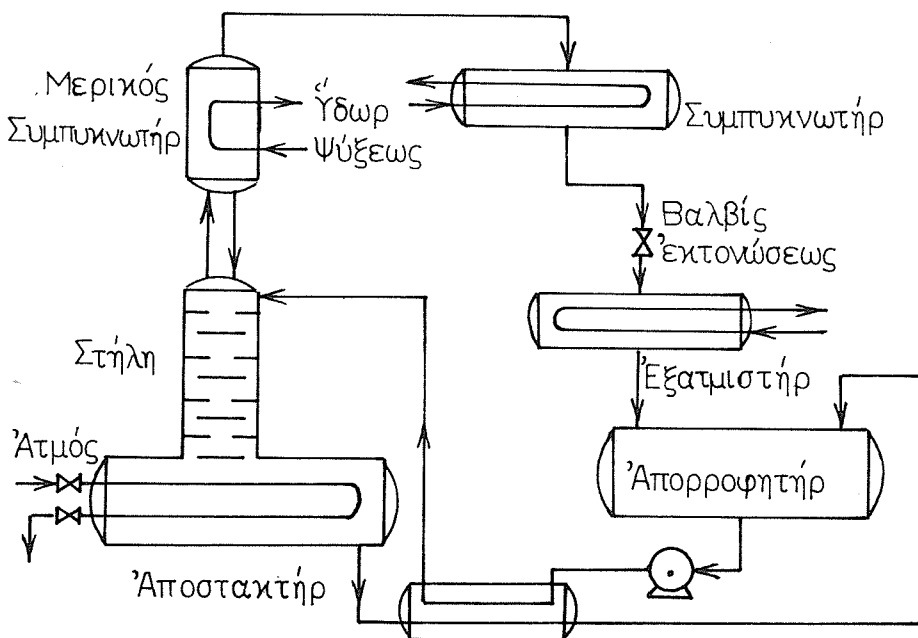
Εἰς μικράς ἐγκαταστάσεις χρησιμοποιοῦνται ἀερόψυκτοι συμπυκνωτήρες, ἀποτελούμενοι ἀπό ὀριζοντίους σωλήνες μετά πτερυγίων διά τῶν ὁποίων διαβιβάζεται ἀήρ δι' ἀνεμιστήρος.

Ὡς ἐξατμιστήρες τοῦ ψυκτικοῦ μέσου χρησιμοποιοῦνται διάφοροι τύποι ἐναλλακτῶν θερμότητος, οἱ ὁποῖοι ἐπιτρέπουν τόν διαχωρισμόν καί τήν ἀπομάκρυνσιν τῶν παραγομένων ἀτμῶν. Διά τήν ψύξιν τοῦ ἀέρος χρησιμοποιοῦνται ἐναλλάκται θερμότητος μετά πτερυγίων, διά τῶν ὁποίων κυκλοφορεῖ ὑπό βεβιασμένην κυκλοφορίαν ὁ ψυχόμενος ἀήρ. Εἰς χώρους ὑψηλῆς ὑγρασίας σχηματίζεται εὐκόλως πάχος ἐπί τῶν ψυχρῶν πτερυγίων μέ ἀποτέλεσμα τήν ἐλάττωσιν τοῦ ρυθμοῦ μεταφορᾶς θερμότητος ἢ καί τήν ἀπόφραξιν τοῦ ἐξωτερικοῦ τοῦ ἐναλλάκτου. Εἰς τήν περίπτωσιν ταύτην ἐνδείκνυνται ἐναλλάκται θερμότητος μέ σχετικῶς μεγάλην ἀπόστασιν μεταξύ τῶν πτερυγίων. Ἐπίσης χρησιμοποιοῦνται συστήματα κυκλοφορίας διαλυμάτων ἄλλης, τὰ ὁποῖα, διαβιβαζόμενα εἰς τήν ἐξωτερικήν ἐπιφάνειαν τῶν ἐναλλακτῶν, ἐμποδίζουν τόν σχηματισμόν πάγου καί βελτιώνουν τούς

συντελεστές μεταφοράς θερμότητας (wet coils).

## 2. Άπορροφήσις Άτμών Ψυκτικού Μέσου

Ἡ ψύξις δι' ἀπορροφήσεως (absorption refrigeration) χρησιμοποιεῖται εἰς ὀρισμένας περιπτώσεις ἀντὶ τοῦ συνήθους συστήματος συμπίεσεως τῶν ἀτμῶν. Τό πλέον ἐν χρήσει σύστημα ἀπορροφήσεως ἀποτελεῖται ἀπό τό μίγμα ἀμμωνία/ὔδωρ. Οἱ ἀτμοί τῆς ἀμμωνίας οἱ προερχόμενοι ἀπό τόν ἐξατμιστήρα (ψυκτήρα), ἀπορροφῶνται εἰς τό ὔδωρ ἐκ τοῦ ὁποῦ διαχωρίζονται διὰ κλασματικῆς ἀποστάξεως καί ἀνακυκλοῦνται. Τό σχ. (2-21) δεικνύει διάγραμμα ψύξεως συνεχοῦς λειτουργίας δι' ἀπορροφήσεως ἀμμωνίας/ὔδατος.



Σχ. 2-21. Ψύξις δι' ἀπορροφήσεως

Οἱ ἀτμοί ἀμμωνίας ἐκ τοῦ ἐξατμιστήρος ἀπορροφῶνται ὑπό τοῦ ἀραιοῦ ὕδατικοῦ ὑπολείμματος τοῦ τμήματος ἀποστάξεως. Τό διάλυμα τῆς ἀμμωνίας διαβιβάζεται δι' ἀντλίας ὑψηλῆς πίεσεως, μέσω ἐναλλάκτου θερμότητας, εἰς τήν κορυφήν τῆς ἀποστακτικῆς στήλης (generator) εἰς τήν ὁποίαν ἐπιτυγχάνεται διαχωρισμός τοῦ μίγματος εἰς τό προϊόν κορυφῆς (πλούσιον εἰς

άμμωνίαν) καί τό ύπόλειμμα (άραιόν ύδατικόν διάλυμα άμμωνίας). 'Ο άποστακτήρ θερμαίνεται διά σπείρας άτμοϋ καί οί παραγόμενοι άτμοί έμπλουτίζονται είς άμμωνίαν διερχόμενοι διά τών δίσκων τής άποστακτικής στήλης (βλέπε Τεχνικήν Φυσικών Διαχωρισμών).

Οί έξερχόμενοι τής άποστακτικής στήλης άτμοί διαβιβάζονται είς τόν μερικόν συμπυκνωτήρα ή έμπλουτιστήρα (rectifier) είς τόν όποϊον έπέρχεται μερική συμπύκνωσις μίγματος άμμωνίας/ύδατος, τό όποϊον έπιστρέφεται ως υγρά άναρροή είς τήν άποστακτικήν στήλην. Οί άτμοί οί έξερχόμενοι του έμπλουτιστήρος περιέχουν σχεδόν καθαράν άμμωνίαν (άνω τών 95%), ή όποία συμπυκνοϋται είς κατάλληλον έναλλάκτην θερμότητος. 'Η υγρά άμμωνία διαβιβάζεται διά βαλβίδος έκτονώσεως, είς τόν έξατμιστήρα, όπου προκαλείται ή ψύξις. Οί άτμοί τής άμμωνίας άπορροφούνται είς τό ύδατικόν διάλυμα καί ό κύκλος έπαναλαμβάνεται.

Είς τά συστήματα ψύξεως δι' άπορροφήσεως άτμών άμμωνίας χρησιμοποιούνται αι άκόλουθοι τυπικά συνθήκαι λειτουργίας: θερμοκρασία έξατμιστήρος  $-18^{\circ}\text{C}$ , άπορροφητήρος  $43^{\circ}\text{C}$ , άποστακτήρος  $120^{\circ}\text{C}$  καί συμπυκνωτήρος  $32^{\circ}\text{C}$ . 'Υπό τάς συνθήκας ταύτας ή πίεσις του συστήματος άποστακτήρος/συμπυκνωτήρος εΐναι 15 bar καί του έξατμιστήρος/άπορροφητήρος 2 bar.

### 3. Δευτερογενή Ψυκτικά Μέσα

Είς πολλάς βιομηχανικάς έφαρμογάς δέν εΐναι δυνατή ή άπ'εύθείας χρῆσις τών ψυκτικών μέσων είς τούς ψυκτήρας. Τοϋτο συμβαίνει είς έγκαταστάσεις πολλών ψυκτικών θαλάμων ευρισκομένων είς σημαντικήν άπόστασιν άπό τό κεντρικόν συγκρότημα συμπιεστοϋ/συμπυκνωτήρος, όπου ύφίστανται μεγάλαι πτώσεις πίεσεως είς τάς σωληνώσεις του ψυκτικοϋ υγροϋ καί τών άτμών αϋτοϋ. 'Επί πλέον, είς ώρισμένας έφαρμογάς δέν έπιτρέπεται ή διαρροή ψυκτικοϋ μέσου είς τό ψυχόμενον προϊόν. Είς τάς περιπτώσεις ταύτας χρησιμοποιούνται τά δευτερογενή ψυκτικά μέσα, ήτοι διάφοροι άλμαι καί ύδατικά διαλύματα, τά όποια μεταφέρουν τήν θερμότητα μεταξύ του πρωτογενοϋς συστήματος ψύξεως καί του τελικοϋ ψυκτήρος.

Τά δευτερογενή ψυκτικά μέσα (διαλύματα χλωριούχου νατρίου, χλωριούχου άσβεστίου, αίθυλενογλυκόλης κλπ.) ψύχονται είς τόν έξατμιστήρα του πρωτογενοϋς ψυκτικοϋ μέσου καί δι-αβιβάζονται διά σωληνώσεων είς έναλλάκτας θερμότητος διαφόρων χρήσεων, ώς ψύξεως άέρος άποθηκευτικων χώρων, ψύξεως ή καταψύξεως προϊόντων, παραγωγής πάγου κλπ.

Τά ψυκτικά διαλύματα έχουν χαμηλά σημεία πήξεως καί οϋτω δύνανται νά χρησιμοποιηθοϋν είς χαμηλάς θερμοκρασίας. Συνήθως χρησιμοποιοϋνται εϋτηκτικά υδατικά διαλύματα διά των οποίων έπιτυγχάνεται ή έλαχίστη δυνατή θερμοκρασία, π. χ. 23,3% NaCl (-21 °C) καί 29,8% CaCl<sub>2</sub> (-51 °C). Διά πολύ χαμηλάς θερμοκρασίας χρησιμοποιοϋνται υδατικά διαλύματα άλκοολων (αίθυλικής ή μεθυλικής άλκοόλης). Είς πολλάς βιομηχανικές έφαρμογάς χρησιμοποιοϋνται υδατικά διαλύματα αίθυλενογλυκόλης, των οποίων τό σημείον πήξεως έξαρτάται από τήν συγκέντρωσιν (π.χ. -13 °C είς 30% καί -46 °C διά 60% αίθυλενογλυκόλης).

Τά ψυκτικά διαλύματα των άλάτων προκαλοϋν σημαντικήν διάβρωσιν είς τάς μεταλλικές σωληνώσεις, ή όποία άντιμετωπίζεται διά προσθήκης άντιδιαβρωτικων οϋσιων (π.χ. χρωμικων άλάτων) ή διά καθοδικής προστασίας.

#### 4. Ζέσις Ψυκτικων Μέσων

Η ψύξις καί ή κατάψυξις διαφόρων προϊόντων δύναται νά έπιτευχθή δι' έπαφής αυτών μέ ώρισμένα ψυκτικά μέσα τά όποια άπομακρύνουν τήν θερμότητα διά ζέσεως. Ός ψυκτικά μέσα χρησιμοποιοϋνται κυρίως τό υγρόν άζωτον, τό Freon 12 καί ό ξηρός πάγος.

Τό υγρόν άζωτον άνήκει είς τά κρυογενή ήτοι τά ψυκτικά μέσα των λίαν χαμηλων θερμοκρασιων. Τοϋτο παρασκευάζεται δι' υγροποίησεως καί κλασματικής άποστάξεως του άτμοσφαιρικοϋ άέρος, βάσει των αρχων της Έφαρμοσμένης θερμοδυναμικής καί της Άποστάξεως. Τό υγρόν άζωτον ζέει είς τούς -196 °C υπό τήν άτμοσφαιρικήν πίεσιν καί έχει θερμοότητα έξατμίσεως 200 kJ/kg. Διά τήν άποθήκευσιν καί μεταφοράν του υγροϋ άζώτου

άπαιτείται καλή μόνωσις τών δοχείων, σωληνώσεων κ.λ.π. προς ελάττωσιν τών άπωλειών θερμότητας.

Τό ύγρόν άζωτον χρησιμοποιείται διά τήν ταχεία κατάψυξιν τών τροφίμων και άλλων προϊόντων και τήν άποθήκευσιν ώρισμένων άλλων εύαισθήτων προϊόντων είς λίαν χαμηλάς θερμοκρασίας. Ή κατάψυξις έπιτυγχάνεται διά έμβαπτίσεως τών τεμαχίων του προϊόντος έντός ύγρου άζώτου είς διάταξιν μεταφορικής ταινίας έντός μονωμένου χώρου. Τό ύγρόν άζωτον έρχόμενον είς έπαφήν μέ τό προϊόν, ζέει έντόνως, έπερχομένης ταχείας καταψύξεως αύτου. Οί παραγόμενοι ψυχροί άτμοί του άζώτου χρησιμοποιούνται, υπό βεβιασμένην κυκλοφορίαν, διά τήν πρόψυξιν του προϊόντος.

Ή κατάψυξις μέ ύγρόν άζωτον παρουσιάζει ώρισμένα μειονεκτήματα ώς ή έφ' άπαξ χρήσις αύτου (δέν είναι πρακτικώς εύκολος ή άναχρησιμοποίησις δι' έπί τόπου ύγροποίησεως αύτου) και ή θραύσις (σχηματισμός ρωγμών) τών προϊόντων λόγω ταχείας έπιφανειακής καταψύξεως. Οί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας κατά τήν ζέσιν του άζώτου είναι σχετικώς χαμηλοί, διότι αί μεγάλοι διαφοραί θερμοκρασίας προκαλούν βρασμόν μέσω λεπτού στρώματος άτμών (Κεφ. 1).

Τό Freon 12 (διχλωροδιφθωρομεθάνιον) υπό άτμοσφαιρικήν πίεσιν ζέει είς  $-30^{\circ}\text{C}$  και έχει θερμότητα έξατμίσεως 165 kJ/kg. Τό ψυκτικόν τουτο μέσον δέν είναι τοξικόν, και δύναται νά χρησιμοποιηθῆ διά τήν κατάψυξιν τών τροφίμων δι' άμέσου έπαφῆς. Ή χρησιμοποίησις αύτου διά τήν κατάψυξιν γίνεται είς διατάξεις παρομοίας μέ τάς διατάξεις του ύγρου άζώτου.

Τό Freon 12, συγκρινόμενον μέ τό άζωτον, έχει τό πλεονέκτημα τῆς πρακτικῆς άνακυκλώσεως αύτου είς τάς έγκαταστάσεις καταψύξεως: Οί άτμοί του Freon 12 έχουν πενταπλασίαν πυκνότητα έν σχέσει μέ τό άζωτον (ή τόν άέρα) και ύγροποιούνται εύκόλως διαβιβαζόμενοι είς τό έξωτερικόν έναλλάκτου θερμότητος μετά σπειρών και πτερυγίων, ψυχομένου διά δευτερογενούς ψυκτικού μέσου είς  $-40^{\circ}\text{C}$ . Κατά τήν χρήσιν του Freon 12 είς τήν κατάψυξιν, λόγω τών μικρών σχετικών διαφορών θερμοκρασίας, λαμβάνει χώραν πυρηνογενής βρασμός και ού-



τως επιτυγχάνονται ύψηλοί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας.

Ό ξηρός πάγος (στερεόν  $\text{CO}_2$ ) τήκεται εις  $-78^\circ\text{C}$  και έχει θερμότητα τήξεως  $190\text{ kJ/kg}$  και έξαχνώσεως  $670\text{ kJ/kg}$ . Παρασκευάζεται διά μερικής έξατμίσεως ή διά καταψύξεως του ύγρου  $\text{CO}_2$ . Τό ύγρόν  $\text{CO}_2$  παρασκευάζεται διά συμπίεσεως του καθαρού αερίου.

Ό ξηρός πάγος χρησιμοποιείται ως ψυκτικόν μέσον εις διάφορα Έργαστήρια υπό μορφήν ψυκτικού μίγματος μετά αίθανόλης. Επίσης χρησιμοποιείται διά τήν αποθήκευσιν και μεταφοράν εύπαθών προϊόντων εις χαμηλάς θερμοκρασίας. Η ψύξις επιτυγχάνεται είτε δι' άμέσου έξαχνώσεως του ξηρού πάγου ή διά κυκλοφορίας ψυκτικού διαλύματος π.χ. 75% αίθανόλης, μεταξύ του ξηρού πάγου και του ψυχομένου χώρου.

## 5. Ψύξις διά Κενού

Η ψύξις του ύδατος και ώρισμένων νωπών προϊόντων διά κενού (vacuum cooling) βασίζεται εις τήν άδιαβατικήν έξάτμισιν μέρους του ύδατος, ή όποία απομακρύνει σημαντικήν ποσότητα θερμότητας. Η επιτυχαμονένη θερμοκρασία ψύξεως έξαρτάται από τήν απόλυτον πίεσιν, συμφώνως προς τήν θερμοδυναμικήν σχέσιν πίεσεως/θερμοκρασίας του ύδατος.

Διά τήν δημιουργίαν κενού χρησιμοποιούνται κυρίως άκροφύσια άτμου δύο ή περισσοτέρων βαθμίδων (βλέπε Κεφ.3 θ3). Διά χρησιμοποίησεως μηχανικών άντλιών κενού επιτυγχάνονται πιέσεις κάτωθεν του τριπλου σημείου του ύδατος (βλέπε Σχ. 5-19), εις τάς όποιας τό ύδωρ μετατρέπεται εις πάγον. Ό σχηματισμός πάγου εφαρμόζεται εις τήν άφαλάτωσιν του ύδατος και έξετάζεται εις τήν Βιομηχανικήν Κρυστάλλωσιν (Τεχνική των Σωματιδίων).

Η ψύξις του ύδατος διά κενού εφαρμόζεται και εις τάς έγκαταστάσεις ψύξεως και κλιματισμού του άέρος.

Η δυναμικότης του συστήματος κενού (άντλίας ή άκροφυσίων) ή άπαιτουμένη διά τήν απομάκρυνσιν  $\dot{m}$  (kg/s) ύδατος δίδεται από τήν έξίσωσιν:

$$\dot{V} = \frac{22,4}{18} \cdot \frac{760}{P} \cdot \frac{T}{273} \dot{m} \quad (2-50)$$

όπου  $\dot{V}$  = δυναμικότητα συστήματος κενού,  $m^3/s$

$P$  = απόλυτος πίεσις, Torr.

$T$  = απόλυτος θερμοκρασία, K

Ίσοζύγιον ένθαλπίας, υπό άδιαβατικής συνθήκας, κατά τήν έξάτμισιν  $\dot{m}$  (kg/s) ύδατος δίδει:

$$\dot{m}\Delta H = (m - \dot{m}dt) C_p \frac{dT}{dt} \quad (2-51)$$

όπου  $m$  = άρχική ποσότης ύδατος, kg

$\dot{m}dt$  = έξατμισθείσα ποσότης ύδατος, kg

$C_p$  = είδική θερμότης ύδατος, kJ/kg K

$dT$  = μεταβολή θερμοκρασίας είς χρόνον  $dt$ , K

$\Delta H$  = θερμότης έξατμίσεως ύδατος, kJ/kg

Έάν ή μεταβολή τής πιέσεως μετά τής θερμοκρασίας του ύδατος θεωρηθ ή ότι άκολουθεϊ τήν έξίσωσιν Antoine:

$$\ln P = A - \frac{B}{C+T} \quad (2-52)$$

όπου  $A, B, C$  = σταθεραί Antoine

ή έξίσωσις (2-50) γράφεται ώς:

$$\dot{m} = \frac{0,28 \dot{V} \exp(A-B/C+T)}{T} \quad (2-53)$$

Η έξίσωσις (2-51) γράφεται καί ώς:

$$\dot{m} = \frac{m C_p}{\Delta H + C_p dT} \frac{dT}{dt} \quad (2-54)$$

Διά μικράς διαφοράς θερμοκρασίας ( $dT$ ) ό όρος  $(C_p dT)$  είναι άμελητέος έν συγκρίσει μέ τήν θερμότητα έξατμίσεως ( $\Delta H$ ) καί διά συνδυασμοϋ τών δύο τελευταίων έξισώσεων προκύπτει:

$$\frac{m C_p}{\Delta H} \frac{dT}{dt} = \frac{0,28 \dot{V} \exp(A-B/C+T)}{T} \quad (2-55)$$

Η έξίσωσις (2-55) ολοκληρουμένη δίδει:

$$t = \frac{mC_p}{0,28\sqrt{\Delta H_{\text{exp}}(A)}} \int_{T_1}^{T_2} T_{\text{exp}}(B/C+T) dt \quad (2-56)$$

Ἡ τελευταία ἐξίσωσις ὁλοκληροῦται γραφικῶς πρὸς εὐρεσιν τοῦ ἀπαιτουμένου χρόνου (t) διὰ τὴν ψῦξιν τῆς δοθείσης ποσότητος τοῦ ὕδατος (m) ἀπὸ θερμοκρασίας  $T_1$  εἰς  $T_2$ .

#### ιστ) Θερμικὴ Παστερίωσις καὶ Ἀποστείρωσις

Αἱ θερμικαὶ διεργασίαι (thermal processes) τῆς ἀποστείρωσεως καὶ τῆς παστεριώσεως ἀποβλέπουν εἰς τὴν συντήρησιν τῶν εὐπαθῶν τροφίμων διὰ θερμικῆς ἀδρανοποιήσεως (καταστροφῆς) τῶν μικροοργανισμῶν τῶν προκαλούντων ἀνεπιθυμητοῦς ἀλλοιώσεις εἰς τὰ ἀποθηκευμένα τρόφιμα.

Ἡ ἀποστείρωσις (sterilization) ἀναφέρεται κυρίως εἰς τὴν θερμικὴν κατεργασίαν τῶν τροφίμων ἐντὸς στεγανῶν δοχείων (κονσερβῶν) εἰς τρόπον ὥστε νά ἐπιτυγχάνεται βιομηχανικὴ στειρότης (commercial sterility) τοῦ προϊόντος, τό ὅποσον δύναται οὕτω νά ἀποθηκευθῆ εἰς θερμοκρασίαν δωματίου ἐπὶ μακρόν χρονικόν διάστημα ἄνευ μικροβιολογικῆς ἀλλοιώσεως. Διὰ τῆς ἀποστεριώσεως, μαζί μέ τούς μικροοργανισμούς ἀλλοιώσεως, καταστρέφονται καί τὰ παθογόνα βακτήρια καθὼς καί τὰ διάφορα ἔνζυμα τῶν τροφίμων.

Ἡ παστερίωσις (pasteurization) ἀποβλέπει εἰς τὴν θερμικὴν καταστροφὴν τῶν παθογόνων μικροοργανισμῶν (κυρίως βακτηρίων), οἱ ὅποιοι κατὰ κανόνα εἶναι πλέον εὐαίσθητοι εἰς τὴν θερμότητα ἀπὸ τούς σποριογόνους μικροοργανισμούς τῆς ἀλλοιώσεως τῶν τροφίμων. Ἡ παστερίωσις ἐφαρμόζεται εἰς ὠρισμένα εὐαίσθητα τρόφιμα, ὡς τό γάλα, εἰς τὰ ὅποια ἀναπτύσσονται εὐκόλως παθογόνα βακτήρια, ἐπιβλαβῆ εἰς τὴν Δημοσίαν Ὑγείαν. Διὰ τῆς παστεριώσεως ἐπιτυγχάνεται ἐπίσης ἡ μερικὴ καταστροφὴ τῶν μικροοργανισμῶν καί τῶν ἐνζύμων ἀλλοιώσεως, εἰς τρόπον ὥστε τὰ παστεριωμένα τρόφιμα νά δύνανται νά ἀποθηκευθοῦν εἰς ὠρισμένον χρονικόν διάστημα, συνήθως εἰς χαμηλὰς θερμοκρασίας (ψυγείου).

Ἡ ἀποστείρωσις καί ἡ παστερίωσις δύνανται νά ἐπιτευχθοῦν καί δι' ἄλλων μεθόδων, ὡς δι' ὑπεριώδους (UV) ἀκτινοβο-

λίας, δι' ίονιζουσών ακτινοβολιών (ακτίνες β και γ) και διά χημικών αερίων (fumigation). Ένταυθα έξετάζονται κυρίως αι θερμικαί μέθοδοι καταστροφής τών μικροοργανισμών, αι όποϊαι άποτελοϋν τήν βάση τής Κονσερβοποιΐας και έφαρμόζονται εις πολλάς Γεωργικάς Βιομηχανίας.

Ή άποστείρωσις και ή παστερίωσις έξετάζονται ένταυθα περιληπτικώς ως θερμικαί διεργασίαι τής Μηχανικής τών Τροφίμων (Food Engineering), ή όποία άποτελεϊ έφαρμογήν τής Χημικής Μηχανικής εις τάς Βιομηχανίας Τροφίμων. Αι θερμικαί αϋται διεργασίαι βασίζονται εις τήν θεωρίαν τής Μεταδόσεως Θερμότητας και τής Χημικής Κινητικής.

Τά χημικά, μικροβιολογικά και τεχνολογικά προβλήματα τής άποστείρωσεως και τής παστεριώσεως έξετάζονται εις τήν Έπιστήμην και Τεχνολογίαν Τροφίμων (Food Science and Technology).

#### 1. Θερμική Καταστροφή τών Μικροοργανισμών

Ή θερμική καταστροφή όρίζεται ως ή πλήρης άδρανοποίησις ενός μικροοργανισμού διά τής θερμότητας, εις τρόπον ώστε οϋτος να μην δύναται να πολλαπλασιασθῆ και να προκαλέση άλλωσεις εις δοθέν υπόστρωμα. Ή άδρανοποίησις έπιτυγχάνεται δι' άναντιστρέπτου χημικής αντίδρασεως (άλλοιώσεως) μιᾶς χημικής ουσίας (π.χ πρωτεΐνης ή νουκλεονικοϋ όξεος), θεωρουμένης ως άπαραιτήτου εις τόν μηχανισμόν πολλαπλασιασμοϋ τοϋ μικροοργανισμού. Ή ταχύτης άδρανοποίησεως, ήτοι ή ταχύτης τής χημικής αντίδρασεως, έξαρτάται έντόνως από τήν θερμοκρασίαν, συμφώνως προς τούς νόμους τής Χημικής Κινητικής.

Άπό πειραματικάς μετρήσεις έχει εύρεθῆ ότι ή θερμική άδρανοποίησις όμοιάζει με χημικήν αντίδρασιν πρώτης τάξεως, ή όποία εις δοθείσαν θερμοκρασίαν παρίσταται από τήν άπλοποιημένην έξίσωσιν:

$$\log(N/N_0) = -t/D \quad (2-57)$$

όπου  $N_0$  = άρχικός πληθυσμός (άριθμός) τών μικροοργανισμών

$N$  = πληθυσμός μετά χρόνον θερμάνσεως  $t$ ,

$D$  = χρόνος υποδεκαπλασιασμοϋ τοϋ πληθυσμοϋ  $s$ ,

Ἡ σταθερά (D) τῆς ἐξισώσεως (2-57) ἐξαρτᾶται ἀπό τὴν θερμοκρασίαν καὶ ὑπολογίζεται διὰ πειραματικῶν μετρήσεων τῶν ἐπιζώντων μικροοργανισμῶν (N) εἰς δοθείσαν καλλιέργειαν, ἡ ὁποία θερμαίνεται ταχέως εἰς τὴν θεωρουμένην θερμοκρασίαν. Τὰ πειραματικά δεδομένα παριστῶνται ὡς εὐθεία γραμμὴ εἰς συντεταγμένας  $\log(N/N_0)$  καὶ  $t$  μέ ἀντίστροφον κλίσιν (-D). Ἡ ἀντίστροφος κλίσις εἰς τὸ διάγραμμα τοῦτο ἀντιστοιχεῖ εἰς τὸν χρόνον τὸν ἀπαιτούμενον δι' ὑποδεκαπλασιασμόν τοῦ πληθυσμοῦ τῶν μικροοργανισμῶν, ἥτοι  $(N/N_0)=1/10$  ἢ  $\log(N/N_0)=-1$ .

Εἰς τοὺς ὑπολογισμοὺς τῆς ἀποστειρώσεως τῶν μὴ ὀξίνων προΐόντων ( $pH > 4,5$ ) ὡς βάσις θερμοκλιῆς κατεργασίας λαμβάνεται ἡ θερμοκρασία  $121^\circ\text{C}$  ( $250^\circ\text{F}$ ). Ὡς πλέον ἀνθεκτικοί εἰς τὴν θερμότητα ὀργανισμοί θεωροῦνται τὰ σπόρια τοῦ ἀναεροβίου βακτηρίου ἀλλοιώσεως *Cl. sporogenes* PA 3679 (*Putrefactive Anaerobe*). Τὰ σπόρια τοῦ παθογόνου ἀναεροβίου βακτηρίου *Cl. botulinum* εἶναι ὀλιγώτερον ἀνθεκτικά εἰς τὴν θερμότητα καὶ διὰ τοῦτο ὡς δείκτης ἀποστειρώσεως τῶν μὴ ὀξίνων προΐόντων λαμβάνονται συνήθως τὰ σπόρια τοῦ PA 3679. Ἀπὸ πειραματικῶν μετρήσεως ἔχει εὐρεθῆ δι' ὠρισμένον ὑπόστρωμα διὰ τὸ PA 3679 ὅτι  $D(121^\circ\text{C})=100$  s καὶ διὰ τὸ *Cl. botulinum* ὅτι  $D(121^\circ\text{C})=12,25$  s. Ὡς λίαν ἀνθεκτικά εἰς τὴν θερμότητα θεωροῦνται ἐπίσης τὰ θερμόφιλα βακτήρια *B. stearothermophilus* ἢ FS 1518 (*Flat Sour*).

Ἡ βιομηχανικὴ στείρωσις θεωρεῖται ὅτι ἐπιτυγχάνεται ὅταν καταστραφῆ ὠρισμένον ποσοστὸν τοῦ πληθυσμοῦ ἐνός ἀνθεκτικοῦ μικροοργανισμοῦ. Διὰ τὸ *Cl. botulinum* λαμβάνεται  $N/N_0=10^{-12}$ , δηλαδή ἡ ἐλάττωσις τοῦ ἀρχικοῦ πληθυσμοῦ εἰς τὸ ἔν τρισεκατομμυριοστὸν. Διὰ τὸ PA 3679 λαμβάνεται  $N/N_0=10^{-5}$ , ἥτοι ἐλάττωσις κατὰ ἑκατὸν χιλιάδες.

Εἰς τὴν βιβλιογραφίαν χρησιμοποιεῖται ὁ χρόνος F (εἰς min), ὁ ἀπαιτούμενος διὰ τὴν ἐπίτευξιν βιομηχανικῆς στείρωσεως εἰς θερμοκρασίαν  $121^\circ\text{C}$ . Συμφώνως πρὸς τὰ προηγούμενα, διὰ τὸ *Cl. botulinum* θὰ εἶναι  $F=12 D/60=12 \times 12,25/60=2,45$  min καὶ διὰ τὸ PA 3679  $F=5D/60=5 \times 100/60=8,33$  min (Σχ. 2-22).

Ἡ θερμοκρασία ἐπιδρᾶ ἰσχυρῶς ἐπὶ τῆς ταχύτητος καταστροφῆς τῶν μικροοργανισμῶν καὶ ἐφαρμόζεται ἡ ἐμπειρικὴ ἐ-

Ξίσωσις:

$$\log(D_{T_1} / D_{T_2}) = \frac{T_2 - T_1}{z} \quad (2-58)$$

όπου:  $D_{T_1}, D_{T_2}$  = χρόνος υποδεκαπλασιασμού εις θερμοκρασίαν  $T_1$  και  $T_2$  αντίστοιχως.

$z$  = αύξησις θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ), απαιτουμένη διά τόν υποδεκαπλασιασμόν δοθέντος πληθυσμοῦ.

Ἡ ἐξίσωσις (2-58) διά  $T_2=121^{\circ}\text{C}$  γράφεται καί ὡς:

$$\log(\tau/F) = \frac{121-T}{z} \quad (2-59)$$

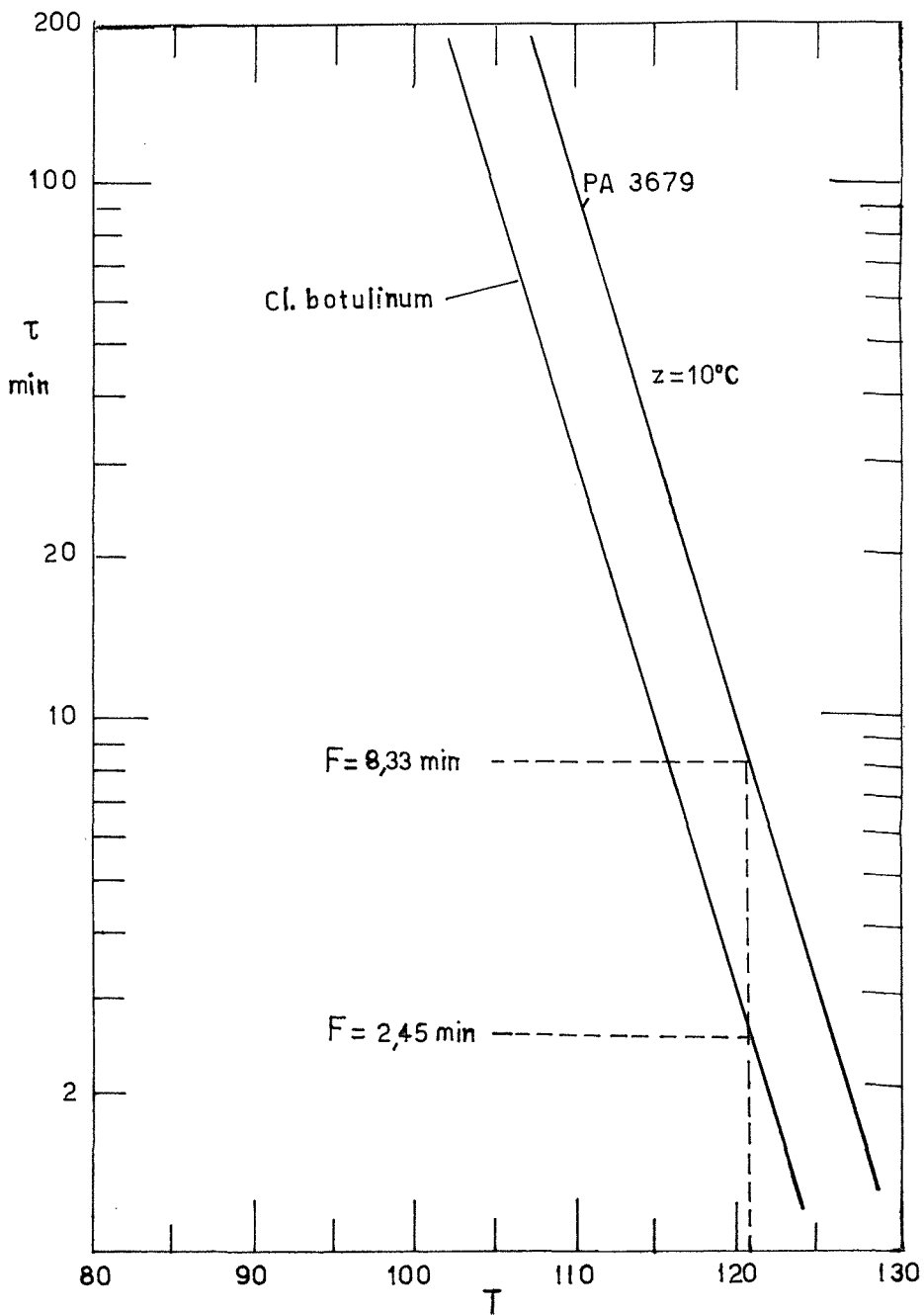
όπου  $\tau$  = χρόνος ἀποστειρώσεως (min) εις θερμοκρασίαν  $T$ .

Ἡ ἐξίσωσις (2-59) παρίσταται γραφικῶς ὡς ἡ καμπύλη θερμικῆς καταστροφῆς καί τό Σχ. (2-22) δίδει μερικά τυπικά παραδείγματα.

Ἡ ἐξίσωσις (2-59) δίδει τόν χρόνον ἀποστειρώσεως ( $\tau$ ) εις δοθείσαν θερμοκρασίαν ( $T$ ), ἐάν τό προϊόν θερμανθῆ στιγμιαίως καί παραμείνῃ συνεχῶς εις τήν θερμοκρασίαν ταύτην καθ' ὅλην τήν διάρκειαν τῆς ἀποστειρώσεως. Ἡ περίπτωσις ὁμως αὐτή ἔχει θεωρητικήν μόνον ἀξίαν, διότι εις τήν πράξιν ἡ θερμοκρασία τοῦ προϊόντος μεταβάλλεται σημαντικῶς κατά τήν διάρκειαν τῆς ἀποστειρώσεως, ὡς ἐξηγεῖται κατωτέρω.

## 2. Μετάδοσις θερμότητος εις Κονσερβας

Ἡ ἀποστείρωσις τῶν τροφίμων ἐντός τῶν κονσερβῶν ἀπαιτεῖ σημαντικόν χρόνον διότι ἡ θερμότης μεταδίδεται βραδέως ἐκ τῶν τοιχωμάτων πρός τό ἐσωτερικόν τῶν δοχείων. Ὡς θερμαντικόν μέσον χρησιμοποιεῖται συνήθως κενκορεσμένος ἀτμός ἢ θερμόν (ζέον) ὕδωρ ἐντός αὐτοκλείστων (autoclaves). Ἡ μετάδοσις θερμότητος ἀπό τόν ἀτμόν ἢ τό ὕδωρ πρός τήν ἐπιφανείαν τῶν κονσερβῶν καί διά μέσου τοῦ μεταλλικοῦ τοιχώματος εἶναι λίαν ταχεία, λόγω τῶν ὑψηλῶν συντελεστῶν μεταφορᾶς θερμότητος καί τῆς ὑψηλῆς θερμικῆς ἀγωγιμότητος τοῦ μετάλλου. Ἡ κυρία ἀντίστασις εις τήν μετάδοσιν θερμότητος εὐρίσκεται εις τό ἀποστειρούμενον προϊόν. Ἡ ἀντίστασις αὐτή εἶναι με-



Σχ. 2-22. Καμπύλαι θερμικής καταστροφής άνθεκτικών μικροοργανισμών

γαλύτερα όταν πρόκειται περί στερεού ή ημιστερεού προϊόντος (πολτού).

Είς τούς υπολογισμούς αποστειρώσεως λαμβάνεται ή δυσμενεστέρα περίπτωσης, ήτοι τό προϊόν θεωρείται ότι είναι στερεόν καί ότι ή θερμότης μεταδίδεται δι' άγωγής (conduction). Οί ούτως υπολογιζόμενοι χρόνοι αποστειρώσεως θεωρούνται ως άσφαλείς, δεδομένου ότι είς τά πλείστα τρόφιμα ή θερμότης μεταδίδεται ταχύτερον διά συνδυασμού τής άγωγής μέ τήν μεταφοράν. Η μεταφορά (convection) είναι ο χαρακτηριστικός τρόπος μεταδόσεως θερμότητος είς τά ρευστά καί είναι κατά πολύ ταχύτερα τής άγωγής.

Η αποστείρωσις τών κονσερβών διά γυμνών φλογών (flame sterilization) δύναται νά εφαρμοσθή είς ώρισμένα προϊόντα, είς τά όποια ή θερμότης μεταφέρεται ταχέως έκ τών τοιχωμάτων πρός τό έσωτερικόν τών δοχείων. Δέν ένδεικνυται όμως διά προϊόντα είς τά όποια ή θερμότης μεταδίδεται βραδέως δι' άγωγής, διότι είς τήν περίπτωσιν ταύτην έπέρχεται μεγάλη άνύψωσις είς τήν θερμοκρασίαν τής έπιφανείας του προϊόντος μέ αποτέλεσμα τήν θερμοκήν άλλοίωσιν ή τήν καταστροφήν αυτού.

Η μετάδοσις θερμότητος δι' άγωγής είς τας κονσέρβας δύναται νά έκφρασθή διά τής διαφορικής έξισώσεως Fourier, ή όποια λύεται διά πολυπλόκου μαθηματικής αναλύσεως. Απλοποιημέναί λύσεις διά συνήθη σχήματα κονσερβών δίδονται είς τήν βιβλιογραφίαν υπό μορφήν έξισώσεων ή διαγραμμάτων (Ball, Charm).

Πειραματικώς ή μετάδοσις θερμότητος μετράται διά τοποθετήσεως είδικού θερμοζεύγους είς τό γεωμετρικόν κέντρον τής κονσέρβας, διά του όποιου παρακολουθείται ή θερμοκρασία είς τό σημείον τουτο καθ' όλην τήν διάρκειαν τής κατεργασίας.

Η παστερίωσις τών υγρών προϊόντων διεξάγεται διά ταχείας θερμάνσεως συνήθως είς έναλλάκτας θερμότητος μετά πλακών (plate heat exchangers). Τό προϊόν παραμένει είς τήν θερμοκρασίαν παστερίώσεως τόν άπαιτούμενον χρόνον καί άκολούθως ψύχεται ταχέως είς τόν έναλλάκτην θερμότητος.

Η άσηπτική αποστείρωσις (aseptic canning) τών ρευστών



προϊόντων διεξάγεται είς είδικούς έναλλάκτας θερμότητας (π.χ. άποξεομένης διά πτερυγίων έπιφανείας έναλλαγής), διά τών όποιών έπιτυγχάνεται ταχεία θέρμανσις είς ύψηλήν θερμοκρασίαν επί βραχύ χρονικόν διάστημα. Τό άποστειρωθέν προϊόν ψύχεται ταχέως καί συσκευάζεται υπό άσηπτικής συνθήκας είς άποστειρωμένα δοχεία.

### 3. Ύπολογισμός Χρόνου Άποστειρώσεως

Ένταυθα έξετάζεται ή περίπτωσης άποστειρώσεως προϊόντος έντός κονσέρβας, τό όποιον θερμαίνεται δι' άγωγής. Λόγω τής μικράς θερμικής άντιστάσεως του μεταλλικού τοιχώματος τής κονσέρβας, ή θερμοκρασία τής έπιφανείας του προϊόντος, τής εύρισκομένης είς έπαφήν μέ τά τοιχώματα του δοχείου, λαμβάνεται κατά προσέγγισιν ώς ίση μέ τήν θερμοκρασίαν του θερμαντικού μέσου: π.χ. του κεκορεσμένου άτμου είς τό αύτόκλειστον.

Ή άποστείρωσις του προϊόντος έντός του δοχείου θεωρείται πλήρης, εάν ή θερμική κατεργασία ίσοδυναμεί πρός τήν έπίτευξιν βιομηχανικής στείρότητας όλοκλήρου τής μάζης αυτού διά τόν μικροοργανισμόν - δείκτην, π.χ. τό PA 3679. Διά τόν ύπολογισμόν του χρόνου άποστειρώσεως άπαιτείται ή γνώσις τής θερμοκρασίας του κρίσιμου σημείου (κέντρου) του δοχείου καθ' όλην τήν διάρκειαν τής θερμικής κατεργασίας.

Ή έξίσωσις (2-59) γράφεται καί ώς άκολούθως:

$$F = t \cdot 10^{\frac{T-121}{z}} \quad (2-60)$$

Ή τελευταία έξίσωσις δίδει τήν τιμήν άποστειρώσεως (sterilization value) F συναρτήσει του χρόνου κατεργασίας (t) είς θερμοκρασίαν T. Ή τιμή άποστειρώσεως (F) ώρίσθη ήδη ώς ό χρόνος ό άπαιτούμενος δι' έπίτευξιν βιομηχανικής στείρότητας είς τούς 121°C. Γενικώτερον, εάν έν προϊόν θερμανθῆ είς μίαν θερμοκρασίαν T επί χρόνον t, ή προκύπτουσα τιμή θερμικής καταστροφής (lethality) L δίδεται από τήν έξίσωσιν:

$$L = t \cdot 10^{\frac{T-121}{z}} \quad (2-61)$$

Αι έξιτώσεις (2-60) καί (2-61) άναφέρονται είς τήν θεωρητικήν περίπτωσιν τής στιγμιαίας θερμάνσεως όλης τής μάζης ένός προϊόντος είς τήν θερμοκρασίαν  $T$ , ή όποία ύποτίθεται ότι διατηρεΐται σταθερά καθ'όλον τόν χρόνον ( $\tau$  ή  $t$ ). Είς τήν πράξιν ή θέρμανσις του προϊόντος είναι βαθμιαία καί ή θερμοκρασία του κρίσιμου σημείου του δοχείου μεταβάλλεται συνεχώς. Δέον νά σημειωθῆ ότι κατά τήν ψύξιν των δοχείων, τό προϊόν εύρίσκεται είσέτι είς ύψηλάς σχετικώς θερμοκρασίας, αι όποiai πρέπει νά ληφθοῦν ύπ'όψιν κατά τόν ύπολογισμόν τής θερμικής καταστροφῆς τής κατεργασίας.

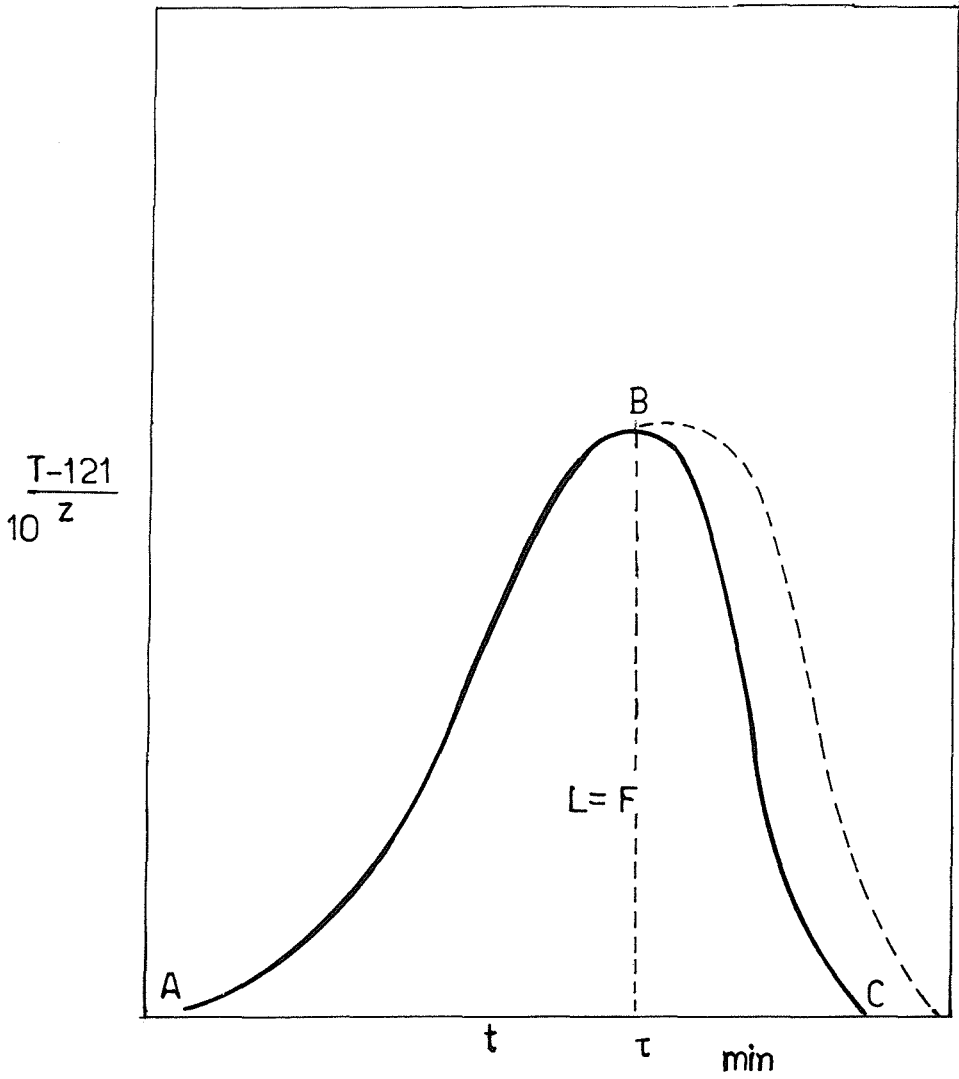
Είς ένα κύκλον άποστειρώσεως συνολικού χρόνου θερμικής κατεργασίας  $t$  (θέρμανσις, διατήρησις θερμοκρασίας του αύτοκλείστου επί τίνα χρόνον καί ψύξις) ή τιμή τής θερμικής καταστροφῆς  $L$  ίσοῦται μέ τό ολοκλήρωμα (άθροισμα) των επί μέρους θερμικών καταστροφών, συμφώνως προς τήν έξίσωσιν:

$$L = \int_0^t 10^{\frac{T-121}{z}} dt \quad (2-62)$$

Διά τήν επίτευξιν βιομηχανικής στειρότητος άπαιτεΐται όπως  $L=F$ .

Ό ύπολογισμός του ολοκληρώματος τής έξιτώσεως (2-62) είναι δυσχερής διότι ή θερμοκρασία  $T$  είναι συνήθως πολύπλοκος συνάρτησις του χρόνου ( $t$ ). Τό ολοκλήρωμα τουτο δύναται νά ύπολογισθῆ διά τής γραφικῆς μεθόδου Bigelow: Προς τουτο προσδιορίζεται πρώτον πειραματικώς ή καμπύλη θερμοκρασίας του κρίσιμου σημείου ως προς τόν χρόνον. Δι'έκαστον ζεύγος τιμών χρόνου ( $t$ ) - θερμοκρασίας ( $T$ ) ύπολογίζεται ή τιμή του  $10^{(T-121)/z}$  ή όποία άκολούθως παρίσταται είς έτερον διάγραμμα ως συνάρτησις του χρόνου (Σχ. 2-23). Η τιμή τής έκθετικής ταύτης έκφράσεως είς θερμοκρασίας κάτω των  $100^{\circ}\text{C}$  καθίσταται άμελητέα. Η παράμετρος ( $z$ ) είναι χαρακτηριστική του μικροοργανισμού - δείκτου, π.χ.  $z=10^{\circ}\text{C}$  διά τό *C. botulinum* καί τό PA 3679.

Η τιμή τής θερμικής καταστροφῆς ( $L$ ) άντιστοιχεΐ είς τό έμβαδόν τής έπιφανείας τής σχηματιζομένης μεταξύ τής καμπύλης καί του άξονος των τετμημένων ( $t$ ). Ό χρόνος άποστειρώ-



Σχ. 2-23. Γραφική μέθοδος προσδιορισμού του χρόνου άποστειλώσεως (Bigelow)

σεως (τ) υπολογίζεται διά δοκιμής και σφάλματος, ούτως ώστε τό έμβαδόν της (L) νά αντιστοιχῆ πρός τήν τιμήν άποστειρώσεως (F). Ός δεικνύεται είς τό Σχ. (2-23) ή περίοδος ψύξεως (BC) τοῦ προϊόντος έχει σημαντική άποστειρωτικήν ικανότητα.

Ἡ άναλυτική μέθοδος Ball υπολογισμοῦ τοῦ χρόνου άποστειρώσεως εφαρμόζεται είς τήν περίπτωσιν της λογαριθμικής σχέσεως μεταξύ θερμοκρασίας (T) και τοῦ χρόνου θερμάνσεως (t). Ἡ περίπτωση αὕτη εἶναι συνήθης είς τήν μετάδοσιν θερμότητος δι'άγωγῆς και είς τήν γενικήν της μορφήν εκφράζεται διά της έξισώσεως Fourier.

Ἡ λογαριθμική σχέσης μεταξύ της θερμοκρασίας τοῦ κρισίμου σημείου (κέντρου) τοῦ προϊόντος (T) και τοῦ χρόνου θερμάνσεως (t) δίδεται άπό τήν έξίσωσιν (2-63):

$$\log(RT-T) - \log j(RT-IT) = -t/f_h \quad (2-63)$$

όπου: RT = θερμοκρασία θερμαντικοῦ μέσου (αὐτοκλείστου)

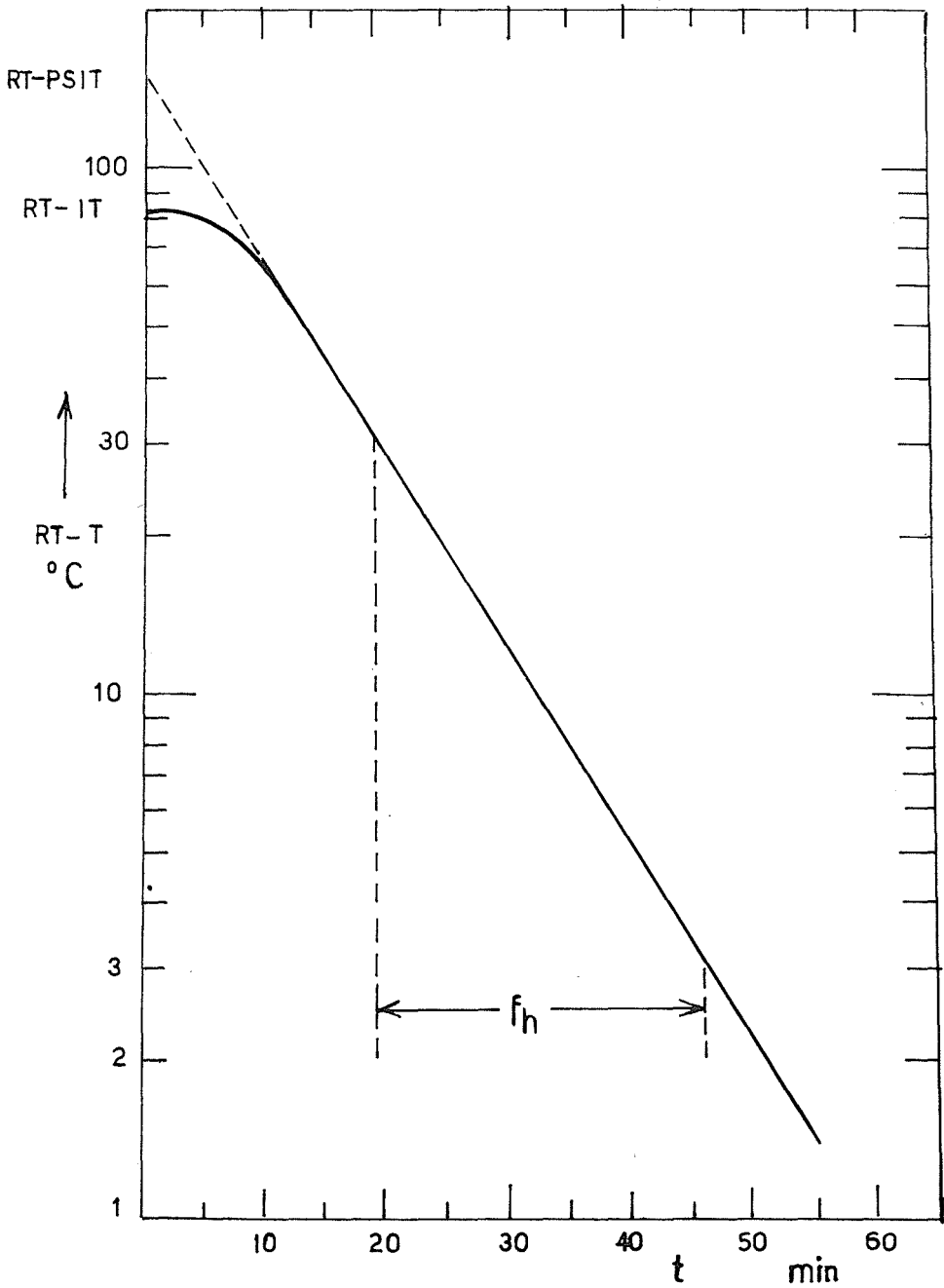
IT = άρχική θερμοκρασία τοῦ προϊόντος (είς t=0)

$f_h$  = χρόνος άπαιτούμενος διά τήν αύξησιν της θερμοκρασίας κατά ένα λογαριθμικόν κύκλον (Σχ. (2-24) και Σχ. (2-25)).

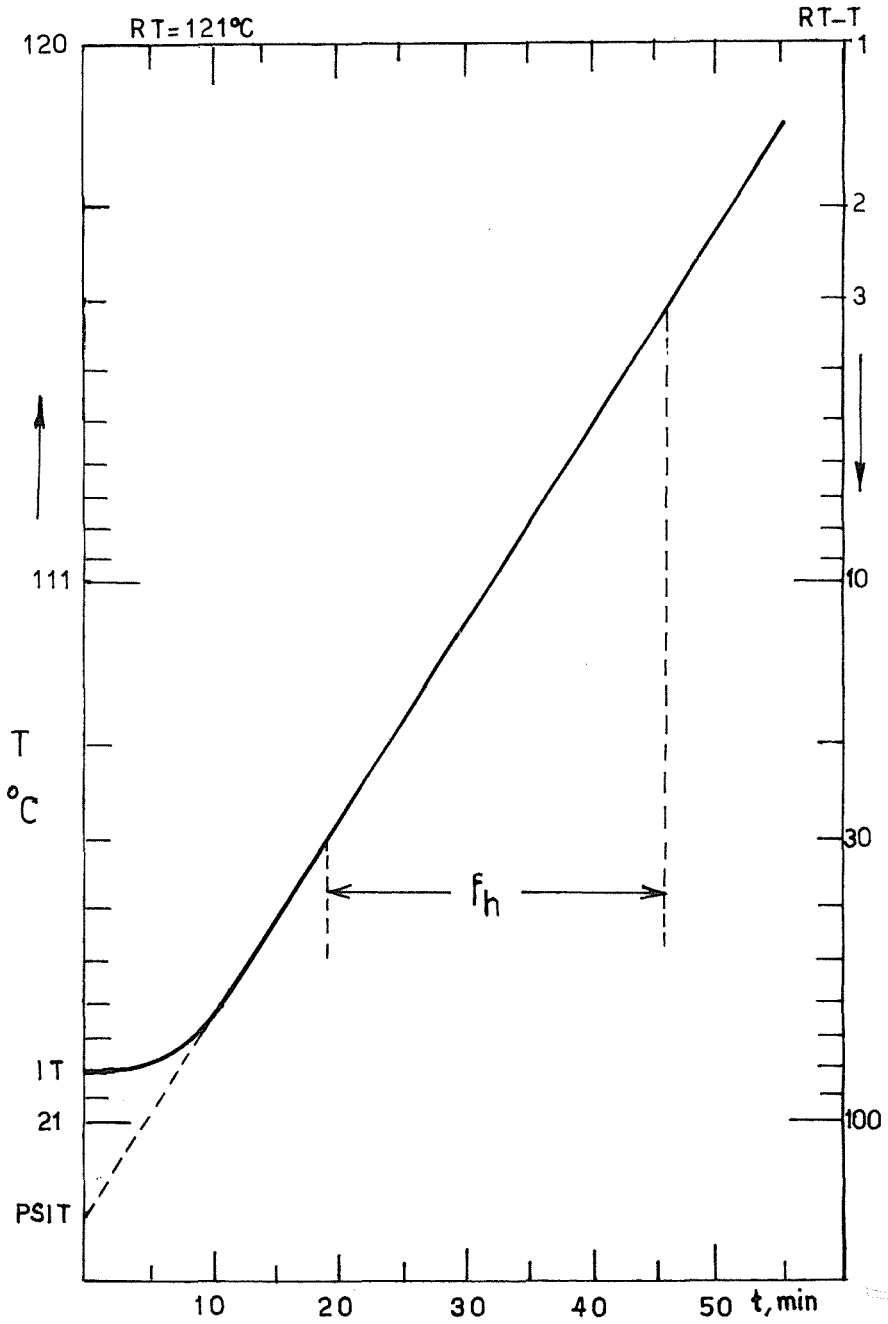
Ός δεικνύεται είς τά Σχήματα (2-24) και (2-25), είς τήν πράξιν παρατηρεῖται μία καθυστέρησις (lag) άνόδου της θερμοκρασίας και άπαιτεῖται ώρισμένος χρόνος διά νά ληφθῆ μία εύθύγραμμος σχέσης είς τό ήμιλογαριθμικόν διάγραμμα. Διά προεκτάσεως τοῦ εύθυγράμμου τμήματος της γραμμῆς λαμβάνεται ή ψευδο-άρχική θερμοκρασία (PSIT) είς χρόνον t=0. Ὁ παράγων καθυστερήσεως (j) όρίζεται άπό τήν έξίσωσιν (2-64):

$$j = IT/PSIT = (RT - PSIT) / (RT - IT) \quad (2-64)$$

Τό Σχ. (2-24) παριστᾶ τήν μεταβολήν της διαφοράς θερμοκρασίας (RT-T) συναρτήσεϊ τοῦ χρόνου (t) είς ήμιλογαριθμικόν χάρτην ώς εύθειαν γραμμήν μέ κλίσιν  $-1/f_h$ . Τό Σχ. (2-25) λαμβάνεται δι'άναστροφῆς τοῦ προηγούμενου και παριστᾶ τήν μεταβολήν της θερμοκρασίας τοῦ κρισίμου σημείου (T) συναρτήσεϊ



Σχ. 2-24. Μετάδοση θερμότητας δι' αγωγής εις τό κέντρον κυτίου κονσέρβας



Σχ. 2-25. "Ανοδος θερμοκρασίας εις τό κέντρον κυτίου κονσέρβας

του χρόνου ( $t$ ) ως εύθειαν γραμμήν μέ κλίσιν  $1/f_h$ .

Δέον νά σημειωθῆ ὅτι ἐνταῦθα ἐγένετο ἡ παραδοχή ὅτι ἡ θερμοκρασία θερμομαντικοῦ μέσου (αὐτόκλειστου) ἀνυψοῦται στιγμιαίως εἰς  $RT$  (π.χ.  $121^{\circ}C$ ) κατά τήν ἔναρξιν τῆς θερμάνσεως ( $t=0$ ). Εἰς τήν πρᾶξιν ἀπαιτεῖται ὠρισμένος χρόνος (come-up time) διὰ νά φθάσῃ τό αὐτόκλειστον εἰς τήν θερμοκρασίαν ταύτην, ὃ ὁποῖος πρέπει νά ληφθῆ ὑπ' ὄψιν.

Δι' ἀντικαταστάσεως τῆς θερμοκρασίας ( $T$ ) τῆς ἐξίσωσως θερμοκῆς καταστροφῆς μέ τήν τιμήν τῆς ( $T$ ) τῆς λαμβανομένης ἀπό τήν ἐξίσωσιν θερμοκῆς ἀγωγῆς προκύπτει μία πολύπλοκος μαθηματική ἐξίσωσις, ἐκ τῆς ὁποίας δύναται νά ὑπολογισθῆ ὁ χρόνος ἀποστειώσεως. Εἰς τήν πρᾶξιν χρησιμοποιεῖται ἡ ἀπλοποιημένη ἐξίσωσις Ball (2-65), εἰς τήν ὁποίαν λαμβάνεται ὑπ' ὄψιν ἡ περίοδος ψύξεως τοῦ προϊόντος.

$$B_b = f_h [\log_j (RT - IT) - \log(g)] \quad (2-65)$$

ὅπου:  $B_b$  = χρόνος ἀποστειώσεως (min)

$f_h$  = ἀντίστροφος κλίσις τῆς λογαριθμικῆς εύθείας ἀνυψώσεως τῆς θερμοκρασίας (min)

$g = RT - FT$  ὅπου  $FT$  = θερμοκρασία τοῦ κρισίμου σημείου εἰς τό τέλος τῆς θερμάνσεως καί τήν ἔναρξιν τῆς ψύξεως τοῦ προϊόντος.

Εἰς τήν ἐξίσωσιν Ball (2-65) γίνεται δεκτόν ὅτι ἡ καμπύλη ψύξεως τοῦ κρισίμου σημείου τοῦ προϊόντος εἶναι εύθεια εἰς ἡμιλογαριθμικόν διάγραμμα καί ἔχει τήν αὐτήν κλίσιν μέ τήν καμπύλην θερμάνσεως ( $-1/f_h$ ). Αἱ δύο εύθεῖαι συνδέονται διὰ καμπύλας σχήματος ὑπερβολῆς, ἡ κορυφή τῆς ὁποίας ἀντιστοιχεῖ εἰς τήν μεγίστην θερμοκρασίαν ( $FT$ ) τοῦ κρισίμου σημείου.

Ἡ διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμομαντικοῦ μέσου καί κρισίμου σημείου εἰς τό τέλος τῆς θερμάνσεως ( $g = RT - FT$ ) δέν εἶναι γνωστή εἰς τήν πρᾶξιν καί ὑπολογίζεται ἀπό πίνακας ἡ διαγράμματα τῆς βιβλιογραφίας (Ball). Ὁ  $\log(g)$  εἶναι συνάρτησις τῆς παραμέτρου  $f_h/U$  ὅπου τό ( $U$ ) ὀρίζεται ὡς ἡ τιμή ἀποστειώσεως (δι' ὠρισμένον μικροοργανισμὸν-δείκτην) εἰς τήν

θερμοκρασίαν τοῦ αὐτοκλειστοῦ ( T ) καί ὑπολογίζεται ἀπό τήν ἐξίσωσιν (2-60), ἡ ὁποία εἰς τήν παρούσαν περίπτωσιν γράφεται ὡς:

$$U = F 10^{\frac{121-RT}{z}} \quad (2-66)$$

Τό ( U ) ὑπολογίζεται ἀπό τά δεδομένα ( F ), ( RT ) καί ( z ) βάσει τῆς ἐξισώσεως (2-66). Ἀκολουθῶς ὑπολογίζεται ἡ παράμετρος  $f_h/U$  ἀπό τήν πειραματικῶς προσδιορισθεῖσαν τιμήν τοῦ ( $f_h$ ) καί τέλος εὐρίσκεται ὁ  $\log(g)$  ἀπό διαγράμματα τῆς βιβλιογραφίας. Τελευταίως χρησιμοποιοῦνται πρὸς τοῦτο μαθηματικά σχέσεις δι' ἠλεκτρονικούς ὑπολογιστάς, εἰς τὰς ὁποίας ὁ  $\log(g)$  ὑπολογίζεται ὡς συνάρτησις τοῦ  $f_h/U$  (σχ. 2-26).

Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις ἐφαρμόζεται ὁ ἀντίστροφος τοῦ ἀνωτέρω ὑπολογισμοῦ κατὰ Ball:

Δίδεται ὁ χρόνος ἀποστερώσεως ( $B_B$ ) διὰ τό ὑπ' ὄψιν προϊόν καθώς καί τά ἀπαιτούμενα στοιχεῖα ( RT ), ( IT ), ( j ), ( $f_h$ ) καί ζητεῖται ὁ ὑπολογισμός τῆς τιμῆς ἀποστερώσεως ( F ). Πρὸς τοῦτο ὑπολογίζεται ὁ  $\log(g)$  ἀπό τήν ἐξίσωσιν (2-65) καί ἀπό τά διαγράμματα ἢ τὰς μαθηματικὰς σχέσεις τῆς βιβλιογραφίας ὑπολογίζεται ἡ παράμετρος  $f_h/U$ .

Ἡ τιμή τῆς θερμικῆς καταστροφῆς L εἰς τοὺς 121°C ὑπολογίζεται ἀπό τήν ἐξίσωσιν (2-67):

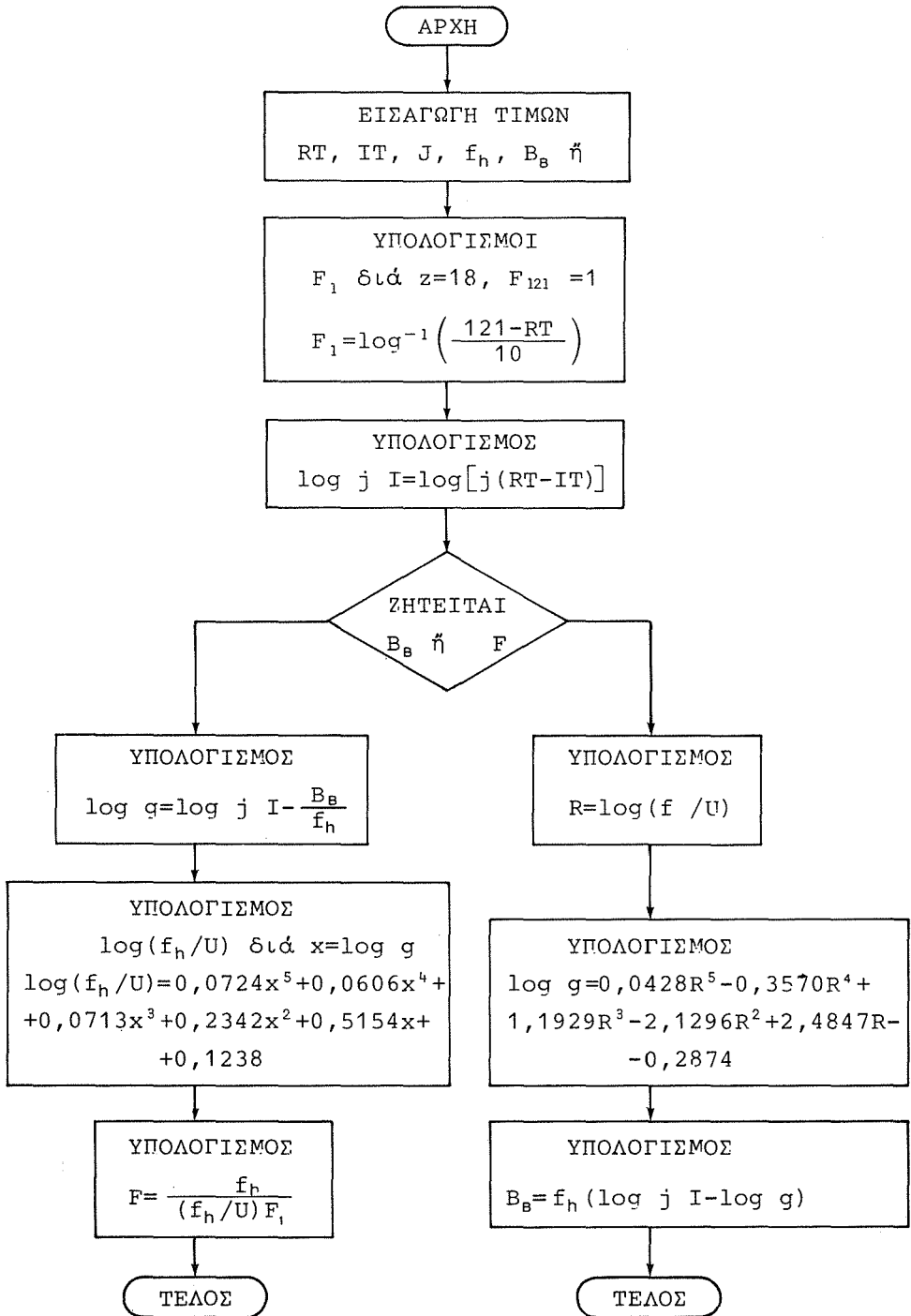
$$L = \frac{f_h 10^{\frac{RT-121}{z}}}{f_h/U} \quad (2-67)$$

Ἡ θερμική ἀποστείρωσις θεωρεῖται πλήρης ἐάν  $L=F$  (διὰ τόν δοθέντα μικροοργανισμόν - δείκτην).

Ἐάν ἡ καμπύλη θερμάνσεως τοῦ κρισίμου σημείου ἀποτελεῖται ἀπὸ δύο εὐθύγραμμα τμήματα (broken curve), ὁ χρόνος ἀποστερώσεως ( $B_B$ ) ὑπολογίζεται διὰ τῆς τροποποιημένης μεθόδου Ball κατὰ τρόπον ἀνάλογον πρὸς τήν ἐκτεθείσαν περίπτωσιν τῆς μιᾶς εὐθείας γραμμῆς.

Π α ρ ἄ δ ε ι γ μ α ὑ π ο λ ο γ ι σ μ ο ῦ διὰ τῆς ἀναλυτικῆς μεθόδου Ball: Δίδονται τά στοιχεῖα  $z=10^\circ\text{C}$ ,  $F=3,5$  min,  $f_h=11,4$  min,  $j=0,98$ ,  $RT=120^\circ\text{C}$ ,  $IT=49^\circ\text{C}$  διὰ μίαν θερμικήν κατεργασίαν καί ζητεῖται ὁ χρόνος ἀποστερώσεως ( $B_B$ ).





Σχ. 2-26. Πρόγραμμα υπολογισμού του  $(B_B)$  ή του  $(F)$

Υπολογίζονται αι ακόλουθοι τιμαί:  $RT-IT=71\text{ C}$ ,  $j(RT-IT)=0,98 \times 71=69,5$ ,  $U=3,5 \times 10^{0,1}=4,52\text{ min}$ ,  $f_h/U=11,4/52=2,52$ . Από διάγραμμα της βιβλιογραφίας διά  $f_h/U=2,52$  εύρισκεται  $\log(g)=0,47$ . Από τήν έξισωσιν (2-65) εύρισκεται δι' άντικαταστά - σεως τών άνωτέρω τιμών, χρόνος άποστειρώσεως,  $B_B=18,6\text{ min}$ .

**Μέγεθος Δοχείων.** Τό μέγεθος τών δοχείων (κονσερβών) έπηρεάζει κυρίως τήν μετάδοσιν θερμότητας πρός τό κρίσιμον σημείον, ήτοι τήν κλίσιν τής γραμμής άνόδου τής θερμοκρασίας, ή όποία έκφράζεται διά τής παραμέτρου  $f_h$ . Εάν είναι γνωστή ή παράμετρος  $f_h$  διά δοθέν μέγεθος δοχείου, τό  $f_h'$  ενός άλλου μεγέθους εύρισκεται από τήν έξισωσιν:

$$f_h'=f_h (\alpha'/\alpha) \quad (2-68)$$

Διά προϊόντα θερμαινόμενα δι' άγωγής:

$$\alpha = \frac{d^2}{(d/l)^2 + 2,34}$$

όπου  $d$  = έσωτερική διάμετρος του δοχείου

$l$  = ύψος του δοχείου (κονσέρβας)

Διά προϊόντα θερμαινόμενα διά μεταφοράς:

$$\alpha = \frac{dl}{d+2l}$$

Τό Σχ. (2-26) δίδει διαγραμματικώς πρόγραμμα ύπολογισμού του ( $B_B$ ) ή του ( $F$ ) μέ άπλοϋν ήλεκτρονικόν ύπολογιστήν.

#### 4. Άποστείρωσις εις Ύψηλάς Θερμοκρασίας

Συμφώνως πρός τήν κινητικήν τής θερμικής καταστροφής τών μικροοργανισμών ό χρόνος άποστειρώσεως έλαττοϋται σημαντικώς όταν αύξηθή ή θερμοκρασία. Αι μέθοδοι άποστειρώσεως εις ύψηλήν θερμοκρασίαν - βραχύν χρόνον (HTST=High Temperatures Short Time Sterilization) εφαρμόζονται εις ρευστά προϊόντα (χυμούς, πολτούς κ.λ.π.), τά όποια δύνανται νά άντληθούν διά τών καταλλήλων έναλλακτών θερμότητας. Πρός τοϋτο χρησιμοποιούνται έναλλάκται μέ πτερύγια, τά όποια άποξέουν

τήν θερμαινομένην ἐπιφάνειαν; πρὸς παρεμπόδισιν τῶν ἐπικαθήσεων καὶ θερμικῆς καταστροφῆς τοῦ προϊόντος (scraped-surface heat exchangers).

Τὸ ἀποστειρωθὲν προϊόν δύναται νὰ συσκευασθῆ θερμὸν εἰς τὸ δοχεῖον (κονσέρβαν), τὸ ὁποῖον ἀφίεται ἐπὶ μικρὸν χρόνον πρὸς τελείαν ἀποστείρωσιν τοῦ δοχείου καὶ ἀκολούθως ψύχεται. Εἰς τὴν ἀσηπτικὴν ἀποστείρωσιν τὸ θερμὸν προϊόν ψύχεται ταχέως εἰς ἐναλλάκτην θερμότητος καὶ συσκευάζεται εἰς δοχεῖα τὰ ὁποῖα ἔχουν ἀποστειρωθῆ προηγουμένως κενὰ εἴτε θερμικῶς ἢ χημικῶς.

Ἡ ἀποστείρωσις ὀρισμένων προϊόντων εἰς λίαν ὑψηλὰς θερμοκρασίας δυνατόν νὰ δημιουργήσῃ προβλήματα ἐνζυμικῆς ἀλλοιώσεως τοῦ προϊόντος. Ὁρισμένα ἐνζυμα εἶναι ἀνθεκτικώτερα τῶν βακτηρίων - δεικτῶν καὶ συνεπῶς ἐπιζοῦν τῆς ἀποστείρωσεως. Ὡς παράδειγμα ἀναφέρεται ἡ ὑπεροξειδάση τῶν μπιζελιῶν, ἡ ὁποία ἔχει τὰ χαρακτηριστικὰ  $F(121^{\circ}\text{C})=8 \text{ min}$  καὶ  $z=29^{\circ}\text{C}$ . Δηλαδή ἡ ὑπεροξειδάση ἔχει περίπου τὸ αὐτὸ (F) μὲ τὸ βακτήριον - δεικτὴν PA 3679, ἀλλὰ τὸ (z) εἶναι περίπου τριπλάσιον τοῦ ἀντιστοίχου (z) τοῦ ἐν λόγῳ ἀνθεκτικοῦ βακτηρίου. Τοῦτο σημαίνει ὅτι ἀπαιτεῖται τριπλασία αὔξεις τῆς θερμοκρασίας διὰ νὰ ἐπιτευχθῆ ἡ αὐτὴ ἐλάττωσις τοῦ πληθυσμοῦ τῆς ὑπεροξειδάσης. Οὕτως εἰς ὑψηλὰς θερμοκρασίας (π.χ. ἄνω τῶν  $125^{\circ}\text{C}$ ) ἡ ὑπεροξειδάση δυνατόν νὰ ἐπιζῆσῃ, ἐνῶ τὰ ἀνθεκτικὰ βακτήρια καταστρέφονται. Πρὸς καλυτέραν διατήρησιν τῶν προϊόντων, εἰς τὰς περιπτώσεις ταύτας, ὁ χρόνος ἀποστείρωσεως ὑπολογίζεται μὲ βάσιν τὸ χαρακτηριστικὸν ἀνθεκτικὸν ἐνζυμον.

## 5. Βιομηχανικοὶ Παστεριωτῆρες καὶ Ἀποστειρωτῆρες

Αἱ βιομηχανικαὶ παστεριώσεις καὶ ἀποστείρωσεις τῶν ρευστῶν προϊόντων συνεχοῦς λειτουργίας διεξάγονται εἰς ἐναλλάκτας θερμότητος διαφόρων τύπων, οἱ κυριώτεροι τῶν ὁποίων περιγράφονται εἰς ἄλλα τμήματα τοῦ παρόντος κεφαλαίου.

Ἡ παστερίωσις τῶν ὑγρῶν χαμηλοῦ ἰξώδους διεξάγεται κυρίως εἰς ἐναλλάκτας θερμότητος μετὰ πλακῶν (Κεφ. 2 στ). Ἡ

παστερίωσις περιλαμβάνει διαφόρους έναλλαγές θερμότητας ως δεικνύεται εις τό παράδειγμα ταχείας παστερίωσης του γάλακτος: Τό γάλα προθερμαίνεται εις 60 °C δι' άνακτήσεως θερμότητος, άκολούθως θερμαίνεται διά θερμού ύδατος εις 73°C και παραμένει εις τήν θερμοκρασίαν ταύτην επί 15 s, ψύχεται εις 25 °C δι' έναλλαγής θερμότητος μέ τό εισερχόμενον προϊόν και τέλος ψύχεται εις 3 °C διά ψυκτικού μέσου.

Δέον νά σημειωθῆ ὅτι ὁ χρόνος παστερίωσης 15 s εις 73 °C εἶναι σημαντικῶς μεγαλύτερος τοῦ χρόνου καταστροφῆς τῶν παθογόνων βακτηρίων τοῦ γάλακτος εις τήν αὐτήν θερμοκρασίαν. (F=4,5 s). Τοῦτο συμβαίνει διότι ἡ βιομηχανική παστερίωσις τοῦ γάλακτος βασίζεται εις τήν καταστροφήν τοῦ άνθεκτικοῦ ένζύμου φωσφατάση, ἡ ὁποία χρησιμοποιεῖται ὡς δείκτης ἐλέγχου τῆς παστερίωσης.

Ἡ άποστείρωσις τῶν μή ὀξείων προϊόντων συσκευασμάτων έντός λευκοσιδηρῶν δοχείων (κονσερβῶν) διεξάγεται κυρίως έντός αὐτοκλείστων (autoclaves ἢ retorts) άσυνεχοῦς λειτουργίας, θερμαινομένων διά "ζωντανοῦ" άτμοῦ, ἢ διά θερμοῦ ύδατος ὑπό πίεσιν. Χρησιμοποιοῦνται κατακόρυφα ἢ ὀριζόντια αὐτόκλειστα ἐφωδιασμένα διά τῶν άναγκαίων ὀργάνων μετρήσεως και ἐλέγχου τῆς θερμοκρασίας και τῆς πίεσεως. Μετά τό πέρας τῆς άποστειρώσεως τά δοχεῖα ψύχονται διά διαβιβάσεως ψυχροῦ ύδατος εις τό αὐτόκλειστον. Κατά τήν ψύξιν τῶν ὑαλίνων άποστειρωθέντων δοχείων χρησιμοποιεῖται ὠρισμένη ὑπερπίεσις άέρος πρός συγκράτησιν τῶν μεταλλικῶν πωμάτων επί τῶν δοχείων.

Εἰς τάς μεγάλας ἐγκαταστάσεις χρησιμοποιοῦνται αὐτόκλειστα συνεχοῦς λειτουργίας, τά ὁποῖα άποτελοῦνται άπό ὀριζόντια κυλινδρικά δοχεῖα φέροντα περιστρεφομένας ἐλικοειδεῖς μεταφορικές ταινίας διακινήσεως τῶν κονσερβῶν. Ἡ εἴσοδος και ἡ ἔξοδος τῶν κονσερβῶν εις τά αὐτόκλειστα ἐπιτυγχάνεται διά περιστροφικῶν βαλβίδων πίεσεως. Παρόμοιαι διατάξεις χρησιμοποιοῦνται διά τήν προθέρμανσιν και τήν ψύξιν τῶν κονσερβῶν.

Οἱ ὕδροστατικοί άποστειρωτῆρες ἔχουν μεγάλον ὕψος (άνωτερον τῶν 10 m) και ἐπιτυγχάνουν θερμοκρασίας άνωτέρας τῶν

100°C δι' ὑδροστατικῆς πιέσεως ἐντός δοχείων ἀνοικτῶν εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν. Αἱ κονσέρβαι διαβιβάζονται βραδέως διὰ μεταφορικῆς ταινίας εἰς τὰ τμήματα προθερμάνσεως, ἀποστειρώσεως καὶ ψύξεως τῆς ἐγκαταστάσεως, οὕτως ὥστε νὰ ἐπιτυγχάνεται ὁ ἀπαιτούμενος ἰσοδύναμος χρόνος ἀποστειρώσεως.

Προϊόντα θερμαινόμενα διὰ μεταφορᾶς θερμότητος δύνανται νὰ ἀποστειρωθοῦν διὰ φλογῶν (flame sterilizers). Κατὰ τὴν μέθοδον ταύτην τὰ μεταλλικὰ δοχεῖα θερμαίνονται διὰ φλογῶν καύσεως ἀερίων, περιστρεφόμενα ταχέως πρὸς ταχυτέραν μεταφορὰν τῆς θερμότητος.

Ἡ ἀποστείρωσις ρευστῶν ὀξίνων προϊόντων διεξάγεται καὶ εἰς ἐναλλακτικὰς θερμότητος συνεχοῦς λειτουργίας, π.χ. μετὰ πλακῶν ἢ μετὰ περιστρεφομένων πτερυγίων. Τὸ ἀποστειρωθέν θερμόν προϊόν συσκευάζεται ἐντός δοχείων, τὰ ὅποια ψύχονται βραδέως πρὸς ἀποστείρωσιν τοῦ ἐσωτερικοῦ αὐτῶν.

Ἡ ἀσηπτικὴ κονσερβοποίησις (aseptic canning) περιλαμβάνει τὴν χωριστὴν ἀποστείρωσιν τοῦ ρευστοῦ προϊόντος καὶ τῶν δοχείων καὶ τὴν συσκευασίαν εἰς ἀσηπτικόν χῶρον (ἀτμόσφαιραν ἀτμοῦ καὶ ἀποστειρωμένου ἀέρος). Τὸ προϊόν θερμαίνεται ταχέως εἰς τὴν θερμοκρασίαν ἀποστειρώσεως καὶ ἀκολούθως ψύχεται εἰς τὴν θερμοκρασίαν δωματίου πρὸ τῆς ἀσηπτικῆς συσκευασίας (γεμίσματος/σφραγίσματος) εἰς τὰ δοχεῖα.

Ἡ ἀποστείρωσις ὀξίνων προϊόντων ( $\text{pH} < 4,5$ ), συσκευασμένων ἐντός μεταλλικῶν ἢ ὑαλίνων δοχείων, διεξάγεται ἐντός ζέοντος ὕδατος εἰς τὴν ἀτμοσφαιρικὴν πίεσιν (ἀσυνεχῆς ἢ συνεχῆς λειτουργία).

### ιζ) Ὑλικά κατασκευῆς Ἐναλλακτῶν Θερμότητος

Κατωτέρω ἀναφέρονται εἰς γενικὰς γραμμάς τὰ ὑλικά κατασκευῆς διαφόρων ἐναλλακτικῶν θερμότητος, ἐξατμιστήρων, ξηραντήρων καὶ λοιπῶν θερμικῶν ἐγκαταστάσεων. Λεπτομερῆς μελέτη τῶν ὑλικῶν τούτων γίνεται εἰς τοὺς κλάδους τῆς Μεταλλουργίας, τῆς Διαβρώσεως, τῆς Τεχνολογίας Πλαστικῶν καὶ γενικώτερον τῆς Ἐπιστήμης τῶν Ὑλικῶν. Ἡ κατασκευὴ τῶν ἐναλλακτικῶν θερμότητος καθὼς καὶ αἱ δοκιμαί ἀσφαλείας αὐτῶν μελετῶνται εἰς τὴν Μηχανολογίαν.

Κατά κανόνα εἰς τούς ἐναλλάκτας θερμότητος χρησιμοποι-  
οῦνται ὡς κατασκευαστικά ὑλικά διάφορα μέταλλα καί κράματα  
τά ὁποῖα ἔχουν ὑψηλὴν ἀντοχὴν εἰς τὰς μηχανικὰς καταπονή-  
σεις καί τὴν διάβρωσιν. Τό κυριώτερον κατασκευαστικόν ὑλι-  
κόν εἶναι ὁ χάλυψ, ὁ ὁποῖος, ἐκτός τῶν ἀνωτέρω, ἔχει καί ὑ-  
ψηλὴν θερμικὴν ἀγωγιμότητα. Τό κυριώτερον μειονέκτημα τοῦ  
χάλυβος εἶναι ἡ τάσις διαβρώσεως αὐτοῦ εἰς πολλὰς βιομηχα-  
νικὰς ἐφαρμογὰς, ἰδιαιτέρως εἰς τὰ συστήματα ὕδατος καί ὑ-  
δατικῶν διαλυμάτων.

Οἱ ἐναλλάκται θερμότητος τῶν διαβρωτικῶν ρευστῶν κατα-  
σκευάζονται ἀπὸ διάφορα ἀνθεκτικὰ μέταλλα καί κράματα, τὰ  
κυριώτερα τῶν ὁποίων ἀναφέρονται κατωτέρω:

Οἱ ἀνοξειδῶτοι χάλυβες (stainless steels) εἶναι κράμα-  
τα σιδήρου-χρωμίου-νικελίου καί χρησιμοποιοῦνται εὐρύτατα  
διὰ τὰ ὑδατικά διαλύματα. Ὑφίστανται διάφοροι τύποι ἀνο-  
ξειδώτου χάλυβος χαρακτηριζόμενοι ἀπὸ τὴν μεταλλογραφικὴν  
μορφήν καί τὴν περιεκτικότητά εἰς ὠρισμένα στοιχεῖα (π.χ.  
μολυβδένιον). Οὕτως ἡ σειρά 300 εἶναι λίαν ἀνθεκτικὴ εἰς τὴν  
διάβρωσιν, π.χ. ὁ ἀνοξειδῶτος χάλυψ 304 χρησιμοποιεῖται εἰς  
ἐγκαταστάσεις νιτρικοῦ ὀξέος καί ὁ τύπος 316 εἰς ὄξινα τρό-  
φιμα. Ὁ τύπος 410 εἶναι ὀλιγώτερον ἀνθεκτικὸς, εἰς τὴν διά-  
βρωσιν, τῆς σειράς 300 καί χρησιμοποιεῖται εἰς ἐλαφρῶς δια-  
βρωτικὸν περιβάλλον (ἐπαφὴ μὲ ἀτμοσφαιρικὸν ἀέρα, κοινὸν ὕ-  
δωρ κλπ.).

Ὁ χαλκὸς καί τὰ κράματα αὐτοῦ (π.χ. admiralty) χρησι-  
μοποιοῦνται κυρίως εἰς τούς ἐναλλάκτας/συμπυκνωτήρας σωλή-  
νων καί κελύφους, τούς ψυχομένους δι' ὕδατος. Ὁ χαλκός, ἐκ-  
τός τῆς ἀνθεκτικότητος εἰς τὴν διάβρωσιν, προτιμᾶται καί διὰ  
τὴν λίαν ὑψηλὴν θερμικὴν ἀγωγιμότητα. Σημαντικὸν μειονέκτη-  
μα τοῦ χαλκοῦ ἔναντι τοῦ ἀνοξειδώτου χάλυβος θεωρεῖται ἡ μι-  
κρά ἀντοχὴ εἰς τὴν πίεσιν. Εἰς τὰς βιομηχανίας τροφίμων ἀ-  
ποφεύγεται ἡ χρῆσις χαλκοῦ διότι δέν ἐπιτρέπεται ἡ παρουσία  
λίχνων τοῦ μετάλλου τούτου εἰς τὸ τελικὸν προϊόν.

Τό νικέλιον καί τὰ κράματα αὐτοῦ (π.χ. Monel, Hastel-  
loy, Inconel) χρησιμοποιοῦνται εἰς ἐφαρμογὰς διαβρωτικῶν  
ρευστῶν, ὡς καυστικοῦ νατρίου, ὀξέων, ὀξειδωτικῶν καί ἀνα-

γωγικών μέσων. Είς ώρισμένες περιπτώσεις διαβρωτικών ρευστών ένδεικνυται ή χρήση δαπανηρών μετάλλων ώς τό τιτάνιον, τό όποϊον είναι λίαν άνθεκτικόν είς τήν διάβρωσιν (π.χ. όξέα, διαλύματα χλωριούχων άλάτων).

Τό άλουμίνιον καί τά κράματα αύτου χρησιμοποιούνται είς έναλλάκτας θερμότητος είς χαμηλάς σχετικώς θερμοκρασίας. Είς ώρισμένες περιπτώσεις εφαρμόζονται σύνθετοι κατασκευαί, είς τάς όποίας ή πλευρά ή έρχομένη είς έπαφήν μέ τό διαβρωτικόν ρευστόν, καλύπτεται ύπό στρώματος άντιδιαβρωτικού μετάλλου ή άλλου ύλικου, π.χ. άλουμινίου, μολύβδου, ύάλου καί πλαστικών ή ρητινικών ύλικών.

Ή πυρίμαχος ύαλος χρησιμοποιείται είς χαμηλάς πιέσεις ύπό μορφήν σωλήνων διαφόρων τύπων έναλλακτών θερμότητος. Έπίσης είς ώρισμένες εφαρμογάς χρησιμοποιούνται έναλλάκται θερμότητος έκ γραφίτου κατειργασθέντος διά φαινολικής ρητίνης (Karbate), οί όποϊοι παρουσιάζουν μεγάλην άνθεκτικότητα είς παντός είδους διάβρωσιν.

Είς λίαν διαβρωτικές εφαρμογάς (π.χ. όξέα, άλμαι) δύνανται νά εφαρμοσθοϋν οί έναλλάκται σωλήνων καί κελύφους έκ Teflon (Du Pont). Οί σωλήνες οϋτοι είναι μικράς διαμέτρου (2 mm) καί λόγω τής μικράς θερμικής άγωγιμότητος του Teflon ό συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητος είναι σχετικώς μικρός (π.χ.  $U=250 \text{ W/m}^2\text{K}$  διά ψύξιν θειϊκου όξέος δι' ύδατος). Διά τοϋτο οί έναλλάκται θερμότητος έκ Teflon περιέχουν μεγάλο αριθμόν σωλήνων μικροϋ σχετικώς μήκους (περιορισμός τής πτώσεως πιέσεως).

## ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΝΑΛΛΑΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ

1. Έναλλάκτης θερμότητας σωλήνων και κελύφους (1-1) χρησιμοποιείται διά τήν θέρμανσιν 6000 kg/h πετρελαίου από 26 °C εις 102 °C. Ἡ θέρμανσις γίνεται διά κεκορεσμένου ἁτμοῦ 110 °C καί ἡ εἰδική θερμότης τοῦ πετρελαίου δύναται νά ληφθῆ ὡς σταθερά  $C_p=2$  kJ/kg K. Ὁ συνολικός συντελεστής μεταφοῶς θερμότητος (U) μεταβάλλεται σημαντικῶς μετά τῆς μέσης θερμοκρασίας τοῦ πετρελαίου καί διά τόν δοθέντα έναλλάκτην εὑρέθησαν αἱ ἀκόλουθοι τιμαί:

|                       |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Θερμοκρασία °C        | 26  | 35  | 43  | 54  | 71  | 88  | 102 |
| U, W/m <sup>2</sup> K | 140 | 185 | 230 | 270 | 340 | 400 | 450 |

Νά ὑπολογισθῆ ἡ ἀπαιτουμένη ἐπιφάνεια ἐναλλαγῆς (A):

- Διά μίαν μέσσην τιμήν τοῦ U.
- Διά γραμμικὴν μεταβολήν τοῦ U μετά τῆς θερμοκρασίας.
- Διά τήν γενικὴν περίπτωσιν μεταβλητοῦ U.

Λ ὕ σ ι ς

- Ὁ ρυθμὸς τῆς μεταφερομένης θερμότητος εἶναι:

$$\dot{q} = \frac{6000}{3600} \cdot 2 \cdot 76 = 253,3 \text{ kW}$$

Ἡ μέση ἀριθμητικὴ τιμὴ τοῦ U εὑρίσκεται ὡς:

$$\bar{U} = (140 + 185 + 230 + 270 + 340 + 400 + 450) / 7 = 288 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ἡ μέση λογαριθμικὴ διαφορὰ θερμοκρασίας εἶναι:

$$\Delta T_L = \frac{84 - 8}{2,31 \log(84/8)} = 32,3 \text{ K}$$

Ἐκ τῆς βασικῆς ἐξισώσεως μεταφοῶς θερμότητος (2-7) ἔ-



πεται ότι:

$$A = \frac{253300}{288 \cdot 32,3} = 27,2 \text{ m}^2$$

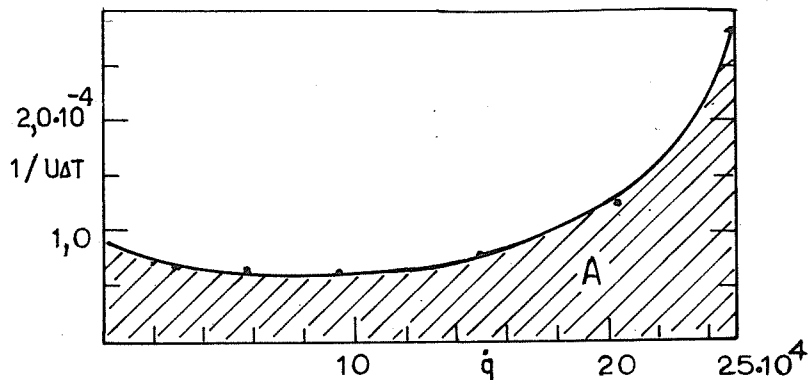
β) Δι' εφαρμογής της εξίσωσης (2-8) προκύπτει:

$$A = \frac{253300}{\frac{450 \cdot 84 - 140 \cdot 8}{2,31 \log \frac{450 \cdot 84}{140 \cdot 8}}} = 24,3 \text{ m}^2$$

γ) Είς τήν γενικήν περίπτωσιν ὁ συντελεστής (U) μεταβάλλεται καθ' ὄλον τό μήκος τοῦ ἐναλλάκτου θερμότητος καί ἐφαρμόζεται ἡ ἐξίσωσις (2-9). Ἡ ἐξίσωσις αὕτη ἐπιλύεται διά γραφικῆς ὁλοκληρώσεως εἰς διάγραμμα  $(1/U\Delta T)$ ,  $(\dot{q})$ , ὡς δεικνύεται εἰς τόν κατωτέρω πίνακα καί τό Σχῆμα (2-1'):

| $\Delta T$ | U   | $U\Delta T$ | $(1/U\Delta T)$      | $\Delta T'$ | $\dot{q}, W$     |
|------------|-----|-------------|----------------------|-------------|------------------|
| 84         | 140 | 11.760      | $0,85 \cdot 10^{-4}$ | 0           | 0                |
| 75         | 185 | 13.875      | 0,72                 | 9           | $3,0 \cdot 10^4$ |
| 67         | 230 | 15.410      | 0,65                 | 17          | 5,7              |
| 56         | 270 | 15.120      | 0,66                 | 28          | 9,3              |
| 39         | 340 | 13.260      | 9,75                 | 45          | 15,0             |
| 22         | 400 | 8.800       | 1,14                 | 62          | 20,7             |
| 8          | 450 | 3.600       | 2,78                 | 76          | 25,3             |

ὅπου  $\Delta T = T_h - T_{c2}$  καί  $\Delta T' = T_{c2} - T_{c1}$



Σχ. 2-1'

Έκ του Σχ. (2-1') προκύπτει ότι  $A=23,7 \text{ m}^2$ .

2. Έναλλάκτης θερμότητας (1-1) θερμαίνει αέρα, αρχικής θερμοκρασίας  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  εις ατμοσφαιρικήν πίεσιν, διά κεκορεσμένου ατμού  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  εις τό κέλυφος. Ὁ έναλλάκτης περιέχει 100 χαλκίνους σωλήνας ἐσωτερικῆς διαμέτρου 50 mm, πάχους τοιχώματος 2 mm καὶ μήκους 3 m. Διά ρυθμὸν ροῆς αἵματος  $20.000 \text{ kg/h}$ , ἡ θερμοκρασία τοῦ ἐξερχομένου τοῦ έναλλάκτου αἵματος εἶναι  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

α) Ποῖος ὁ συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητος τοῦ αἵματος ( $h_i$ );

β) Ποῖα ἡ θερμοκρασία ἐξόδου τοῦ αἵματος ἐάν ἡ ταχύτης αὐτοῦ εἰς τὸν ἀνωτέρω έναλλάκτην διπλασιασθῇ;

γ) Ποῖον τὸ ἀπαιτούμενον μήκος σωλήνων τοῦ ἀνωτέρω έναλλάκτου διά νά ἐπιτευχθῇ θερμοκρασία ἐξόδου αἵματος  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  μέ τὴν διπλασιασθεῖσαν ταχύτητα (β);

δ) Ποῖα ἡ πτώσις πιέσεως εἰς τὰς ἀνωτέρω τρεῖς περιπτώσεις;

Δ ε δ ο μ έ ν α :

Συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητος τοῦ ατμοῦ  $h_0=10.000 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Σταθεραὶ φυσικαὶ ἰδιότητες τοῦ αἵματος:  $\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\eta=0,02 \text{ cP}$ ,  $C_p=1 \text{ kJ/kg K}$ .

Λ ύ σ ι ς

$$\alpha) \quad \dot{q} = \frac{20000 \cdot 1 \cdot 50}{3600} = 278 \text{ kW}, \quad A = 3,14 \cdot 0,05 \cdot 100 \cdot 3 = 47 \text{ m}^2$$

$$\Delta T_1 = 100, \quad \Delta T_2 = 50, \quad \Delta T_L = \frac{100 - 50}{2,3 \log 2} = 72$$

$$\text{καὶ} \quad U_i = 278000 / 47 \cdot 72 = 82 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ἐπειδὴ αἱ θερμικαὶ ἀντιστάσεις τοῦ μεταλλικοῦ τοιχώματος (χαλκοῦ) καὶ τῆς πλευρᾶς τοῦ (κεκορεσμένου) ατμοῦ εἶναι πολὺ μικραὶ ἐν συγκρίσει πρὸς τὴν ἀντίστασιν τοῦ αἵματος, λαμ-

βάνεται προσεγγιστικῶς:  $h_i = U_i = 82 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

β) Διὰ διπλασιασμοῦ τῆς ταχύτητος τοῦ ἀέρος ἐντὸς τῶν σωλῆνων ἀυξάνεται σημαντικῶς ὁ συντελεστὴς θερμότητος τοῦ ἀέρος ( $h_i$ ). Ἡ ροὴ εἶναι τυρβώδης καὶ ἀπὸ τὴν ἐξίσωσιν (1-43), δεχόμενοι σταθερὰς φυσικὰς ἰδιότητας τοῦ ἀέρος, προκύπτει:

$$h_i' = 2^{0,8} h_i = 1,74 \cdot 82 = 142 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Κατὰ προσέγγισιν, ὡς καὶ προηγουμένως:

$$U_i' = h_i' = 142 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ἴσοζύγιον ἐνθαλπίας διὰ τὴν περίπτωσιν (β) δίδει:

$$\frac{2 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot (T_{c2} - 20)}{3600} = \frac{142 \cdot 47 (\Delta T_1 - \Delta T_2)}{1000 \cdot 2,3 \log(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

ἀλλὰ  $\Delta T_1 = 120 - 20 = 100$ ,  $\Delta T_2 = 120 - T_{c2}$

καὶ  $11,1 (T_{c2} - 20) = \frac{2,8 (T_{c2} - 20)}{\log[100 / (120 - T_{c2})]}$

ἢ  $\log[100 / (120 - T_{c2})] = 0,26$

$$100 / (120 - T_{c2}) = 1,82 \text{ καὶ } T_{c2} = 65^\circ\text{C}$$

γ) Συνολικὸς συντελεστὴς μεταφορᾶς θερμότητος  $U_i' = 142 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\dot{q}' = 2\dot{q} = 2 \cdot 278 = 556$$

$$\dot{q}' = 142 A' \Delta T_L, \Delta T_L = 72$$

$$\dot{q}' = 142 \cdot 100 \cdot 3,14 \cdot 0,05 \cdot 72 L' = 556 \cdot 10^3$$

καὶ  $L' = 3,4 \text{ m}$

$$\delta) N_{Re} = \frac{D \bar{u} \rho}{\eta} = \frac{4 \dot{m}}{\pi D \eta} = \frac{4 \cdot 20 \cdot 10}{3,14 \cdot 0,05 \cdot 3600 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3}} = 7 \cdot 10^4$$

Μέση ταχύτης  $\bar{u} = \frac{20000 \cdot 4}{3600 \cdot 1,2 \cdot 3,14 \cdot (0,05)^2 \cdot 100} = 23,6 \text{ m/s}$

Από τό διάγραμμα Fanning  $f=0,005$

Από τήν έξίσωσιν Fanning (1-71)

$$\Delta P_1 = 4 \cdot 0,005 \cdot \frac{3}{0,05} \cdot \frac{(23,6)^2}{2} \cdot 1,2$$

ήτοι

$$\Delta P_1 = 400 \text{ N/m}^2$$

Διά παρομοίων υπολογισμών εύρισκονται:

$$\Delta P_2 = 1312 \text{ N/m}^2 \quad \text{καί} \quad \Delta P_3 = 1487 \text{ N/m}^2$$

3. Κλάσμα πετρελαίου ψύχεται από  $72^\circ\text{C}$  είς  $39^\circ\text{C}$  είς έναλλάκτην θερμότητας (1-2) δι' ύδατος θερμοκρασίας  $15^\circ\text{C}$ . Τό ύδωρ διέρχεται διά μέσου 166 σωλήνων, έξωτερικής διαμέτρου  $1\frac{1}{4}$ " No 10 BWG.

Ζ η τ ο ύ ν τ α ι :

- α) Ή άπαιτουμένη έπιφάνεια έναλλαγής θερμότητας.
- β) Τό μήκος έκάστου σωλήνος.

Δ ε δ ο μ έ ν α :

Είδική θερμότης κλάσματος πετρελαίου  $C_p = 3,15 \text{ kJ/kgK}$

Παροχή κλάσματος πετρελαίου =  $58450 \text{ kg/h}$

Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $U = 770 \text{ W/m}^2\text{K}$

Ή ψύξις λαμβάνει χώραν ώς δεικνύεται είς τό Σχ. (2-2').

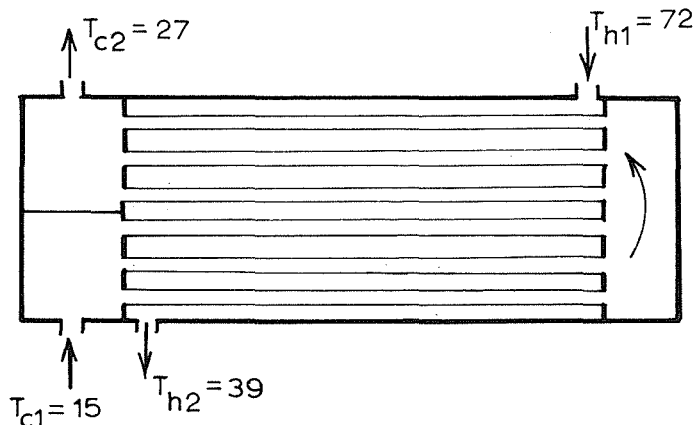
Α ύ σ ι ς

α) Ή άπαιτουμένη έπιφάνεια δίδεται από τήν έξίσωσιν (2-29).

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είς τόν έναλλάκτην είναι:

$$\dot{q} = \frac{58450 \cdot 3,15 (72-39)}{3600} = 1688 \text{ kW}$$

Έκ τοϋ Σχ. (2-11) διά  $X = \frac{27-15}{72-15} = 0,21$  καί



Σχ. 2-2' (θερμοκρασίες εις °C)

$$z = \frac{72-39}{27-15} = 2,25 \text{ εϋρίσκεται } \gamma = 0,94$$

Λογαριθμική μέση διαφορά θερμοκρασίας

$$\Delta T_L = \frac{(72-27) - (39-15)}{2,3 \log (45/24)} = 33,4^\circ \text{C}$$

Δι'άντικατάστασews εις τήν εξίσωσιν (2-29) προκύπτει:

$$A = \frac{1688000}{0,94 \cdot 770 \cdot 33,4} = 70 \text{ m}^2$$

β) 'Επειδή ή μεγαλύτερα θερμική αντίστασις εϋρίσκεται εις τήν πλευράν του κλάσματος πετρελαίου (έξωτερικώς των σωλήνων), ή επιφάνεια έναλλαγής θερμότητος θεωρείται ως ή έξωτερική επιφάνεια των σωλήνων, ήτοι:

$$A = 3,14 \cdot 1,25 \cdot 0,0254 \cdot 166 \quad L = 70$$

καί

$$L = 4,2 \text{ m}$$

4. 'Εάν ή θερμοκρασία του έξερχομένου ύδατος του προβλήματος (3) είναι άγνωστος νά προσδιορισθ ή τό άριστον μέγεθος του έναλλάκτη θερμότητος.

Δ ε δ ο μ έ ν α :

Λειτουργία έναλλάκτου 300 ημέρας επί 24 ώρας ημερησίως  
 Κόστος έναλλάκτου  $160 \text{ \$/m}^2$  επιφανείας έναλλαγής  
 Έτησία απόσβεσις 10% του κόστους  
 Κόστος ύδατος  $3,17 \cdot 10^{-3} \text{ \$/m}^3$   
 Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας  $0,01 \text{ \$/kWh}$   
 Σταθερά πτώσις πιέσεως  $0,5 \text{ bar}$

Λ ύ σ ι ς

Διά τόν προσδιορισμόν του άριστου μεγέθους του έναλλάκτου άπαιτεΐται ή εύρεσις του έλαχίστου τής συναρτήσεως του έτησίου κόστους (K) του έναλλάκτου.

$$K=K_1+K_2+K_3$$

όπου  $K_1=0,1 \cdot 160 \cdot A =$  έτησία απόσβεσις

$K_2=3,17 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \cdot 24 \cdot 3600 \dot{V}_w =$  έτήσιον κόστος ύδατος

$K = 0,01 \dot{V}_w \Delta P =$  έτήσιον κόστος ενέργειας

$\dot{V}_w =$  έτησία ροή ύδατος,  $\text{m}^3/\text{έτος}$

Ή επιφάνεια έναλλαγής θερμότητας δύναται νά έκφρασθή συναρτήσει των δεδομένων του προβλήματος (3) :

$$\dot{q}=1688 \text{ kW}, Y=0,94, U=770 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{καί } \Delta T_L = \frac{72-T_{c2} - 39+15}{2,3 \log \frac{72-T_{c2}}{39-15}} = \frac{48-T_{c2}}{2,3 \log [(72-T_{c2})/24]}$$

$$A = \frac{1.688.000.2,3 \log [(T_2-T_{c2})/24]}{0,94.770(48-T_{c2})}$$

$$= \frac{5,36 \cdot 10^3 \log [(72-T_{c2})/24]}{48-T_{c2}}$$

$$\text{καί έπομένως: } K_1 = \frac{85,8 \cdot 10^3 \log [(72-T_{c2})/24]}{48-T_{c2}} \quad (2)$$

Ό ρυθμός ροής ύδατος  $\dot{V}_w$  εις  $\text{m}^3/\text{s}$  έκφράζεται ως άκο-  
 λούθως :

$$\dot{V}_w = \alpha / C_p \rho \Delta T = \frac{1688}{4,18 \cdot 1000 (T_{c2} - 15)} = \frac{0,4}{T_{c2} - 15}$$

καί επομένως 
$$K_2 = \frac{3,32 \cdot 10^4}{T_{c2} - 15} \quad (3)$$

Ἡ πτώσις πιέσεως εἰς τόν ἐναλλάκτην λαμβάνεται ὡς  $\Delta P = 0,5 \text{ bar} = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 0,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

Καί ἡ ἔτησία ροή ὕδατος:

$$\dot{V}_w = \frac{300 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 0,4}{T_{c2} - 15} = \frac{10,4 \cdot 10^6}{T_{c2} - 15}$$

Ἐτησία κατανάλωσις ἐνεργείας δι' ὑπερνίκησιν τῆς πτώσεως πιέσεως:

$$\dot{V}_w \Delta P = \frac{10,4 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 10^5}{T_{c2} - 15} = \frac{5,18 \cdot 10^{11}}{T_{c2} - 15} \text{ J} = \frac{1,44 \cdot 10^5}{T_{c2} - 15} \text{ kWh}$$

καί επομένως:

$$K_3 = \frac{1,44 \cdot 10^3}{T_{c2} - 15} \quad (4)$$

Δι' ἀντικαταστάσεως τῶν τιμῶν  $K_1, K_2, K_3$  εἰς τήν ἐξίσωσιν (1) προκύπτει:

$$K = \frac{85,8 \cdot 10^3 \log [(72 - T_2) / 24]}{48 - T_{c2}} + \frac{34 \cdot 10^3}{T_{c2} - 15} \quad (5)$$

Ἡ συνάρτησις (5) δέν εἶναι συνεχῆς εἰς τό διάστημα ( $T_{c2} = 15$  ἕως 72) καί επομένως δέν εἶναι δυνατή ἡ εὑρεσις τοῦ ἐλαχίστου διά παραγωγίσεως. Ἡ ἀριστοποίησις γίνεται δι' ἀριθμητικῆς ἢ γραφικῆς ἀναλύσεως, ἥτοι δι' ὑπολογισμοῦ τοῦ (K) διά διαφόρους τιμάς τῆς ( $T_{c2}$ ).

Εἰς τόν πίνακα δίδονται τά ζεύγη τῶν τιμῶν  $T_{c2}$ , K τὰ ὑπολογισθέντα ἐκ τῆς ἐξισώσεως (5):

Ἐκ τοῦ κατωτέρω πίνακος προκύπτει ὅτι ἡ ἀρίστη θερμοκρασία ἐξόδου τοῦ ὕδατος εἰς τόν ἐναλλάκτην θερμότητος εἶναι ἡ  $T_{c2} = 48^\circ \text{C}$ .

| $T_{c2}$ | K    | $T_{c2}$ | K    |
|----------|------|----------|------|
| 40       | 2726 | 46       | 2609 |
| 41       | 2695 | 47       | 2605 |
| 42       | 2669 | 48*      | 2603 |
| 43       | 2648 | 49       | 2606 |
| 44       | 2631 | 50       | 2612 |
| 45       | 2618 |          |      |

\* Διά τοῦ κανόνος L' Hospital.

5. Νά ὑπολογισθῇ συμπυκνωτήρ διὰ τήν συμπύκνωσιν 22.500 kg/h κεκορεσμένων ἀτμῶν ἀπολύτου πιέσεως 1 bar δι' ὑφαλμύρου ὕδατος θερμοκρασίας 20°C.

Δ ε δ ο μ έ ν α :

Ἡ θερμοκρασία τοῦ ὕδατος δέν πρέπει νά ὑπερβαίνει τοὺς 50 °C, διὰ τήν καλήν λειτουργίαν τοῦ ψυκτικοῦ πύργου εἰς τόν ὁποῖον διαβιβάζεται τό ὕδωρ μετά τόν συμπυκνωτήρα.

Ταχύτης ροῆς τοῦ ὕδατος 2 m/s.

Συντελεστής ἀποθέσεων ὑφαλμύρου ὕδατος  $h_d = 5600 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Ἐνδείκνυται ἡ χρῆσις σωλήνων προτύπου μήκους  $L=3,0 \text{ m}$ .

Εἰς τήν πλευράν τῆς συμπυκνώσεως ἡ πτώσις θερμοκρασίας εἶναι τό 1/3 τῆς  $\Delta T_L$ .

Ἄριθμός ὀριζοντίων σωλήνων εἰς μίαν κατακόρυφον σειρὰν μέχρι  $N=20$ .

Δ ὑ σ ι ς

Ἴσοζύγιον ἐνθαλπίας διὰ τήν συμπύκνωσιν τοῦ κεκορεσμένου ἀτμοῦ, ἄνευ ψύξεως τοῦ συμπυκνώματος, δίδει:

$$\dot{q} = \dot{m}_s \Delta H_s = \dot{m}_w c_p (T_2 - T_1)$$

ὅπου  $\dot{m}_s = \frac{22,5 \cdot 10^3}{3600} = 6,25 \text{ kg/s}$  συμπυκνουμένου ἀτμοῦ

$\Delta H_s = 2260 \text{ kJ/kg}$  θερμότης ἐξατμίσεως ὕδατος εἰς 1 bar (πίνακες Ἀτμῶν)



$\dot{m}_w$  = ρυθμός ροής ύδατος ψύξεως, kg/s

$C_p = 4,18$  kJ/kg K

$T_1 = 20$  °C,  $T_2 = 47$  °C = θερμοκρασία έξόδου του ύδατος.

Ένταυθα λαμβάνεται κατά 3 °C μικροτέρα του ανωτάτου επιτρεπομένου όριου (50 °C). Ούτως ο ρυθμός ροής του ύδατος υπολογίζεται ως:

$$\dot{m}_w = \frac{6,25 \cdot 2260}{4,18 \cdot 27} = 125 \text{ kg/s}$$

Τό ύδωρ ψύξεως ρέει έντός τών σωλήνων. Πρός εύκολον καθαρισμόν καί ελάττωσιν τής διαβρώσεως έκλέγονται σωλήνες έκ κράματος χαλκού Admiralty έξωτερικής διαμέτρου 1" N<sup>ο</sup> 18 BWG (έσωτερική διάμετρος  $D_i = 0,902$ " = 0,023 m).

Διά τόν υπολογισμόν του συντελεστού μεταφοράς θερμότητος του ύδατος ( $h_i$ ) άπαιτείται ή εύρεσις τών άριθμών  $N_{Re}$  καί  $N_{Pr}$ . Αι φυσικαί ιδιότητες του ύδατος λαμβάνονται εις τήν μέσην θερμοκρασίαν 33,5°C.

$$N_{Re} = \frac{0,023 \cdot 2 \cdot 1000}{0,73 \cdot 10^{-3}} = 63.014 \text{ (τυρβώδης ροή)}$$

$$N_{Pr} = \frac{4180 \cdot 0,73 \cdot 10^{-3}}{0,6} = 5,1$$

Έκ τής έξισώσεως (1-43) προκύπτει:

$$h_i = \frac{0,023 \cdot 63014^{4,3} \cdot 5,1^{0,4} \cdot 0,6}{0,023} = 7957 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ό συντελεστής μεταφοράς θερμότητος διά τήν συμπύκνωσιν του άτμου έξωτερικώς τών σωλήνων υπολογίζεται άπό τήν έξίσωσιν (1-61). Ό έναλλάκτης θερμότητος θεωρείται ότι έχει όριζοντίαν διάταξιν τών σωλήνων.

$$h_o = \frac{10800}{(ND_o)^{1/4} \Delta T^{1/3}}$$

$$\delta\text{που } \Delta T = 1/3 \Delta T_L = \frac{80-53}{3 \cdot 2,3 \log(80/53)} = 22^\circ\text{C}$$

$$\text{καί} \quad h_0 = \frac{10300}{(20 \cdot 0,025)^{1/4} 22^{1/3}} = 4584 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Έκ τῆς ἐξισώσεως (2-13) ἐάν ληφθῆ διὰ τὸ μεταλλικὸν τοίχωμα  $k=110 \text{ W/m K}$ , προκύπτει:

$$1/U_0 = 1/4584 + \frac{1 \cdot 0,049 \cdot 0,025}{0,951 \cdot 110} + \frac{1}{0,902} \left( \frac{1}{7957} + \frac{1}{5600} \right) = \frac{1}{1763}$$

$$\text{καί} \quad A = \frac{6,25 \cdot 2,26 \cdot 10^5}{1763 \cdot 66} = 122 \text{ m}^2$$

Ὁ ἀριθμὸς τῶν σωλήνων ἀνά διάβασιν θὰ εἶναι:

$$N' = \frac{125 \cdot 4}{3,14 \cdot (0,023)^2 \cdot 2 \cdot 1000} = 150$$

Τὸ ἀπαιτούμενον μῆκος τῶν σωλήνων πρέπει νὰ εἶναι:

$$L = \frac{122}{3,14 \cdot 0,025 \cdot 150n} = \frac{10,36}{n}$$

ὅπου  $n$  = ἀριθμὸς διαβάσεων εἰς τὸν ἐναλλάκτην θερμότητος.

Διὰ  $n=3$  προκύπτει  $L=3,45 \text{ m}$ , τὸ ὁποῖον ἀποτελεῖ τὴν πλησιεστέραν τιμὴν εἰς τὸ πρότυπον μῆκος σωλήνων  $3,6 \text{ m}$ .

Ἐπομένως ὁ ζητούμενος συμπυκνωτὴρ θὰ εἶναι τύπου (1-3) κελύφους καί σωλήνων μὲ  $3 \times 150=450$  σωλήνας μήκους  $3,6 \text{ m}$ . Οἱ σωλήνες προτύπου μήκους  $3,6 \text{ m}$  παρέχουν ἔναντι τῶν ἀπαιτούμενων τιμῶν ( $3,45 \text{ m}$ ) ἀσφάλειαν  $[(3,60-3,45)/3,45] \cdot 100=4,35\%$ .

### 3. ΕΞΑΤΜΙΣΙΣ

Ἡ ἐξάτμισις ὀρίζεται ὡς ἡ ἀπομάκρυνσις τοῦ διαλύτου ἀπό ἕν διάλυμα ἢ αἰώρημα διὰ θερμικῆς ἐνεργείας. Εἰς τὰς πλείστας περιπτώσεις ὁ διαλύτης εἶναι τὸ ὕδωρ καὶ ἡ ἐξάτμισις ἀποσκοπεῖ εἰς τὴν συμπύκνωσιν τοῦ διαλύματος ἢ τοῦ αἰωρήματος. Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις τὸ κύριον προϊόν εἶναι τὸ ἀποσταζόμενον ὕδωρ, ὡς εἰς τὴν ἀφαλάτωσιν τῶν ἀλατούχων ὑδάτων. Εἰς πολλὰς περιπτώσεις ἡ ἐξάτμισις χρησιμοποιεῖται ὡς τὸ πρῶτον στάδιον ἄλλων διεργασιῶν, ὡς τῆς κρυσταλλώσεως καὶ τῆς ξηράνεως.

Ἡ ἐξάτμισις περιλαμβάνει βασικῶς καὶ τὰ τρία φαινόμενα Μεταφορᾶς, ἥτοι τὴν μετάδοσιν θερμότητος, τὴν μεταφορὰν μάζης καὶ τὴν ροὴν ρευστῶν. Εἰς τὴν πράξιν ἡ ἐξάτμισις ἐξαρτᾶται κυρίως ἀπὸ τὴν μετάδοσιν θερμότητος καὶ διὰ τοῦτο ἐξετάζεται εἰς τὰς θερμικὰς Διεργασίας. Ἡ ἀντίστασις εἰς τὴν μεταφορὰν μάζης θεωρεῖται ἀμελητέα ἐν συγκρίσει πρὸς τὴν μεταφορὰν θερμότητος. Ἡ ροὴ ρευστῶν παίζει σημαντικὸν ρόλον καὶ λαμβάνεται ὑπ' ὄψιν εἰς τὸν σχεδιασμόν τῶν ἐξατμιστήρων.

#### α) Ἰδιότητες τῶν Ρευστῶν

Αἱ φυσικαὶ ἰδιότητες τοῦ ὑγροῦ ἔχουν μεγάλην ἐπίδρασιν ἐπὶ τῆς ἐξατμίσεως, ὡς τοῦτο συμβαίνει γενικῶς εἰς τὴν μετάδοσιν θερμότητος. Ὁ συντελεστής μεταφορᾶς θερμότητος ἐ-

πιφανείας θερμάνσεως/ύγρου (h) εξαρτάται κυρίως από τό ίξωδες του ύγρου (η). Τό ίξωδες αύξάνει λογαριθμικώς μετά της συγκεντρώσεως καί συνεπώς ό συντελεστής μεταφοράς θερμότητος έλαττοῦται σημαντικώς προΐούσης της έξατμίσεως του ύδατικού διαλύματος.

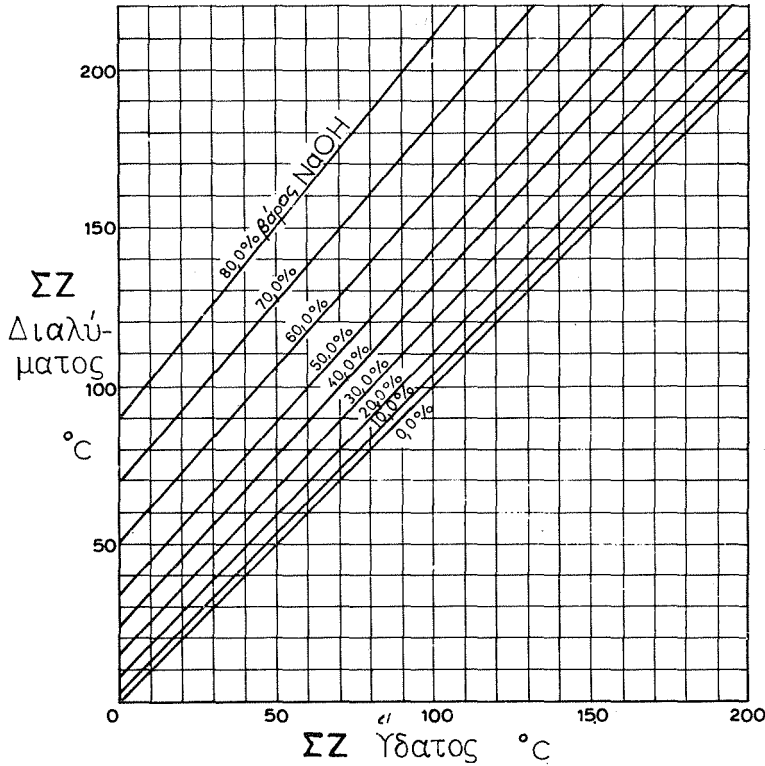
Ό σχηματισμός αποθέσεων (scaling ή fouling), ήτοι άδιαλύτων άλάτων καί πολυμερών ούσιων, επί της θερμαινομένης έπιφανείας μειώνει σημαντικώς τόν ρυθμόν μεταφοράς θερμότητος καί έπομένως τόν ρυθμόν έξατμίσεως. Ό άφρισμός του ύγρου κατά τήν έξάτμισιν είναι άνεπιθύμητος διότι προκαλεῖ παράσυρσιν (entrainment) του ύγρου εις τούς άπομακρυνόμενους άτμούς. Τά διαβρωτικά ύγρά άπαιτοῦν άνθεκτικά κατασκευαστικά ύλικά τών έξατμιστήρων, ως ό άνοξειδωτος χάλυψ, τό τιτάνιον κλπ.

Η εύαισθησία του ύγρου εις τήν θερμοκρασίαν έπιδρά επί της έκλογής του τύπου του έξατμιστήρος, της θερμοκρασίας έξατμίσεως καί του χρόνου παραμονής.

Η Ανύψωσις του Σημείου Ζέσεως (ΑΣΖ) τών ύδατικών διαλυμάτων έχει σημαντικήν έπίδρασιν επί της λειτουργίας του έξατμιστήρος. Γενικώς, εις τά άραιά διαλύματα καί τά διαλύματα ή αίωρήματα μεγαλομορίων καί κολλοειδών ή ΑΣΖ είναι μικρά καί δύναται νά άμεληθῆ. Αντιθέτως, εις τά διαλύματα άλάτων καί άλλων ίόντων ή μικρών μορίων, ή ΑΣΖ είναι σημαντική καί δύναται νά υπερβῆ τούς 50 °C. Η ΑΣΖ τών διαλυμάτων άποτελεῖ σοβαρόν μειονέκτημα εις τήν έξάτμισιν, διότι αύτη προκαλεῖ έλάττωσιν της διαφοράς θερμοκρασίας (ΔΤ) μεταξύ του θερμοανηκτικού ρευστου (κυρίως άτμου) καί του ζέοντος ύγρου, ως δεικνύεται κατωτέρω.

Η ΑΣΖ καθαρών διαλυμάτων δύναται νά ύπολογισθῆ βάσει τών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων καί τών έξισώσεων της Φυσικοχημείας. Εις τήν πράξιν χρησιμοποιοῦνται πίνακες καί διαγράμματα διά τόν άπ'εύθείας ύπολογισμόν της ΑΣΖ, ως τό Διάγραμμα Dühring διά τά διαλύματα καυστικού νατρίου (Σχ. 3-1).

Κατά τόν έμπειρικόν κανόνα Dühring, τό σημείον ζέσεως ενός ύδατικού διαλύματος είναι γραμμική συνάρτησις του σημείου ζέσεως του καθαρού ύδατος εις τήν αύτήν πίεσιν. Πρός



Σχ. 3-1. Διάγραμμα Dühring διαλυμάτων καυστικού νατρίου

εὑρεσίν τῆς ΑΣΖ ἑνός διαλύματος εἰς δοθεῖσαν πίεσιν εὐρίσκειται πρῶτον ἀπό Πίνακα Ἀτμῶν τό σημεῖον ζέσεως τοῦ καθαροῦ ὕδατος. Ἀκολουθῶς, διά τήν δοθεῖσαν συγκέντρωσιν τῆς οὐσίας, εὐρίσκειται ἀπό τό Διάγραμμα Dühring τό σημεῖον ζέσεως τοῦ διαλύματος καί ἡ ΑΣΖ ὑπολογίζεται ὡς ἡ διαφορά μεταξύ τῶν δύο τούτων θερμοκρασιῶν. Οὕτω, διάλυμα καυστικού νατρίου 40% εἰς ἀπόλυτον πίεσιν 1 bar δίδει ΑΣΖ=30 °C.

Ἡ ἐνθαλπία (H) τοῦ ὑγροῦ θεωρεῖται ἀπαραίτητος διά τούς ὑπολογισμούς τῶν ἰσοζυγίων θερμότητος τῶν ἐξατμιστήρων. Ἐάν δέν ὑφίσταται αἰσθητή φυσικοχημική ἀλληλεπίδρασις διαλελυμένης οὐσίας - ὕδατος (π.χ. διαλύματα μεγαλομορίων, αἰωρήματα) χρησιμοποιεῖται ἡ εἰδική θερμότης ( $C_p$ ) τοῦ διαλύματος ἀπό πίνακα τῆς Βιβλιογραφίας. Ἡ ( $C_p$ ) δύναται νά ὑπολογισθῇ κατά προσέγγισιν, ἀπό τὰς ἐξισώσεις:

$$C_p = 4,18(1-w/2) \quad (3-1)$$

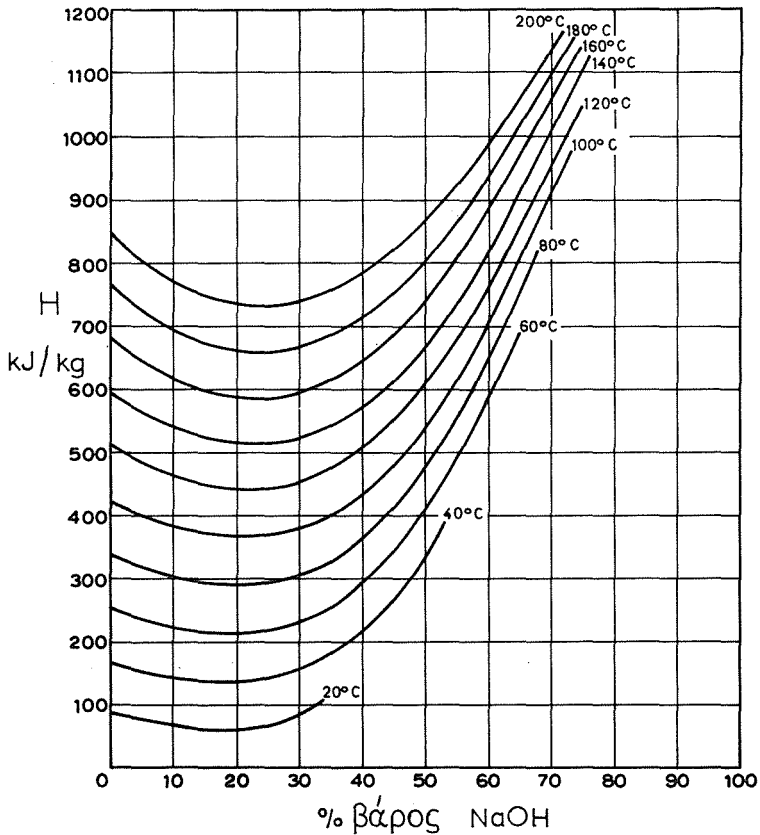
$$\eta \quad C_p = 4,18 - (4,18 - C_{p_0}) \frac{w}{w_0} \quad (3-2)$$

όπου  $C_{p_0}$  = είδική θερμότης διαλύματος συγκεντρώσεως ( $w_0$ ),  
kJ/kg K

$C_p$  = είδική θερμότης διαλύματος συγκεντρώσεως ( $w$ )

$w$  = κλάσμα μάζης διαλελυμένης ούσι-  
ας, kg/kg διαλύμα-  
τος.

Εάν υφίσταται σημαντική αλληλεπίδρασις διαλελυμένης ού-  
σι-ας - ύδατος απαιτούνται δεδομένα ένθαλπιας από την Βιβλι-



Σχ. 3-2 . Ένθαλπία διαλυμάτων καυστικού νατρίου

ογραφίαν (πίνακες και διαγράμματα). Είς τό Σχ. (3-2) δίδεται τυπικόν διάγραμμα ένθαλπίας-συγκεντρώσεως διαλυμάτων κωστικού νατρίου.

Κατά τόν ύπολογισμόν τών έξατμιστήρων χρησιμοποιούνται εύρύτατα αί θερμοδυναμικά ιδιότητες τών άτμών και τοϋ ύδατος αί όποια λαμβάνονται άπό τούς Πίνακες Άτμών (Πίναξ Π-3 Παραρτήματος). Κατά τήν έξάτμισιν διαλυμάτων μετά σημαντικής ΑΣΖ οί παραγόμενοι άτμοί εΐναι υπέρθερμοι διά τήν άπικρατούσαν πίεσιν τοϋ έξατμιστήρος. Αί ιδιότητες τών υπέρθερμων άτμών παρέχονται είς είδικούς πίνακας τής Βιβλιογραφίας. Διά προσεγγιστικούς ύπολογισμούς τών συνήθων έξατμιστήρων (περιοχή 100 °C) ή είδική θερμότης τών υπέρθερμων άτμών δύναται νά ληφθῆ ώς  $C_p=1,88 \text{ kJ/kg K}$  ( $0,45 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ ) και ή ένθαλπία αύτών δίδεται ύπό τής έξισώσεως:

$$H_g = \Delta H_w + 1,88 (ΑΣΖ) \quad (3-3)$$

όπου  $\Delta H_w$  = θερμότης έξατμίσεως καθαροϋ ύδατος είς τήν δοθείσαν πίεσιν,  $\text{kJ/kg}$

Ένταϋθα, ώς βάσις ύπολογισμού τής ένθαλπίας λαμβάνεται τό σημείον ζέσεως τοϋ καθαροϋ ύδατος είς τήν δοθείσαν πίεσιν ( $T_w$ ).

## β) Έξατμιστήρες μιᾶς Βαθμίδος

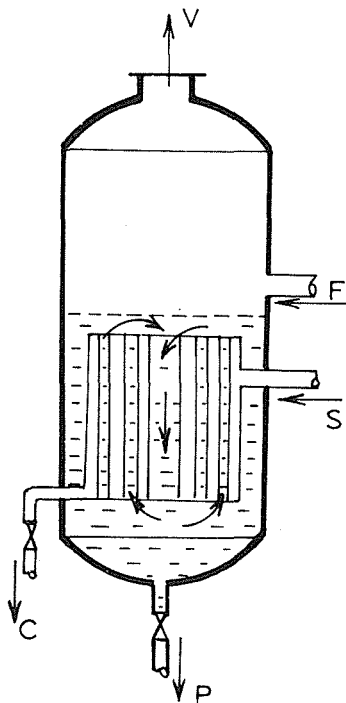
Οί σύγχρονοι έξατμιστήρες εΐναι, κατά κανόνα, συνεχοϋς λειτουργίας και άποτελοϋνται βασικῶς άπό τρία τμήματα, ήτοι τόν έναλλάκτην θερμότητος, τόν διαχωριστήρα άτμών ύγροϋ και τόν συμπυκνωτήρα. Επί πλέον, αί έγκαταστάσεις έξατμίσεως περιλαμβάνουν διαφόρους σωληνώσεις, άντλίας, σύστημα κενοϋ, σύστημα ψύξεως συμπυκνωτήρος και σύστημα έλέγχου λειτουργίας.

### 1. Έξατμιστήρες Βραχέων Σωλήνων

Οί έξατμιστήρες οϋτοι χρησιμοποιούνται διά τήν έξάτμισιν διαλυμάτων χαμηλοϋ ίξώδους, τά όποια δέν σχηματίζουν αί-

σθητάς αποθέσεις. Ὁ ἐναλλάκτης θερμότητος (θερμαντήρ) ἀποτελεῖται ἀπὸ σωλήνας διαμέτρου 5-10 cm καὶ μήκους 1-2 m καὶ τοποθετεῖται εἰς τὸ κάτω τμήμα τοῦ κυρίου σώματος τοῦ ἐξατμιστήρος (calandria) περιβαλλόμενος ἀπὸ τὸ ἐξατμιζόμενον ὑγρὸν. Εἰς τὸ κέλυφος τοῦ ἐναλλάκτου χρησιμοποιεῖται ἀτμὸς θερμάνσεως ὁ ὁποῖος συμπυκνούμενος ἀπομακρύνεται διὰ καταλλήλου ἀτμοπαγίδος (Σχ. 3-3).

Τὸ ὑγρὸν θερμαίνόμενον ἀνέρχεται διὰ τῶν σωλήνων μέ ταχύτητα περίπου 1 m/s καί, ἀφοῦ ἐξατμισθῇ μερικῶς, κατέρχεται διὰ τοῦ κεντρικοῦ σωλήνος πρὸς ἐπανάληψιν τῆς φυσικῆς κυκλοφορίας. Ὁ κεντρικὸς ἀγωγὸς καθόδου τοῦ ὑγροῦ ἔχει ἐγκαρσίαν ἐπιφάνειαν 25-40% τῆς συνολικῆς ἐγκαρσίας ἐπιφανεί-



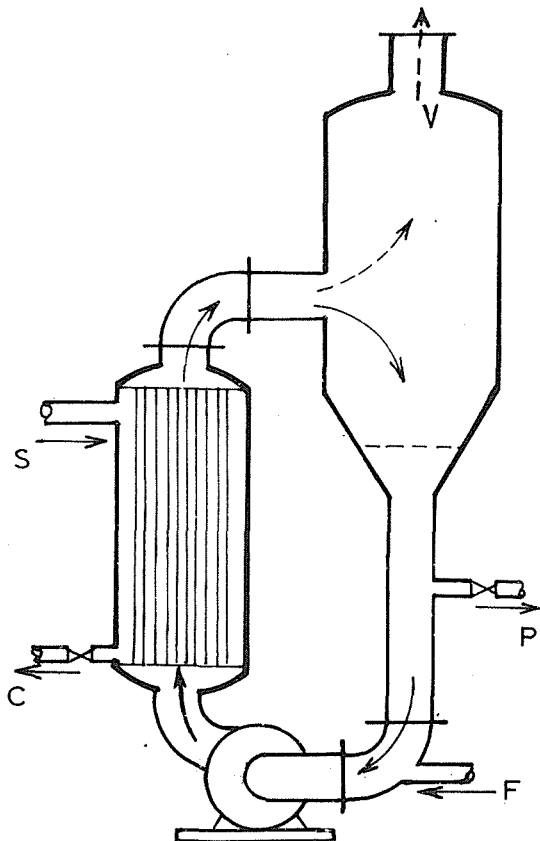
Σχ. 3-3 Ἐξατμιστὴρ βραχέων σωλήνων



ας τοῦ ἐναλλάκτου θερμότητος. Ἡ σχετικῶς μικρά ταχύτης ροῆς τοῦ ὑγροῦ ἐντός τῶν σωλήνων ἔχει ὡς ἀποτέλεσμα τὴν ἐπιτεῦξιν μᾶλλον χαμηλῶν συντελεστῶν μεταφορᾶς θερμότητος. Λόγω τοῦ μεγάλου χρόνου παραμονῆς οἱ ἐξατμιστῆρες οὗτοι δὲν ἐνδείκνυνται δι'εὐαίσητα εἰς τὴν θερμοκρασίαν προϊόντα.

## 2. Ἐξατμιστῆρες Ἐξηναγκασμένης Κυκλοφορίας

Εἰς τοὺς ἐξατμιστήρας ἐξηναγκασμένης ἢ βεβιασμένης κυκλοφορίας, (forced circulation evaporators) τὸ ὑγρὸν κυκλοφορεῖ μέ μεγάλην ταχύτητα διὰ τοῦ ἐναλλάκτου θερμότητος καὶ οὕτως ἐπιτυγχάνονται μεγάλοι συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητος. Ἡ κυκλοφορία διεξάγεται διὰ φυγοκέντρου ἀντλίας τοπο-



Σχ. 3-4. Ἐξατμιστῆρ ἐξηναγκασμένης κυκλοφορίας. (F) Τροφοδότησις, (P) προϊόν, (V) ἀτμοῦ, (S) ἀτμός θερμάνσεως, (C) συμπυκνώματα ἀτμοῦ

θειμένης εις τό κάτω τμήμα τοῦ διαχωριστήρος ἀτμῶν / ὑγροῦ (Σχ. 3-4).

Τό ὑγρόν διαβιβάζεται μέ ὕψηλὴν ταχύτητα (3-5 m/s) ἐκ τῶν κάτω πρὸς τὰ ἄνω ἐντὸς τῶν σωλήνων τοῦ ἐναλλάκτου, θερμαινόμενον ἐξωτερικῶς δι' ἀτμοῦ. Τό ὑγρόν ὑπερθερμαίνεται ἐντὸς τῶν σωλήνων, ἀλλὰ δέν ζέει ἐντὸς αὐτῶν, λόγω τῆς ὕψηλης ταχύτητος καί τῆς σημαντικῆς πτώσεως πιέσεως. Τό ὑπερθερμον ὑγρόν ἐκτονοῦται εἰς τὸν διαχωριστήρα ἀτμῶν/ὑγροῦ ὅπου καί ἐπέρχεται βρασμός αὐτοῦ ὑπὸ τὴν ἐπικρατοῦσαν εἰς τὸν ἐξατμιστήρα πίεσιν.

Διὰ τῆς ἐξηναγκασμένης κυκλοφορίας ἀποφεύγεται ὁ σχηματισμός ἀφροῦ καί ἀποθέσεων ἀπὸ συμπεπυκνωμένα διαλύματα (π.χ. καυστικόν νάτριον, χλωριοῦχον νάτριον, φωσφορικόν ὀξύ).

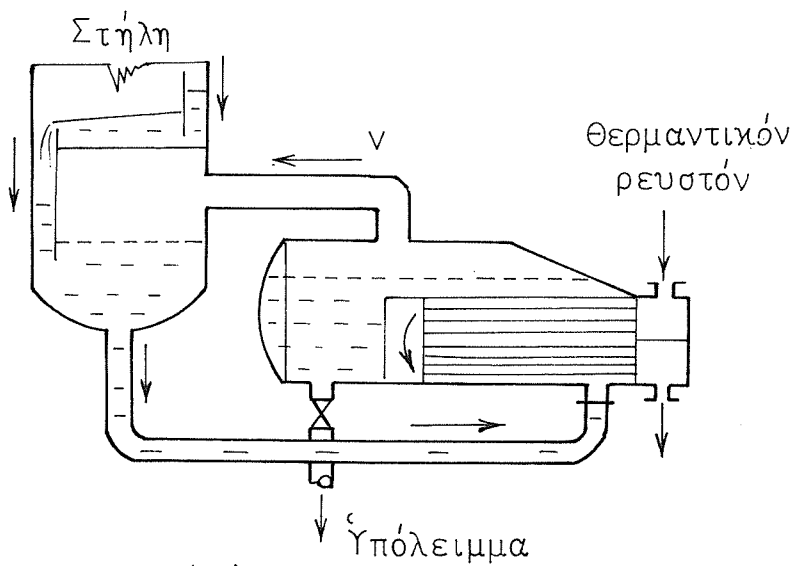
Ὁ χρόνος παραμονῆς εἰς τοὺς συμπυκνωτήρας τούτους εἶναι σχετικῶς μεγάλος καί ἐπομένως δέν ἐνδείκνυνται διὰ προϊόντα εὐαίσητα εἰς τὴν θερμοκρασίαν.

### 3. Ἀτμογόνα καί Ἀναβραστήρες

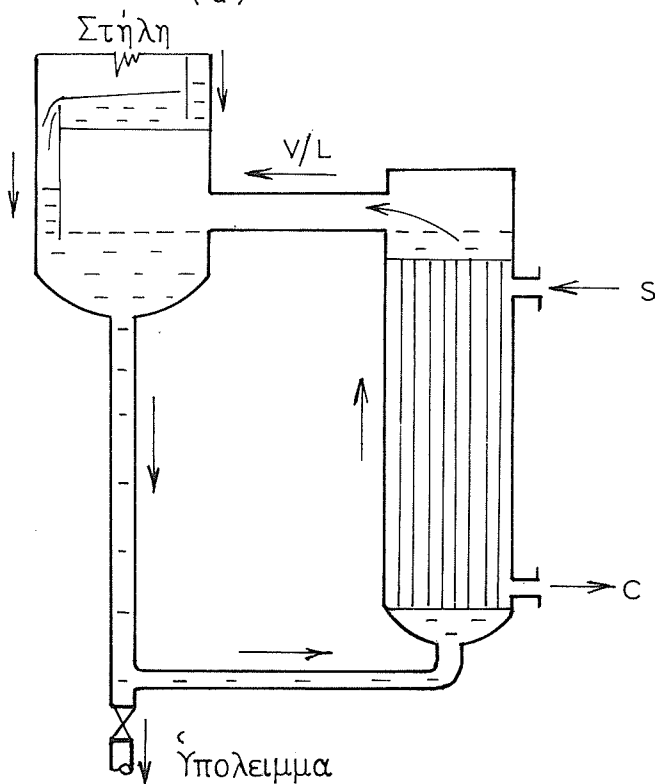
Τὰ ἀτμογόνα (vapourizers) εἶναι ἐξατμιστήρες χρησιμοποιούμενοι διὰ τὴν παραγωγὴν ἀτμῶν δι' ἐναλλαγῆς θερμότητος μέ ἀτμόν ἢ ρευστὰ ὕψηλης θερμοκρασίας. Εἰς τὰ ἀτμογόνα δέν περιλαμβάνονται οἱ ἀτμολέβητες, οἱ ὅποιοι θερμαίνονται δι' ἀμέσου ἐπαφῆς μέ φλόγας ἢ καυσαέρια. Οἱ ἀναβραστήρες (Reboilers) χρησιμοποιοῦνται εὐρύτατα εἰς τὴν ἀπόσταξιν καί τὴν ἀπορρόφησιν τῶν ἀερίων, θεωρούμενοι ὡς τμήματα τῆς ὅλης ἐγκαταστάσεως.

Τό Σχ. (3-5) δεικνύει δύο τύπους ἀναβραστήρων ἀποστακτικῆς στήλης, λειτουργούντων διὰ φυσικῆς κυκλοφορίας: α) Ἀτμογόνου τύπου λέβητος καί β) κατακορύφου ἀναβραστήρος τύπου θερμοσίφωνος (thermosyphon-type reboiler).

Εἰς τό ὀριζόντιον ἀτμογόνον ἢ ἐξάτμισις τοῦ ὑγροῦ λαμβάνει χώραν εἰς τό κέλυφος τοῦ ἐναλλάκτου, ἐνῶ εἰς τὸν κατακόρυφον θερμοσίφωνα ἢ ἐξάτμισις γίνεται ἐντὸς τῶν σωλήνων (καλυτέρα κυκλοφορία).



(α)

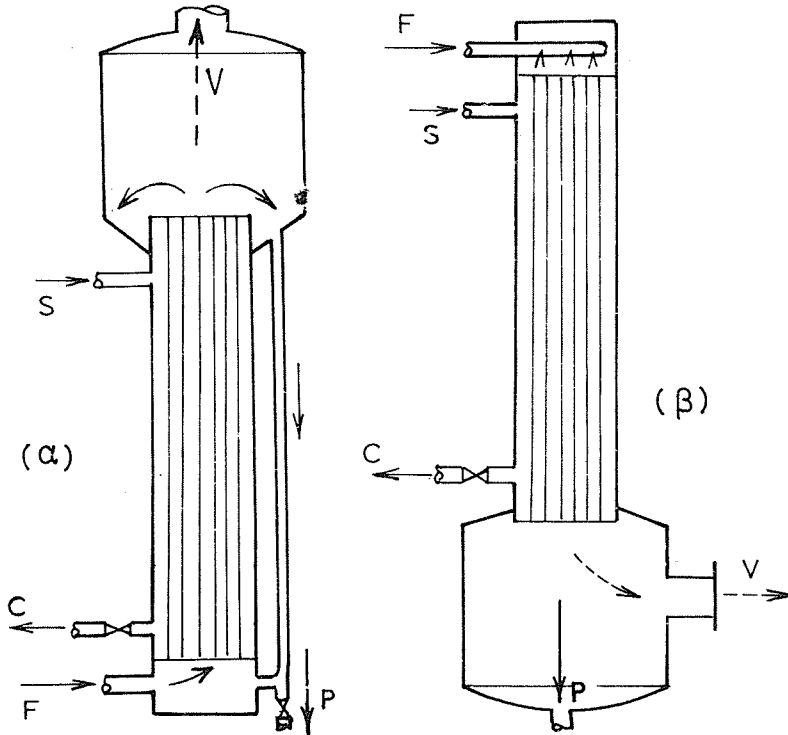


(β)

Σχ. 3-5. Ἀτμογόνα (α) τύπου λέβητος καὶ (β) τύπου θερμοσύ-  
φηνος

## 4. Ξεατμιστήρες Μακρών Σωλήνων

Οι ξεατμιστήρες μακρών σωλήνων (long tube vertical evaporators, LTV ή VTE) αποτελούνται από μακρούς κατακόρυφους σωλήνας, διαμέτρου 2,5-5,0 cm και μήκους 5-10 m, έντός των οποίων κυκλοφορεί το ξεατμιζόμενο υγρόν διά φυσικής κυκλοφορίας ή διά της βαρύτητας. Είς τήν πρᾶξιν εφαρμόζονται δύο τύποι ξεατμιστήρων, ἤτοι τοῦ ἀνερχομένου λεπτοῦ στρώματος (rising film) καί τοῦ πίπτοντος λεπτοῦ στρώματος (falling film), ὡς δεικνύεται εἰς τό Σχ. (3-6).



Σχ. 3-6. Ξεατμιστήρες μακρών σωλήνων. (α) Ἀνερχομένου στρώματος, (β) κατερχομένου στρώματος. (F) Τρόφοδοσις, (P) προϋόν, (V) ἀτμού, (S) ἀτμός θερμάνσεως, (C) συμπύκνωμα ἀτμοῦ.

Εἰς τοὺς ξεατμιστήρας μακρών σωλήνων ἐπιτυγχάνονται ὑψηλαί ταχύτητες ροῆς τῶν ἀτμῶν καί τοῦ ὑγροῦ (μέχρι 100m/s) καί συνεπῶς ὑψηλοί συντελεσταί μεταφορᾶς θερμότητος. Οἱ ξεατμιστήρες οὗτοι λειτουργοῦν κυρίως ὡς μονάδες ἀπλῆς διαβάσεως καί συνεπεῖα τοῦ μικροῦ χρόνου παραμονῆς, ἐνδείκνυν-

ται διά τήν συμπύκνωσιν εύαισθήτων είς τήν θερμότητα προϊόντων (π.χ. διαλυμάτων νιτρικού άμμωνίου, χυμών φρούτων). Ἡ λειτουργία αὐτῶν εἶναι οἰκονομική (ύψηλοί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητος) καί χρησιμοποιοῦνται είς τήν άφαλάτωσιν τοῦ ὕδατος.

Οἱ έξατμιστήρες πίπτοντος λεπτοῦ στρώματος άπαιτοῦν είδικούς ύπερχειλιστήρας τοῦ ὕγρου τροφοδοτήσεως είς τήν κορυφήν αὐτῶν πρός καλυτέραν κατανομήν τοῦ ὕγρου είς τό έσωτερικόν τῶν σωλήνων. Ἡ δημιουργία τοῦ άνερχομένου λεπτοῦ στρώματος ὕγρου γίνεται διά φυσικῆς κυκλοφορίας τοῦ μίγματος άτμῶν/ὕγρου ὡς δεικνύεται είς τό Σχ. (3-10). Διά συνδυασμοῦ τῶν δύο έξατμιστήρων τοῦ Σχ. (3-6) έν σειρᾷ προκύπτει ὁ έξατμιστήρ άνερχομένου/κατερχομένου στρώματος (RFC), ὁ ὁποῖος συνδυάζει τά πλεονεκτήματα άμφοτέρων τῶν τύπων.

#### 5. Ἐξατμιστήρες μετά Πλακῶν

Οἱ έξατμιστήρες μετά πλακῶν (plate evaporators) ὁμοιάζουν πρός τούς έναλλάκτας θερμότητος μετά πλακῶν (Σχ.2-12) καί έχουν τά αὐτά κύρια πλεονεκτήματα, ἤτοι μεγάλην έπιφάνειαν διά δοθέντα ὄγκον συσκευῆς, ύψηλούς συντελεστάς μεταφοράς θερμότητος καί εύκολίαν καθαρισμοῦ δι' άποσυνδέσεως.

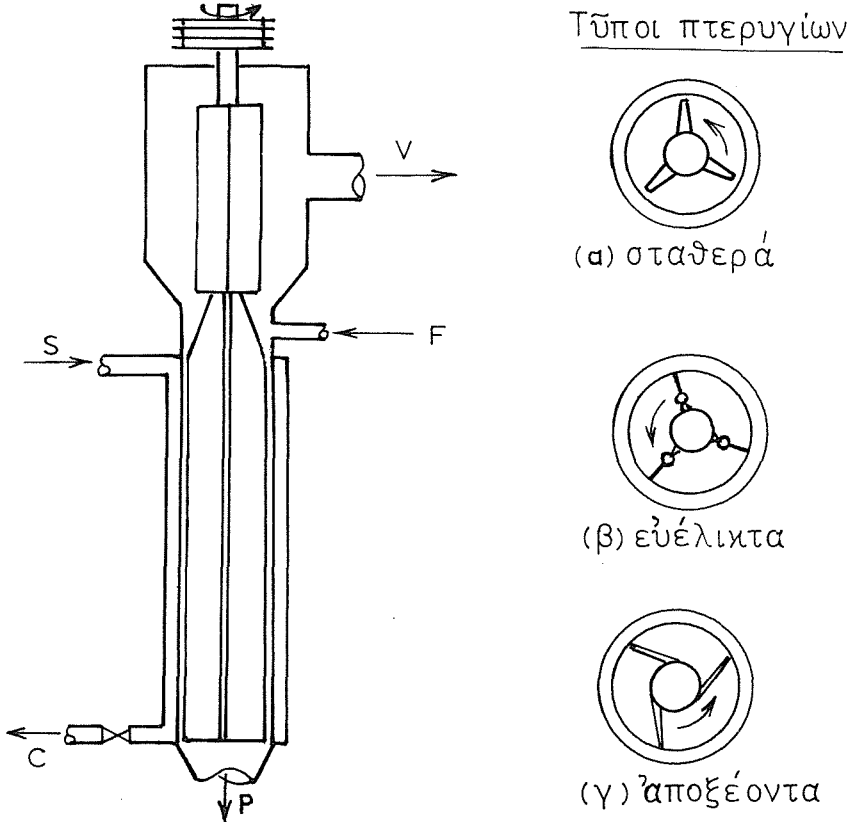
Οἱ έξατμιστήρες οὔτοι έχουν σχετικῶς μεγαλύτερα άνοίγματα μεταξύ τῶν πλακῶν πρός διευκόλυνσιν τῆς ροῆς τοῦ παραγομένου μίγματος άτμῶν/ὕγρου, τό ὁποῖον διαβιβάζεται άκολούθως είς κατάλληλον διαχωριστήρα. Λειτουργοῦν κυρίως ὡς έξατμιστήρες άπλῆς διαβάσεως καί ένδεικνυνται δι' εύαίσθητα είς τήν θερμοκρασίαν προϊόντα.

#### 6. Ἐξατμιστήρες Ἐναδευομένου Λεπτοῦ Στρώματος

Οἱ έξατμιστήρες άναδευομένου λεπτοῦ στρώματος (agitated film evaporators) χρησιμοποιοῦνται διά τήν συμπύκνωσιν διαλυμάτων καί αίωρημάτων, τά ὁποῖα δέν δύνανται νά έξατμισθοῦν εύχερῶς είς τούς συνήθεις έξατμιστήρας. Οἱ έξατμιστήρες οὔτοι ὁμοιάζουν βασικῶς πρός τούς έναλλάκτας θερμότητος μετά πτερυγίων άναδεύσεως.

Εἰς τό Σχ. (3-7) δεικνύεται διάγραμμα ἑξατμιστήρος ἀναδευομένου λεπτοῦ στρώματος τύπου Luwa.

Τό κύριον σῶμα τοῦ ἑξατμιστήρος ἀποτελεῖται ἀπό κατακόρυφον κύλινδρον περιβαλλόμενον ὑπό μανδύου ἀτμοῦ θερμάνσεως. Ἐντός τοῦ ἑξατμιστήρος εὐρίσκεται ἀναδευτήρ μετά πτερυγίων, ὁ ὁποῖος, περιστρεφόμενος μετά μεγάλης ταχύτητος, ἀναδεύει ἐντόνως στρώμα ὑγροῦ, κατερχομένου διά τῶν τοιχωμά-



Σχ. 3-7. Ἐξατμιστήρ ἀναδευομένου λεπτοῦ στρώματος

των. Τό κατερχόμενον στρώμα ὑγροῦ ἑξατμιζόμενον συμπυκνοῦται καί ἐξέρχεται τοῦ πυθμένος τοῦ ἑξατμιστήρος, ἐνῶ οἱ ἀτμοί διέρχονται διά διαχωριστήρος ἀτμῶν/ὑγροῦ καί διαβιβάζονται εἰς τόν συμπυκνωτήρα.

Ὁ ἀναδευτήρ προκαλεῖ ταχείαν ἀνάδευσιν τοῦ στρώματος τοῦ ὑγροῦ (πάχους 0,2-2 mm) καί αὐξάνει σημαντικῶς τόν συν-

τελεστήν μεταφορᾶς θερμότητας. Διά τῆς ἐντόνου ἀναδεύσεως ἀποφεύγεται ἡ δημιουργία ἀποθέσεων ἐπὶ τῆς θερμαινομένης ἐπιφανείας τοῦ ἔξατμιστήρος καὶ ἐπιτυγχάνεται οὕτως εὐχερῶς ἡ συμπύκνωσις ὑγρῶν ὑψηλοῦ ἰξώδους καὶ ὑψηλῆς περιεκτικότητος εἰς στερεᾶς οὐσίας, αἰωρήματα, κολλοειδῆ ἢ κρυστάλλους ἀλάτων.

Ἐναλόγως πρὸς τὸ εἶδος τοῦ ἔξατμιζομένου προϊόντος χρησιμοποιεῖται ὁ κατάλληλος τύπος ἀναδευτήρος, οἱ ὁποῖοι δεικνύονται εἰς τὸ Σχ. (3-7). Τὰ σταθερά πτερύγια (fixed blades) ἔχουν ἄνοιγμα πτερυγίων-τοιχώματος 0,8-3 mm καὶ κινούνται μέ μεγάλην περιφερειακὴν ταχύτητα (10 m/s). Χρησιμοποιοῦνται διὰ ρευστὰ μέ ἰξῶδες μέχρι 1000 P, ὡς οἱ χυμοὶ φρούτων, ἡ ζελατίνη κλπ.

Τὰ εὐέλικτα πτερύγια (swinging blades) κινούνται μέ παρομοίας ὑψηλᾶς ταχύτητας καὶ ἀπομακρύνουν ταχέως τὰς σχηματιζομένας ἀποθέσεις (παχύρρευστα ὑγρά, κρυσταλλούμενα ἢ ξηραίνόμενα ἐντὸς τοῦ ἔξατμιστήρος). Τὰ ἀποξέοντα πτερύγια (wiper blades) κινούνται μέ μικροτέραν ταχύτητα (3 m/s) καὶ πιέζουν ἐλαφρῶς τὴν ἐπιφάνειαν ἔξατμίσεως. Χρησιμοποιοῦνται εἰς περιπτώσεις παρομοίας μέ τὰς ἐφαρμογὰς τοῦ συστήματος εὐελίκτων πτερυγίων.

Ἐνάλογος πρὸς τὸν περιγραφέντα ἔξατμιστήρα εἶναι καὶ ὁ ὀριζόντιος ἔξατμιστὴρ ἀναδευομένου λεπτοῦ στρώματος, π.χ. τύπου Artisan. Εἰς τὸν τύπον τοῦτον ὁ κυρίως ἔξατμιστὴρ ἀποτελεῖται ἀπὸ ὀριζόντιον κύλινδρον μετὰ τοιχωμάτων ἐλαφρᾶς κλίσεως καὶ κατάλληλον ἀναδευτήρα, πρὸς σχηματισμὸν καὶ μετακίνησιν τοῦ λεπτοῦ στρώματος τοῦ ὑγροῦ.

Οἱ ἔξατμιστήρες ἀναδευομένου λεπτοῦ στρώματος παρέχουν μικροὺς χρόνους παραμονῆς καὶ χρησιμοποιοῦνται διὰ τὴν συμπύκνωσιν εὐαισθητῶν εἰς τὴν θερμοκρασίαν προϊόντων, ὡς ζελατίνης, χυμῶν φρούτων κλπ. Εἰς τὰς ἐγκαταστάσεις ταύτας διὰ ρυθμίσεως τῶν συνθηκῶν λειτουργίας, εἶναι δυνατὴ ἡ τελεία ἔξάτμισις πρὸς ξηρόν προϊόν (βλέπε Κεφ. 5.ιβ5).

Οἱ ἔξατμιστήρες ἀναδευομένου λεπτοῦ στρώματος εἶναι δαπανηρότεροι τῶν ἄλλων τύπων ἔξατμιστήρων καὶ εἶναι μικρᾶς σχετικῶς ἰκανότητος ἔξατμίσεως, λόγῳ τῆς σχετικῶς μικρᾶς ἐ-

πιφανείας του κυλινδρικού έξατμιστήρος.

### 7. Φυγοκεντρικοί Έξατμιστήρες

Οι φυγοκεντρικοί έξατμιστήρες, π.χ. τύπου Centritherm της Alfa Laval, αποτελούνται από θερμοινομένην κωνικήν έπιφάνειαν, ταχέως περιστρεφομένην, επί της οποίας διαβιβάζεται τό έξατμιζόμενον υγρόν. Η θέρμανσις του έσωτερικού του περιστρεφομένου κώνου γίνεται δι' άτμοϋ, ό όποϊος εισέρχεται διά καταλλήλου συνδέσεως τό δέ συμπύκνωμα άπομακρύνεται δι' άναλόγου διατάξεως.

Είς τούς φυγοκεντρικούς έξατμιστήρας έπιτυγχάνονται λίαν ύψηλοί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητος καί μικροί χρόνοι παραμονής του υγροϋ, καί οϋτοι ένδεικνυνται διά λίαν εϋαίσθητα καί σχετικώς δαπανηρά προϊόντα. Οι έξατμιστήρες οϋτοι έχουν σχετικώς μικράν ικανότητα έξατμίσεως (μικρά θερμική έπιφάνεια) καί θεωροϋνται δαπανηροί.

### 8. Χρόνος Παραμονής είς Έξατμιστήρας

Ό χρόνος παραμονής (residence time) του υγροϋ είς τούς έξατμιστήρας θεωρείται ως έν έν τών σημαντικωτέρων χαρακτηριστικών της λειτουργίας αύτών. Είς τάς πλείστας βιομηχανικές έφαρμογάς έπιζητείται μικρός χρόνος παραμονής είς τόν έξατμιστήρα πρός άποφυγήν άνεπιθυμητών φυσικών καί χημικών μεταβολών καί άλλοιώσεων του προϊόντος. Ό έξατμιστήρ δύναται νά θεωρηθῆ ως άντιδραστήρ συνεχούς λειτουργίας έντός του όποϊου τό προϊόν υποβάλλεται είς θέρμανσιν επί ώρισμένον χρονικόν διάστημα. Αί διάφοροι άλλοιώσεις του προϊόντος θεωροϋνται συναρτήσεις τών δύο βασικών παραγόντων χρόνου - θερμοκρασίας.

Η ροή είς τόν έξατμιστήρα-άντιδραστήρα δύναται νά είναι έμβολική (plug flow), καλώς άναμεμιγμένη (well mixed flow) ή ένδιαμέσου τύπου. λεπτομερής άνάλυσις του θέματος γίνεται είς τήν Τεχνικήν τών Χημικών Διεργασιών.

Διά τήν άπλοποιημένην περίπτωση τής έμβολικής ροής, ό χρόνος παραμονής είς τόν έξατμιστήρα (τ) δίδεται άπό τήν έ-



σωσιν:

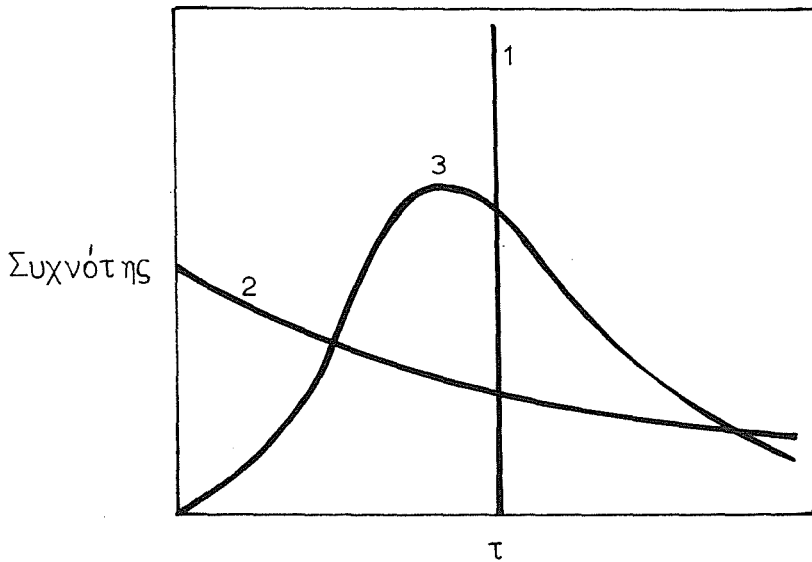
$$\tau = V\rho / \dot{m} \quad (3-4)$$

όπου  $V$  = όγκος συγκρατούμενου ύγρου,  $m^3$

$\rho$  = μέση πυκνότητα ύγρου είς τόν έξατμιστήρα,  $kg/m^3$

$\dot{m}$  = μέσος ρυθμός ροής τοϋ ύγρου είς τόν έξατμιστήρα,  $kg/s$

Είς τό Σχ. (3-8) δεικνύονται διαγραμματικώς αι κατανομαί τών χρόνων παραμονής είς έξατμιστήρας διαφόρων τύπων ροής.

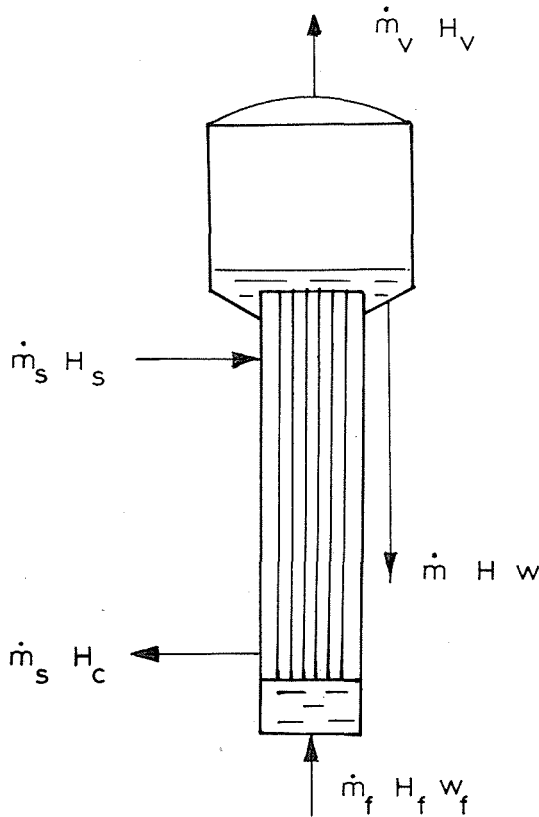


Σχ. 3-8. Χρόνος παραμονής είς έξατμιστήρας. (1) Έμβολική ροή, (2) πλήρως άναμεμιγμένη ροή, (3) ένδιάμεσος ροή

Είς πολλές περιπτώσεις (π.χ. έξατμιστήρες λεπτοϋ στρώματος) ό συγκρατούμενος όγκος τοϋ ύγρου είναι μικρός, και δέν είναι εύχερης ή μέτρησις αύτοϋ. Διά τοϋτο ό χρόνος παραμονής προσδιορίζεται πειραματικώς δι' ίχνηθετήσεως. Ός ίχνηθεται χρησιμοποιούνται ούσίαι αι όποίαι δέν μεταβάλλονται διερχόμεναι τοϋ έξατμιστήρος και δύνανται νά άνιχνευθοϋν εύκόλως είς μικράς συγκεντρώσεις, π.χ. χρωστικά ούσίαι, διαλύματα αλάτων και ραδιενεργά ίσότοπα.

## γ) Ίσοζύγια Μάζης και Ένθαλπιας

Ἡ ἀνάλυσις τῆς λειτουργίας ἑνός ἐξατμιστήρος βασίζεται εἰς τὰ ἰσοζύγια μάζης καὶ ἐνθαλπίας διὰ τῶν ὁποίων συνδέονται αἱ ποσότητες τοῦ ἐξατμιζομένου ὕδατος καὶ τῆς μεταφερομένης θερμότητος. Τό Σχ. (3-9) παριστᾷ τὰς διαφόρους ποσότητας μάζης καὶ ἐνθαλπίας εἰς ἐξατμιστήρα μακρῶν σωλῆνων μιᾶς βαθμίδος.



Σχ. 3-9. Ίσοζύγια μάζης καὶ ἐνθαλπίας εἰς ἐξατμιστήρα

Ὁ θεωρούμενος ἐξατμιστήρ εἶναι συνεχoῦς λειτουργίας καὶ τροφοδοτεῖται μέ ρυθμούς ροῆς  $\dot{m}_f$  ὑγροῦ καὶ  $\dot{m}_s$  ἀτμοῦ. Ὁ ρυθμός συμπεπυκνωμένου προϊόντος εἶναι  $\dot{m}$ , τοῦ δέ ἐξατμιζομένου ὕδατος  $\dot{m}_v$  (ὄλαι αἱ ποσότητες εἰς kg/s). Ἐάν ἡ συγκέντρωσις τοῦ διαλύματος τροφοδοτήσεως εἶναι  $w_f$  καὶ τοῦ συμπεπυκνωμέ-

νου προϊόντος  $w$  (είς kg στερεοῦ/kg διαλύματος), ἰσοζύγιον μάζης εἰς τὸν ἔξατμιστήρα δίδει:

$$\dot{m}_f w_f = \dot{m} w \quad (3-5)$$

Ἡ ἐξίσωσις (3-5) ἰσχύει ἐάν δέν ἐπέρχεται συσσώρευσις στερεῶν ἐντὸς τοῦ ἔξατμιστήρος (π.χ. διὰ κρυσταλλώσεως), ἐάν δέν λαμβάνει χώραν παράσυρις στερεῶν ὑπὸ τῶν ἀτμῶν καὶ ἐάν τὸ σύστημα λειτουργεῖ συνεχῶς. Ἐκ τῆς ἐξίσωσως ταύτης εἶναι δυνατὸς ὁ ὑπολογισμὸς τῶν  $\dot{m}$  ἢ  $w$  ἀπὸ τὰ δεδομένα  $\dot{m}_f, w_f$  καὶ  $w$  ἢ  $\dot{m}$ . Ἡ ἔξατμιζομένη ποσότης ὕδατος ὑπολογίζεται ὡς ἡ διαφορά:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_f - \dot{m} \quad (3-6)$$

Ὁ ρυθμὸς μεταφορᾶς θερμότητος ( $\dot{q}_s$ ) τῆς παρεχομένης ὑπὸ τοῦ ἀτμοῦ θερμάνσεως δίδεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωσιν:

$$\dot{q}_s = \dot{m}_s (H_s - H_c) \quad (3-7)$$

ὅπου  $H_s$  = ἐνθαλπία ἀτμοῦ, kJ/kg

$H_c$  = ἐνθαλπία συμπυκνώματος ἀτμοῦ

Ἐάν τὸ συμπύκνωμα ἀτμοῦ ἐξέρχεται τοῦ ἔξατμιστήρος ὡς κεκορεσμένον ὑγρὸν (ἦτοι εἰς τὴν θερμοκρασίαν συμπυκνώσεως), ἰσχύει ἡ σχέσις  $H_s - H_c = \Delta H_s$  ὅπου  $\Delta H_s$  =θερμότης ἔξατμίσεως τοῦ ἀτμοῦ εἰς τὴν θερμοκρασίαν λειτουργίας τοῦ ἐναλλάκτου, kJ/kg.

Ἐπὶ τὰς συνθήκας ταύτας λαμβάνεται:

$$\dot{q}_s = \dot{m}_s \Delta H_s \quad (3-8)$$

Ἴσοζύγιον ἐνθαλπίας τῆς πλευρᾶς τοῦ ἔξατμιζομένου ὑγροῦ δίδει:

$$\dot{q} = (\dot{m}_f - \dot{m}) H_v - \dot{m}_f H_f + \dot{m} H \quad (3-9)$$

ὅπου  $H_f$  = ἐνθαλπία τροφοδοτήσεως

$H_v$  = ἐνθαλπία ἀτμῶν

$H$  = ἐνθαλπία συμπεπυκνωμένου ὑγροῦ.

$\dot{q}$  = ρυθμὸς μεταφορᾶς θερμότητος

Όλικόν ίσοζύγιον ένθαλπίας είς τόν έξατμιστήρα δίδει:

$$\dot{q}_s = \dot{q} + \dot{q}' \quad (3-10)$$

όπου  $\dot{q}'$  = άπώλεια θερμότητας, kJ/s

Είς τούς συνήθεις έξατμιστήρας αι άπώλειαι θερμότητας είναι σχετικώς μικραί καί είς μερικές περιπτώσεις δύνανται νά άμεληθοϋν. Αι άπώλειαι όφείλονται είς μετάδοσιν θερμότητος δι' άκτινοβολίας καί φυσικής κυκλοφορίας πρός τό περιβάλλον. Κατά προσέγγισιν δύναται νά ληφθῆ  $\dot{q}' = 0,03 \dot{q}$ .

Έάν ἡ τροφοδότησις είσαχθεῖ είς τόν έξατμιστήρα είς τό σημείον βρασμοϋ τοϋ διαλύματος, ἡ μεταφερομένη θερμότης θά είναι:

$$\dot{q} = \dot{m}_v \Delta H_v \quad (3-11)$$

όπου:  $\Delta H_v$  = θερμότης έξατμίσεως

#### δ) Μεταφορά Θερμότητος είς Έξατμιστήρας

Ό σχεδιασμός καί ἡ λειτουργία τών έξατμιστήρων άποβλέπει βασικώς είς τήν ταχείαν μεταφοράν θερμότητος οϋτως ὥστε νά έξατμισθῆ ταχέως δοθείσα ποσότης διαλύτου (ϋδατος). Έπειδή ἡ θερμότης έξατμίσεως τοϋ ϋδατος είναι ὑψηλή (π.χ. 2255 kJ/kg ἢ 540 kcal/kg είς 100 °C) καθίσταται προφανές ὅτι είς τάς βιομηχανικές έγκαταστάσεις έξατμίσεως άπαιτεῖται ἡ μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων θερμότητος. Ὡς θερμαντικόν μέσον χρησιμοποιεῖται κυρίως άτμός χαμηλῆς πιέσεως άπό άτμολέβητας, άτμογόνα ἢ άτμοστροβίλους παραγωγῆς ἠλεκτρικῆς ένεργείας.

Ἡ μεταφορά θερμότητος γίνεται κατά κανόνα διά μεταλλικῆς έπιφανείας καί μόνον είς ὠρισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιεῖται άμεσος θέρμανσις τοϋ ὑγροϋ διά "ζωντανοϋ" άτμοϋ. Ἡ βασική έξίσωσις σχεδιασμοϋ τών έξατμιστήρων είναι ἡ αϋτή μέ τήν έξίσωσιν ὑπολογισμοϋ τών έναλλακτῶν θερμότητος, ἦτοι:

$$\dot{q}/A = U \Delta T \quad (3-12)$$

Ὡς ἀναπτύσσεται εἰς τὰ προηγούμενα κεφάλαια, ὁ συνολικός συντελεστής μεταφοῶς θερμότητος ( $U$ ) ἐξαρτᾶται κυρίως ἀπὸ τὸν συντελεστήν μεταφοῶς θερμότητος τῆς πλευρᾶς τοῦ ὑγροῦ ( $h$ ). Ὁ συντελεστής οὗτος ἐξαρτᾶται ἀπὸ διαφόρους παράγοντας ἐκ τῶν ὁποίων οἱ κυριώτεροι εἶναι τὸ ἕξωδες καὶ ἡ ταχύτης ροῆς τοῦ ὑγροῦ. Ἡ ἐπιφάνεια ἐναλλαγῆς θερμότητος ( $A$ ) ὑπολογίζεται μέ βάσιν τὴν πλευράν τοῦ τοιχώματος τοῦ ἐξατμιστήρος.

Εἰς τοὺς ἐξατμιστήρες ἡ ( $\Delta T$ ) ὀρίζεται γενικῶς ὡς:

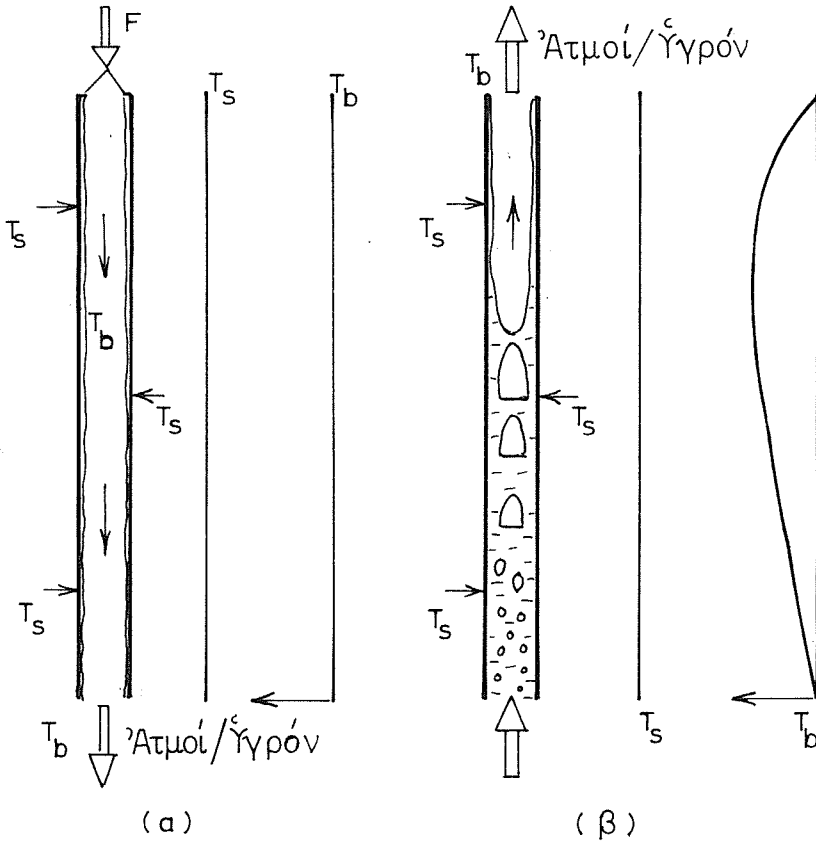
$$\Delta T = T_s - T_b \quad (3-13)$$

ὅπου  $T_s$  = θερμοκρασία κεκορεσμένου ἀτμοῦ.

$T_b$  = θερμοκρασία ζέσεως τοῦ ὑγροῦ.

Ἡ θερμοκρασία ζέσεως τοῦ ὑγροῦ περιλαμβάνει τὴν τυχόν ὑπάρχουσα  $ASZ$  καὶ λαμβάνεται εἰς τὸν διαχωριστήρα ἀτμῶν / ὑγροῦ τοῦ ἐξατμιστήρος. Ὡς δεικνύεται εἰς τὸ Σχ. (3-10), ἡ θερμοκρασία ζέσεως ( $T_b$ ) παραμένει σταθερά εἰς τοὺς ἐξατμιστήρας πίπτοντος λεπτοῦ στρώματος, ἀλλὰ μεταβάλλεται σημαντικῶς κατὰ μῆκος τῶν σωλῆνων ἀνερχομένου μίγματος ἀτμῶν / ὑγροῦ.

Κατὰ τὴν ἐξάτμισιν ἐντὸς μακρῶν κατακορύφων σωλῆνων διὰ φυσικῆς κυκλοφορίας (Σχ. 3-10β) παρατηροῦνται τρεῖς περιοχαί: 1) Εἰς τὸ κάτω τμήμα τὸ ὑγρὸν πληρεῖ ὅλον τὸν σωλῆνα καὶ σχηματίζονται φουσαλλίδες ἐντὸς αὐτοῦ. 2) Εἰς τὸ ἐνδιάμεσον τμήμα σχηματίζονται βλήματα (slugs), ἥτοι μεγάλαι φουσαλλίδες ἀτμῶν καταλαμβάνουσαι σχεδόν ὅλην τὴν ἐγκαρσίαν διατομὴν τοῦ σωλῆνος καὶ 3) Εἰς τὸ ἄνω τμήμα, συνεπεῖα τῆς ὑψηλῆς ταχύτητος, οἱ ἀτμοὶ διαχωρίζονται τελείως τοῦ ὑγροῦ, τὸ ὁποῖον ἀνέρχεται ὡς λεπτόν στρώμα ἐπὶ τῶν τοιχωμάτων τοῦ σωλῆνος. Συνεπεῖα τῆς στατικῆς πιέσεως καὶ τῶν τριβῶν, ἡ θερμοκρασία τοῦ ὑγροῦ αὐξάνει ἐκ τοῦ πυθμένος πρὸς τὴν κορυφὴν τοῦ σωλῆνος, διερχομένη δι' ἑνὸς ἐνδιαμέσου μεγίστου. Ἡ θερμοκρασία τοῦ ἐξερχομένου τοῦ σωλῆνος μίγματος ἀτμῶν / ὑγροῦ ἀντιστοιχεῖ εἰς τὸ σημεῖον ζέσεως τοῦ ὑγροῦ ( $T_b$ ) ὑπὸ τὴν πίεσιν τοῦ ἐξατμιστήρος.



Σχ. 3-10. Κατανομή θερμοκρασιών εις έξατμιστήρας μακρών σωλήνων, (α) κατερχομένου στρώματος καί (β) άνερχομένου στρώματος

Ο αναλυτικός υπολογισμός τών μερικῶν συντελεστῶν μεταφοράς θερμότητος τοῦ ὑγροῦ ( $h$ ) εἶναι δυσχερής διότι τό σύστημα ροῆς ἀτμῶν/ὑγροῦ εἶναι πολύπλοκον καί δέν δύνανται νά ἐφαρμοσθοῦν αἱ ἐμπειρικά ἐξισώσεις τοῦ κεφαλαίου 1. Εἰς τόν σχεδιασμόν τῶν έξατμιστήρων χρησιμοποιοῦνται ἐμπειρικά τιμαί τοῦ συνολικοῦ συντελεστοῦ μεταφοράς θερμότητος ( $U$ ), ὑπολογισμέναι ἀπό λειτουργούσας παρομοίας βιομηχανικάς ἐγκαταστάσεις. Τυπικά τιμαί τοῦ συντελεστοῦ ( $U$ ) δίδονται εἰς τόν Πίνακα 3-1.

Ο συντελεστής ( $U$ ) αὐξάνει σημαντικῶς μετά τῆς θερμοκρασίας έξατμίσεως καί μετά τῆς διαφορᾶς θερμοκρασίας ἀτμοῦ -

## Π Ι Ν Α Ε 3-1

Συνολικοί Συντελεσταί Μεταφοράς Θερμότητας  
Βιομηχανικών Έξατμιστήρων

| Τύπος Έξατμιστήρος                    | U, W/m <sup>2</sup> K |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Βραχέων σωλήνων (calandria)           | 750 - 2.500           |
| Έξηναγκασμένης κυκλοφορίας            | 2.000 - 10.000        |
| Πίπτοντος στρώματος, μακρών σωλήνων   | 2.000 - 6.000         |
| Ανερχομένου στρώματος, μακρών σωλήνων | 1.000 - 3.000         |
| Αναδευομένου στρώματος, 1 cP          | 5.000                 |
| Αναδευομένου στρώματος, 100 cP        | 2.000                 |
| Αναδευομένου στρώματος, 10.000 cP     | 800                   |

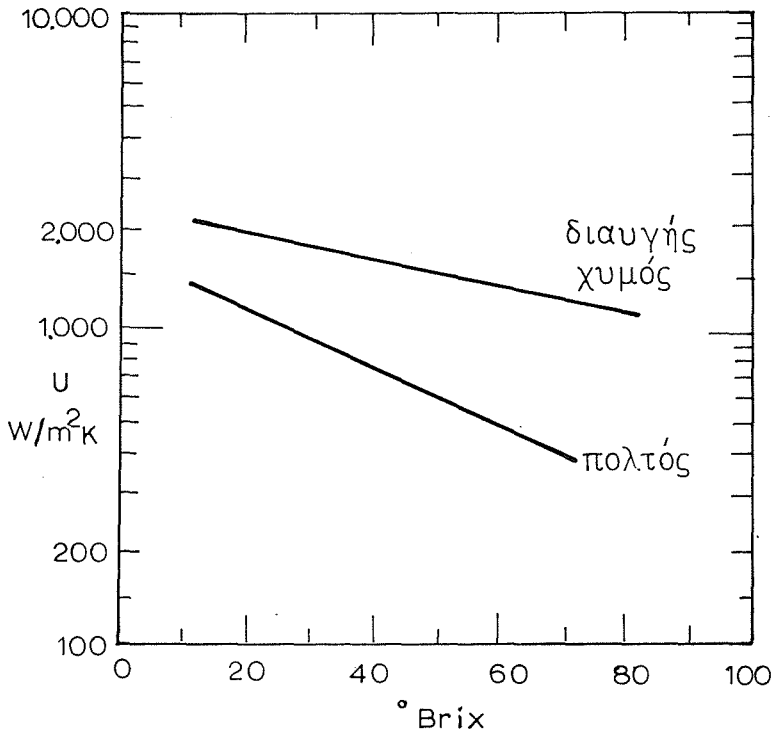
ζέοντος υγρού ( $\Delta T$ ). Αύξανομένης τής συγκεντρώσεως του διαλύματος ελαττούται σημαντικῶς ὁ συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (U). Σακχαροῦχα διαλύματα συμπυκνούμενα καθίστανται λίαν ιξώδη με ἀποτέλεσμα τήν σημαντικήν ἐλάττωσιν τοῦ συντελεστοῦ (U), ὡς δεικνύεται εἰς τό Σχ. (3-11). Οἱ διαυγεῖς χυμοί φρούτων συμπεριφέρονται ὡς τά σακχαροῦχα διαλύματα. Οἱ πολλοί περιέχουν διάφορα αἰωρούμενα καί κολλοειδή στερεά, τά ὁποῖα ἐλαττώνουν σημαντικῶς τόν συντελεστήν (U), ἰδιαιτέρως εἰς τās ὑψηλάς συγκεντρώσεις.

## ε) Ἀνασυμπίσεις Ἀτμῶν

Ἡ θερμική ἀπόδοσις ἐνός συστήματος ἐξατμίσεως ἐκφράζεται διά τής οἰκονομίας ἀτμοῦ (steam economy, E), ὀριζομένης διά τής σχέσεως:

$$E = \frac{\text{kg ἔξατμιζομένου ὕδατος}}{\text{kg καταναλισκομένου ἀτμοῦ}} \quad (3-14)$$

Εἰς τούς συνήθεις ἐξατμιστήρας μιᾶς βαθμίδος ἡ οἰκονομία ἀτμοῦ εἶναι μικροτέρα τής μονάδος διά δύο λόγους: 1) Τῶν θερμικῶν ἀπωλειῶν πρὸς τό περιβάλλον καί 2) Τῆς μεγαλυτέρας θερμότητος ἐξατμίσεως εἰς τās χαμηλάς θερμοκρασίας, συμφώνως πρὸς τήν Ἐφαρμοσμένην θερμοδυναμικήν. Οὕτως 1 kg ἀτμοῦ συμπυκνούμενον εἰς θερμοκρασίαν  $T_s$  ἀποδίδει μικροτέραν



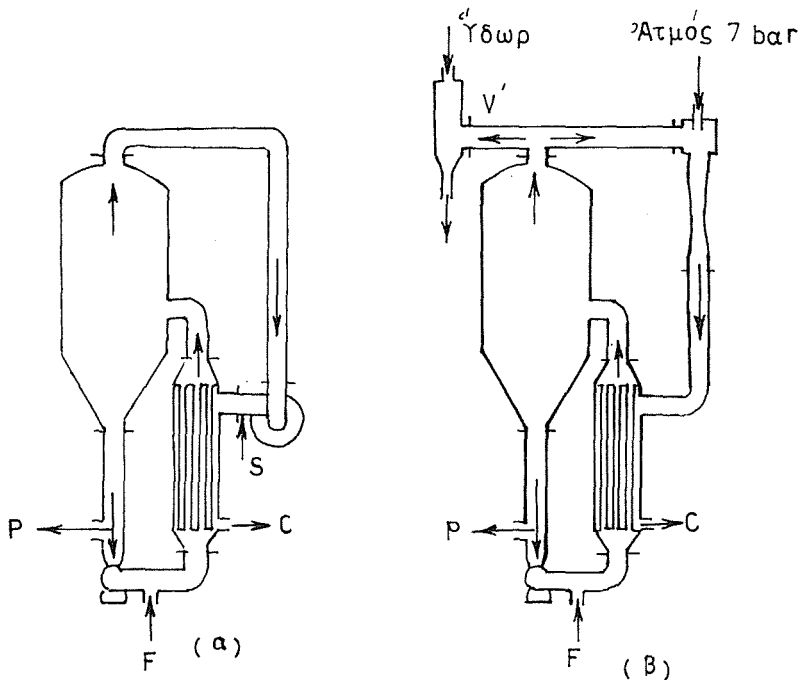
Σχ. 3-11. Συνολικοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας εις έξατμιστήρας πύπτοντος στρώματος ( $^{\circ}\text{Brix} = \% \text{ κατά βάρος διαλυμένα στερεά}$ )

θερμότητα από την απαιτούμενη διά την εξάτμισιν 1 kg ύδατος εις θερμοκρασίαν  $T_b$ , όπου  $T_s > T_b$ .

Ἡ οἰκονομία ἀτμοῦ δύναται νά ἀύξηθῆ εἰς τοὺς ἐξατμιστήρας κατὰ δύο κυρίους τρόπους: 1) Δι'ἀνασυμπιέσεως τῶν ἀτμῶν (vapor recompression) καί 2) Διά τῶν ἐξατμιστῆρων πολλαπλῶν βαθμίδων. Ἡ ἀνασυμπιέσις τῶν ἀτμῶν γίνεται εἴτε διὰ μηχανικοῦ συμπιεστοῦ ἢ δι'ἀτμοῦ ὑψηλῆς πίεσεως (θερμικὴ ἀνασυμπιέσις). Τό Σχ. (3-12) δεικνύει διαγραμματικῶς τὰ δύο συστήματα ἀνασυμπιέσεως ἀτμῶν.

Ὁ μηχανικὸς συμπιεστής συμπιέζει τοὺς ἀτμούς τοὺς ἐξερχομένους ἐκ τοῦ διαχωριστήρος ἀτμῶν/ὕγρου εἰς ἐπαρκῶς ὑψηλὴν πίεσιν καί θερμοκρασίαν ὥστε οἱ νά δύνανται νά χρησιμοποιηθοῦν ὡς ἀτμοί θερμάνσεως τοῦ ἐξατμιστήρος. Πρὸς κά-





Σχ. 3-12. Έξατμιστήρες άνασυμπιέσεως άτμών. (α) Μηχανική, (β) θερμική άνασυμπίεσις

λυψιν τών άπωλειών άτμού άπαιτεΐται ή είσαγωγή είς τό κύκλωμα μικράς ποσότητος έξωτερικού άτμού.

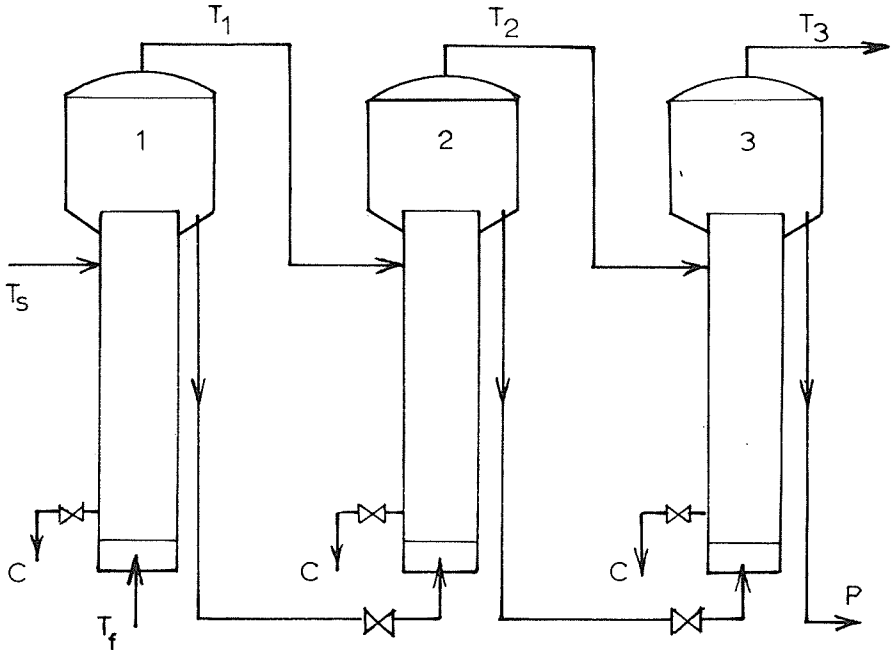
Ή θερμική άνασυμπίεσις έπιτυγχάνεται δι' άκροφυσίου άτμού τό όποϊον συμπιέζει τούς άτμούς. Ό άτμός συμπιέσεως πρέπει νά έχη ύψηλήν σχετικώς πίεσιν (άνω τών 7 bar). Διά τήν κανονικήν λειτουργίαν του κύκλωματος καθίσταται άναγκαΐα ή άπομάκρυνσις μέρους τών άτμών (V') διά συμπυκνώσεως. Ή θερμική άνασυμπίεσις ένδεικνυται όταν τό κόστος τής ένεργείας (διά μηχανικήν άνασυμπίεσιν) είναι ύψηλόν καί ύπάρχει διαθέσιμος άτμός ύψηλης σχετικώς πιέσεως.

στ) Έξατμιστήρες Πολλαπλών Βαθμίδων

Οί έξατμιστήρες πολλαπλών βαθμίδων (multiple effect e-

vapourators) χρησιμοποιούνται εύρυστα εἰς τὰς βιομηχανίας λόγω τῆς ἐπιτυχανομένης μεγάλης οἰκονομίας ἀτμοῦ. Ὁ ἀριθμὸς τῶν χρησιμοποιουμένων βαθμίδων κυμαίνεται συνήθως μεταξὺ 2-12.

Τὸ Σχ. (3-13) παριστᾷ σύστημα ἑξατμιστήρος τριῶν βαθμίδων λειτουργοῦντος καθ' ὁμορροήν (παράλληλον ροήν) ἀτμοῦ/ὕγρου. Εἰς ὠρισμένες περιπτώσεις ἐνδείκνυται ἡ χρῆσις συστήματος ἀντιρροῆς ἢ ἐγκαρσίας ροῆς ἀτμοῦ/ὕγρου.



Σχ. 3-13. Ἐξατμιστὴρ (3) βαθμίδων

Ἡ βαθμὶς (1) τροφοδοτεῖται δι' ἀραιοῦ διαλύματος θερμοκρασίας  $T_f$  καὶ κεκορεσμένου ἀτμοῦ θερμοκρασίας  $T_s$ . Οἱ ἀτμοὶ οἱ παραγόμενοι εἰς τὴν βαθμίδα (1), θερμοκρασίας  $T_1$ , χρησιμεύουν διὰ τὴν θέρμανσιν τῆς βαθμίδος (2). Οἱ ἀτμοὶ τῆς βαθμίδος (2) θερμοκρασίας  $T_2$ , θερμαίνουν τὴν βαθμίδα (3). Τέλος, οἱ ἀτμοὶ τῆς βαθμίδος (3) διαβιβάζονται εἰς τὸ σύστημα συμπυκνώσεως/κενοῦ. Οἱ ἀτμοὶ θερμάνσεως ἐκάστης βαθμίδος συμπυκνοῦνται εἰς τὸ κέλυφος τοῦ ἐναλλάκτου θερμότητος καὶ τὸ συμπύκνωμα ἀπομακρύνεται διὰ καταλλήλου βαλβίδος. Ἐάν τὸ συμπυκνούμενον διάλυμα παρουσιάζει ἀμελητέαν ΑΣΖ, αἱ θερ-

μοκρασίαι  $T_1, T_2, T_3$  αντιστοιχοῦν εἰς τὰς θερμοκρασίας κορεσμοῦ διὰ τὰς πιέσεις  $P_1, P_2, P_3$  τῶν τριῶν βαθμίδων.

Τό μερικῶς συμπυκνωθέν διάλυμα ἐξέρχεται ἐκ τῆς βαθμίδος (1) εἰς θερμοκρασίαν  $T_1$  καί διαβιβάζεται μέσω βαλβίδος ἐκτονώσεως εἰς τὴν βαθμίδα (2) ὅπου ἀποκτᾶ τὴν θερμοκρασίαν ζέσεως  $T_2$  (ἀμελητέα  $\Delta S Z$ ). Ἡ αὐτὴ πορεία ἐπαναλαμβάνεται μέχρι τῆς τρίτης βαθμίδος, ἐκ τῆς ὁποίας ἐξάγεται τό τελικόν συμπυκνωμένον προϊόν.

Ὁ ὑπολογισμός τῶν ἐξατμιστήρων πολλαπλῶν βαθμίδων ἀπλοποιεῖται διὰ τῶν ἐξῆς παραδοχῶν: 1) Ἀμελητέα  $\Delta S Z$ , 2) ἀμελητέα ἀπώλεια θερμότητος εἰς τό περιβάλλον, 3) ἡ μεταφορὰ θερμότητος μεταξύ τῶν βαθμίδων λαμβάνει χώραν μόνον εἰς τοὺς ἐναλλάκτας θερμότητος, συμπεριλαμβανομένης καί τῆς θερμότητος ἐκτονώσεως τοῦ προϊόντος μεταξύ τῶν βαθμίδων καί 4) ὅλαι αἱ βαθμίδες ἔχουν τὴν αὐτὴν ἐπιφάνειαν ἐναλλαγῆς θερμότητος. Ὑπὸ τὰς συνθήκας ταύτας ἰσχύουν αἱ ἐξισώσεις:

$$\dot{q}_1 = U_1 A_1 \Delta T_1, \quad \dot{q}_2 = U_2 A_2 \Delta T_2, \quad \dot{q}_3 = U_3 A_3 \Delta T_3 \quad (3-15)$$

καί 
$$\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_3 = q, \quad A_1 = A_2 = A_3 = A$$

Ἐπομένως 
$$\dot{q}/A = U_1 \Delta T_1 = U_2 \Delta T_2 = U_3 \Delta T_3 \quad (3-16)$$

Ἐκ τῆς ἐξισώσεως (3-16) ἔπεται ὅτι αἱ διαφοραὶ θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) εἶναι ἀντιστρόφως ἀνάλογοι τῶν συνολικῶν συντελεστῶν μεταφορᾶς θερμότητος ( $U$ ). Ἡ συνολικὴ διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τοῦ ἀτμοῦ θερμάνσεως καί τῶν ἀτμῶν τῆς τελευταίας βαθμίδος δίδεται ὑπὸ τῆς ἐξισώσεως:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 \quad (3-17)$$

ὅπου 
$$\Delta T = T_5 - T_3$$

Συνήθως δίδεται ἡ συνολικὴ ( $\Delta T$ ) καί οἱ συντελεσταὶ ( $U$ ), ὅποτε ὑπολογίζονται εὐκόλως αἱ μερικά ( $\Delta T$ ) καί ἐξ αὐτῶν αἱ ἐνδιάμεσοι θερμοκρασίαι ( $T_1, T_2$ ).

Ἐάν τό ἐξατμιζόμενον διάλυμα παρουσιάζει σημαντικὴν  $\Delta S Z$ , ἡ ἱκανότης ἐξατμίσεως τῶν ἐξατμιστήρων πολλαπλῶν βαθμίδων

έλαττοῦται σημαντικῶς. Τό σημεῖον ζέσεως τοῦ διαλύματος εἰς τήν πρώτην βαθμίδα θά εἶναι :

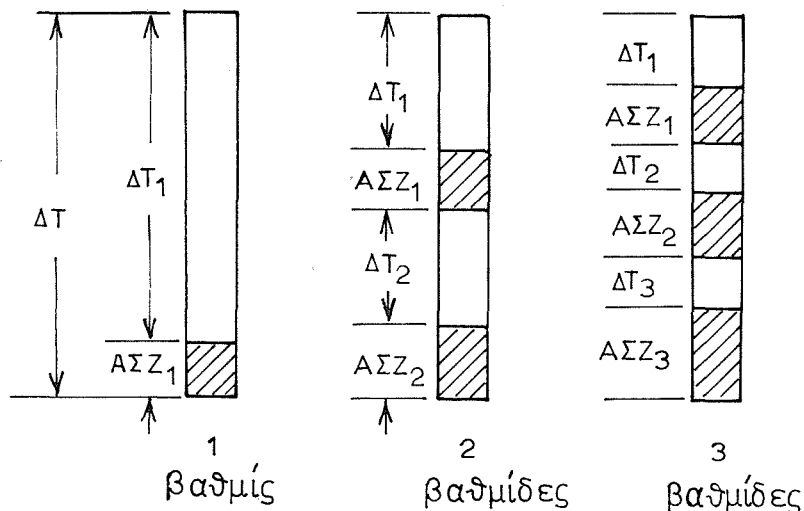
$$T_1 = T_{w_1} + (A\sigma Z)_1 \quad (3-18)$$

ὅπου  $T_{w_1}$  = σημεῖον ζέσεως τοῦ καθαροῦ ὕδατος εἰς τήν πίεσιν  $P_1$ .

Ἡ ὠφέλιμος διαφορά θερμοκρασίας εἰς τήν πρώτην βαθμίδα θά εἶναι  $\Delta T_1 = T_s - T_1$ , ὅπου  $T_s$  = θερμοκρασία τοῦ κεκορεσμένου ἀτμοῦ θερμάνσεως. Ἡ  $(\Delta T)$  αὕτη εἶναι μικροτέρα κατὰ  $(A\sigma Z)_1$  τῆς θερμοδυναμικῆς διαθεσίμου  $\Delta T = T_s - T_{w_1}$ .

Οἱ παραγόμενοι ἀτμοί εἰς τήν πρώτην βαθμίδα, θερμοκρασίας  $T_1$  εἶναι ὑπέρθερμοι διὰ τήν ἐπικρατούσαν πίεσιν  $P_1$ . Οὗτοι χρησιμοποιοῦνται διὰ τήν θέρμανσιν τῆς δευτέρας βαθμίδος, συμπυκνούμενοι εἰς τήν θερμοκρασίαν κορεσμοῦ ( $T_{w_1}$ ) ὡς ἐξηγεῖται εἰς τήν συμπύκνωσιν Ἀτμῶν (Κεφ. 1Βε). Ἡ ὠφέλιμος διαφορά θερμοκρασίας διὰ τήν δευτέραν βαθμίδα θά εἶναι  $\Delta T_2 = T_{w_1} - T_2$ , ἡ ὁποία εἶναι μικροτέρα κατὰ  $(A\sigma Z)_2$  τῆς θερμοδυναμικῆς διαθεσίμου  $\Delta T = T_{w_1} - T_{w_2}$ . Κατ'ἀνάλογον τρόπον ἡ ὠφέλιμος  $\Delta T_3$  εἶναι μικροτέρα κατὰ  $(A\sigma Z)_3$  τῆς ἀντιστοίχου θερμοδυναμικῆς διαφοράς κ.ο.κ. Αἱ ὠφέλιμοι διαφοραί θερμοκρασίας δι'έξατμιστήρα τριῶν βαθμίδων δεικνύονται διαγραμματικῶς εἰς τό Σχ. (3-14).

Αἱ ὠφέλιμοι  $(\Delta T)$  ἐλαττοῦνται ἀπό τήν πρώτην πρός τήν τρίτην βαθμίδα διότι αἱ συγκεντρώσεις καί ἐπομένως αἱ  $(A\sigma Z)$  τοῦ διαλύματος αὐξάνουν πρός τήν κατεύθυνσιν ταύτην (παράλληλος ροή ἀτμοῦ/ὕγρου). Ἡ συνολικῶς διαθέσιμος  $(\Delta T)$  ἐλαττοῦται αὐξανομένου τοῦ ἀριθμοῦ τῶν βαθμίδων καί εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις ὑψηλῆς  $A\sigma Z$  καθίσταται πρακτικῶς ἀδύνατος ἡ λειτουργία ἐξατμιστήρων μέ πλείονας τῶν 3 ἢ 4 βαθμίδων. Τό πρόβλημα δύναται νά ἀντιμετωπισθῇ δι'αύξήσεως τῆς διαθεσίμου συνολικῆς  $(\Delta T)$  π.χ. δι'αύξήσεως τῆς πιέσεως τοῦ ἀτμοῦ θερμάνσεως ( $P_s$ ) ἢ δι'ἐλαττώσεως τῆς πιέσεως τῆς τελευταίας βαθμίδος (ὕψηλόν κενόν). Ἡ αὐξησις τῆς  $P_s$  περιορίζεται εἰς ἀνθηκτικά εἰς τήν θερμοκρασίαν διαλύματα (π.χ. ἀνόργανα ἄλατα), ἐνῶ ἡ ἐλάττωσις τῆς πιέσεως εἶναι δυνατή μέχρις ὠρι-



Σχ. 3-14. Διαθέσιμοι θερμοκρασίοι ( $\Delta T$ ) εις έξατμιστήρα (3) βαθμίδων

σμένου σημείου καί θεωρεῖται γενικῶς δαπανηρά.

Κατά τήν λεπτομερεστέραν ἀνάλυσιν τῶν έξατμιστήρων πολυ-  
 λαπλῶν βαθμίδων (ὁμορορροῆς ἢ ἀντιρορροῆς) πρέπει νά ληφθοῦν ὑπ'  
 ὄψιν αἱ μεταβολαί ἐνθαλπίας αἱ ὁποῖαι συνοδεύουν τήν ροήν  
 τοῦ συμπυκνωμένου διαλύματος μεταξύ δύο γειτονικῶν βαθμίδων.  
 Εἰς τήν λειτουργίαν καθ' ὁμορορροήν τό διάλυμα τό έξερχόμενον  
 ἀπό μίαν βαθμίδα εὐρίσκεται εἰς ὑψηλοτέραν πίεσιν ἀπό τήν πί-  
 εσιν λειτουργίας τῆς ἐπομένης βαθμίδος καί ἡ εἴσοδος του εἰς  
 αὐτήν συνοδεύεται ἀπό μερικὴν έξάτμισιν. Τό ποσοστόν έξα-  
 τμίσεως εἶναι ἀνάλογον τῆς ὑπαρχούσης διαφορᾶς πίεσεως (ἢ  
 θερμοκρασίας) μεταξύ τῶν δύο βαθμίδων, π.χ. διά μίαν διαφο-  
 ράν θερμοκρασίας 20 °C τό ποσοστόν έξατμίσεως ἐνός ἀραιοῦ  
 ὕδατικοῦ διαλύματος εἶναι περίπου 4%.

Ἡ ἀνάλυσις ἐνός συστήματος (n) βαθμίδων βασίζεται εἰς  
 ἰσοζύγια μάζης καί ἐνθαλπίας εἰς ἐκάστην βαθμίδα καί τό ὅ-  
 λον σύστημα ἐκ τῶν ὁποίων προκύπτουν (2n+1) ἐξισώσεις. Ἐάν  
 δέν ὑφίσταται σημαντικὴ ΑΣΖ ἡ ἀνάλυσις ἀπλοποιεῖται ὡς ἀκο-

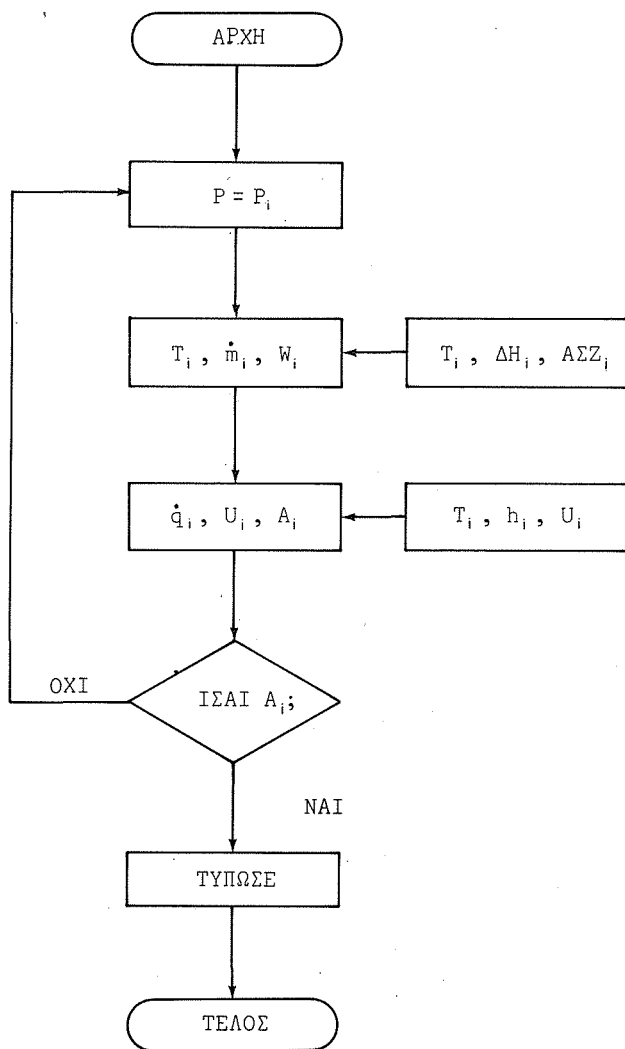
λούθως:

Ὡς δεδομένα θεωροῦνται συνήθως τὰ στοιχεῖα: Ρυθμός ροῆς τροφοδοτήσεως, συνολική ποσότης ἑξατμιζομένου ὕδατος (ἢ συγκεντρώσεις τροφοδοτήσεως καὶ συμπεπυκνωμένου προϊόντος), θερμοκρασία (ἢ πίεσις) ἀτμοῦ θερμάνσεως πρώτης βαθμίδος, θερμοκρασία (ἢ πίεσις) τελευταίας βαθμίδος, καὶ οἱ συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητος ( $U$ ) ὄλων τῶν βαθμίδων. Οἱ ἄγνωστοι τοῦ συστήματος εἶναι ( $2n$ ): Αἱ θερμοκρασίαι ζέσεως ( $n-1$ ) βαθμίδων, οἱ ρυθμοὶ ροῆς διαλύματος εἰς τὰς ( $n-1$ ) βαθμίδας, ὁ ρυθμός ροῆς ἀτμοῦ θερμάνσεως τῆς πρώτης βαθμίδος καὶ ἡ κοινή ἐπιφάνεια ἐκάστης βαθμίδος ( $A$ ).

Τὸ σύστημα τῶν ἐξισώσεων ἐπιλύεται διὰ δοκιμῆς καὶ σφάλματος ὡς ἀκολούθως: Γίνεται δεκτὴ μία κατανομὴ τῶν διαφορῶν θερμοκρασίας  $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_n$  βάσει τῆς δοθείσης συνολικῆς ( $\Delta T$ ) καὶ τῆς ἀντιστρόφου σχέσεως  $U$  καὶ  $\Delta T$  (ἐξίσωσις 3-16). Ἐκ τῶν ( $\Delta T$ ) ὑπολογίζονται αἱ θερμοκρασίαι καὶ δι' ἰσοζυγίων μάζης καὶ ἐνθαλπίας, οἱ ρυθμοὶ ροῆς ἀτμῶν καὶ διαλύματος εἰς ὅλας τὰς βαθμίδας. Ἐκ τῶν ρυθμῶν ἑξατμίσεως ὑπολογίζονται αἱ ἐπιφάνειαι θερμάνσεως ἐκάστης βαθμίδος ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ ). Ἐάν αἱ ἐπιφάνειαι αὗται διαφέρουν σημαντικῶς ἀλλήλων, οἱ προηγούμενοι ὑπολογισμοὶ ἐπαναλαμβάνονται μὲ νέαν καλυτέραν κατανομὴν τῶν διαφορῶν θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) κ.ο.κ. μέχρις ὅτου αἱ λαμβανόμεναι ἐπιφάνειαι εἶναι ἴσαι μεταξὺ τῶν ( $A$ ).

Εἰς τὴν γενικὴν περίπτωσιν πρέπει νὰ ληφθοῦν ὑπ' ὄψιν αἱ  $\Delta Z$ , ἡ μεταβολὴ τῶν συντελεστῶν μεταφορᾶς θερμότητος μετὰ τῆς θερμοκρασίας κλπ. καὶ ὁ ἀριθμὸς τῶν ἐξισώσεων αὐξάνει σημαντικῶς. Διὰ τὴν λεπτομερεστέραν ἀνάλυσιν χρησιμοποιοῦνται ἠλεκτρονικοὶ ὑπολογισταὶ καὶ τὸ Σχ. (3-15) δεικνύει περιληπτικῶς πρόγραμμα ὑπολογισμοῦ διὰ τὴν γενικὴν περίπτωσηιν ἑξατμιστήρος πολλαπλῶν βαθμίδων.

Ἡ οἰκονομία ἀτμοῦ ( $E$ ) τῶν ἑξατμιστήρων πολλαπλῶν βαθμίδων εἶναι μεγαλύτερα τῆς μονάδος καὶ μικροτέρα τοῦ ( $n$ ). Τυπικαὶ τιμαὶ τοῦ ( $E$ ) εἶναι διὰ δύο βαθμίδας 1,6 διὰ τρεῖς 2,3 καὶ διὰ τέσσαρας 3. Ἡ ( $E$ ) ὑπολογίζεται ἀπὸ δεδομένα ἑξατμίσεως καὶ καταναλώσεως ἀτμοῦ (ἐξίσωσις 3-13). Ὁ σχεδιασμὸς καὶ ἡ λειτουργία τῶν ἑξατμιστήρων πολλαπλῶν βαθμίδων



Σχ. 3-15. Περιληπτικόν πρόγραμμα υπολογισμού εξατμιστήρος πολλαπλών βαθμίδων

άποβλέπουν εἰς τὴν αὐξησιν τῆς τιμῆς τοῦ (Ε) δι'οἰκονομικὴν λειτουργίαν. Δέον νά σημειωθῇ ὅτι ἡ (ΑΣΖ) δέν ἐλαττώνει τὴν οἰκονομίαν ἀτμοῦ, ἀλλὰ ἐλαττώνει σημαντικῶς τὴν ἱκανότητα ἐξατμίσεως καί τόν θερμοδυναμικόν βαθμὸν ἀποδόσεως τοῦ συστήματος.

Ὁ ἄριστος ἀριθμὸς βαθμίδων εὐρίσκεται δι'οἰκονομικότε-  
χνικῆς ἀναλύσεως τοῦ συστήματος. Πρὸς τοῦτο ὑπολογίζεται τὸ  
κόστος ἐγκαταστάσεως καί λειτουργίας συστημάτων 2,3,4 κλπ.  
βαθμίδων καί χαράσσεται ἡ καμπύλη συνολικοῦ κόστους-ἀριθμοῦ  
βαθμίδων. Αὐξανόμενου τοῦ ἀριθμοῦ τῶν βαθμίδων αὐξάνεται τὸ  
κόστος ἐγκαταστάσεως καί ἐλαττοῦται τὸ κόστος λειτουργίας,  
ὃ δέ ἄριστος ἀριθμὸς βαθμίδων ἀντιστοιχεῖ εἰς τὸ ἐλάχιστον  
συνολικόν κόστος. Εἰς τὴν πρᾶξιν ὁ ἀριθμὸς τῶν βαθμίδων εἰς  
τάς κυριωτέρας βιομηχανικὰς ἐφαρμογὰς ἔχει τυποποιηθῆ, π.χ.  
5-6 βαθμίδες διὰ τὴν συμπύκνωσιν τῆς σακχάρους καί 4 βαθμί-  
δες διὰ τὴν συμπύκνωσιν τοῦ μαγειρικοῦ ἄλατος.

### ζ) Ἐξατμιστῆρες Πολτῶν

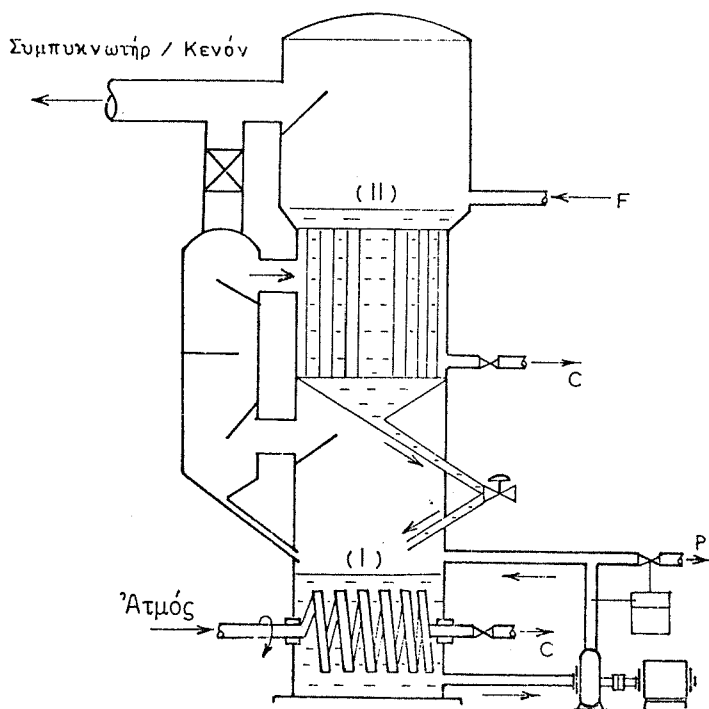
Ἡ ἐξάτμισις ἐφαρμόζεται εἰς πολλάς γεωργικὰς βιομηχα-  
νίας διὰ τὴν συμπύκνωσιν τῶν διαφόρων χυμῶν καί πολτῶν. Τὰ  
προϊόντα ταῦτα εἶναι εὐαίσθητα εἰς τὴν θερμοκρασίαν καί ἡ  
ἐξάτμισις των διεξάγεται εἰς χαμηλὰς θερμοκρασίας (ὑπὸ κε-  
νόν). Διὰ λίαν εὐαίσθητα προϊόντα ἐνδείκνυται ἡ χρῆσις ἐξ-  
ατμιστῆρων ἀπλῆς διαβάσεως, π.χ. μακρῶν σωλῆνων ἢ ἀναδευο-  
μένου λεπτοῦ στρώματος.

Ἄρισμένα προϊόντα, ὡς ὁ πολτός τῆς τομάτας, παρουσιάζ-  
ουν σημαντικὴν ἀνθεκτικότητα εἰς τὴν θερμοκρασίαν, δηλαδή  
δύνανται νά κατεργασθοῦν εἰς σχετικῶς ὑψηλὰς θερμοκρασίας ἐ-  
πί σημαντικόν χρόνον ἄνευ ἀλλοιώσεως τῆς ποιότητος αὐτῶν.  
Εἰς τὰς περιπτώσεις ταύτας δύνανται νά χρησιμοποιηθοῦν συ-  
στήματα ἐξατμίσεως δύο βαθμίδων. Οὕτως ἐφαρμόζεται σύστημα  
ἀποτελούμενον ἀπὸ μίαν βαθμίδα φυσικῆς κυκλοφορίας (βραχέων  
ἢ μακρῶν σωλῆνων) καί μίαν βαθμίδα βεβιασμένης κυκλοφορίας  
διὰ τὸ συμπυκνωθέν προϊόν ὑψηλοῦ ἰξώδους. Τὸ σύστημα λει-  
τουργεῖ κατ'ἀντίρροπὴν ἀτμοῦ/ὕγροῦ, ἦτοι ὁ ἐξωτερικὸς ἀτμὸς



θερμαίνει την βαθμίδα του συμπυκνωμένου προϊόντος, οι άτμοί του οποίου θερμαίνουν την βαθμίδα του άραιου χυμού.

Άνάλογος είναι και η λειτουργία του εξατμιστήρος πολτών τύπου Titano της εταιρίας Manzini (Σχ. 3-16).



Σχ. 16. Έξατμιστήρ πολτών

Τό άραιόν διάλυμα τροφοδοτείται είς την δευτέραν βαθμίδα (II), ή οποία άποτελείται από έξατμιστήρα φυσικής κυκλοφορίας μετά βραχέων σωλήνων. Τό μερικώς συμπυκνωθέν προϊόν (είς 40-42 °C) διαβιβάζεται διά ρυθμιστικής βαλβίδος είς την πρώτην βαθμίδα (I) όπου συμπυκνοϋται (είς 60-65 °C) μέχρι της έπιθυμητής συγκεντρώσεως, π.χ. 40% στερεών συστατικών.

Είς την πρώτην βαθμίδα ή θέρμανσις γίνεται διά περιστρεφομένης σπείρας, έντός της οποίας κυκλοφορεί άτμός υπό

πίεσιν. Ἡ σπεῖρα ἀποτελεῖ τὴν ἐπιφάνειαν θερμάνσεως καὶ περιστρέφεται δι' ἐξωτερικοῦ κινητήρος μέ περιφερειακὴν ταχύτητα περίπου 3 m/s. Διὰ τῆς ταχείας κινήσεως τῆς θερμαινομένης ἐπιφανείας ἐπιτυγχάνονται ὑψηλοὶ συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητος καὶ συγχρόνως ἀποφεύγεται ὁ σχηματισμὸς ἀποθέσεων.

Οἱ ἀτμοὶ τῆς πρώτης βαθμίδος διέρχονται διὰ διαχωριστήρος ἀτμῶν/ὕγρου καὶ χρησιμοποιοῦνται διὰ τὴν θέρμανσιν τοῦ ἐναλλάκτου τῆς πρώτης βαθμίδος. Οἱ ἀτμοὶ τῆς δευτέρας βαθμίδος διαβιβάζονται εἰς σύστημα συμπυκνωτήρος ἀναμίξεως καὶ κενοῦ δι' ἀκροφυσίων ἀτμοῦ (Σχ. 3-19).

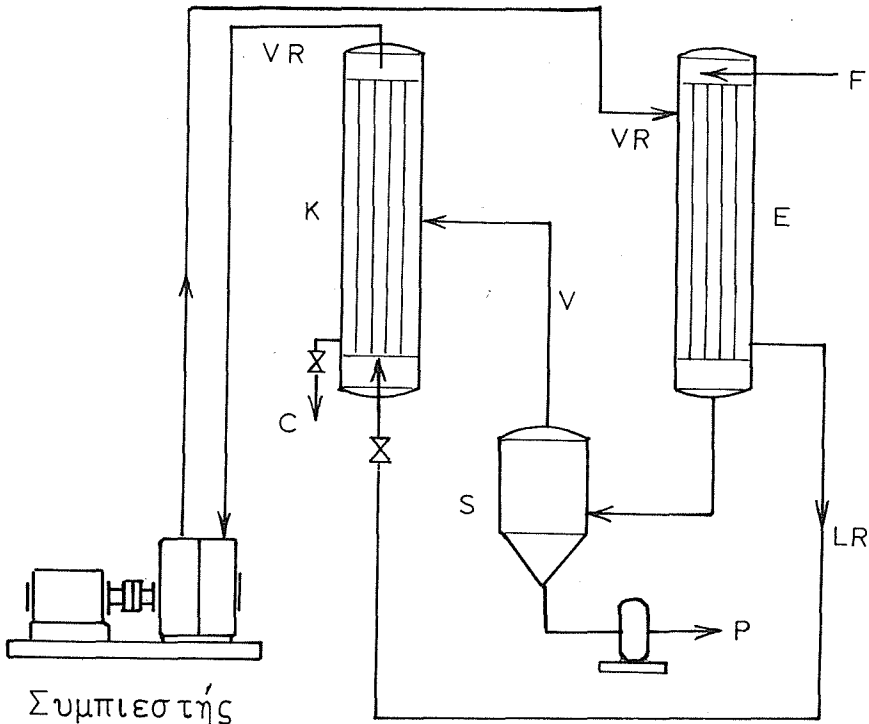
Ὁ συμπυκνούμενος πολτός ἐξέρχεται τῆς πρώτης βαθμίδος δι' ἀντλίας θετικῆς ἐκτοπίσεως. Ἡ πυκνότης τοῦ προϊόντος ἐλέγχεται αὐτομάτως διὰ διαθλασιμέτρου τὸ ὁποῖον μετρεῖ τὸ σύνολον τῶν διαλελυμένων στερεῶν (<sup>0</sup>Brix).

Τὸ σύστημα θερμάνσεως τῶν ἐξατμιστήρων διὰ περιστρεφόμενης σπεύρας ἀτμοῦ ἀναπτύχθη ὑπὸ τοῦ Ἀμερικανικοῦ Ὑπουργείου Γεωργίας ὑπὸ τὸ ὄνομα WURLING.

#### η) Ἐξατμιστῆρες Τύπου Ἀντλίας Θερμότητος

Διὰ τὴν ἐξάτμισιν ὠρισμένων εὐαίσθητων εἰς τὴν θερμοκρασίαν προϊόντων χρησιμοποιοῦνται οἱ ἐξατμιστῆρες τύπου ἀντλίας θερμότητος (heat pump evaporators) διὰ τῶν ὁποίων ἐπιτυγχάνονται χαμηλαὶ θερμοκρασίαι ἐξατμίσεως. Ὁ ἐξατμιστῆρ εἶναι συνδεδεμένος μέ ψυκτικὸν σύστημα συμπιεστήρος - συμπυκνωτήρος ἀναλόγου πρὸς τὸ βασικὸν σύστημα τοῦ Σχ. (2-19). Ἡ ἐξάτμισις τοῦ διαλύματος ἐπιτυγχάνεται δι' ἐναλλαγῆς θερμότητος μέ τοὺς θερμούς ἀτμούς τοῦ ψυκτικοῦ μέσου (π.χ. ἀμμωνίας), οἱ ὅποιοι συγχρόνως ὑγροποιοῦνται. Οἱ ἀτμοὶ τοῦ ὕδατος συμπυκνοῦνται διὰ ψύξεως ὑπὸ τοῦ ψυκτικοῦ ὕγρου, τὸ ὁποῖον συγχρόνως ἐξατμίζεται (Σχ. 3-17).

Εἰς τὸν ἐξατμιστῆρα τύπου ἀντλίας θερμότητος δέν χρησιμοποιεῖται ἀτμός θερμάνσεως καὶ ἡ ἀπαιτουμένη ἐνέργεια προέρχεται ἀπὸ τὴν συμπίεσιν τοῦ ἀερίου ψυκτικοῦ μέσου. Εἰς τὸ σύστημα τοῦτο ὁ ἐξατμιστῆρ τοῦ ὕγρου (E), εἶναι συγχρόνως



Σχ. 3-17. Ύεξατμιστήρ τύπου άντλίας θερμότητας. (Α) έξατμιστήρ διαλύματος, (Κ) συμπυκνωτήρ ύδρατμών, (S) διαχωριστήρ άτμών/ύγρου. (F) τροφοδότησις, (P) προΰδόν, (LR) ύγρόν ψυκτικόν μέσον, (VR) άτμοί ψυκτικου μέσου

καί συμπυκνωτήρ τών άτμών του ψυκτικου μέσου, ο δέ συμπυκνωτήρ τών άτμών του ύδατος (Κ) είναι συγχρόνως καί έξατμιστήρ του ψυκτικου ύγρου. Οι δύο ούτοι έναλλάκται θερμότητος είναι τύπου κελύφους καί σωλήνων. Το διάλυμα του προΰδοντος μετά την έξάτμισιν διέρχεται διά του διαχωριστήρος άτμών/ύγρου (S), έκ του οποίου έξάγεται διά καταλλήλου άντλίας.

### θ) Ύεξαρτήματα Ύεξατμιστήρων

Έκτός του κυρίου θερμαντικου σώματος (έναλλάκτου θερμότητος), οι έξατμιστήρες περιέχουν διάφορα έξαρτήματα άπαραίτητα διά την λειτουργίαν του συστήματος. Αι άπαιτούμεναι άντλίας, σωληνώσεις καί βάνναι έξετάζονται εις την Τεχνικήν τών Ρευστών. Τά συστήματα μετρήσεως καί έλέγχου τών

θερμοκρασιών, πιέσεων και ροών αποτελούν θέματα του Έλεγχου των Διεργασιών. Ένταυθα εξετάζονται ώρισμένα είδικά έξαρτήματα των έξατμιστήρων, όπως οι διαχωριστήρες άτμών / ύγρου, οι συμπυκνωτήρες άτμών και τά συστήματα κενού και έξαερισμού.

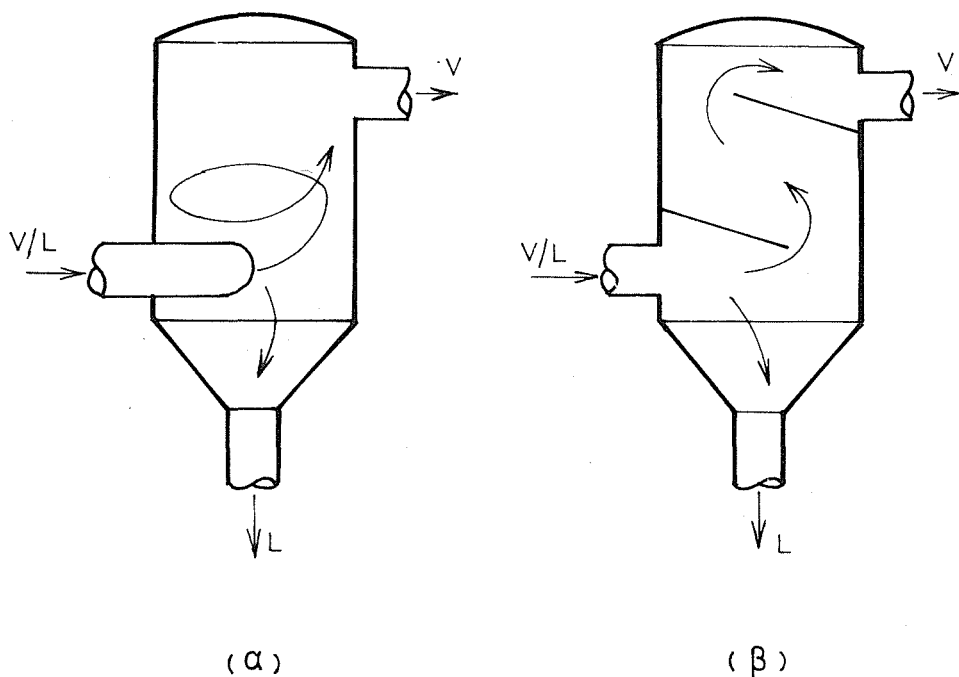
#### 1. Διαχωριστήρες Άτμών/Ύγρου

Οι διαχωριστήρες είναι κυλινδρικά δοχεία διά τών οποίων έπιτυγχάνεται διαχωρισμός τών άτμών από τό μίγμα άτμών / ύγρου τό έξερχόμενον του έναλλάκτου θερμότητας του έξατμιστήρος. Διά τών διαχωριστήρων παρεμποδίζεται ή παράσυρσις (entrainment) σταγονιδίων ύγρου υπό τών άτμών, ή οποία καθίσταται σημαντικώτερα κατά τήν λειτουργίαν είς ύψηλόν κενόν. Οι διαχωριζόμενοι άτμοί διαβιβάζονται είς τόν συμπυκνωτήρα. Είς τό Σχ. (3-18) δεικνύονται δύο συνήθεις τύποι διαχωριστήρων, ήτοι ό φυγοκεντρικός και ό μετ' άνακλαστήρων (baffles). Είς ώρισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται είδικά πλέγματα συγκρατήσεως τών σταγονιδίων (demisters).

Ή παράσυρσις σταγονιδίων ύγρου είς τούς άτμούς είναι άνεπιθύμητος διότι, άφ'ένός μέν έπέρχεται άπώλεια χρησίμου προϊόντος (στερεών συστατικών), άφ'έτέρου δέ τό λαμβανόμενον συμπύκνωμα άτμών δέν είναι καθαρόν.

Αί διαστάσεις τών κυλινδρικών διαχωριστήρων ύπολογίζονται από τόν όγκον τών διερχομένων άτμών ( $m^3/s$ ) και τήν έπιτρεπομένη ταχύτητα άτμών έντός του διαχωριστήρος ( $m/s$ ). Ή έπιτρεπομένη ταχύτης άτμών είναι σχετικώς μικρά και εκλέγεται είς τρόπον ώστε νά δίδεται έπαρκής χρόνος παραμονής πρός πλήρη διαχωρισμόν τών σταγονιδίων. Αύτη έξαρτάται από τήν άπόλυτον πίεσιν έντός του διαχωριστήρος και αύξάνεται σημαντικώς είς τάς χαμηλάς πιέσεις (κενόν). Τυπικάί έπιτρεπόμεναι ταχύτητες άτμών είς διαχωριστήρας είναι  $2 m/s$  διά πίεσιν  $1 bar$  και  $10 m/s$  διά πίεσιν  $50 Torr$ .

Αί σωληνώσεις αί συνδέουσαι τούς διαχωριστήρας μέ τούς συμπυκνωτήρας πρέπει νά έχουν μεγάλην σχετικώς διάμετρον πρός άποφυγήν τών ύψηλών ταχυτήτων και μεγάλων πτώσεων πίεσεως.



Σχ. 3-18. Τύποι διαχωριστήρων ατμών (V)/ύγρου (L). (α) φυγοκεντρικός, (β) μετ'ἀνακλαστήρων

Ἡ ἐπιτρεπομένη ταχύτης ατμῶν εἰς σωληνώσεις ατμῶν εἰς πίεσιν 1 bar εἶναι περίπου 20 m/s, εἰς δέ πίεσιν 50 Torr εἶναι 100 m/s. Εἰς τὰς σωληνώσεις ατμῶν πρέπει νά ἀποφεύγονται αἱ ἀπότομοι καμπαί καί ἄλλα ἐμπόδια ροῆς, τὰ ὅποια προκαλοῦν σημαντικὴν πτώσιν πιέσεως, ἥτοι ἀπώλειαν κενοῦ, εἰς τὸν κυρίως ἐξατμιστήρα.

## 2. Συμπυκνωτῆρες Ἀτμῶν

Οἱ ἀτμοὶ τῆς τελευταίας βαθμίδος ἐξατμίσεως συμπυκνοῦνται εἰς δύο κυρίους τύπους συμπυκνωτῶν, ἥτοι: α) τοὺς συμπυκνωτῆρας ἐπιφανείας (surface condensers) καί β) τοὺς συμπυκνωτῆρας ἐπαφῆς (contact condensers).

Οἱ συμπυκνωτῆρες ἐπιφανείας ὁμοιάζουν πρὸς ἐναλλάκτας

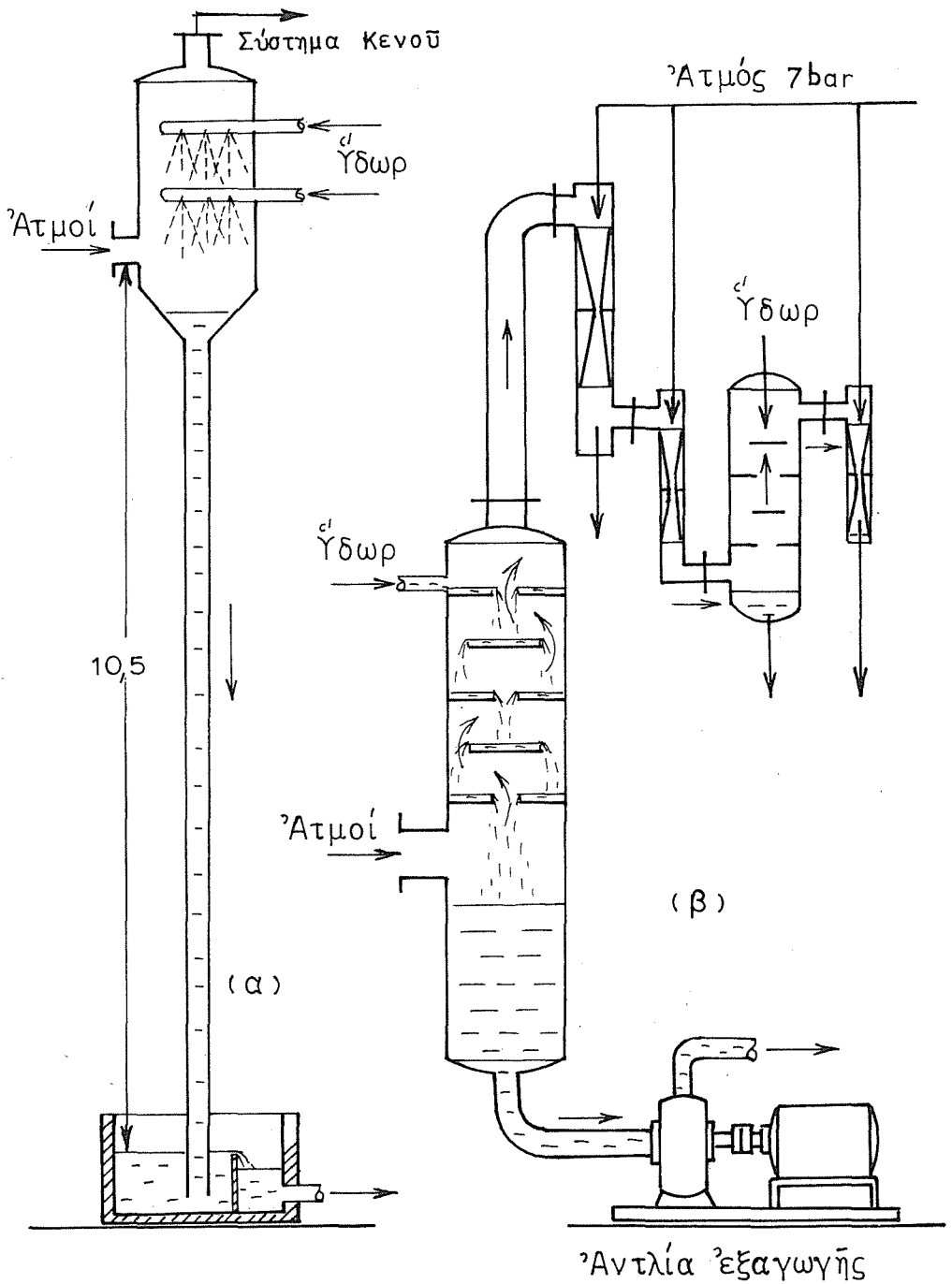
κελύφους καί σωλήνων (Κεφ. 2ε). Οί άτμοί συμπυκνοϋνται κατά κανόνα είς τό κέλυφος, ένώ τό ψυκτικόν μέσον (κυρίως ύδωρ) κυκλοφορεϊ διά τών σωλήνων. Ή μέθοδος αύτη συμπυκνώσεως εί- ναι δαπανηρά καί εφαρμόζεται είς μικράς έγκαταστάσεις ή είς περιπτώσεις κατά τάς όποίας χρησιμοποιεϊται τό προϊόν συμ- πυκνώσεως τών άτμών (ύδωρ).

Είς τούς συμπυκνωτήρας έπαφής ή άναμίξεως οί άτμοί συμ- πυκνοϋνται διά άναμίξεως μέ τό ύδωρ. Τό Σχ. (3-19) παριστά δύο τύπους συμπυκνωτήρων έπαφής μετά τών άναγκαιούτων έξ- αρτημάτων.

Είς τήν πράξιν εφαρμόζονται κυρίως δύο τύποι συμπυκνω- τήρων έπαφής, ήτοι ό βαρομετρικός συμπυκνωτήρ καί ό συμπυ- κνωτήρ μετ' άντλίας έξαγωγής τοϋ ύδατος. Ό βαρομετρικός συμ- πυκνωτήρ άπαιτεϊ ύψος έγκαταστάσεως μεγαλύτερον τών 10m καί διά τοϋτο τοποθετεϊται συνήθως είς τό ύπαιθρον. Ό συμπυ- κνωτήρ μετ' άντλίας άπαιτεϊ μικρότερον ύψος καί χρησιμοποι- εϊται έντός τοϋ έργοστασίου.

Είς άμφοτέρους τούς τύπους οί άτμοί συμπυκνοϋνται έρ- χόμενοι είς έπαφήν μέ τό ύδωρ ψύξεως τό όποϊον καταιονίζε- ται υπό μορφήν σταγόνων ή κατέρχεται ώς λεπτόν στρώμα επί καταλλήλων δίσκων. Πρός καλύτεραν συμπύκνωσιν χρησιμοποιεϊ- ται άντιρροή άτμών/ύδατος. Τό μίγμα συμπυκνώματος/ύδατος ψύ- ξεως έξέρχεται εϊτε διά βαρομετρικοϋ σωλήνος ύψους τουλάχι- στον 10,33 m ή διά καταλλήλου φυγοκεντρικής άντλίας, τοπο- θετημένης είς τόν πυθμένα τοϋ συμπυκνωτήρος. Τό ύψος τών 10,33 m άντιστοιχεϊ είς πίεσιν 1 atm καί οϋτω καθίσταται δυ- νατή ή άπομάκρυνσις τοϋ ύδατος έκ τοϋ συστήματος διά τής βα- ρύτητος άκόμη καί είς περίπτωσιν τελείου κενοϋ έντός αύτοϋ.

Ή θερμότης συμπυκνώσεως τών άτμών άπορροφάται ώς αί- σθητή θερμότης υπό τοϋ ύδατος καί καθίσταται προφανές ότι ά- παιτοϋνται μεγάλαι ποσότητες ύδατος ψύξεως χαμηλής θερμο- κρασίας. Αύξανομένης τής θερμοκρασίας τοϋ ύδατος αύξάνεται λογαριθμικώς ή τάσις άτμών αύτοϋ μέ άποτέλεσμα τόν περιο- ρισμόν τοϋ έπιτυχανομένου είς τό σύστημα κενοϋ. Οϋτως, ύ- δωρ ψύξεως θερμοκρασίας 30 °C έχει τάσιν άτμοϋ 32 Torr καί έπομένως είς έν τοιοϋτον σύστημα καθίσταται άδύνατος ή επί-



Σχ. 3-19. Συμπυκνωτήρες ατμών, (α) Βαρομετρικός (β) μετ'άντλ-ας έξαγωγής του ύδατος

τευξίς άπολύτου πιέσεως μικροτέρας τών 32 Torr.

Είς μεγάλας έγκαταστάσεις έξατμίσεως καθίσταται άναγκαία ή άνακυκλοφορία του ύδατος ψύξεως άφοϋ προηγουμένως τουτο διεέλθη διά καταλλήλου ψυκτικού πύργου (Κεφ. 4 στ).

### 3. Συστήματα Κενού

Είς τάς πλείστας έγκαταστάσεις ή έξάτμισις διεξάγεται κάτωθεν τής άτμοσφαιρικής πιέσεως καί οϋτω καθίσταται άναγκαϊον έν σύστημα δημιουργίας καί διατηρήσεως του κενού. Διά του συστήματος κενού άπομακρύνονται τά διάφορα μή συμπυκνούμενα άέρια, τά όποια είτε διαρρέουν είς τό σύστημα (π.χ. άήρ) ή είναι διαλελυμένα είς τό έξατμιζόμενον υγρόν (π.χ. διοξειδίου του άνθρακος). Ή διατήρησις του κενού γίνεται είτε διά μηχανικής άντλίας ή δι' άκροφυσίου άτμοϋ.

Ώς μηχανικαί άντλίας κενού χρησιμοποιούνται αι είδικαί άντλίας δακτυλίου ύδατος (π.χ. τύπου Nash), αι όποια λειτουργούν ικανοποιητικώς παρουσία υδρατμών (βλέπε Τεχνική τών Ρευστών). Σημειωτέον ότι αι συνήθεις άντλίας έλαίου δέν ένδεικνυνται διά συστήματα κενού περιέχοντα υδρατμούς.

Τά άκροφύσια άτμοϋ ή τζιζάρια (steam jet ejectors) είναι άπλούστερα από άπόψεως λειτουργίας καί άπαιτούν άτμόν πιέσεως περίπου 7 bar. Τά μή συμπυκνούμενα άέρια συμπιέζονται είς δύο ή περισσοτέρας βαθμίδας άκροφυσίων μέχρις ότου έπιτευχθή τό άπαιτούμενον κενόν. Είς ώρισμένες έγκαταστάσεις χρησιμοποιεΐται ένδιάμεσος συμπυκνωτήρ άτμών μεταξύ τών βαθμίδων συμπιέσεως (Σχ. 3-19).

#### ι) Άφαλάτωσις του Ύδατος

Ή έξάτμισις εφαρμόζεται είς μεγάλην κλίμακα διά τήν άφαλάτωσιν του θαλασσίου καί τών ύφαλμύρων (brackish) ύδάτων. Τό θαλάσσιον ύδωρ δύναται νά άφαλατωθῆ καί διά τής κρυσταλλώσεως του πάγου (Τεχνική Σωματιδίων), τό δέ ύφάλμυρον άφαλατοϋται καί διά τής άντιστρόφου ώσμώσεως ή τής ήλεκτροδιαπιδύσεως (Τεχνική Φυσικών Διαχωρισμών).

Ή έξάτμισις του ύδατος παρουσιάζει προβλήματα διαβρώ-



σεως καί άποθέσεως άλάτων, τά όποια άντιμετωπίζονται διά χρησιμοποίησης καταλλήλων μετάλλων καί διά κατεργασίας του ύδατος τροφοδοτήσεως. Από οικονομικής πλευράς έπιζητούνται ύψηλοί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας καί μεγάλη οικονομία άτμου.

Είς τήν άφαλάτωσιν χρησιμοποιούνται κυρίως σωληνωτοί έξατμιστήρες πολλαπλών βαθμίδων. Οί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας τής πλευράς έξατμίσεως καί τής πλευράς συμπυκνώσεως είναι τής αύτής τάξεως μεγέθους. Πρός έλάττωσιν τής θερμικής άντιστάσεως του τοιχώματος χρησιμοποιούνται σωλήνες λεπτού πάχους τοιχώματος (0,8-1,0mm) ύψηλής θερμικής άγωγιμότητας καί άνθεκτικοί είς τήν διάβρωσιν, ώς τά κράματα του χαλκού, του άλουμινίου καί τό τιτάνιον (Κεφ. 2).

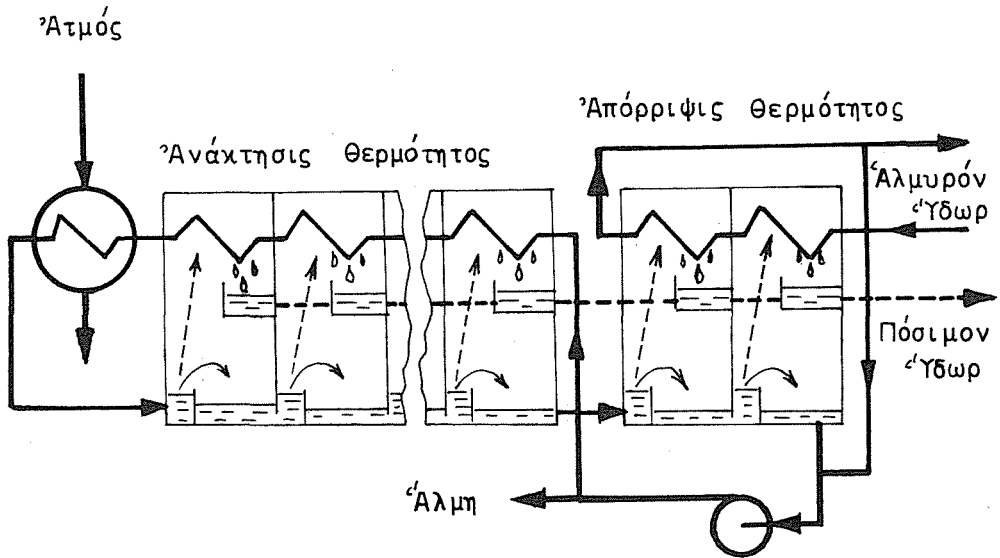
Δι' έγκαταστάσεις άφαλατώσεως μέχρι 1 Mgd (10<sup>6</sup> U.S. gallons/day=3780 m<sup>3</sup>/day) χρησιμοποιούνται έξατμιστήρες πολλαπλών βαθμίδων (μέχρι 12) πίπτοντος λεπτού στρώματος, μακρών κατακορύφων σωλήνων (VTE). Πρός αύξησιν των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας εφαρμόζονται σωλήνες έπηυξημένης έπιφανείας (enhanced surface) οί όποιοι φέρουν έπιμήκεις ή σπειροειδεΐς αύλακας είς άμφοτέρας τάς πλευράς (fluted tubes). Διά των σωλήνων τούτων έπιτυγχάνονται λίαν ύψηλοί συνολικοί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας (8.000-10.000 W/m<sup>2</sup> K).

Είς ώρισμένες περιπτώσεις εφαρμόζονται οί έξατμιστήρες πίπτοντος λεπτού στρώματος είς όριζοντίους σωλήνας. Είς τούς έξατμιστήρας τούτους τό ύδωρ διαβιβάζεται διά καταλλήλου κατανομέως είς τήν έξωτερικήν έπιφάνειαν των όριζοντίων σωλήνων καί έξατμίζεται ώς λεπτόν στρώμα. Ο άτμός θερμάνσεως διαβιβάζεται είς τό έσωτερικόν των σωλήνων.

Διά σχετικώς μικράς έγκαταστάσεις άφαλατώσεως ώς πλέον οικονομική μέθοδος θεωρείται ή έξάτμισις διά μηχανικής άνασυμπιέσεως των άτμων (Κεφ. 3ε).

Διά μεγάλας έγκαταστάσεις άφαλατώσεως ένδεικνυται οί έξατμιστήρες στιγμιαίας έξατμίσεως πολλαπλών βαθμίδων, (Multiple Stage Flash, MSF). Είς τούς έξατμιστήρας MSF χρησιμοποιείται μέγας αριθμός βαθμίδων (π.χ. 25-50) καί έπιτυγχάνεται ούτω πλήρης έκμετάλλευσις τής θερμότητας. Τό Σχ. (3-20)

δεικνύει διαγραμματικῶς σύστημα πολλαπλῶν βαθμίδων στιγμιαίας ἐξατμίσεως.



Σχ. 3-20. Ἐξατμιστὴρ πολλαπλῶν βαθμίδων στιγμιαίας ἐξατμίσεως (MSF)

Τό θαλάσσιον ὕδωρ προθερμαίνεται εἰς σειράν ἐναλλακτῶν θερμότητος καί τελικῶς θερμαίνεται εἰς  $120^{\circ}\text{C}$  περίπου δι' ἄτμου πίεσεως 3 bar. Τό ὑπό πίεσιν θερμόν ὕδωρ ἐκτονοῦται τελικῶς εἰς τόν προ-τελευταῖον ἐναλλάκτην καί οἱ παραγόμενοι ἄτμοι ὑγροποιούμενοι προθερμαίνουν τό ὕδωρ. Ἡ μερική αὐτή ἐκτόνωσις τοῦ ὕδατος (περίπου  $2-3^{\circ}\text{C}$  ἀνά βαθμίδα) ἐπαναλαμβάνεται εἰς ὅλας τὰς βαθμίδας, παραγομένου οὕτως ἀπεσταγμένου ὕδατος, ἐνῶ συγχρόνως προθερμαίνεται τό ὕδωρ τροφοδοτήσεως.

Οἱ ἐναλλάκται θερμότητος τοῦ συστήματος MSF ἀποτελοῦνται ἀπό εἰδικήν διάταξιν σωλήνων ἢ ὁποία ἐπιτρέπει τήν στι-

γμιαίαν έξάτμισιν τοῦ ἀλατούχου ὕδατος, τόν διαχωρισμόν ἀτμῶν/ὕγρου καί τήν συμπύκνωσιν τῶν ἀτμῶν μέ ταυτόχρονον προ-θέρμανσιν τοῦ ὕδατος τροφοδοτήσεως. Πρός βελτίωσιν τοῦ ρυθμοῦ μεταφορᾶς θερμότητος ἐφαρμόζεται μερική ἀνακυκλοφορία τῆς ἄλμης.

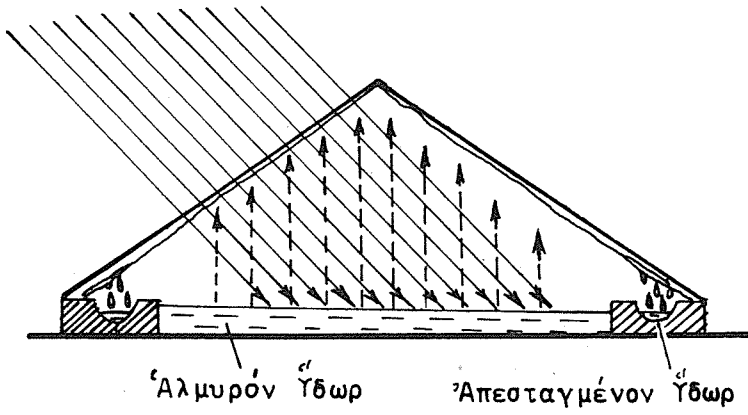
Εἰς μεγάλας ἐγκαταστάσεις δύνανται νά χρησιμοποιηθοῦν, οἰκονομικούς λόγους, συνδυασμοί έξατμιστῆρων πίπτοντος λεπτοῦ στρώματος καί στιγμιαίας έξατμίσεως πολλαπλῶν βαθμίδων (VTE/MSF).

Ὁ σχηματισμός ἀποθέσεων ἀλάτων κυρίως Ca καί Mg εἰς τοὺς έξατμιστῆρας ἀντιμετωπίζεται διά προσθήκης θειϊκοῦ ὀξεόος εἰς τό ὕδωρ τροφοδοτήσεως. Τό ὀξύ τροφοδοτεῖται διά καταλλήλου δοσιμετρικῆς ἀντλίας εἰς συγκέντρωσιν 100-130 ppm εἰς τό ὕδωρ τροφοδοτήσεως τῶν έξατμιστῆρων. Τό παραγόμενον ἐκ τῆς διασπάσεως τῶν ἀνθρακικῶν ἀλάτων διοξειδίου τοῦ ἀνθρακος ἀπομακρύνεται εἰς στήλην ἀπαερισμοῦ. Ὁ σχηματισμός ἀλάτων παρεμποδίζεται ἐπίσης διά προσθήκης ὠρισμένων πολυμερῶν οὐσιῶν, ὅπως τά πολυφωσφορικά ἄλατα (περίπου 10 ppm), αἱ ὁποῖαι σχηματίζουν μετά τῶν ἀλάτων εὐκόλως ἀπομακρυνόμενα συσσωματώματα.

Οἱ ἡλιακοὶ ἀποστακτῆρες (solar stills) χρησιμοποιοῦνται διά τήν ἀφαλάτωσιν μικρῶν σχετικῶς ποσοτήτων ὕδατος εἰς ἀπομονωμένας περιοχάς ἢ μικράς νήσους. Οἱ ἀποστακτῆρες οὗτοι ὁμοιάζουν πρόσ τά ὑάλινα θερμοκήπια καί βασίζονται εἰς τήν έξάτμισιν στρώματος ὕδατος διά τῆς ἡλιακῆς ἀκτινοβολίας καί τήν συμπύκνωσιν τῶν ἀτμῶν εἰς τό ἐσωτερικόν τῆς ὑαλίνης ὀροφῆς. Τό συμπύκνωμα συλλέγεται διά καταλλήλου διατάξεως τῆς ὀροφῆς τοῦ ἀποστακτῆρος (Σχ. 3-21).

Οἱ ἀποστακτῆρες θαλασσίου ὕδατος κατασκευάζονται ἀπό ἀνθεκτικά εἰς τήν διάβρωσιν ὑλικά, ὡς τό ἀλουμίνιον, ὁ ἀμίαντος καί ἡ ὕαλος. Ἡ ἀποστακτικὴ ἱκανότης τῶν ἐγκαταστάσεων τούτων έξαρτᾶται ἀπό τήν εἰδικήν ἡλιακὴν ἀκτινοβολίαν, ἡ ὁποία εἶναι συνάρτησις τοῦ γεωγραφικοῦ πλάτους καί τῆς ἡλιοφανείας τῆς περιοχῆς καθὼς καί τῆς ἐποχῆς τοῦ ἔτους. Διά τήν Ἑλλάδα ἡ μέση ἀπόδοσις τῶν ἡλιακῶν ἀποστακτῆρων κατὰ τό θέρος εἶναι τῆς τάξεως τῶν 5 kg/m<sup>2</sup> day.

## Ἡλιακή Ἀκτινοβολία



Σχ. 3-21. Ἄπλοῦς ἡλιακός ἀποστακτήρ

## ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΞΑΤΜΙΣΕΩΣ

1. Έξατμιστήρ έξηναγκασμένης κυκλοφορίας, συνεχούς λειτουργίας, συμπυκνώνει 10000 kg/h ύδατικού διαλύματος καυστικού νατρίου από 10% είς 50%. Ή τροφοδότση είσέρχεται είς τήν θερμοκρασίαν βρασμού του διαλύματος καί διά τήν θέρμανσιν χρησιμοποιεΐται άτμός πίεσεως 3 bar. Ή πίεσις είς τόν έξατμιστήρα εΐναι 95 Torr.

Ζ η τ ο υ ν τ α ι :

α) Ή άπαιτουμένη έπιφάνεια θερμάνσεως του έξατμιστήρος, εάν ό συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητος εΐναι  $U=2000 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

β) Ή διάμετρος του διαχωριστήρος άτμών/ύγρου.

γ) Ή άπαιτουμένη άξονική ίσχύς τής άντλίας κυκλοφορίας, εάν ή μέση ταχύτης του ύγρου έντός των σωλήνων εΐναι 6 m/s καί ή προσδιδομένη ύπό τής άντλίας είς τό ύγρόν ένέργεια εΐναι 80 J/kg (βαθμός άποδόσεως άντλίας  $\eta=0,75$ ).

δ) Ό άπαιτούμενος ρυθμός ροής ύδατος ψύξεως, εάν χρησιμοποιεΐται συμπυκνωτήρ έπαφής μέ ύδωρ θερμαινόμενον από 20° είς 40 °C.

Λ ύ σ ι ς

Τό σημείον ζέσεως του ύδατος είς πίεσιν 95 Torr εΐναι 50,5 °C. Έκ του διαγράμματος Dühring του Σχ. (3-1) εύρίσκειται ότι είς τήν δοθείσαν πίεσιν τό διάλυμα 50% καυστικού νατρίου ζέει είς τούς 88 °C καί έπομένως  $\Delta T=37,5$  °C. Ό ρυθμός ροής του συμπεπυκνωμένου προϊόντος θα εΐναι, συμφώνως πρός τήν έξίσωσιν (3-5):

$$\dot{m}=10000 \cdot 0,1/0,5=2000 \text{ kg/h}$$

Έπομένως, ο ρυθμός εξατμίσεως θα είναι:

$$\dot{m}_v = 10000 - 2000 = 8000 \text{ kg/h} = 2,22 \text{ kg/s}$$

Έκ τών Πινάκων Άτμών εύρίσκεται ή θερμότης εξατμίσεως τοϋ ύδατος είς 50,5 °C ώς ΔH=2382 kJ/kg. Οί παραγόμενοι άτμοί έντός τοϋ εξατμιστήρος είναι υπέρθερμοι μέ ένθαλπίαν H=2382+1,88·37,5=2452 kJ/kg. (Ώς βάσις ύπολογισμοϋ τής ένθαλπίας λαμβάνονται οί 50,5 °C). Η θερμοκρασία τοϋ άτμοϋ θερμάνσεως είναι 133 °C καί έπομένως ΔT=45 °C.

α) Η άπαιτουμένη έπιφάνεια θερμάνσεως θα είναι:

$$A = 2,22 \cdot 2452000 / 2000 \cdot 45 = 60,5 \text{ m}^2$$

β) Ο είδικός όγκος τών κευκορεσμένων ύδρατμών είς 50,5 °C εύρίσκεται άπό Πίνακας ώς 12 m<sup>3</sup>/kg. Οί υπέρθερμοι άτμοί θα έχουν όγκον 12(361/323,5)=13,4 m<sup>3</sup>/kg.

Όγκομετρική ροή άτμών: 2,22·13,4=29,7 m<sup>3</sup>/s

Άπαιτουμένη διατομή διαχωριστήρος 29,7/10=2,97 m<sup>2</sup> καί διάμετρος διαχωριστήρος D=(4·2,97/3,14)<sup>1/2</sup>=1,95 m

Λαμβάνεται D=2 m.

γ) Διά τόν ύπολογισμόν τής ίσχύος τής άντλίας κυκλοφορίας άπαιτείται ή γνώνσις τής διαμέτρου τών σωλήνων τοϋ ένναλλάκτου θερμότητος. Πρός τοϋτο γίνεται ή παραδοχή ότι ο ένναλλάκτης άποτελείται άπό σωλήνας έσωτερικής διαμέτρου 50 mm καί μήκους 3 m. Ο άπαιτούμενος άριθμός σωλήνων θα είναι:

$$N = 60,5 / 3,14 \cdot 0,05 \cdot 3 = 128$$

Η έσωτερική διατομή εκάστου σωλήνος θα είναι:

$$3,14 \cdot (0,05)^2 / 4 = 0,0019 \text{ m}^2$$

Καί ή έσωτερική διατομή όλων τών σωλήνων θα είναι:

$$128 \cdot 0,0019 = 0,251 \text{ m}^2$$

Ο ρυθμός ροής τοϋ διαλύματος διά τών σωλήνων θα είναι:

$$6 \cdot 0,251 \rho = 1885 \text{ kg/s}$$

όπου  $\rho=1250 \text{ kg/m}^3$  ή μέση πυκνότης του κυκλοφορούντος διαλύματος καυστικού νατρίου.

Η άξονική ισχύς της αντλίας θα είναι:

$$P = \frac{1885 \cdot 80}{0,75 \cdot 1000} = 201 \text{ kW}$$

δ) Οι υπέρθερμοι άτμοί του εξατμιστήρος θα συμπυκνωθούν εις τήν θερμοκρασίαν κορεσμού διά τήν έπικρατούσαν πίεσιν ήτοι εις  $50,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , εάν άμεληθή ή πτώσις πιέσεως μεταξύ διαχωριστήρος καί συμπυκνωτήρος. Έκαστον  $\text{kg}$  υπερθέρμου άτμου συμπυκνούμενον εις  $50,5 \text{ }^\circ\text{C}$  άποδίδει  $2452 \text{ kJ}$  θερμότητος. Έπομένως άπαιτείται ή άπομάκρυνσις  $2,22 \cdot 2452 = 5443 \text{ kJ/s}$  διά τήν συμπύκνωσιν εις τούς  $50,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Τό άπαιτούμενον πρός τοϋτο ύδωρ ψύξεως (άπό  $20$  εις  $50,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) θα είναι  $5443/4,18 \cdot 30,5 = 42,7 \text{ kg/s}$ . Διά τήν ψύξιν του μίγματος συμπυκνώματος / ύδατος ψύξεως άπό  $50,5 \text{ }^\circ\text{C}$  εις  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  άπαιτούνται  $(42,7+2,2)4,18 \cdot 10,5/4,18 \cdot 20 = 23,6 \text{ kg/s}$  ύδατος. Τό συνολικώς άπαιτούμενον ύδωρ ψύξεως θα είναι:

$$23,6+42,7=66,3 \text{ kg/s}=238,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

2. Έξατμιστήρ τριών βαθμίδων χρησιμοποιείται διά τήν συμπύκνωσιν  $20.000 \text{ kg/h}$  ύδατικού διαλύματος άπό  $10$  εις  $50\%$ . Διά τήν θέρμανσιν χρησιμοποιείται άτμός πιέσεως  $2 \text{ bar}$  καί ή πίεσις εις τήν τρίτην βαθμίδα είναι  $100 \text{ Torr}$ .

Ζ η τ ο υ ν τ α ι :

Νά ύπολογισθοϋν ή άπαιτουμένη έπιφάνεια θερμάνσεως καί ή έπιτυγχανομένη οίκονομία άτμου διά τάς έξής περιπτώσεις:

α) Λειτουργία καθ' όμορροήν μέ τροφοδότησιν εις τήν θερμοκρασίαν βρασμού τής πρώτης βαθμίδος.

β) Λειτουργία καθ' όμορροήν μέ τροφοδότησιν εις  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

γ) Λειτουργία κατ' άντιρροήν μέ τροφοδότησιν εις τούς  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Δ ε δ ο μ έ ν α :

Άμελητέα ΑΣΖ και άπώλεια θερμότητας.

Τά συμπυκνώματα άτμών άπομακρύνονται ώς κεκορεσμένον ύ-  
γρόν.

Συνολικοί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας,  $U_1=3400$ ,  
 $U_2=1500$  και  $U_3=750$  W/m<sup>2</sup>K.

Λ ύ σ ι ς

Ρυθμός ροής συμπυκνωμένου προϊόντος  $\dot{m}=20000 \cdot 0,1/0,5=4000$  kg/h

Ρυθμός έξατμίσεως  $\dot{m}_v=20000-4000=16000$  kg/h=4,44 kg/s

Θερμοκρασία είς τρίτην βαθμίδα  $T_3=51,5$  °C

Θερμοκρασία άτμοϋ  $T_s=120$  °C

Διαθέσιμος διαφορά θερμότητας  $\Delta T=68,5$  °C

α) Είς τήν περίπτωσιν ταύτην ίσχύουν αί παραδοχαί ά-  
πλοποιήσεως και ή έξισωσις (3-15) και έπομένως:

$$3400 \Delta T_1=1500 \Delta T_2=750 \Delta T_3$$

$$\Delta T_1+\Delta T_2+\Delta T_3=68,5$$

Έκ τών τελευταίων έξισώσεων προκύπτουν:

$$\Delta T_1=8,8, \Delta T_2=19,8, \Delta T_3=39,6$$
 °C

και  $T_1=111,2, T_2=91,4, T_3=51,5$  °C

Άπό Πίνακα Άτμών εύρίσκονται αί έξής θερμότητες έξατμί-  
σεως:

$$\Delta H_s=2200, \Delta H_1=2240, \Delta H_2=2280 \text{ και } \Delta H_3=2380 \text{ kJ/kg.}$$

Διά τούς ρυθμούς έξατμίσεως τών τριών βαθμίδων ίσχύουν  
αί έξισώσεις:

$$\dot{m}_{v1}+\dot{m}_{v2}+\dot{m}_{v3}=\dot{m}_v=4,44 \text{ kg/s}$$

και  $22400 \dot{m}_{v1}=2280 \dot{m}_{v2}=2380 \dot{m}_{v3}$

έκ τών όποιων εύρίσκεται:



$$\dot{m}_{v_1} = 1,52, \dot{m}_{v_2} = 1,49 \text{ και } \dot{m}_{v_3} = 1,43 \text{ kg/s}$$

Ἡ ἐπιφάνεια ἐναλλαγῆς θερμότητος θά εἶναι:

$$A_1 = 1,52 \cdot 2,24 \cdot 10^6 / 3400 \cdot 8,8 = 114 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 1,49 \cdot 2,28 \cdot 10^6 / 1500 \cdot 19,8 = 114,4 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 1,43 \cdot 2,38 \cdot 10^6 / 750 \cdot 39,6 = 114,6 \text{ m}^2$$

Οὕτω λαμβάνεται ὡς κοινή ἐπιφάνεια θερμάνσεως τῶν τριῶν βαθμίδων τοῦ ἐξατμιστήρος ἡ  $A = 115 \text{ m}^2$ .

Ἡ ἀπαιτούμενη ποσότης ἀτμοῦ θά εἶναι:

$$\dot{m}_s = 1,53 \cdot 2,240 / 2,200 = 1,56 \text{ kg/s}$$

καί ἡ οἰκονομία ἀτμοῦ τοῦ ἐξατμιστήρος:

$$E = 4,44 / 1,56 = 2,85$$

β) Γίνεται ἀρχικῶς δεκτὴ ἡ προηγουμένη κατανομή θερμοκρασιῶν, ἥτοι  $T_1 = 111,2$ ,  $T_2 = 91,4$  καί  $T_3 = 51,5$  °C.

Ἴσοζύγιον ἐνθαλπίας εἰς τὴν πρώτην βαθμίδα δίδει:

$$2200 \dot{m}_s = \frac{20000 \cdot 0,95 \cdot 4,18 (111,2 - 40)}{3600} + 2240 \dot{m}_{v_1}$$

$$\text{ἢ } 2,2 \dot{m}_s = 1,57 + 2,24 \dot{m}_{v_1}$$

Οἱ ρυθμοὶ ἐξατμίσεως εἰς τὰς τρεῖς βαθμίδας θά εἶναι οἱ αὐτοὶ μέ τὴν περίπτωσιν (α), ἥτοι:

$$\dot{m}_{v_1} = 1,52, \dot{m}_{v_2} = 1,49 \text{ καί } \dot{m}_{v_3} = 1,43 \text{ kg/s}$$

Ἐπομένως ὁ ρυθμὸς ροῆς τοῦ ἀτμοῦ θά εἶναι  $\dot{m}_s = 2,26 \text{ kg/s}$ .

Ἡ ἐπιφάνεια θερμάνσεως τῆς πρώτης βαθμίδος θά εἶναι:

$$A_1 = 2,26 \cdot 2200000 / 3400 \cdot 8,8 = 166 \text{ m}^2$$

Αἱ ἐπιφάνειαι τῶν ὑπολοίπων βαθμίδων θά εἶναι αἱ αὐταὶ μέ τὴν περίπτωσιν (α), ἥτοι  $A_2 = A_3 = 115 \text{ m}^2$ .

Ἐπειδὴ αἱ τρεῖς ἐπιφάνειαι διαφέρουν σημαντικῶν ἀλλή-  
λων ἀπαιτεῖται νέα κατανομή τῶν θερμοκρασιῶν. Αὕτη γίνεται  
μέ βάσιν τὴν μέσην τιμὴν τῶν τριῶν ἐπιφανειῶν  $(166+115+115)/3=$   
 $=132 \text{ m}^2$  ὡς ἀκολουθῶς:

$$\Delta T_1=8,8 \cdot 166/132=11, \quad \Delta T_2=17,3$$

καί 
$$\Delta T_3=68,5-28,3=40,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ἐπομένως  $T_1=109, T_2=91,7$  καί  $T_3=51,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Αἱ νέα θερμοκρασίαι δὲν διαφέρουν οὐσιωδῶς ἀπὸ τὰς  
προηγουμένας καὶ αἱ θερμότητες ἐξατμίσεως δύνανται νὰ λη-  
φθοῦν αἱ αὐταί. Ἡ ἀπαιτουμένη ποσότης ἀτμοῦ θὰ εἶναι:

$$2200 \dot{m}_s = \frac{20.000 \cdot 0,95 \cdot 4,18 (109-40)}{3600} + 2240 \cdot 1,52$$

ἦτοι 
$$\dot{m}_s = 2,24 \text{ kg/s}$$

Αἱ ἐπιφάνειαι θερμάνσεως θὰ εἶναι:

$$A_1 = 2,24 \cdot 2,2 \cdot 10^6 / 3400 \cdot 11 = 131 \text{ m}^2,$$

$$A_2 = 1,49 \cdot 2,28 \cdot 10^6 / 1500 \cdot 17,3 = 131 \text{ m}^2$$

καί 
$$A_3 = 1,43 \cdot 2380000 / 750 \cdot 40,2 = 113 \text{ m}^2$$

Ἀπαιτεῖται νέα κατανομή τῶν  $\Delta T$  μέ βάσιν τὴν μέσην τι-  
μὴν τῶν ἐπιφανειῶν  $(131+131+113)/3=125 \text{ m}^2$ . Οὕτως λαμβάνον-  
ται  $\Delta T_1=11,5, \Delta T_2=18$  καὶ  $\Delta T_3=39$ . Ἐξ αὐτῶν  $T_1=109,5, T_2=$   
 $=91,5$  καὶ  $T_3=51,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Διὰ παρομοίων ὑπολογισμῶν εὐρίσκονται  
 $A_1=126 \text{ m}^2; A_2=125 \text{ m}^2$  καὶ  $A_3=117 \text{ m}^2$ .

Λαμβάνεται κατὰ προσέγγισιν ὡς κοινὴ ἐπιφάνεια θερ-  
μάνσεως εἰς τὰς τρεῖς βαθμίδας ἐξατμίσεως ἢ  $A=125 \text{ m}^2$ .

Ἡ οἰκονομία ἀτμοῦ εἰς τὴν περίπτωσιν εἰσαγωγῆς τῆς  
τροφοδοτήσεως εἰς τοὺς  $40 \text{ } ^\circ\text{C}$  θὰ εἶναι:  $E=4,44/2,24=2$ , δηλα-  
δὴ σημαντικῶς χαμηλότερα τῆς οἰκονομίας ἀτμοῦ τῆς περιπτώ-  
σεως εἰσαγωγῆς τῆς τροφοδοτήσεως εἰς τὴν θερμοκρασίαν βρα-  
σμοῦ (α).

γ) Είς τήν λειτουργίαν κατ'άντιρροήν ἡ τροφοδότησις εἰσέρχεται εἰς τήν τρίτην βαθμίδα καί τό συμπυκνούμενο προϊόν ἐξέρχεται τῆς πρώτης βαθμίδος. Ὁ ἀτμός χρησιμοποιεῖται ὡς καί προηγουμένως, δηλαδή θερμαίνει τήν πρώτην βαθμίδα κ.λ.π.

Ἐπειδή οἱ συντελεσταί μεταφορᾶς θερμότητος ἐλαττοῦνται αὐξανομένης τῆς συγκεντρώσεως τοῦ διαλύματος, γίνεται δεκτὴ ἡ ἀντίστροφος σειρά τῶν τιμῶν τῆς περιπτώσεως (α) καί (β), ἥτοι  $U_1=750$ ,  $U_2=1500$  καί  $U_3=3400$  W/m<sup>2</sup>K. Ἐπομένως διὰ τήν πρώτην κατανομήν τῶν θερμοκρασιῶν, θά ἰσχύουν, αἱ ἀντίστροφοι τιμαί τῆς περιπτώσεως (α), ἥτοι:  $\Delta T_1=39,6$ ,  $\Delta T_2=19,8$  καί  $\Delta T_3=8,8$  °C. Ἐξ αὐτῶν  $T_1=80,4$ ,  $T_2=60,6$ ,  $T_3=51,5$  °C καί  $\Delta H_1=2310$ ,  $\Delta H_2=2340$ ,  $\Delta H_3=2380$  kJ/kg.

Ὡς πρώτη προσέγγισις θεωρεῖται ἡ περίπτωσις τῆς εἰσαγωγῆς τῆς τροφοδοτήσεως εἰς τήν θερμοκρασίαν βρασμοῦ τῆς πρῆτης βαθμίδος, ὅποτε οἱ ρυθμοί ἐξατμίσεως εἰς τὰς τρεῖς βαθμίδας ὑπολογίζονται ἐκ τῶν ἐξισώσεων:

$$\dot{m}_{v_1} + \dot{m}_{v_2} + \dot{m}_{v_3} = 4,44 \text{ kg/s}$$

$$2,31\dot{m}_{v_1} = 2,34 \dot{m}_{v_2} = 2,38 \dot{m}_{v_3}$$

ἐκ τῶν ὁποίων εὐρίσκονται:

$$\dot{m}_{v_1} = 1,51, \dot{m}_{v_2} = 1,48 \text{ καί } \dot{m}_{v_3} = 1,46 \text{ kg/s}$$

Αἱ ἐπιφάνειαι θερμάνσεως θά εἶναι:

$$A_1 = 1,51 \cdot 2,31 \cdot 10^6 / 750 \cdot 39,6 = 115 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 1,48 \cdot 2,34 \cdot 10^6 / 1500 \cdot 19,8 = 116 \text{ m}^2$$

καί 
$$A_3 = 1,46 \cdot 2,38 \cdot 10^6 / 3400 \cdot 8,8 = 116 \text{ m}^2$$

Ἡ εἰσαγωγή τῆς τροφοδοτήσεως εἰς τοὺς 40 °C εἰς τήν τρίτην βαθμίδα (σημεῖον ζέσεως 51,5 °C) θά ἔχη ὡς ἀποτέλεσμα τήν ἐλαφρὰν μεταβολήν τῶν ἀνωτέρω μεγεθῶν. Ἐάν γίνουν δεκταί αἱ αὐταί θερμοκρασίαι ἐξατμίσεως καί συνεπῶς αἱ αὐταί  $\Delta H$ , ἰσοζύγια μάζης καί ἐνθαλπίας δίδουν τὰς ἐξισώσεις:

$$\dot{m}_{v_1} + \dot{m}_{v_2} + \dot{m}_{v_3} = 4,45$$

$$2,31 \dot{m}_{v_1} = 2,34 \dot{m}_{v_2} = 2,38 \dot{m}_{v_3} + 0,26$$

έκ τῶν ὁποίων εὐρίσκονται :

$$\dot{m}_{v_1} = 1,53, \dot{m}_{v_2} = 1,51 \text{ καί } \dot{m}_{v_3} = 1,39 \text{ kg/s}$$

Αἱ ἐπιφάνειαι θερμάνσεως θά εἶναι :

$$A_1 = 1,53 \cdot 2,31 \cdot 10^6 / 750 \cdot 39,6 = 118 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 1,51 \cdot 2,34 \cdot 10^6 / 1500 \cdot 19,8 = 117 \text{ m}^2$$

$$\text{καί } A_3 = (1,39 \cdot 2,38 \cdot 10^6 + 260000) / 3400 \cdot 8,8 = 119 \text{ m}^2$$

Λαμβάνεται κατὰ προσέγγισιν ὡς κοινή ἐπιφάνεια θερμάνσεως εἰς τὰς τρεῖς βαθμίδας ἑξατμίσεως ἢ  $A = 120 \text{ m}^2$ .

Ἡ κατανάλωσις ἀτμοῦ εἰς τὴν πρώτην βαθμίδα θά εἶναι :

$$\dot{m}_s = 1,53 \cdot 2,31 / 2,2 = 1,61 \text{ kg/s}$$

Καί ἡ οἰκονομία ἀτμοῦ:  $E = 4,44 / 1,61 = 2,75$ .

Π α ρ α τ ῆ ρ ῆ σ ι ς :

Ἐκ τοῦ παραδείγματος τούτου δεικνύεται ὅτι, μέ τὴν τροφοδότησιν εἰς τὴν αὐτὴν θερμοκρασίαν, ὁ ἑξατμιστὴρ λειτουργεῖ μέ καλυτέραν ἀπόδοσιν κατ' ἀντιρροήν (μικροτέρα A, μεγαλύτερα E). Εἰς τὴν πρᾶξιν ὅμως ἡ λειτουργία κατ' ἀντιρροήν ἀπαῖτεῖ τὴν ἐγκατάστασιν ἀντλιῶν πρὸς διακίνησιν τοῦ διαλύματος ἀπὸ τῆς τρίτης πρὸς τὴν δευτέραν καί πρώτην βαθμίδα, αἱ ὁποῖαι εὐρίσκονται εἰς ὑψηλότερας πιέσεις. Εἰς τὴν λειτουργίαν καθ' ὁμορροήν ἡ ροή τοῦ διαλύματος γίνεται συνεπεία ὑπαρχουσῶν διαφορῶν πιέσεως.

3. Μελετᾶται ἡ ἐγκατάστασις συστήματος ἑξατμιστήρων πολλαπλῶν βαθμίδων μέ μικροῦς κατακορύφους σωλήνας (VTE) διὰ τὴν ἀφαλάτωσιν τοῦ θαλασσίου ὕδατος. Πρὸ τοῦ λεπτομεροῦς σχεδι-

ασμού απαιτείται ο προκαταρκτικός προσδιορισμός του βελτί-  
στου (optimum) αριθμού των βαθμίδων, δηλαδή του συστήματος  
εκείνου εις τό όποϊον άντιστοιχεί τό ελάχιστον συνολικόν κό-  
στος έγκαταστάσεως καί λειτουργίας.

Δ ε δ ο μ έ ν α :

Παραγωγή 10.000 kg/h άπεσταγμένου ύδατος

Ή πρώτη βαθμής θερμαίνεται μέ κεκορεσμένον άτμόν άπο-  
λύτου πιέσεως 2 bar καί ή τελευταία λειτουργεί εις πίεσιν  
50 Torr.

Ή τροφοδότησις εισέρχεται εις τήν θερμοκρασίαν βρασμού  
καί ή ΑΣΖ είναι άμελητέα.

Ό συντελεστής μεταφοράς θερμότητος εις τήν βαθμίδα (n)  
δίδεται άπό τήν σχέσιν  $U_n = 2500 - 100(n-1)$  εις  $W/m^2K$ .

Ή έπιφάνεια θερμάνσεως είναι ή ίδια εις όλας τάς βα-  
θμίδας.

Αί άπώλειαι θερμότητος θεωροϋνται άμελητέαι.

Ό συμπυκνωτήρ τής τελευταίας βαθμίδος ψύχεται μέ ύδωρ  
θερμοκρασίας 15 °C, τό όποϊον θερμαίνεται εις 30 °C. Συντε-  
λεστής μεταφοράς θερμότητος εις τόν συμπυκνωτήρα 2000  $W/m^2K$ .  
Τό άπεσταγμένον ύδωρ έξέρχεται εις τήν θερμοκρασίαν συμπυ-  
κνώσεως.

Κόστος έγκαταστάσεως έξατμιστήρων καί έξαρτημάτων (έ-  
κτός του συμπυκνωτήρος) μέ βάση τήν έπιφάνειαν θερμάνσεως  
50.000 Δρχ./m<sup>2</sup>. Κόστος συμπυκνωτήρα 20.000 Δρχ./m<sup>2</sup>.

Κόστος άτμοϋ θερμάνσεως 0,2 Δρχ./kg. Κόστος ύδατος ψύ-  
ξεως 3 Δρχ./m<sup>3</sup>.

Ή έγκατάστασις θά λειτουργή 8.000 h/έτος.

Άπόσβεσις τής έγκαταστάσεως έντός 5 έτών.

Περίληψις Λύσεως:

Διερευνάται ή περιοχή μεταξύ 2 καί 12 βαθμίδων, εις τήν  
όποϊαν εύρίσκεται συνήθως ό βέλτιστος αριθμός βαθμίδων (n).  
Διά κάθε τιμήν του (n) ύπολογίζονται οι συντελεσταί καί αι  
ΔΤ των βαθμίδων, άπό τάς όποϊας εύρίσκονται αι θερμοκρασίαι

βρασμοῦ (ἐξισώσεις 3-16 καί 3-17). Ἡ ἐξατμιζομένη ποσότης ὕδατος εἰς ἐκάστην βαθμίδα θά εἶναι  $10.000/n$  kg/h καί ἀπό αὐτήν καί τήν θερμότητα ἐξατμίσεως ὑπολογίζεται ἡ μεταφερομένη θερμότης εἰς κάθε ἐξατμιστήρα καί ἡ κοινή ἐπιφάνεια θερμάνσεως. Ἡ ἐπιφάνεια τοῦ συμπυκνωτήρος ὑπολογίζεται ἀπό ἰσοζύγιον ἐνθαλπίας εἰς τήν τελευταίαν βαθμίδα. Τό ἐτήσιον κόστος τῆς ἐγκαταστάσεως ἰσοῦται μέ τό 20% τοῦ κόστους τῶν ἐπιφανειῶν θερμάνσεως καί συμπυκνώσεως.

Τό ἐτήσιον κόστος λειτουργίας ἰσοῦται μέ τό ἄθροισμα τοῦ κόστους τοῦ ἀτμοῦ θερμάνσεως καί τοῦ ὕδατος ψύξεως. Τά ἀποτελέσματα τῶν ἀνωτέρω ὑπολογισμῶν συγκεντροῦνται εἰς Πίνακα καί Διάγραμμα ἐτησίου κόστους (ἐγκαταστάσεως, λειτουργίας, συνολικοῦ) ὡς πρός τόν ἀριθμόν βαθμίδων ( $n$ ) ἐκ τῶν ὁποίων εὐρίσκεται ὅτι τό ἐλάχιστο συνολικό κόστος ἀντιστοιχεῖ εἰς  $n=8$ .

Τό κόστος τοῦ παραγομένου ἀπεσταγμένου ὕδατος κυμαίνεται μεταξύ 76-170 Δρχ./ $m^3$ . Τό ἐλάχιστον κόστος (76 Δρχ./ $m^3$ ) ἀντιστοιχεῖ εἰς τόν βέλτιστον ἀριθμόν βαθμίδων ( $n=8$ ).

#### 4. ΥΓΡΑΝΣΙΣ ΚΑΙ ΑΦΥΓΡΑΝΣΙΣ

Ἡ ὑγρανσις (humidification) καί ἡ ἄφυγρανσις (Dehumidification) ἀναφέρονται κυρίως εἰς μίγματα ὑδρατμῶν /ἀέρος, ἀλλά αἱ ἀρχαί καί αἱ ἀναλυτικαί μέθοδοι αὐτῶν δύνανται νά ἐφαρμοσθοῦν καί εἰς ἄλλα συστήματα βιομηχανικῆς σημασίας, π.χ. εἰς μίγματα ἀτμῶν ὀργανικοῦ διαλύτου/ἀέρος. Αἱ διεργασίαι αὗται ἐφαρμόζονται εἰς τούς ψυκτικούς πύργους, τήν ξήρανσιν τοῦ ἀέρος, τόν κλιματισμόν καί τήν ξήρανσιν τῶν στερεῶν.

Εἰς τάς διεργασίας ὑγράνσεως καί ἀφυγράνσεως, λαμβάνει χώραν ταυτόχρονος μεταφορά θερμότητος καί μάζης μέ ἐπικρατοῦντα μηχανισμόν τήν μεταφοράν θερμότητος. Διά τόν λόγον τοῦτο ἡ ὑγρανσις καί ἀφυγρανσις μελετῶνται εἰς τάς θερμικάς Διεργασίας. Αἱ βασικαί ἀρχαί καί ἐφαρμογαί τῆς μεταφορᾶς μάζης ἐξετάζονται εἰς τήν Τεχνικήν τῶν Φυσικῶν Διαχωρισμῶν. Ἡ θεωρία τῶν μιγμάτων ὑδρατμῶν / ἀέρος ἐξετάζεται εἰς τήν Ἐφηρμοσμένην Θερμοδυναμικήν.

Ἐνταῦθα ἐξετάζονται τά κύρια σημεῖα τῆς ὑγράνσεως καί τῆς ἀφυγράνσεως καί αἱ κυριώτεροι ἐφαρμογαί αὐτῶν εἰς τάς χημικάς καί συναφεῖς βιομηχανίας. Ἡ κατανόησις τῶν διεργασιῶν τούτων εἶναι ἀπαραίτητος διά τήν μελέτην τῆς ξηράνσεως τῶν στερεῶν ἢ ὁποία ἐξετάζεται εἰς τό ἐπόμενον Κεφάλαιον.

## α) Ύγρομετρία

Τά μίγματα υδρατμών / αέρος εξετάζονται κυρίως εις τήν ατμοσφαιρικήν πίεσιν καί επομένως δύνανται νά θεωρηθοῦν ὡς τέλεια αέρια. Ὑπό τὰς συνθήκας ταύτας ἰσχύει ὁ νόμος τοῦ Dalton:

$$P = P_W + P_A \quad (4-1)$$

ὅπου  $P$  = ὀλική πίεσις, bar

$P_W$  = μερική πίεσις υδρατμών

$P_A$  = μερική πίεσις αέρος

Διά τὰ τέλεια αέρια ἰσχύουν αἱ ἐξισώσεις:

$$P_W V_W = n_W RT \quad (4-2)$$

$$P_A V_A = n_A RT$$

Ἐκ τῶν ἐξισώσεων (4-2) προκύπτει:

$$P_W / P_A = P_W / (P - P_W) = n_W / n_A \quad (4-3)$$

ὅπου  $n_W$  = κmol υδρατμών εἰς ὄγκον  $V$

$n_A$  = κmol αέρος εἰς τόν αὐτόν ὄγκον  $V$

Ἐξ ὀρισμοῦ:

$$n_W = m_W / M_W \text{ καί } n_A = m_A / M_A$$

καί επομένως:

$$n_W / n_A = (m_W / m_A) (M_A / M_W) \quad (4-4)$$

ὅπου  $m_W, m_A$  = μάζα υδρατμών καί αέρος ἀντιστοίχως εἰς τόν αὐτόν ὄγκον, kg.

$M_W, M_A$  = μοριακόν βάρος υδρατμών καί αέρος ἀντιστοίχως.

Ἡ ἀπόλυτος ὑγρασία ( $W$ ) ὀρίζεται ὡς ὁ λόγος μάζης υδρατμών/αέρος, ἤτοι τὰ kg υδρατμών ἀνά kg ξηροῦ αέρος:

$$W = m_W / m_A \quad (4-5)$$

Δι' ἀντικατάστασεως τῶν τιμῶν τοῦ λόγου ( $n_W / n_A$ ) εἰς τήν ἐξίσωσιν (4-3) προκύπτει ἡ ἐξίσωσις ἀπολύτου ὑγρασίας:

$$W = (M_W / M_A) \frac{P_W}{P - P_W} \quad (4-6)$$



Διά τήν συνήθη περίπτωσιν τῆς ἀτμοσφαιρικῆς πιέσεως ( $P \approx 1$  bar) ἡ ἐξίσωσις αὕτη γράφεται ὡς:

$$W = (M_W/M_A) \frac{P_W}{1 - P_W} \quad (4-7)$$

Ἡ ἀπόλυτος ὑγρασία κορεσμοῦ ( $W_s$ ) λαμβάνεται ἐκ τῆς ἐξισώσεως (4-7) δι' ἀντικαταστάσεως τῆς μερικῆς πιέσεως ( $P_W$ ) ὑπό τῆς τάσεως ἀτμῶν τοῦ ὕδατος εἰς τήν δοθείσαν θερμοκρασίαν ( $P_W^0$ ).

Ἡ (%) ἀπόλυτος ὑγρασία ὀρίζεται ὡς:

$$100(W/W_s) = 100(P_W/P_W^0) \left( \frac{1 - P_W^0}{1 - P_W} \right) \quad (4-8)$$

Ἡ σχετικὴ ὑγρασία ( $RH = \text{relative humidity}$ ) ὀρίζεται ὡς ὁ λόγος (%) τῆς μερικῆς πιέσεως πρὸς τήν τάσιν ἀτμῶν τοῦ ὕδατος εἰς δοθείσαν θερμοκρασίαν, ἥτοι:

$$RH = 100(P_W/P_W^0) \quad (4-9)$$

Τὸ σημεῖον δρόσου (dew point) ὀρίζεται ὡς ἡ θερμοκρασία εἰς τήν ὁποίαν τὸ μίγμα ἀτμῶν/ἀέρος καθίσταται κεκορεσμένον καὶ ἐπέρχεται ὑγροποίησης τῶν ἀτμῶν. Εἰς τὸ σημεῖον δρόσου ἰσχύουν αἱ σχέσεις:  $P_W = P_W^0$  καὶ  $RH = 100$ .

Ὁ ὑγρὸς ὄγκος (humid volume,  $V_H$ ) μίγματος ἀτμῶν/ἀέρος, ὀρίζεται ὡς ὁ ὄγκος 1 kg ξηροῦ ἀέρος καὶ τῶν περιεχομένων ἀτμῶν καὶ δίδεται ἀπὸ τήν ἐξίσωσιν (εἰς  $m^3/kg$ ):

$$V_H = \frac{22.4T}{273} (1/M_A + W/M_W) \quad (4-10)$$

ὅπου  $T =$  ἀπόλυτος θερμοκρασία,  $K$ .

Ἡ ὑγρά θερμότης (humid heat,  $C_s$ ) μίγματος ἀτμῶν/ἀέρος, ὀρίζεται ὡς ἡ θερμότης ἡ ἀπαιτουμένη διὰ τήν ἀνύψωσιν τῆς θερμοκρασίας κατὰ 1  $K$  εἰς 1 kg ξηροῦ ἀέρος μετὰ τῆς περιεχομένης ὑγρασίας.

Διὰ τεχνικούς ὑπολογισμούς χρησιμοποιεῖται ἡ ἐξίσωσις:

$$C_s = 1 + 2W \quad (4-11)$$

ὅπου  $C_s$  εἰς  $kJ/kg K$

Είς τήν εξέλιωσιν (4-11) αἱ εἰδικαί θερμότητες τοῦ ξηροῦ ἀέρος καί τῶν ὑδρατμῶν λαμβάνονται ὡς σταθεραί καί ἴσαι πρὸς 1 καί 2 kJ/kg K ἀντιστοίχως.

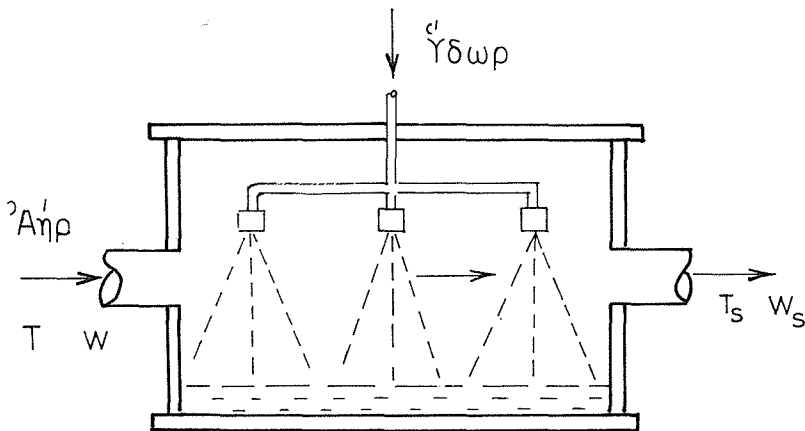
Ἡ ὀλική ἐνθαλπία (H) μίγματος ἀτμῶν/ἀέρος (kJ/kg) εἰς δοθείσαν θερμοκρασίαν (T) ὀρίζεται ὡς ἡ ἐνθαλπία 1 kg ξηροῦ ἀέρος καί τῆς περιεχομένης ὑγρασίας, ὑπολογιζομένη ἀπὸ τήν εξέλιωσιν:

$$H = C_s (T - T_0) + W \Delta H_0 \quad (4-12)$$

ὅπου  $T_0$  = θερμοκρασία ἀναφορᾶς, συνήθως 273 K (0°C)

$\Delta H_0$  = θερμότης ἐξατμίσεως τοῦ ὕδατος εἰς  $T_0$ , kJ/kg.

Ἐάν μίγμα ὑδρατμῶν/ἀέρος διέλθῃ διὰ χώρου ὑγράνσεως, π.χ. χώρου ψεκαζομένου δι' ὕδατος, τοῦτο καθίσταται κεκορεσμένον καί ἡ ἀντιστοιχοῦσα θερμοκρασία ἰσορροπίας καλεῖται ἀδιαβατική θερμοκρασία κορεσμοῦ (σχ. 4-1).



σχ. 4-1. Ἀδιαβατικός κορεσμός τοῦ ἀέρος.

Ἐάν ἡ διεργασία κορεσμοῦ τοῦ ἀέρος εἶναι ἀδιαβατική (π.χ. μονωμένος χώρος τοῦ σχ. 4-1), ἡ ἐνθαλπία τοῦ εἰσερχομένου ἀέρος πρέπει νά ἰσοῦται πρὸς τήν ἐνθαλίαν τοῦ ἐξερχομένου, ἦτοι:

$$C_s (T - T_s) + W \Delta H_s = W_s \Delta H_s \quad (4-13)$$

ὅπου  $W, W_s$  = ἀπόλυτος ὑγρασία εἰσερχομένου καί ἐξερχομένου ἀέρος ἀντιστοίχως.

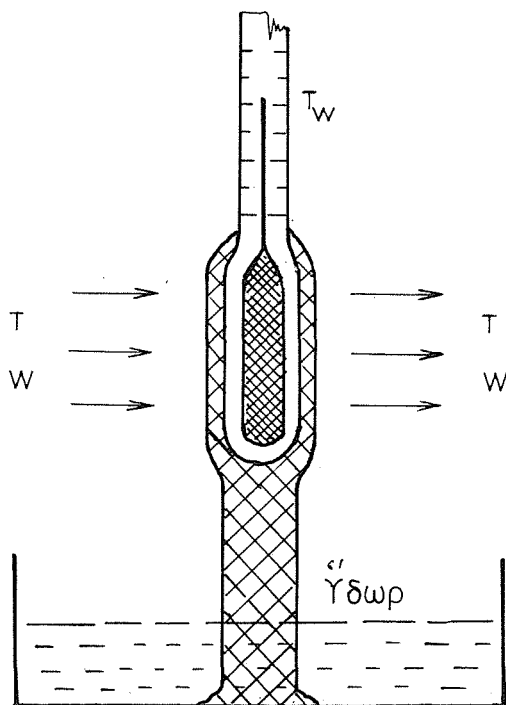
$T_s$  = θερμοκρασία κορεσμένου (έξερχομένου του χώρου) αέρος

$\Delta H_s$  = θερμότης εξατμίσεως του ύδατος εις  $T_s$ .

Χάριν απλοποιήσεως, ένταυθα λαμβάνεται ως θερμοκρασία αναφοράς ή  $T_s$ . Ἡ ἐξίσωσις (4-13) γράφεται καί ως:

$$(W-W_s)/(T-T_s) = -C_s/\Delta H_s \quad (4-14)$$

Ἡ θερμοκρασία ὑγροῦ θερμομέτρου ( $T_w$ ) ὁμοιάζει πρὸς τὴν ἀδιαβατικὴν θερμοκρασίαν κορεσμοῦ ( $T_s$ ) καί ὁρίζεται ως ἡ θερμοκρασία ὑγροῦ θερμομέτρου εὐρισκομένου εἰς θερμικὴν ἰσορροπίαν μετὰ ρεύματος αέρος κινουμένου περίξ αὐτοῦ (Σχ.4-2).



Σχ. 4-2. Ὑγρὸν θερμοόμετρον

Τὸ ὑγρὸν θερμοόμετρον ἀποτελεῖται ἀπὸ κοινὸν ὑάλινον θερμοόμετρον, τὸ δοχεῖον ὑδραργύρου τοῦ ὁποῖου περιβάλλεται ὑπὸ θρυαλλίδος. Τὸ ἄκρον τῆς θρυαλλίδος ἐμβαπτίζεται εἰς δοχεῖ-

ον ύδατος καί οὕτω τό δοχεῖον τοῦ ὑδραργύρου διατηρεῖται ὑγρόν. Ὁ ἀήρ κινεῖται μέ ὑψηλήν ταχύτητα πέριξ τῆς θρυαλλίδος καί ἀποκτᾷ μίαν ὀρισμένην θερμοκρασίαν ἰσορροπίας, ἡ ὁποία ἐξαρτᾶται ἀπό τᾶς συνθήκας ὑγρασίας. Κατά τήν θερμοκινή ἰσορροπίαν ὁ ρυθμός μεταφορᾶς θερμότητος ἐκ τοῦ ἀέρος πρὸς τό ὑγρόν ἰσοῦται πρὸς τόν ρυθμόν μεταφορᾶς θερμότητος δι' ἐξατμίσεως τοῦ ὑδατος, ἦτοι:

$$\dot{q} = hA(T - T_w) = \dot{m}_w \Delta H_w \quad (4-15)$$

ὅπου  $\dot{q}$  = μεταφερομένη θερμότης, W

$h$  = συντελεστής μεταφορᾶς θερμότητος,  $W/m^2K$

$A$  = ἐπιφάνεια ἐναλλαγῆς θερμότητος,  $m^2$

$T$  = θερμοκρασία κυρίας μάζης ἀέρος, K

$T_w$  = θερμοκρασία διεπιφανείας ἀέρος/ὑδατος, ἢ θερμοκρασία ὑγροῦ θερμομέτρου

$\dot{m}_w = N_w M_w$  = ρυθμός ροῆς μάζης, kg/s

$N_w$  = ρυθμός μοριακῆς ροῆς μάζης, kmol/s

$\Delta H_w$  = θερμότης ἐξατμίσεως τοῦ ὑδατος εἰς  $T_w$ , J/kg

Εἰς τήν ἐξίσωσιν (4-15) ἡ μεταβολή τῆς αἰσθητῆς θερμότητος τῶν ἀτμῶν θεωρεῖται ἀμελητέα ἐν σχέσει πρὸς τήν θερμότητα ἐξατμίσεως τοῦ ὑδατος.

Ὁ ρυθμός μεταφορᾶς μάζης δίδεται ἀπό τήν ἐξίσωσιν:

$$N_w = k_y (y_w - y) A \quad (4-16)$$

ὅπου  $k_y$  = συντελεστής μεταφορᾶς μάζης, kmol/s  $m^2$  (μορ. κλ.).

$y_w$  = μορ. κλάσμα ὑδρατμῶν εἰς διεπιφάνειαν ὑδατος/ἀέρος

Τό μοριακόν κλάσμα τῶν ὑδρατμῶν εἰς τόν ἀέρα εἶναι ἐξ ὀρισμοῦ:

$$y = \frac{m_w/M_w}{m_w/M_w + m_a/M_a} \quad (4-17)$$

Ἐκ τῆς ἐξισώσεως (4-5) ἔπεται ὅτι  $m_w = W m_a$  καί:

$$y = \frac{W/M_w}{W/M_w + 1/M_a} \quad (4-18)$$

Διά μικράς τιμᾶς τῆς ἀπολύτου ὑγρασίας (συνήθως περί-

πτωσις) ο παράγων  $W/M_W$  είναι άμελητέος έν σχέσει μέ τόν  $1/M_A$  καί ή έξίσωσις (4-18) γράφεται ώς:

$$Y = \frac{M_A}{M_W} W \quad (4-19)$$

Δηλαδή, είς μικράς συγκεντρώσεις ύγρασίας, τό μοριακόν κλάσμα τών ύδρατιμών είναι άνάλογον τής άπολύτου ύγρασίας. Κατόπιν τούτου ή έξίσωσις (4-16) γράφεται ώς:

$$\dot{m}_W = N_W M_W = k'_y (W_W - W) A \quad (4-20)$$

όπου  $k'_y = M_A k_y$  = συντελεστής μεταφοράς μάζης,  $\text{kg/s m}^2$

Δι' άντικαταστάσεως τής τιμής του ( $\dot{m}_W$ ) είς τήν έξίσωσιν (4-15) προκύπτει:

$$h(T - T_W) = k'_y (W_W - W) \Delta H_W \quad (4-21)$$

Η έξίσωσις (4-21) γράφεται ώς:

$$(W - W_W) / (T - T_W) = -h / k'_y \Delta H_W \quad (4-22)$$

Συμφώνως πρός τάς αναλογίας μεταφοράς μάζης καί θερμότητος, διά τό σύστημα ύγρου θερμομέτρου/άέρος μέ τυρβώδη κίνησιν του άέρος, ίσχύει ή αναλογία Chilton-Colburn:

$$j_H = j_D \quad (4-23)$$

όπου  $j_H, j_D$  = παράγοντες μεταφοράς θερμότητος καί μάζης άντιστοίχως:

$$j_H = \frac{h}{C_s G} (N_{Pr})^{2/3} \quad \text{καί} \quad j_D = \frac{k_y P_{BM}}{G_M} (N_{Sc})^{2/3} \quad (4-24)$$

$N_{Pr} = C_p \eta / k$  = άριθμός Prandtl

$N_{Sc} = \eta / \rho D$  = άριθμός Schmidt

$\eta$  = ίξώδες άέρος,  $\text{kg/m s}$

$\rho$  = πυκνότης άέρος,  $\text{kg/m}^3$

$C_p$  = είδική θερμότης άέρος,  $\text{J/kg K}$

$D$  = συντελεστής διαχύσεως ύδρατιμών είς άέρα,  $\text{m}^2/\text{s}$

$G = M_A G_M$  = ρυθμός ροής άέρος,  $\text{kg/s m}^2$

$C_s$  = ύγρά θερμότης άέρος,  $\text{J/kg K}$

$P_{BM}$  = πίεσις ξηρου άέρος, ένταϋθα  $P_{BM} = 1 \text{ bar}$

Ἡ ἐξίσωσις (4-23) γράφεται ὡς:

$$h/k_y' C_s = N_{Le}^{-2/3} \quad (4-25)$$

ὅπου  $N_{Le} = N_{Pr} / N_{Sc} = \rho C_p D / k =$  ἀριθμός Lewis

$h/k_y' C_s =$  ψυχομετρικός λόγος

Εἰς τὰ μίγματα ὑδρατμῶν/ἀέρος ὁ ψυχομετρικός λόγος (καί ἐπομένως καί ὁ ἀριθμός Lewis) ἰσοῦται μέ τήν μονάδα (1), δηλαδή:

$$h/k_y' = C_s \quad (4-26)$$

Ἡ τελευταία ἐξίσωσις (4-26) καλεῖται "σχέσις Lewis".

Κατόπιν τῶν ἀνωτέρω ἡ ἐξίσωσις (4-22) γράφεται ὡς:

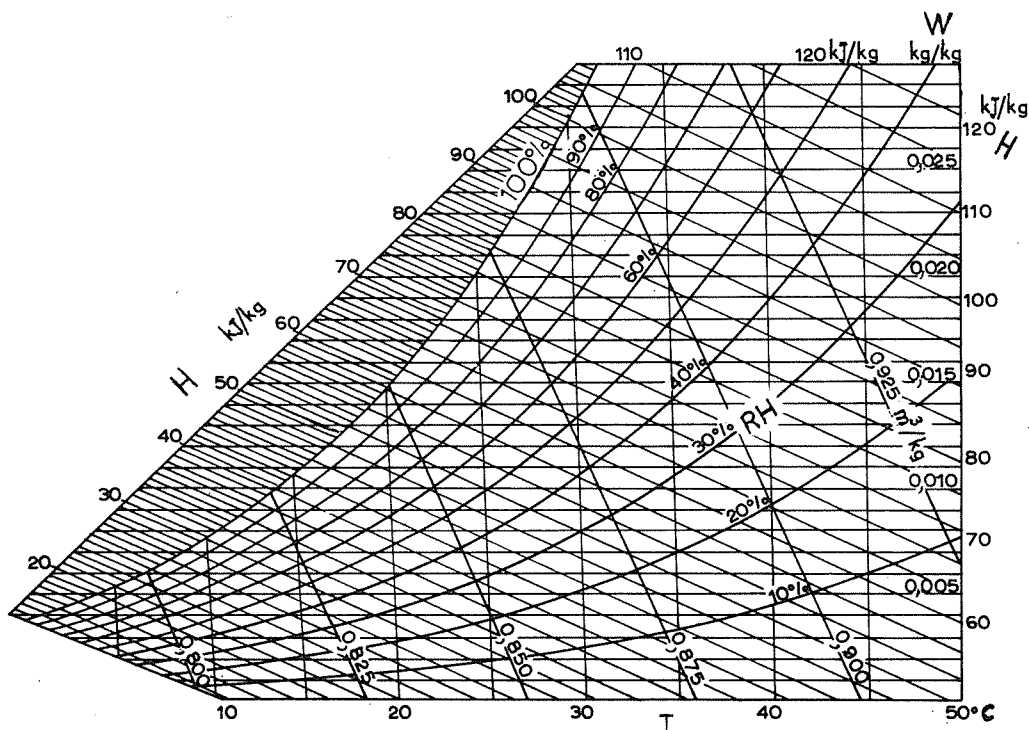
$$(W - W_w) / (T - T_w) = -C_s / \Delta H_w \quad (4-27)$$

Διά συγκρίσεως τῶν ἐξισώσεων (4-27) καί (4-14) ἔπεται ὅτι αἱ εὐθεῖαι γραμμαί τοῦ ὑγροῦ θερμομέτρου καί τῆς ἀδιαβατικῆς θερμοκρασίας ἔχουν τήν αὐτήν κλίσιν καί αἱ δύο αὐταί θερμοκρασίαι συμπίπτουν. Εἰς ἄλλα συστήματα ἀτμῶν (π.χ. ὀργανικῶν οὐσιῶν) / ἀέρος ὁ ψυχομετρικός λόγος εἶναι διάφορος τῆς μονάδος (δέν ἰσχύει ἡ σχέση Lewis) καί οἱ δύο αὐταί θερμοκρασίαι διαφέρουν σημαντικῶς μεταξὺ τῶν.

## β) Ψυχομετρικός Χάρτης

Ὁ ψυχομετρικός χάρτης εἶναι ἓν χρήσιμον διάγραμμα τῶν ἰδιοτήτων μιγμάτων ὑδρατμῶν/ἀέρος εἰς τήν ἀτμοσφαιρικήν πίεσιν. Παρόμοια διαγράμματα δύνανται νά κατασκευασθοῦν καί διά μίγματα ἀτμῶν ἄλλων συστατικῶν/ἀέρος διά τήν ἀτμοσφαιρικήν ἢ διαφορετικὴν πίεσιν. Τά Σχ. (4-3α) καί (4-3β) δεικνύουν τυπικούς ψυχομετρικούς χάρτας δι' ὠρισμένας περιοχάς θερμοκρασιῶν. Λεπτομερέστερα διαγράμματα μεγαλύτερων διαστάσεων εἰς διαφόρους περιοχάς θερμοκρασιῶν παρέχονται εἰς τήν Βιβλιογραφίαν.

Ὡς τετμημένη τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου λαμβάνεται ἡ θερμοκρασία ξηροῦ θερμομέτρου (T). Ἡ τεταγμένη τοῦ δεξιοῦ ἄκρου παριστᾷ τήν ἀπόλυτον ὑγρασίαν (W). Αἱ γραμμαί σταθερᾶς θερμοκρασίας ὑγροῦ θερμομέτρου ( $T_w$ ) παρίστανται δι' εὐθειῶν



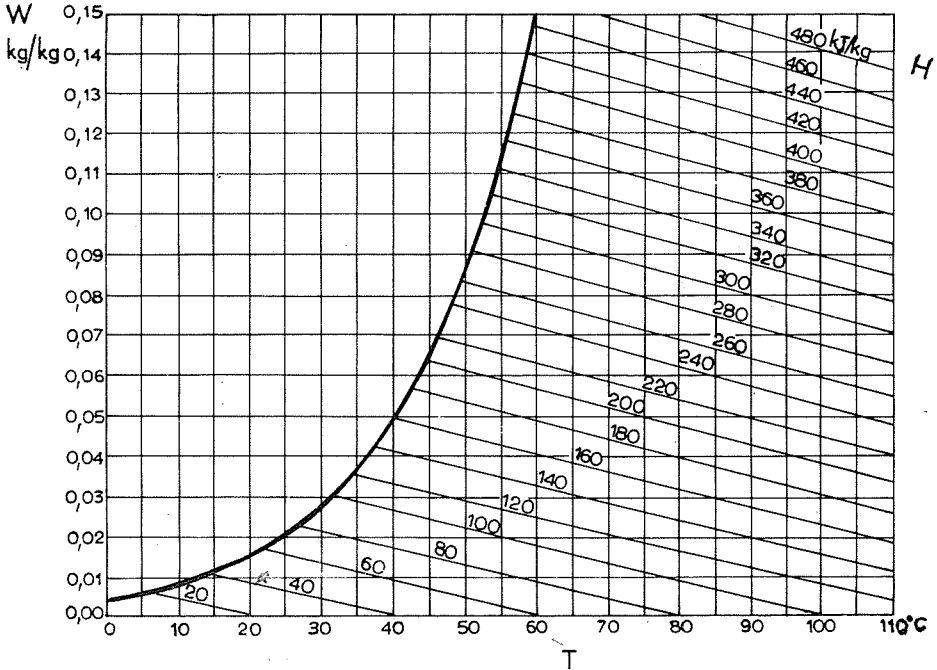
Σχ. 4-3α. Ψυχομετρικός χάρτης περιοχής 10-50°C

κλίσεως ( $-C_s/\Delta H_w$ ) συμφώνως προς τήν ἔξισωσιν (4-27). ὡς ἐξηγήθη προηγουμένως, αἱ εὐθεῖαι τῆς σταθερᾶς ( $T_w$ ) συμπίπτουν μέ τās εὐθείας σταθερᾶς ( $T_s$ ), συμφώνως προς τήν ἔξισωσιν (4-14). Εἰς διαγράμματα ἑτέρων συστημάτων ἀτμῶν/ἀέρος αἱ δύο αὐται εὐθεῖαι ἔχουν διαφορετικὴν κλίσιν.

Αἱ σχετικαὶ ὑγρασίαι παρίστανται ἀπὸ καμπύλας γραμμᾶς (% RH) καὶ ἡ καμπύλη 100 % RH συμπίπτει μέ τήν γραμμὴν κορεσμοῦ τοῦ μίγματος ὑδρατμῶν/ἀέρος. Ὁ ὑγρὸς ὄγκος ( $V_H$ ) καὶ ἡ ἔνθαλπία (H) τῶν διαφόρων μιγμάτων ὑδρατμῶν/ἀέρος, παρίστανται δι' ὄρισμένων εὐθειῶν.

Εἰς τās συνήθεις περιπτώσεις δίδονται αἱ θερμοκρασίαι ξηροῦ καὶ ὑγροῦ θερμομέτρου ( $T, T_w$ ) καὶ διὰ τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου προσδιορίζονται αἱ ὑπόλοιποι ιδιότητες τοῦ μίγματος. Ὁ ψυχομετρικός χάρτης χρησιμοποιεῖται καὶ διὰ

τήν ἀπεικόνισιν διαφόρων διεργασιῶν ὑγράνσεως καί ξηράνσεως ὡς ἐξηγεῖται εἰς τὰς ἐπομένους ἐφαρμογὰς.



Σχ. 4-3β. Ψυχομετρικός χάρτης περιοχῆς 0-110<sup>0</sup>C

### γ) Μέτρησις Ὑγρασίας τοῦ Ἀέρος

Ἡ ὑγρασία τοῦ ἀέρος προσδιορίζεται πειραματικῶς διὰ τῶν ἑξῆς μεθόδων:

1. Ψυχρόμετρον. Διὰ τοῦ ψυχομέτρου μετρῶνται αἱ θερμοκρασίαι τοῦ ξηροῦ καί ὑγροῦ θερμομέτρου καί διὰ τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου προσδιορίζεται ἡ ὑγρασία τοῦ ἀέρος.

Διὰ τήν κανονικὴν λειτουργίαν τοῦ ὑγροῦ θερμομέτρου ἀπαιτεῖται ὁ πλήρης κορεσμός τῆς θρυαλλίδος δι' ὕδατος καί ἡ ἐπίτευξις σαφῶς τυρβώδους ροῆς τοῦ ἀέρος (ταχύτης ἄνω τῶν 5 m/s). Αἱ ὑψηλαί ταχύτητες τοῦ ἀέρος ἐπιτυγχάνονται διὰ τοποθετήσεως τοῦ ψυχομέτρου εἰς κατάλληλον ρεῦμα ἀέρος τοῦ



μελετωμένου συστήματος (π.χ. εἰς τόν ἀγωγόν ἀέρος Ξηραντή-  
ρος).

Διά τήν μέτρησιν τῆς ὑγρασίας τοῦ ἀτμοσφαιρικοῦ ἀέρος εἰς δοθέντα χώρον χρησιμοποιεῖται τό περιστρεφόμενον ψυχρό-  
μετρον (sling psychrometer). Τοῦτο ἀποτελεῖται ἀπό τά δύο θερμομέτρα (Ξηρόν καί ὑγρόν) τά ὅποια περιστρέφονται ταχέ-  
ως διά τῆς χειρός μέχρις ἐπιτεύξεως σταθεραῶς θερμοκρασίας ὑγροῦ θερμομέτρου. Διά τόν αὐτόν σκοπόν χρησιμοποιεῖται καί σύστημα ψυχομέτρου ἐφωδιασμένου διά μικροῦ ἀνεμιστήρος πρὸς ἐπίτευξιν τῆς ἀπαιτουμένης ταχύτητος τοῦ ἀέρος πέριξ τοῦ ὑγροῦ θερμομέτρου.

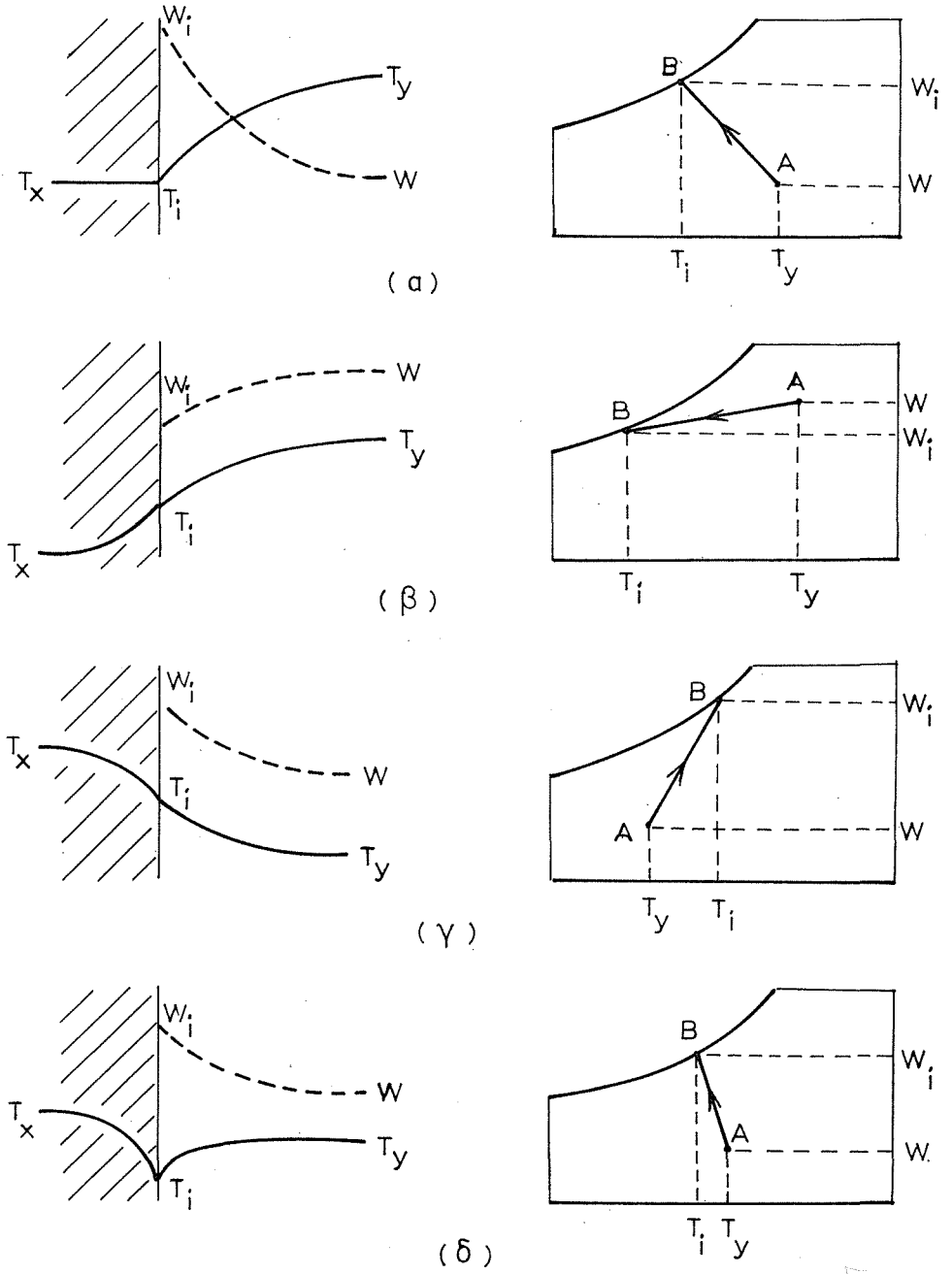
2. Ὑγρόμετρον Σημείου Δρόσου. Τό σημεῖον δρόσου τοῦ μίγματος ὑδρατιῶν/ἀέρος ὑπολογίζεται διά προσδιορισμοῦ τῆς θερμοκρασίας ἐνάρξεως ὑγροποιήσεως τῶν ὑδρατιῶν δι' ἐπαφῆς μέ ψυχομένην στιλπνὴν μεταλλικὴν ἐπιφάνειαν (κάτοπτρον). Ἐκ τοῦ σημείου δρόσου προσδιορίζονται, διά τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου, αἱ λοιπαὶ ἰδιότητες τοῦ μίγματος.

3. Ἡλεκτρικὸν Ὑγρόμετρον. Τοῦτο βασίζεται εἰς τήν ἰσορροπίαν ὑγρασίας ἀέρος ὑγροσκοπικοῦ ἄλατος (κυρίως χλω-  
ριούχου λιθίου). Τό ὑγροσκοπικὸν ἄλας εὐρίσκεται ὡς λεπτόν στρώμα ἐπὶ μονωτικοῦ ὑλικοῦ, ἡ ἠλεκτρικὴ ἀντίστασις τοῦ ὁποίου μεταβάλλεται μετὰ τῆς περιεκτικότητος ὑγρασίας τοῦ ἄλατος. Ἐπομένως ἡ ὑγρασία τοῦ ἀέρος προσδιορίζεται ὡς συνάρτησις τῆς ἠλεκτρικῆς ἀντιστάσεως τοῦ κελλίου μετρήσεως.

4. Ὑγρόμετρον Τριχός. Τοῦτο βασίζεται εἰς τήν ἐπιμή-  
κυνσιν τριχός ἢ ἄλλης ὀργανικῆς οὐσίας διά προσροφήσεως ὑ-  
γρασίας τοῦ ἀέρος. Ἡ μεταβολὴ τοῦ μήκους τῆς τριχός ἐπιφέ-  
ρει μετακίνησιν δείκτου ἐπὶ βαθμολογημένης κλίμακος σχετι-  
κῆς ὑγρασίας. Τό ὄργανον τοῦτο δέν θεωρεῖται ἀκριβές δι' ἀ-  
κραίας τιμὰς τῆς ὑγρασίας (ὑγρός ἢ Ξηρός ἀήρ).

#### δ) Διεργασαὶ Ὑγράνσεως καὶ Ἀφυγράνσεως

Αἱ κυριώτεραι διεργασαὶ ὑγράνσεως καὶ ἀφυγράνσεως πα-  
ρίστανται διαγραμμaticῶς εἰς τό Σχ. (4-4). Εἰς ἐκάστην πε-  
ρίπτωσιν δίδονται παραστατικῶς αἱ μεταβολαὶ τῆς θερμοκρα-  
σίας καὶ ὑγρασίας εἰς ἀπλοῦν διάγραμμα καὶ ἐπὶ τοῦ ψυχρο-  
μετρικοῦ χάρτου.



Σχ. 4-4. Διεργασίες υγράνσεως καὶ ἀφυγράνσεως (α) Ἀδιαβατική ὑγρανσις, (β) ἀφύγρανσις, (γ) ὑγρανσις εἰς τὴν κορυφὴν ψυκτικοῦ πύργου, (δ) ὑγρανσις εἰς τὸν πυθμὲνα ψυκτικοῦ πύργου.

Αι δύο πρώται διεργασίαι τῆς ὑγράνσεως καί ἀφυγράνσεως ἀποτελοῦν τὴν βάσιν τοῦ κλιματισμοῦ τοῦ ἀέρος (air conditioning) αἱ δέ ἐπόμεναι ἐφαρμόζονται εἰς τοὺς ψυκτικούς πύργους.

1. Ἀδιαβατικὴ Ὑγρανσις. Ἡ ἀδιαβατικὴ ἢ ἀδιάθερμος ὑγρανσις ἀνεφέρθη ἤδη εἰς τὸν ἀδιαβατικὸν κορεσμόν τοῦ ἀέρος (Σχ. 4-1). Εἰς πολλάς περιπτώσεις ἡ ἀδιαβατικὴ ὑγρανσις εἶναι μερική, ἥτοι ὁ λαμβανόμενος ἀήρ δέν εἶναι κεκορεσμένος. Ὁ ρυθμὸς μεταφορᾶς αἰσθητῆς θερμότητος ἐκ τοῦ ἀέρος πρὸς τὸ ὕδωρ ἰσοῦται πρὸς τὸν ρυθμὸν μεταφορᾶς τῆς λανθανούσης θερμότητος τοῦ ἐξατμιζομένου ὕδατος. Ὑπὸ τὰς συνθήκας ταύτας ἡ θερμοκρασία τῆς κυρίας μάζης τοῦ ὕδατος ( $T_x$ ) παραμένει κατὰ προσέγγισιν σταθερά καί ἴση πρὸς τὴν θερμοκρασίαν τῆς διεπιφανείας ὑγροῦ/ἀέρος ( $T_i$ ). Διὰ τὴν πραγματοποίησιν τῆς ἀδιαβατικῆς ὑγράνσεως ἀπαιτεῖται ὅπως  $T_y > T_i$  καί  $W_i > W$ .

Εἰς τὴν πρᾶξιν ἡ ὑγρανσις τοῦ ἀέρος ἐπιτυγχάνεται διὰ ψεκασμοῦ ὕδατος, δι' ἐξατμίσεως ὕδατος ἢ διὰ διαβιβάσεως κεκορεσμένου ἀτμοῦ εἰς τὸν κλιματιζόμενον χῶρον.

2. Ἀφύγρανσις. Ἀήρ ὑψηλῆς ὑγρασίας, ἐρχόμενος εἰς ἐπαφήν μέ ψυχρὸν ὕδωρ, ἀψυδατοῦται διὰ μεταφορᾶς μάζης καί θερμότητος. Ἡ θερμότης τῆς κυρίας μάζης τοῦ ὑγροῦ πρέπει νὰ εἶναι χαμηλοτέρα τῆς θερμοκρασίας τῆς διεπιφανείας, διὰ νὰ καταστή δυνατὴ ἡ μεταφορὰ τῆς θερμότητος ἐκ τῆς διεπιφανείας πρὸς τὸ κυρίως ὑγρὸν.

Ἡ ἀφύγρανσις παρίσταται διὰ τῆς γραμμῆς (AB) ἐπὶ τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου, ἡ ὁποία ἀποδεικνύεται πειραματικῶς ὅτι εἶναι εὐθεία. Εἰς τὴν πρᾶξιν ἡ ἀφύγρανσις ἐπιτυγχάνεται δι' ἐπαφῆς τοῦ ἀέρος μέ στρῶμα ἢ σταγονίδια ψυχροῦ ὑγροῦ (ὕδατος ἢ ὑδατικοῦ διαλύματος) ἢ μέ ψυχομένην ἐπιφάνειαν ἐναλλάκτου θερμότητος διὰ τοῦ ὁποίου κυκλοφορεῖ ψυχρὸν ὕδωρ ἢ ψυκτικὸν μέσον (Κεφ. 2.1γ). Ἡ ἀφύγρανσις τοῦ ἀέρος διὰ προσροφήσεως εἰς στερεᾶς οὐσίας ἐξετάζεται εἰς τὴν Τεχνικὴν τῶν Φυσικῶν Διαχωρισμῶν.

3. Ὑγρανσις εἰς Ψυκτικούς Πύργους. Εἰς τοὺς ψυκτικούς πύργους (βλέπε κατωτέρω) θερμὸν ὕδωρ ψύχεται διαβιβαζόμενον

είναι ρεῦμα αέρος χαμηλῆς θερμοκρασίας καί ὑγρασίας. Εἰς τό ἄνω τμήμα τοῦ πύργου, ἡ διεργασία ψύξεως εἶναι ἀκριβῶς ἡ ἀντίστροφος τῆς ἀφυγράνσεως, ὡς δεικνύεται καί εἰς τόν ψυχρομετρικόν χάρτην. Ἡ θερμοκρασία καί ἡ ὑγρασία τοῦ αέρος εἶναι κατώτεροι τῶν ἀντιστοίχων τιμῶν τῆς διεπιφανείας.

Εἰς τό κατώτερον τμήμα τοῦ πύργου ἡ θερμοκρασία τῆς διεπιφανείας δυνατόν νά εἶναι κατωτέρα τῆς θερμοκρασίας τοῦ αέρος, ἐνῶ πρέπει πάντοτε ἡ θερμοκρασία τοῦ ὕδατος νά εἶναι ὑψηλοτέρα τῆς θερμοκρασίας τοῦ αέρος. Ὑπό τὰς συνθήκας ταύτας ἡ κατανομή τῶν θερμοκρασιῶν παρουσιάζει τό χαρακτηριστικόν σχῆμα τοῦ διαγράμματος 4-4 (δ).

#### ε) Ἀνάλυσις Μεταφοῶς Θερμότητος καί Μάζης

Ὁ ἀναλυτικὸς ὑπολογισμὸς τῶν ἐγκαταστάσεων ὑγράνσεως καί ἀφυγράνσεως βασίζεται εἰς τὴν θερμοδυναμικὴν ἰσοροπίαν τῶν μιγμάτων ὑδρατμῶν/αέρος καί τὴν κινητικὴν μεταφορᾶς θερμότητος καί μάζης. Αἱ ἐφαρμοζόμεναι μέθοδοι ἀναλύσεως εἶναι παρόμοιαι πρὸς τὰς μεθόδους ὑπολογισμοῦ μεταφορᾶς μάζης εἰς συστήματα ἀπορροφήσεως ἀερίων/ὑγροῦ (βλέπε Ἀπορρόφησην).

Τό Σχ. (4-5) παριστᾷ πύργον διαφορικῆς ἐναλλαγῆς θερμότητος καί μάζης μεταξὺ ἀνερχομένου αέρος καί κατερχομένου ὕδατος (σύστημα ἀντιρροῆς).

Ὁ πύργος ἔχει ἐνεργὸν ὕψος μεταφορᾶς θερμότητος καί μάζης  $Z$  (m) καί ἐγκαρσίαν διατομὴν  $A$  ( $m^2$ ). Ἡ διατομὴ ( $A$ ) ὑπολογίζεται ἐπὶ κενοῦ πύργου δηλαδὴ δέν λαμβάνονται ὑπ' ὄψιν τὰ περιεχόμενα πληρωτικὰ ὑλικά (packed materials), τὰ ὁποῖα προστίθενται πρὸς αὔξησιν τῆς εἰδικῆς ἐπιφανείας μεταφορᾶς θερμότητος καί μάζης.

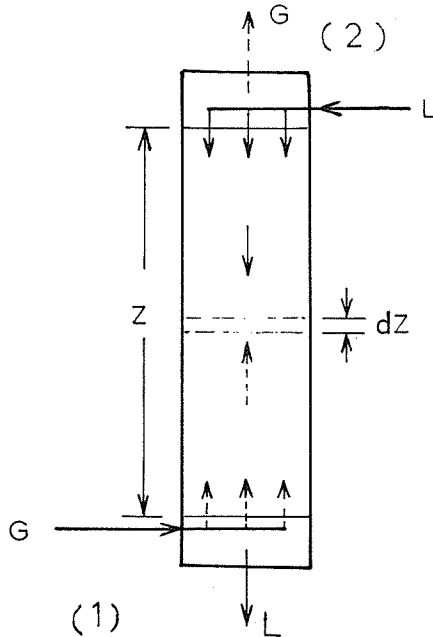
Εἰς διαφορικὸν ὕψος ( $dZ$ ) τοῦ πύργου ἰσχύει τό ἰσοζύγιον μάζης:

$$dL = G dW \quad (4-28)$$

• ὅπου  $L$  = ρυθμὸς ροῆς ὕδατος,  $kg/s$   $m^2$

$G$  = ρυθμὸς ροῆς αέρος,  $kg/s$   $m^2$

$W$  = ἀπόλυτος ὑγρασία τοῦ αέρος,  $kg/kg$



Σχ. 4-5. Πύργος έναλλαγής θερμότητας και μάζης.

Ίσοζύγιον ένθαλπίας είς τό ίδιον διαφορικόν ύψος δίδει

$$L C_p dT_x = G dH \quad (4-29)$$

όπου  $C_p$  = είδική θερμότης τοϋ ύδατος, J/kg K

$T_x$  = θερμοκρασία τοϋ ύδατος

$H$  = ένθαλπία τοϋ άέρος, J/kg

Ή μεταβολή τής ένθαλπίας τοϋ ύγροϋ ίσοϋται πρός τήν μεταφερομένην θερμότητα έκ τοϋ ύγροϋ πρός τήν έπιφάνειαν (θεωροϋντες τήν περίπτωσησιν ψύξεως τοϋ ύδατος).

$$L C_p dT_x = h_x \alpha_H (T_x - T_i) dz \quad (4-30)$$

όπου  $h_x$  = συντελεστής μεταφοράς θερμότητος έντός τοϋ ύγροϋ  
W/m<sup>2</sup>K

$\alpha_H$  = είδική έπιφάνεια μεταφοράς θερμότητος, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Ή έξίσωσις (4-30) γράφεται καί ώς:

$$\frac{dT_x}{T_x - T_i} = \frac{h_x \alpha_H}{LC_p} dz \quad (4-31)$$

Κατ' αναλογία, η μεταφορά θερμότητας εκ της διεπιφανείας ύδατος/αέρος προς την κυρίαν μάζαν του αέρος, δίδει την εξίσωσιν:

$$\frac{dT_y}{T_i - T_y} = \frac{h_y \alpha_H}{GC_s} dz \quad (4-32)$$

ὅπου  $h_y$  = συντελεστής μεταφοῦς θερμότητος εἰς τὸν αέρα.

Ὁ ρυθμὸς μεταφοῦς ὑγρασίας ἐκ τῆς διεπιφανείας πρὸς τὴν κυρίαν μάζαν τοῦ αέρος εἶναι:

$$G dW = k'_y (W_i - W) \alpha_M dz \quad (4-33)$$

ὅπου  $k'_y$  = συντελεστής μεταφοῦς μάζης, kg/s m<sup>2</sup>

$\alpha_M$  = εἰδικὴ ἐπιφάνεια μεταφοῦς μάζης, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

Αἱ εἰδικαὶ ἐπιφάνειαι μεταφοῦς θερμότητος καὶ μάζης εἶναι ἴσαι, ἐάν τὸ ὕδωρ καλύπτει τελείως τὰ πληρωτικὰ ὑλικά ( $\alpha_H = \alpha_M = \alpha$ ).

Τὸ ὕψος τοῦ πύργου (Z) ὑπολογίζεται δι' ὀλοκληρώσεως τῶν ἐξισώσεων (4-31), (4-32) καὶ (4-33):

$$Z = \frac{LC_p}{h_x \alpha} \int_1^2 \frac{dT_x}{T_x - T_i} = \frac{GC_s}{h_y \alpha} \int_1^2 \frac{dT_y}{T_i - T_y} = \frac{G}{k'_y \alpha} \int_1^2 \frac{dW}{W_i - W} \quad (4-34)$$

ὅπου (1), (2) = πυθμὴν καὶ κορυφὴν τοῦ πύργου ἀντιστοίχως.

### στ) Ψυκτικοὶ Πύργοι

Μεγάλαι ποσότητες ὕδατος ἀπαιτοῦνται διὰ τὴν ψύξιν τῶν θερμοηλεκτρικῶν ἐγκαταστάσεων, τῶν συμπυκνωτῶν βιομηχανικῆς ἐξατμίσεως, τῶν βιομηχανικῶν ἐναλλακτῶν θερμότητος κλπ. Τὸ ὕδωρ τοῦτο δύναται νὰ ἀναχρησιμοποιηθῇ ἀφοῦ προηγουμένως ψυχθῇ εἰς ψυκτικὸν πύργον (cooling tower).

Εἰς τοὺς ψυκτικούς πύργους ἐπιτυγχάνεται σημαντικὴ ἐλάττωσις τῆς θερμοκρασίας τοῦ ὕδατος δι' ἐξατμίσεως μέρους αὐτοῦ ὑπὸ ρεύματος αέρος διαβιβαζομένου κατ' ἀντιρροήν ἢ κατὰ ἐγκαρσίαν ροήν. Ὁ μηχανισμὸς μεταφοῦς θερμότητος καὶ μάζης παρίσταται εἰς τὸ σχ. (4-4). Ἡ ἀνάλυσις τῆς μεταφοῦς θερμότητος καὶ μάζης βασίζεται εἰς τὰς ἐκτεθείσας γενι-

κάς άρχάς (4ε) καί τό ύψος τοϋ πύργου δύναται κατ'άρχήν νά υπολογισθῆ διά μιᾶς τῶν ἐξισώσεων (4-34). Εἰς τήν προᾶξιν ἡ επίλυσις τῶν ἐξισώσεων (4-34) εἶναι δυσχερῆς καί ἀντ'αὐτῶν χρησιμοποιεῖται ἡ ἐξίσωσις Merkel, ἡ ὁποία προκύπτει ὡς ἀκολούθως:

Εἰς τό διαφορικόν ύψος ( $dZ$ ) τοϋ πύργου ἀντιρροῆς ἡ θερμότης ἡ ἀπομακρυνομένη ἐκ τοϋ ὕδατος ἰσοῦται πρὸς τήν θερμότητα τήν μεταφερομένην ἐκ τῆς διεπιφανείας ὕδατος/ἀέρος πρὸς τήν κυρίαν μάζαν τοϋ ἀέρος, ἦτοι:

$$LC_p dT_x = h_x \alpha_H (T_i - T_y) dZ \quad (4-35)$$

Διά τό μίγμα ὕδατιμῶν/ἀέρος ὁ ψυχρομετρικός λόγος (ἐξίσωσις (4-25)) ἰσοῦται πρὸς τήν μονάδα, ἦτοι  $h_y = k'_y C_s$  καί ἡ ἐξίσωσις (4-35) δίδει:

$$LC_p dT_x = k'_y \alpha_H C_s (T_i - T_y) dZ \quad (4-36)$$

Διά μικράς μεταβολάς τῆς ἀπολύτου ὑγρασίας ( $W_i \approx W$ ) ἐκ τῆς ἐξισώσεως (4-12) προκύπτει κατά προσέγγισιν:

$$H_i - H_y = C_s (T_i - T_y) \quad (4-37)$$

Δι'ἀντικαταστάσεως τῆς τιμῆς ἐνθαλπίας καί ὀλοκληρώσεως, ἡ ἐξίσωσις (4-36) δίδει τήν ἐξίσωσιν Merkel:

$$Z = \frac{LC_p}{k'_y \alpha} \int_1^2 \frac{dT_x}{H_i - H_y}$$

Ἡ ὀλοκλήρωσις εἰς τήν ἐξίσωσιν Merkel γίνεται μεταξϋ τῶν θερμοκρασιῶν τοϋ πυθμένος ( $T_{x_1}$ ) καί τῆς κορυφῆς ( $T_{x_2}$ ) τοϋ πύργου.

Κατ'ἀναλογίαν πρὸς τήν ἐξίσωσιν (2-17), ἡ ἐξίσωσις Merkel γράφεται ὡς:

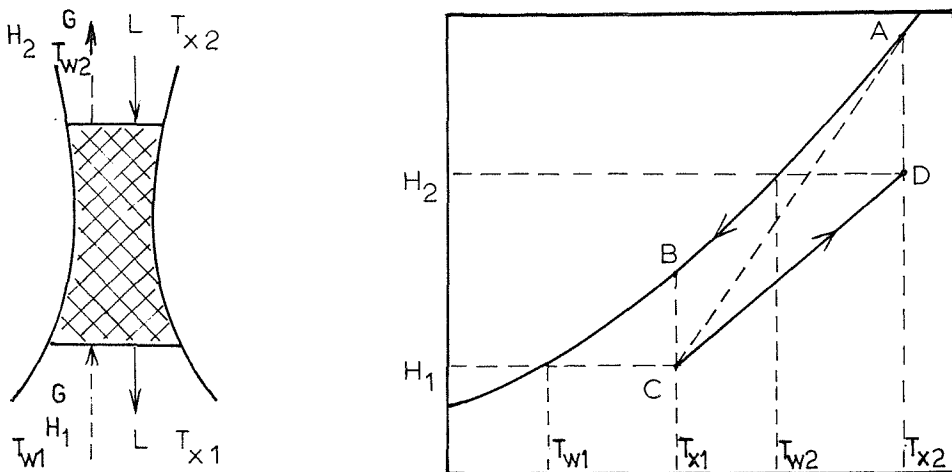
$$A = (HTU) (NTU) \quad (4-39)$$

ὅπου  $HTU = L/k'_y \alpha =$  ὕψος μονάδος μεταφορᾶς

$$NTU = C_p \int_1^2 \frac{dT_x}{H_i - H_y} = \text{ἀριθμός μονάδων μεταφορᾶς}$$

Ὡς ἐξηγεῖται κατωτέρω, ὁ (NTU) δύναται νά υπολογισθῆ

διά γραφικής ολοκλήρωσης. Ἡ λειτουργία ἑνός ψυκτικοῦ πύργου παρίσταται εἰς τό Σχ. (4-6).



Σχ. 4-6. Διάγραμμα ἑνθαλπίας - θερμοκρασίας ψυκτικοῦ πύργου. (AB) Καμπύλη κορεσμοῦ, (CD) γραμμή λειτουργίας

Εἰς τὴν κορυφήν τοῦ πύργου διαβιβάζεται ὕδωρ θερμοκρασίας  $T_{x2}$  καὶ ἐκ τοῦ πυθμένους ἐξέρχεται ψυχρὸν ὕδωρ θερμοκρασίας  $T_{x1}$ . Ἡ διεργασία ψύξεως τοῦ ὕδατος παρίσταται εἰς τό διάγραμμα ἑνθαλπίας ἀέρος - θερμοκρασίας ὕδατος ( $H-T_x$ ) τοῦ Σχ. (4-6). Ἡ γραμμή ἰσορροπίας παριστᾷ τὴν ἑνθαλίαν τοῦ κεκορεσμένου ἀέρος ( $H_i$ ) εἰς τὴν διεπιφάνειαν ὕδατος/ἀέρος, ἥτοι εἰς θερμοκρασίαν  $T_i$ . Τὰ σημεῖα A καὶ B ἀντιστοιχοῦν εἰς τὴν εἴσοδον καὶ ἐξοδον τοῦ ὕδατος εἰς τὸν πύργον.

Κατὰ τὴν λειτουργίαν τῶν ψυκτικῶν πύργων τό ἐξάτμιζό - μενον ποσοστὸν τοῦ ὕδατος εἶναι περίπου 2-3% καὶ συνεπῶς οἱ ρυθμοὶ ροῆς τοῦ ὕδατος (L) καὶ τοῦ ἀέρος (G) δύνανται νά θεωρηθοῦν κατὰ προσέγγισιν ὡς σταθεροί. Ἴσοζύγιον θερμότητος εἰς ὅλοκληρον τὸν πύργον δίδει:

$$G(H_2 - H_1) = LC_p(T_{x2} - T_{x1}) \quad (4-40)$$

Ἡ ἐξίσωσις (4-40) παριστᾷ τὴν εὐθείαν γραμμὴν (CD) ἐπὶ τοῦ διαγράμματος ( $H-T_x$ ) τοῦ Σχ. (4-6), ἡ ὁποία καλεῖται γραμμή λειτουργίας (operating line) τοῦ ἀέρος. Τὰ σημεῖα C καὶ D ἀντιστοιχοῦν εἰς τὴν ὑγρομετρικὴν κατάστασιν τοῦ ἀέρος εἰς τὸν πυθμένα καὶ τὴν κορυφήν τοῦ πύργου ἀντιστοίχως. Ἡ ὑ-



γρομετρική κατάσταση ορίζεται εἰς τὴν περίπτωσιν ταύτην διὰ τῆς ἐνθαλπίας (H) καὶ τῆς θερμοκρασίας ὑγροῦ θερμομέτρου ( $T_w$ ) εἰς ἕκαστον σημεῖον τοῦ πύργου.

Ἡ θερμοκρασία ὑγροῦ θερμομέτρου ὀρίζει βασικῶς τὴν ψυκτικὴν ἰκανότητα τοῦ ἀέρος. Ἡ διαφορὰ θερμοκρασιῶν ψυχθέντος ὕδατος - ὑγροῦ θερμομέτρου εἰσερχομένου ἀέρος ( $T_{x_1} - T_{w_1}$ ) καλεῖται προσέγγισις θερμοκρασιῶν (approach) διὰ δοθέν σύστημα ψυκτικοῦ πύργου. Ἡ προσέγγισις θερμοκρασιῶν τείνει πρὸς τὸ μηδέν διὰ πύργους ἀπείρου ὕψους. Εἰς τὴν πρᾶξιν χρησιμοποιοῦνται προσεγγίσεις μεταξύ  $2-4^{\circ}\text{C}$ . Ἡ διαφορὰ θερμοκρασιῶν ( $T_{x_2} - T_{x_1}$ ) καλεῖται περιοχὴ ψύξεως τοῦ ὕδατος (range) καὶ κυμαίνεται μεταξύ  $5-10^{\circ}\text{C}$ .

Εἰς τὸ Σχ. (4-6) ὀρίζεται ἀρχικῶς τὸ σημεῖον A ἀπὸ τὴν θερμοκρασίαν τοῦ θερμοῦ ὕδατος  $T_{x_2}$  καὶ τὴν καμπύλην ἰσορροπίας. Τὰ σημεῖα B καὶ C ὀρίζονται ἀπὸ τὴν γνωστὴν θερμοκρασίαν ὑγροῦ θερμομέτρου τοῦ ἀέρος εἰσόδου ( $T_{w_1}$ ) καὶ τὴν λαμβανομένην προσέγγισιν ( $T_{x_1} - T_{w_1}$ ). Ἡ εὐθεία (CA) παριστᾷ τὴν γραμμὴν λειτουργίας μὲ τὸν ἐλάχιστον λόγον ροῆς ἀέρος / ὕδωρ  $(G/L)_{\min}$ . Εἰς τὴν ὀριακὴν ταύτην περίπτωσιν τὸ ἀπαιτούμενον ὕψος τοῦ πύργου καθίσταται ἄπειρον.

Ἡ πραγματικὴ γραμμὴ λειτουργίας τοῦ πύργου (CD) εὐρίσκεται διὰ τῆς παραδοχῆς ἑνὸς ὀρισμένου λόγου ροῶν  $(G/L)$  διὰ τοῦ ὁποίου ἐπιτυγχάνεται ἡ ἐπιθυμητὴ ψύξις τοῦ ὕδατος εἰς πύργον πρακτικῶν καὶ οἰκονομικῶν διαστάσεων. Συνήθως λαμβάνεται  $(G/L) = (1,2 \text{ ἕως } 1,5) (G/L)_{\min}$ . Οὕτως, ἡ γραμμὴ λειτουργίας (CD) χαράσσεται ἐκ τοῦ σημείου C μὲ κλίσιν  $(L/G)$ .

Τὸ διάγραμμα  $(H-T_x)$  χρησιμεύει διὰ τὸν γραφικὸν ὑπολογισμόν τοῦ (NTU): Προσδιορίζονται πρῶτον αἱ διαφοραὶ  $(H_i - H_y)$  εἰς διαφόρους τιμὰς τοῦ  $T_x$  καὶ ἀκολούθως κατασκευάζεται διὰ γραμμὰ μὲ συντεταγμένας  $1/(H_i - H_y)$  καὶ  $T_x$ . Διὰ γραφικῆς ὀλοκληρώσεως τοῦ διαγράμματος τούτου μεταξύ  $T_{x_1}$  καὶ  $T_{x_2}$  προσδιορίζεται ὁ (NTU). Τὸ (HTU) τῶν ψυκτικῶν πύργων ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὰς συνθήκας λειτουργίας, τὴν γεωμετρικὴν διάταξιν καὶ τὸ εἶδος τῶν πληρωτικῶν ὑλικῶν. Τὸ (HTU) τῶν πύργων μετὰ μηχανικοῦ ἀερισμοῦ κυμαίνεται μεταξύ  $0,5-1 \text{ m}$ .

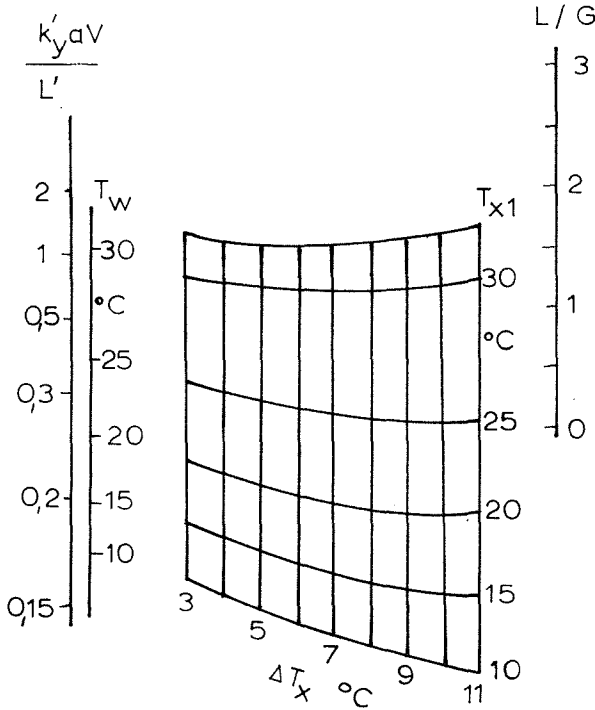
Ἡ ἐξίσωσις Merkel γράφεται καὶ ὡς:

$$\frac{k'_y a V}{L'} = C_p \int_1^2 \frac{dT_x}{H_i - H_y} \quad (4-41)$$

όπου  $V = AZ =$  όγκος του πύργου,  $m^3$

$L' = LA =$  ρυθμός ροής του ύδατος,  $kg/s$

Η επίλυσις της εξισώσεως (4-41) γίνεται καί διά του Νομογραφήματος του Σχ. (4-7).



Σχ. 4-7. Νομογράφημα ύπολογισμοϋ ψυκτικού πύργου.

Αρχικώς όρίζεται ό λόγος τών ρυθμών ροής ύδατος προς άέρα ( $L/G$ ), ή θερμοκρασία υγροϋ θερμομέτρου του άέρος είσόδου ( $T_{w1}$ ), ή περιοχή ψύξεως ( $\Delta T_x$ ) καί ή επίθυμητή θερμοκρασία του έξερχομένου ύδατος ( $T_{x1}$ ). Ακολουθως, επί του Νομογραφήματος χαράσσεται ή εύθεια ή συνδέουσα τό σημείον  $T_{w1}$  μέ τό σημείον ( $\Delta T_x, T_{x1}$ ) του δικτύου καί έκ του σημείου ( $L/G$ ) φέρεται παράλληλος προς τήν άνωτέρω εύθειαν, ή όποία τέμνει τόν άξονα τών ( $k'_y a V/L'$ ) είς ώρισμένον σημείον. Έκ τής τιμής

του τελευταίου σημείου υπολογίζεται ο όγκος του πύργου (V) διά παραδοχής ώρισμένων τιμών των  $k'_{\alpha}$ , και L (διά τό ύδωρ  $C_p = 4,18 \text{ kJ/kg K}$ ).

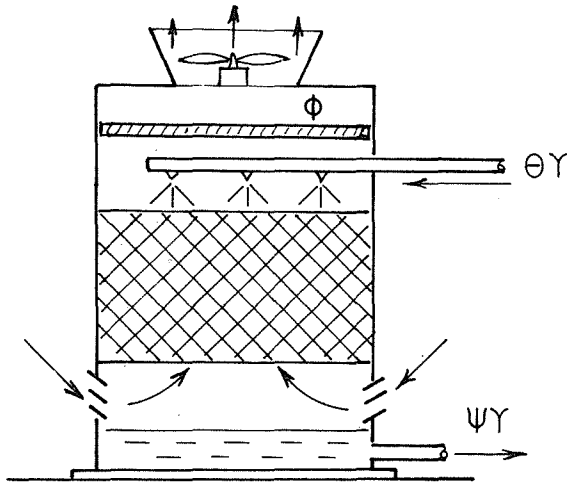
Ο σχεδιασμός των ψυκτικών πύργων απαιτεί γνώσιν των θερμοκρασιών του ύγρου θερμομέτρου του άέρος, αι οποῖαι παρέχονται εἰς Πίνακας τῆς Μετεωρολογικῆς Ὑπηρεσίας διά διαφόρους περιοχάς τῆς χώρας καθ' ὄλον τό ἔτος. Ὡς βάσις σχεδιασμοῦ λαμβάνονται αι δυσμενέστεραι συνθήκαι λειτουργίας, αι οποῖαι ἀντιστοιχοῦν εἰς τήν μεγίστην θερμοκρασίαν ύγρου θερμομέτρου του άέρος διά τήν δοθεῖσαν περιοχήν.

Οἱ πύργοι μηχανικοῦ ἀερισμοῦ χρησιμοποιοῦνται εἰς πολλές ἐγκαταστάσεις μικροῦ και μεσαίου μεγέθους εἰς διατάξεις ἀντιρροῆς ἢ ἐγκαρσίας ροῆς. Τό Σχ. (4-8) δεικνύει ψυκτικόν πύργον ἀντιρροῆς μέ ἐλκυσμόν άέρος, ἥτοι μέ τούς ἀνεμιστήρας εἰς τήν κορυφήν τῆς ἐγκαταστάσεως (induced-draft towers) Εἰς ὠρισμένους πύργους χρησιμοποιεῖται κατάθλιψις του άέρος, ἥτοι οἱ ἀνεμιστήρες τοποθετοῦνται εἰς τήν βάσιν αὐτῶν (forced - draft towers).

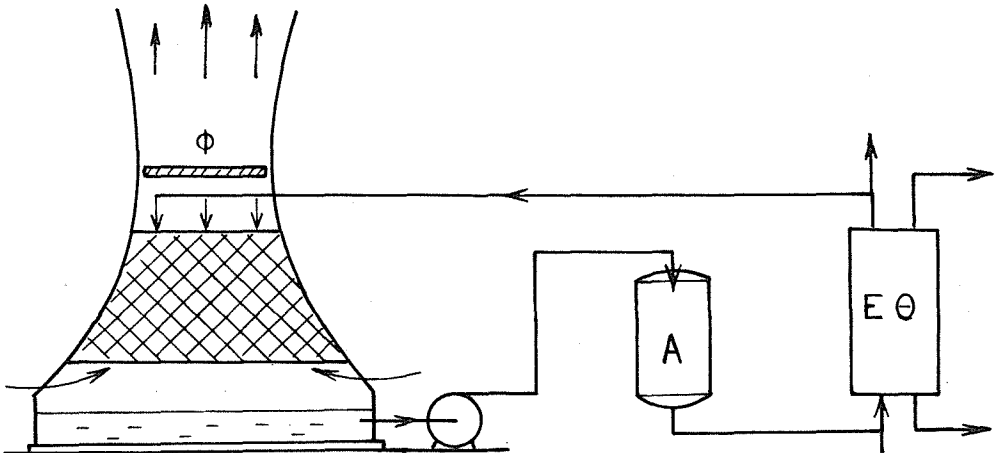
Διά πολύ μεγάλας ἐγκαταστάσεις ψύξεως ύδατος (π.χ. θερμοηλεκτρικοί ἢ πυρηνικοί σταθμοί) χρησιμοποιοῦνται οἱ πύργοι φυσικῆς κυκλοφορίας ὑπερβολικοῦ σχήματος (Σχ. 4-9). Οἱ πύργοι οὔτοι ἔχουν μέγáλον ὄγκον (π.χ. διάμετρος 60 m και ύψος 100 m) και ἡ λειτουργία των βασίζεται εἰς τήν ροήν του άέρος λόγω διαφορᾶς πυκνότητος μεταξύ του ψυχροῦ άέρος εἰσόδου και του θερμοῦ άέρος ἐξόδου. Ἡ ταχύτης του άέρος εἰς τούς πύργους τούτους κυμαίνεται μεταξύ 1,5-2 m/s.

Οἱ βιομηχανικοί πύργοι ψύξεως ἐγκαρσίας ροῆς (Cross-flow) παρουσιάζουν ὠρισμένα πλεονεκτήματα, ὅπως ἡ μικροτέρα πτώσις πιέσεως του άέρος, ἔναντι τῶν συνήθων πύργων ἀντιρροῆς. Εἰς τούς πύργους τούτους ὁ ἀήρ εἰσέρχεται ἀπό πλάγια ἀνοίγματα και διέρχεται ὀριζοντίως, ἐνώ τό ψυχόμενον ύδωρ κατέρχεται κατακόρυφως.

Ὡς κατασκευαστικά ὑλικά τῶν πύργων ψύξεως χρησιμοποιοῦνται ξύλον, σκυρόδεμα, γαλβανισμένος χάλυψ κλπ. Τά πληρωτικά ὑλικά κατασκευάζονται ἀπό ξύλον, πλαστικά κλπ. Τά κατασκευαστικά ὑλικά πρέπει νά εἶναι ἀνθεκτικά εἰς τήν διά-



Σχ. 4-8. Ψυκτικός πύργος βεβιασμένης κυκλοφορίας. (ΘΥ) θερμόν ύδωρ (ΨΥ) ψυχρόν ύδωρ, (Φ) φίλτρον σταγονιδίων.



Σχ. 4-9. Ψυκτικός πύργος φυσικής κυκλοφορίας. (Α) Ἀπαερωτήρ, (ΕΘ) ἐναλλάκτης θερμότητας, (Φ) φίλτρον σταγονιδίων.

βρωσιν ὑπό τοῦ ὕδατος. Ἡ παρεμπόδισις τῆς διαβρώσεως ἐπι-  
τυγχάνεται ἐπίσης διὰ χημικῆς κατεργασίας τοῦ ὕδατος κυκλο-  
φορίας, π.χ. προσθήκης χρωμικῶν ἀλάτων.

Τό ὕδωρ κυκλοφορίας κατεργάζεται ἐπίσης πρός παρεμπό-  
δισιν τοῦ σχηματισμοῦ ἀποθέσεων ἀλάτων (χαμηλόν pH) καί  
ἀναπτύξεως διαφόρων μικροοργανισμῶν (προσθήκη φαινολῶν, χλω-  
ρίου, συντηρητικῶν τοῦ ξύλου). Δόγω τῆς μερικῆς ἐξατμίσεως  
τοῦ ὕδατος ἐνδείκνυται ἡ συμπλήρωσις τῶν ἀπωλειῶν καθὼς καί

ή περιοδική απομάκρυνσις μέρους τοῦ συμπυκνουμένου ὕδατος (blow-down).

### ζ) Δεξαμεναί Ψύξεως τοῦ Ὑδατος

Ἡ ψύξις τοῦ βιομηχανικοῦ ὕδατος δύνανται νά ἐπιτευχθῇ εἰς ὑπαιθρίους δεξαμενάς ψύξεως αἱ ὁποῖαι εἶναι ὀλιγώτερον δαπανηραί τῶν ψυκτικῶν πύργων ἀλλά ἔχουν σχετικῶς μικροτέραν ἰκανότητα ψύξεως καί ἡ λειτουργία των ἐπηρεάζεται σημαντικῶς ἀπό τὰς ἐπικρατούσας κλιματολογικὰς συνθήκας.

1. Δεξαμεναί Ψεκασμοῦ. Αἱ δεξαμεναί ψεκασμοῦ (spray ponds) εἶναι ἐπιμήκεις δεξαμεναί εἰς τὰς ὁποίας τό ὕδωρ ψεκάζεται διὰ καταλλήλων βαλβίδων καί ψύχεται διὰ μερικῆς ἐξατμίσεως εἰς τόν περιβάλλοντα ἀέρα. Ἡ δεξαμενή κατασκευάζεται μέ τόν κύριον ἄξονα κάθετον πρός τήν φοράν τοῦ ἐπικρατοῦντος θερινοῦ ἀνέμου.

Τά σταγονίδια τοῦ ὕδατος πρέπει νά ἔχουν ὠρισμένον μέγεθος πρός ἐπίτευξιν ἐπαρκοῦς ψύξεως δι' ἀναμίξεως μετά τοῦ ἀέρος. Τά πολύ μικρά σταγονίδια εἶναι ἀνεπιθύμητα διότι ταῦτα σχηματίζουν ὁμίχλην ἡ ὁποία παρασύρεται ὑπό τοῦ πνεόντος ἀνέμου. Ἡ πίεσις τοῦ ὕδατος εἰς τὰς βαλβίδας ραντισμοῦ κυμαίνεται μεταξύ 1,3-1,5 bar.

Αἱ δεξαμεναί ἔχουν βάθος 1-1,5 m καί ἐπαρκῆ ἐπιφάνειαν πρός συλλογήν τοῦ ψεκαζομένου ὕδατος. Ἡ ψυκτικῆ ἰκανότης ἐξαρτᾶται ἀπό τήν θερμοκρασίαν τοῦ ὕδατος, τήν ταχύτητα, θερμοκρασίαν καί ὑγρασίαν τοῦ ἀέρος καί τὰς συνθήκας ψεκασμοῦ.

2. Δεξαμεναί Ψύξεως. Αἱ δεξαμεναί ψύξεως (cooling ponds) χρησιμοποιοῦνται εἰς ὑπαίθρια ἐργοστάσια ὅπου διατίθενται μεγάλοι ἐκτάσεις ἐδάφους. Αἱ δεξαμεναί αὗται ἔχουν βάθος 2-3m καί κατασκευάζονται εἰς ἐδάφη ἀδιαπέρατα εἰς τό ὕδωρ.

Εἰς τὰς δεξαμενάς ψύξεως ἡ ἀπώλεια θερμότητος λαμβάνει χώραν δι' ἐπιφανειακῆς ἐξατμίσεως, διὰ μεταφορᾶς ἐξ ἐπαφῆς μέ τόν ἀέρα, καί δι' ἀκτινοβολίας πρός τό περιβάλλον. Συγχρόνως ὅμως αἱ δεξαμεναί αὗται ἀπορροφοῦν τήν θερμότητα ἡλιακῆς ἀκτινοβολίας. Τό θερμόν βιομηχανικόν ὕδωρ παραμένει εἰς τήν δεξαμενήν μεταξύ 24-48 h καί ψύχεται εἰς θερμοκρασίαν

προσεγγίζουσιν κατά  $2^{\circ}\text{C}$  περίπου τήν θερμοκρασίαν ίσορροπίας, ἤτοι τήν θερμοκρασίαν τήν ὁποίαν ἀποκτᾶ τό ὕδωρ ἐκτιθέμενον ἐπί μακρόν χρόνον εἰς τό περιβάλλον.

Ἡ ψυκτική ἰκανότης τῶν δεξαμενῶν ψύξεως ἐξαρτᾶται ἀπό τήν ταχύτητα, τήν θερμοκρασίαν καί τήν ὑγρασίαν τοῦ ἀέρος, τήν έντασιν τῆς ἡλιακῆς ἀκτινοβολίας καί τήν διεπιφάνειαν ὕδατος/ἀέρος. Διά ψῦξιν τοῦ ὕδατος κατά  $10^{\circ}\text{C}$  ἀπαιτεῖται κατὰ προσέγγισιν ἐπιφάνεια δεξαμενῆς  $30 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ὕδατος/h.

## ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΥΓΡΑΝΣΕΩΣ

1. Ἄηρ ἀτμοσφαιρικῆς πιέσεως θερμοκρασίας Ξηροῦ καὶ ὑγροῦ θερμομέτρου 25 καὶ 18°C ἀντιστοίχως, θερμαίνεται εἰς 50°C καὶ διαβιβάζεται εἰς θάλαμον ἀδιαβατικῆς ὑγράνσεως ἐκ τοῦ ὁποῦ ἐξέρχεται εἰς θερμοκρασίαν ὑψηλοτέραν κατὰ 2°C τῆς θερμοκρασίας ἀδιαβατικοῦ κορεσμοῦ. Ὁ ὑγρανθεὶς ἄηρ θερμαίνεται ἀκολούθως μέχρι 30% RH.

Ζ η τ ο ὦ ν τ α ι :

α) Ἡ τελικὴ θερμοκρασία καὶ ἡ ἀπόλυτος ὑγρασία τοῦ ἀέρος.

β) Ἡ ἀπαιτούμενη ποσότης θερμότητος (kJ/m<sup>3</sup>).

γ) Ὁ οὕτω λαμβανόμενος ἄηρ ἀναμιγνύεται ἀδιαβατικῶς μετὰ ἀέρος παρομοίας καταστάσεως μέ τὸν ἀρχικόν, ἀέρα πρὸς μίγμα ἀπολύτου ὑγρασίας 0,015. Ποία ἡ θερμοκρασία τοῦ μίγματος καὶ ποία ἡ ἀναλογία τῶν δύο ρευμάτων τοῦ ἀέρος;

Δ ὕ σ ι ς

α) Ἐκ τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου εὐρίσκεται ὅτι ἡ ἀπόλυτος ὑγρασία τοῦ ἀρχικοῦ ἀέρος εἶναι 0,010. Ὁ ἄηρ οὗτος θερμαίνεται εἰς 50°C ὅτε ἡ θερμοκρασία ὑγροῦ θερμομέτρου γίνεται 25,2°C. Ἡ ἀδιαβατικὴ ὑγρασις ἀκολουθεῖ τὴν γραμμὴν σταθερᾶς θερμοκρασίας ὑγροῦ θερμομέτρου (25,2°C) καὶ ὁ ἄηρ ἐξέρχεται τοῦ ὑγραντήρος εἰς θερμοκρασίαν 27,2°C, 87% RH καὶ ἀπόλυτον ὑγρασίαν 0,020. Ἀκολούθως ὁ ἄηρ θερμαίνεται ὑπὸ σταθεράν ἀπόλυτον ὑγρασίαν (0,020) μέχρι 30% RH ἤτοι μέχρι θερμοκρασίας 47°C.

β) Ἡ ἀρχικὴ ἐνθαλπία τοῦ ἀέρος εὐρίσκεται ἐκ τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου ὡς 51 kJ/kg, ἡ δέ τελικὴ 100 kJ/kg. Ἐπομένως ἡ ἀπαιτούμενη θερμότης εἶναι 49 kJ/kg. Εἰς τὴν ἀνω-

τέρω περιοχὴν ὁ εἰδικὸς ὄγκος τοῦ ἀέρος εἶναι κατὰ προσέγγισιν  $0,9 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Συνεπῶς ἡ ἀπαιτουμένη θερμότης εἶναι:  $49/0,9=54,5 \text{ kJ/m}^3$ .

γ) Ὡς βάσις ὑπολογισμοῦ λαμβάνεται  $1 \text{ kg}$  ξηροῦ ἀέρος τοῦ μίγματος. Ἐάν ἡ ποσότης τοῦ θερμοῦ ὑγροῦ ἀέρος εἶναι  $x \text{ kg}$ , ὁ ψυχρότερος ἀήρ θὰ εἶναι  $(1-x) \text{ kg}$ . Ἴσοζύγιον ὑγρασίας δίδει:

$$0,020x + (1-x)0,01 = 0,015$$

Ἐκ τῆς ἐξισώσεως ταύτης ἔπεται ὅτι:  $x=0,5$  καὶ ἐπομένως  $1-x=0,5$ , ἥτοι  $(1-x)/x=1$ .

Ἡ ἐνθαλπία τοῦ μίγματος (H) θὰ εἶναι:

$$H = 51 \cdot 0,5 + 100 \cdot 0,5 = 75,5 \text{ kJ/kg}$$

Ἐκ τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου εὐρίσκεται ἡ θερμοκρασία τοῦ μίγματος  $T = 36,3^\circ\text{C}$ . Σημειωτέον ὅτι τὸ σημεῖον τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου τὸ ἀντιστοιχοῦν εἰς τὸ μίγμα συμπίπτει κατὰ προσέγγισιν μὲ τὸ σημεῖον τομῆς τῆς εὐθείας  $W = 0,015$  καὶ τῆς εὐθείας τῆς συνδεούσης τὰ δύο σημεῖα τῶν συστατικῶν ρευμάτων τοῦ μίγματος.

**2.** Ψυκτικὸς πύργος φυσικῆς κυκλοφορίας διαμέτρου  $8 \text{ m}$  καὶ ὕψους  $6 \text{ m}$  ἀπομακρύνει  $25000000 \text{ kJ/h}$  βιομηχανικῆς θερμότητος. Ὁ ἀήρ τῆς περιοχῆς ἔχει μέσην θερμοκρασίαν ὑγροῦ θερμομέτρου  $25^\circ\text{C}$  καὶ χρησιμοποιεῖται προσέγγισις  $5^\circ\text{C}$ , ἥτοι θερμοκρασία τοῦ ψυχθέντος ὕδατος  $30^\circ\text{C}$ . Τὸ θερμὸν ὕδωρ διαβιβάζεται εἰς τὸν ψυκτικὸν πύργον εἰς θερμοκρασίαν  $50^\circ\text{C}$ . Ἀήρ μὲ ρυθμὸν  $320000 \text{ m}^3/\text{h}$  διαβιβάζεται κατ'ἀντιρροπὴν πρὸς τὸ ψυχόμενον ὕδωρ.

**Ζητοῦνται:**

α) Ὁ ἀριθμὸς μονάδων μεταφορᾶς (NTU)

β) Τὸ ὕψος τῆς μονάδος μεταφορᾶς (HTU)

**Λύσις:**

Ἡ ποσότης τοῦ κυκλοφοροῦντος ὕδατος θὰ εἶναι



$$L' = \frac{25000000}{4,18(50-30)} = 300000 \text{ kg/h} = 83,5 \text{ kg/s}$$

Ἡ διατομή τοῦ πύργου εἶναι:  $A = \frac{3,14 \cdot 64}{4} = 50 \text{ m}^2$

καί  $L = 83,5/50 = 1,67 \text{ kg/s m}^2$

Ἡ ροή ἀέρος εἶναι  $\frac{320000}{3600 \cdot 50 \cdot 0,875} = 2 \text{ kg/s m}^2$

$$L/G = 1,67/2 = 0,835$$

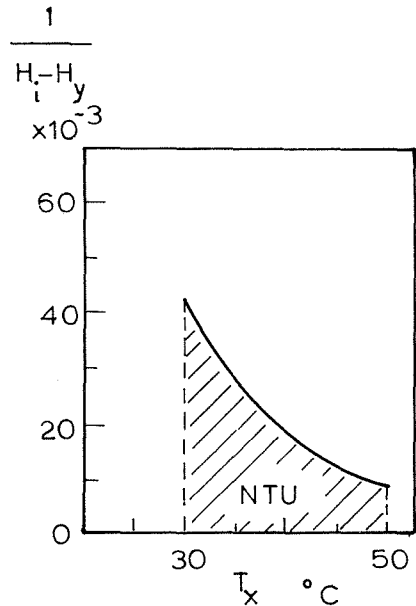
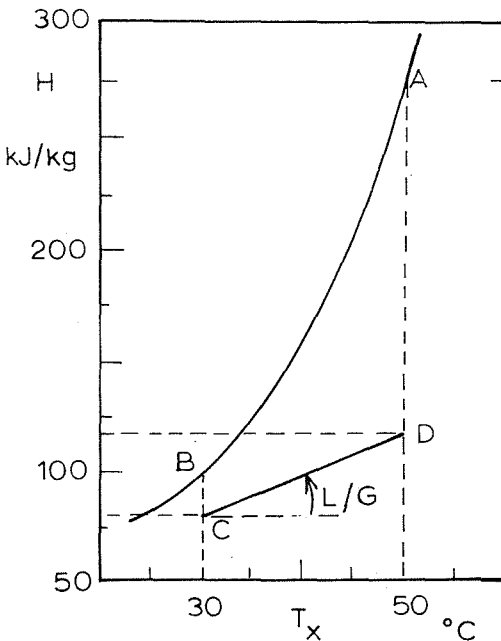
α) Εἰς διάγραμμα ἐνθαλπίας/θερμοκρασίας ὕδατος (H,T) κατασκευάζεται ἡ γραμμὴ λειτουργίας τοῦ πύργου (CD) ὡς δεικνύεται εἰς τὸ Σχ. (4.1').

Διὰ γραφικῆς ὁλοκληρώσεως εὐρίσκεται

$$NTU = C_p \int_1^2 \frac{dT}{H_i - H_y} = 1,70$$

β) Τὸ ὕψος μονάδος μεταφορᾶς ὑπολογίζεται ὡς:

$$HTU = Z/NTU = 6/1,70 = 3,53 \text{ m}$$



Σχ. 4-1'. Γραφικὸς ὑπολογισμὸς (NTU) ψυκτικοῦ πύργου

## 5. ΞΗΡΑΝΣΙΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ

Ἡ Ξήρανσις (drying) ὀρίζεται ὡς ἡ ἀπομάκρυνσις δι' ἔξατμίσεως ἑνός πτητικοῦ ὑγροῦ, συνήθως τοῦ ὕδατος, ἀπὸ στερεά σώματα, ἢ ὁποῖα ἐπιτυγχάνεται δι' ἑνός ἢ περισσοτέρων μηχανισμῶν μεταδόσεως θερμότητος, ἢτοι δι' ἀγωγῆς, διὰ μεταφορᾶς ἐξ ἐπαφῆς ἢ δι' ἀκτινοβολίας. Ἡ Ξήρανσις εἶναι μία διεργασία ταυτοχρόνου μεταφορᾶς θερμότητος καί μάζης, μεταξὺ στερεῶν σωμάτων καί ἀδρανῶν ἀερίων ἢ κενοῦ. Ὁ ρυθμὸς Ξηράσεως τῶν στερεῶν ἐπηρεάζεται σημαντικῶς ἀπὸ ἀμφοτέρας τὰς ἀντιστάσεις μεταφορᾶς θερμότητος καί μάζης, ἐν ἀντιθέσει πρὸς τὴν ἐξάτμισιν, ἢ ὁποῖα ἐξαρτᾶται κυρίως ἀπὸ τὸν ρυθμὸν μεταφορᾶς θερμότητος.

Ἡ Ξήρανσις εἶναι μία ἐκ τῶν σημαντικωτέρων θερμικῶν διεργασιῶν τῆς Χημικῆς Μηχανικῆς εἰς τὴν ὁποίαν δέν περιλαμβάνεται, ἐξ ὀρισμοῦ, ἡ μηχανικὴ ἀπομάκρυνσις τοῦ ὕδατος ἀπὸ τὰ στερεά π.χ. διὰ διηθήσεως, πιέσεως ἢ φυγοκεντρήσεως.

Ἡ Ξήρανσις ἢ ἀφυδάτωσις (dehydration) ἐφαρμόζεται εἰς πολλὰς βιομηχανίας διὰ τὴν παραγωγὴν προϊόντων χαμηλῆς ὑγρασίας, τὰ ὁποῖα ἀποθηκεύονται, μεταφέρονται, συντηροῦνται ἢ κατεργάζονται καλῦτερον ἀπὸ τὰ νωπά προϊόντα. Μεγάλαι ποσότητες προϊόντων Ξηραίνονται εἰς τὰς βιομηχανίας λιπασμάτων, ἀπορρυπαντικῶν, χάρτου, τροφίμων, γεωργικῶν προϊόντων, κεραμικῆς, μεταλλευμάτων κλπ.

## α) Ύγρασία Στερεῶν

Τά διάφορα στερεά σώματα περιέχουν δύο εἴδη ὑγρασίας:

1. Τό ἐλεύθερον ὕδωρ (free water), τό ὁποῖον συγκρατεῖται ὑπό τοῦ στερεοῦ μηχανικῶς καί συμπεριφέρεται ὡς τό καθαρὸν ὕδωρ. Τό ὕδωρ τοῦτο δύναται νά ἀπομακρυνθῇ ἐν μέρει μηχανικῶς ἢ δι' ἐλευθέρας ἐξατμίσεως.

2. Τό ἠνωμένον ὕδωρ (bound water) τό ὁποῖον συναντᾶται ὡς φυσικῶς προσροφημένον ὕδωρ, ὡς κρυσταλλικόν ὕδωρ, ἢ ὡς διάλυμα καί ἀπομακρύνεται δυσχερέστερον ἐκ τοῦ στερεοῦ κυρίως διὰ θερμάνσεως.

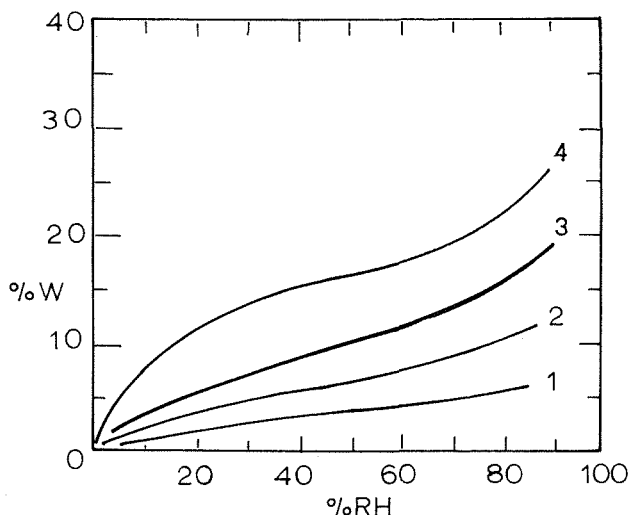
Ἡ ὑγρασία τῶν στερεῶν ἐκφράζεται συνήθως ἐπί ξηρᾶς βάσεως (W) εἰς kg ὕδατος/kg ξηροῦ στερεοῦ. Τό W ὑπολογίζεται ἀπό τήν συνήθη περιεκτικότητα ἐπί ὑγρᾶς βάσεως (% w) διὰ τῆς ἐξισώσεως:

$$W = \frac{\% w}{100 - \% w} = \frac{w}{1 - w} \quad (5-1)$$

Οὕτω, στερεόν περιέχον 50% ὑγρασίαν κατά βάρος ἐπί ὑγρᾶς βάσεως ἀντιστοιχεῖ εἰς  $W = 50 / (100 - 50) = 1$  ἢ  $\% w = 100 \%$ .

Τό ἠνωμένον ἢ προσροφημένον ὕδωρ εἰς δοθέν στερεόν δεικνύεται ἐπί τῆς ἰσοθέρμου αὐτοῦ, ἥτοι τῆς καμπύλης ἰσορροπίας ὕδρατμοῦ/στερεοῦ εἰς δοθεῖσαν θερμοκρασίαν. Αἱ καμπύλαι αὗται προσδιορίζονται πειραματικῶς καί ἡ ἀναλυτικῆ των ἔκφρασις ἐξετάζεται εἰς τήν Φυσικοχημίαν καί τήν Τεχνικήν Φυσικῶν Διαχωρισμῶν (Προσρόφησιν). Τυπικαί ἰσοθερμοί καμπύλαι βιομηχανικῶν στερεῶν δεικνύονται εἰς τό Σχ. (5-1).

Τό ἠνωμένον ὕδωρ ἀντιστοιχεῖ πρὸς τήν ὑγρασίαν τοῦ στερεοῦ τοῦ εὐρισκομένου εἰς χῶρον 100% ὑγρασίας (RH), ἥτοι εἰς χῶρον κεκορεσμένον δι' ὕδρατμοῦ διὰ τήν δοθεῖσαν θερμοκρασίαν. Εἰς ὠρισμένα ὑγροσκοπικά στερεά (π.χ. σακχαροῦχα προϊόντα) ἡ καμπύλη ἰσορροπίας πλησιάζει ἀσυμπτωτικῶς τήν 100% RH, καθόσον τό ὕδωρ διαλύει συνεχῶς τά στερεά ταῦτα καί δέν ὑφίσταται σαφῆς διαχωρισμός μεταξὺ τοῦ ἠνωμένου καί τοῦ ἐλευθέρου ὕδατος.



Σχ. 5-1. Ίσόθερμοι τυπικών υλικών εις 25° C. (1) Nylon, (2) χάρτης, (3) silica gel (4) άμυλον.

Αι ισόθερμοι καλοϋνται καί καμπϋλαι περιεκτικότητας υ-γρασίας ισορροπίας (equilibrium moisture content), αι οποϋ-αι εϋχουν σημασίαν καί εις τήν αποθήκευσιν τών διαφόρων Ξη-ρών στερεών προϊόντων. Ή υγρασία ισορροπίας εις δοθείσαν σχετικήν υγρασίαν ελάττωϋται ελαφρώς αύξανομένης τής θερμο-κρασίας τοϋ συστήματος. Τό σχήμα τών καμπυλών ισορροπίας καί η υγρασία ισορροπίας εϋξαρτώνται βασικώς από τήν χημικήν καί φυσικήν σύστασιν τοϋ στερεοϋ σώματος.

Κατά τήν αποθήκευσιν διαφόρων βιομηχανικών προϊόντων εις μεγάλας ποσότητας, άνευ προστατευτικής συσκευασίας, έν-δεικνυται ὅπως ὁ αποθηκευτικός χῶρος διατηρεϋται εις ὠρι-σμένην σχετικήν υγρασίαν, η οποία εϋξαρτάται από τό εϋδος τοϋ προϊόντος. Μεγαλυτέρα υγρασία δυνατόν νά επιφέρη φυσικάς, χημικάς η μικροβιολογικάς αλλοιώσεις εις τά αποθηκευμένα προϊόντα. Χαμηλοτέρα υγρασία δυνατόν νά προκαλέση πλήρη ά-φυδάτωσιν τοϋ προϊόντος συνοδευομένην υπό άνεπιθυμητών με-ταβολών τών φυσικών καί μηχανικών ιδιοτήτων αϋτοϋ. Ή δια-τήρησις ὠρισμένης σχετικής υγρασίας επιτυγχάνεται δι' άφϋ-

γράνσεως ή υγράνσεως του άέρος διά φυσικών μεθόδων (π.χ.διά Ξηράνσεως του άέρος διά στερεών προσροφητικών ούσιων, ήτις έξετάζεται είς τήν Τεχνικήν Φυσικών Διαχωρισμών). Τυπικά παραδείγματα ένδεικνυομένων σχετικών υγρασιών διά τήν άποθήκευσιν βιομηχανικών προϊόντων δίδονται είς τόν Πίνακα (5-1).

Π Ι Ν Α Κ Ε 5-1

Μεγίστη Σχετική Ύγρασία (% RH) Άποθηκεύσεως  
Στερεών Άλάτων

| Άλας  | Θερμοκρασία       | % RH |
|---|-------------------|------|
| NaOH.H <sub>2</sub> O                               | 25 <sup>0</sup> C | 7    |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O   | 25                | 43   |
| KNO <sub>3</sub>                                    | 20                | 45   |
| CaCl <sub>2</sub>                                   | 20                | 58   |
| NaOH  | 20                | 59   |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                     | 10                | 75   |
| NaCl  | 20                | 76   |
| NH <sub>4</sub> Cl                                  | 30                | 77   |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                     | 25                | 85   |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O | 25                | 87   |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>                     | 30                | 93   |
| CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O                | 30                | 97   |
| CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O                | 30                | 98   |

Ο προσδιορισμός της υγρασίας ίσορροπίας γίνεται κυρίως διά της στατικής μεθόδου των σταθερών σχετικών υγρασιών: Δείγματα της ούσιας τοποθετούνται έντός θαλάμων σταθεράς υγρασίας καί θερμοκρασίας καί άφίενται μέχρις έπιτεύξεως ίσορροπίας, διαπιστουμένης διά του σταθεροϋ βάρους της ούσιας. Αί σταθεραί σχετικαί υγρασιαί έπιτυγχάνονται διά κενοροσμένων διαλυμάτων άλάτων ή διά διαλυμάτων θειϊκού όξεος, ώς δεικνύεται είς τόν Πίνακα 5-2.

Η υγρασία των στερεών προσδιορίζεται πειραματικώς διά

μιάς τών κατωτέρω μεθόδων:

1. Εήρανσις έντός κλιβάνου είς άτμοσφαιρικήν πίεσιν καί 105 °C μετά ή άνευ κυκλοφορίας θερμού άέρος, επί ώρισμένον χρονικόν διάστημα (π.χ. 4 h).

Π Ι Ν Α Ε 5-2

Κεκορεσμένα Διαλύματα διά τήν 'Επίτευξιν Σταθερών 'Υγρασιών (RH) είς 25 °C

| α) Κεκορεσμένα Διαλύματα                       |      | β) Διαλύματα Θειϊκού 'Οξέος             |      |
|--|------|---|------|
| 'Αλας  | % RH | Πυκνότης H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | % RH |
| LiCl   | 12   | 1,7224                                  | 0,8  |
| CH <sub>3</sub> COOK                           | 22   | 1,6644                                  | 2,3  |
| MgCl <sub>2</sub>                              | 32   | 1,6059                                  | 5,2  |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                 | 43   | 1,5489                                  | 9,8  |
| Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> | 52   | 1,4944                                  | 17,2 |
| NaNO <sub>2</sub>                              | 66   | 1,4412                                  | 26,8 |
| NaCl   | 75   | 1,3912                                  | 36,8 |
| NH <sub>4</sub> Cl                             | 79,3 | 1,3439                                  | 46,8 |
| KCl  | 84   | 1,2993                                  | 56,8 |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                 | 96,5 | 1,2567                                  | 66,8 |
| CaSO <sub>4</sub>                              | 98   | 1,2164                                  | 75,6 |
|  |      | 1,1755                                  | 82,9 |
|  |      | 1,1368                                  | 88,5 |
|  |      | 1,0997                                  | 92,9 |
|  |      | 1,0300                                  | 98,5 |
|  |      | 0,9971                                  | 100  |

2. Εήρανσις είς κενόν, χρησιμοποιουμένη δι' εύαίσητα είς τήν θερμοκρασίαν προϊόντα. Χρησιμοποιεΐται π.χ. άπόλυτος πίεσις 100 Torr, θερμοκρασία 70 °C καί χρόνος 6-h.

3. 'Αξεοτροπική άπόσταξις του ύδατος δι' άναμίξεως του στερεού μετά τολουενίου.

4. 'Ογκομετρικώς διά του άντιδραστηρίου Fischer (διάλυ-

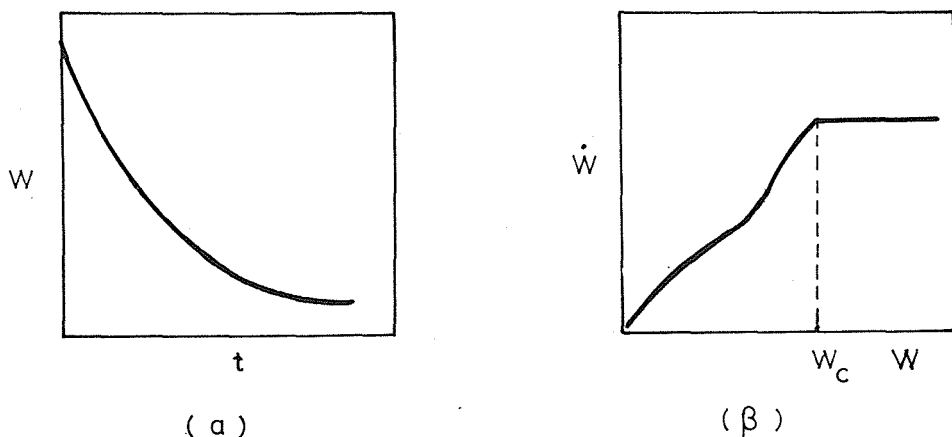
μα (ωδίου εις πυριδίνην).

5. Ἡλεκτρικαὶ μετρήσεις: Ἡ ἡλεκτρικὴ ἀντίστασις τοῦ στερεοῦ μεταβάλλεται μετὰ τῆς περιεκτικότητος αὐτοῦ εἰς ὑγρασίαν. Ἐπίσης ἡ διηλεκτρικὴ σταθερὰ αὐξάνεται σημαντικῶς μετὰ τῆς ὑγρασίας.

### β) Καμπῦλαι Ξηράνσεως

Ἡ Ξήρανσις ἑνὸς στερεοῦ δέν εἶναι δυνατόν νά προβλεφθῇ πλήρως μόνον ἀπό δεδομένα τῶν φυσικῶν ἰδιοτήτων τοῦ στερεοῦ καί τῆς μηχανικῆς διατάξεως τοῦ συστήματος Ξηράνσεως. Διὰ τόν σχεδιασμόν τῶν βιομηχανικῶν Ξηρατῆρων ἀπαιτοῦνται πειραματικά δεδομένα Ξηράνσεως τοῦ προϊόντος ὑπό παρομοίας συνθήκας. Πρὸς τοῦτο χρησιμοποιοῦνται ἐργαστηριακοὶ καί ἡμιβιομηχανικοὶ Ξηρατῆρες, οἱ ὅποιοι λειτουργοῦν ὑπό ρυθμιζόμενης συνθήκας θερμοκρασίας, ταχύτητος καί ὑγρασίας τοῦ ἀέρος, κενοῦ κλπ.

Τὰ ἀποτελέσματα τῶν πειραματικῶν Ξηράνσεων παρίστανται εἰς τὰς καμπύλας Ξηράνσεως, τυπικαὶ μορφαὶ τῶν ὁποίων δίδονται εἰς τό Σχ. (5-2).



Σχ. 5-2. Καμπῦλαι Ξηράνσεως στερεῶν. (α) Καμπύλη Ξηράνσεως  
(β) καμπύλη ρυθμοῦ Ξηράνσεως

Ἄρχικῶς κατασκευάζεται ἡ καμπύλη Ξηράνσεως ( $\alpha$ ) μέ τετμημένας τόν χρόνον Ξηράνσεως ( $t$ ) καί τεταγμένας τήν ἀντίστοιχον μέσην ὑγρασίαν τοῦ στερεοῦ ( $W$ ). Διά γραφικῆς διαφορίσεως τῆς καμπύλης ( $\alpha$ ) ἢ δι' ἀριθμητικῆς διαφορίσεως τῶν πειραματικῶν δεδομένων προκύπτει ἡ καμπύλη ρυθμοῦ Ξηράνσεως ( $\beta$ ) μέ συντεταγμένας ( $\dot{W}, W$ ). Παρομοία καμπύλη ρυθμοῦ Ξηράνσεως παρίσταται μέ συντεταγμένας ( $\dot{W}, t$ ).

Τό Σχ. (5-2) παριστᾶ τήν συνήθη περίπτωσιν Ξηράνσεως τῶν στερεῶν εἰς τήν ὁποίαν ὑφίστανται δύο περίοδοι Ξηράνσεως, ἥτοι ἡ ἀρχική περίοδος σταθεροῦ ρυθμοῦ Ξηράνσεως, ἀκολουθουμένη ὑπό τῆς περιόδου ἡλαττωμένου ρυθμοῦ Ξηράνσεως. Αἱ δύο αὗται περίοδοι συνδέονται εἰς τό σημεῖον τῆς κρισίμου περιεκτικότητος τῆς ὑγρασίας ( $W_c$ ). Ἐάν τό πρός Ξήρανσιν στερεόν εἰσέλθῃ εἰς τόν Ξηραντήρα εἰς χαμηλήν θερμοκρασίαν, παρατηρεῖται μία βραχεία περίοδος προθερμάνσεως τοῦ προϊόντος κατά τήν ὁποίαν ὁ ρυθμός Ξηράνσεως αὐξάνει μέχρις ὅτου ἐπιτευχθῇ ἡ περίοδος σταθεροῦ ρυθμοῦ Ξηράνσεως.

Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις ἡ Ξήρανσις δύναται νά λάβῃ χώραν εἰς τήν μίαν μόνον περίοδον, εἴτε τοῦ σταθεροῦ ἢ τοῦ ἡλαττωμένου ρυθμοῦ Ξηράνσεως. Αἱ καμπύλαι Ξηράνσεως μεταβάλλονται αἰσθητῶς ἐάν μεταβληθοῦν τά φυσικά χαρακτηριστικά τοῦ στερεοῦ (μέγεθος, σχῆμα, ὑγρασία) ἢ αἱ συνθήκαι Ξηράνσεως.

### γ) Περίοδος Σταθεροῦ Ρυθμοῦ Ξηράνσεως

Κατά τήν περίοδον τοῦ σταθεροῦ ρυθμοῦ Ξηράνσεως (constant rate period) ἡ ἐπιφάνεια τοῦ στερεοῦ εἶναι κεκορεσμένη δι' ὕδατος καί ἡ Ξήρανσις λαμβάνει χώραν διά διαχύσεως τοῦ ὕδατος εἰς τόν περιβάλλοντα χῶρον (ἀέρα ἢ κενόν). Τό φαινόμενον τοῦτο εἶναι ἀνάλογον πρός τήν ἐπιφανειακὴν ἐξάτμισιν τοῦ ὕδατος εἰς ρεῦμα ἀέρος, ἥτις ἀνεφέρθη ἤδη εἰς τὰς περιπτώσεις τοῦ ἀδιαβατικοῦ κορεσμοῦ καί τοῦ ὑγροῦ θερμομέτρου.

Κατά τήν περίοδον ταύτην ἡ ὑγρασία μεταφέρεται ἐκ τοῦ ἐσωτερικοῦ πρός τήν ἐπιφάνειαν τοῦ στερεοῦ κατά τρόπον ὥστε αὕτη νά διατηρεῖται συνεχῶς κεκορεσμένη δι' ὕδατος. Ὁ μηχανισμὸς



νισμός μεταφοράς της υγρασίας εξετάζεται κατωτέρω.

Ἡ θερμότης ἐξατμίσεως μεταδίδεται εἰς τὴν διεπιφανείαν στερεοῦ/ἀέρος (ἢ στερεοῦ/ἀερίων) διὰ μεταφοράς ἐξ ἐπαφῆς μὲ ρεῦμα θερμοῦ ἀέρος, ἢ δι' ἀγωγῆς ἀπὸ τὴν ἐπιφανείαν ἐπαφῆς στερεοῦ/τοιχωμάτων ἢ δι' ἀκτινοβολίας. Εἰς τὴν περίπτωσιν μεταφοράς ἐξ ἐπαφῆς μὲ ρεῦμα ἀέρος ὑπάρχει μίᾳ ἰσορροπία μεταξὺ τῶν ρυθμῶν μεταφοράς θερμότητος καὶ μάζης:

$$\dot{W} = \frac{hA\Delta T}{\Delta H} = k'_G A \Delta P = k'_y A \Delta W \quad (5-2)$$

ὅπου  $\dot{W} = dW/dt =$  ρυθμὸς Ξηράνσεως, kg ὕδατος/s

$h =$  συντελεστής μεταφοράς θερμότητος,  $W/m^2 K$

$\Delta H_w =$  θερμότης ἐξατμίσεως τοῦ ὕδατος, J/kg

$A =$  ἐπιφάνεια ἐξατμίσεως (ξηράνσεως)  $m^2$

$\Delta T = T - T_w$

$T_w =$  θερμοκρασία ἐπιφανείας ἐξατμίσεως, K

$T =$  θερμοκρασία κυρίας μάζης τοῦ ἀέρα, K

$\Delta P = P_s - P$

$P_s =$  τάσις ἀτμῶν ὕδατος εἰς τὴν θερμοκρασίαν  $T_w$ , bar

$P =$  μερική πίεσις τοῦ ὕδατος εἰς τὴν κυρίαν μάζαν τοῦ ἀέρος, bar

$\Delta W = W_s - W$

$W_s =$  υγρασία κενωροεσμένου ἀέρος, εἰς  $T_w$ , kg ὕδατος/kg Ξηροῦ ἀέρος

$W =$  υγρασία εἰς τὸ ρεῦμα ἀέρος, εἰς  $T$ .

$k'_G =$  συντελεστής μεταφοράς μάζης,  $kg/s m^2 bar$

$k'_y =$  συντελεστής μεταφοράς μάζης,  $kg/s m^2 (\Delta W)$

Διὰ τὴν περιοχὴν χαμηλῶν υγρασιῶν, κατὰ προσέγγισιν  $k'_y = P(M_A/M_w) k'_G$  ὅπου  $P =$  συνολική πίεσις, bar.

Εἰς τὰς ἐξισώσεις (5-2) ὑποτίθεται ὅτι οἱ συντελεσταὶ μεταφοράς θερμότητος καὶ μάζης εἶναι σταθεροὶ καὶ ἀνεξάρτητοι τῶν ρυθμῶν μεταφοράς. Τοῦτο ἰσχύει διὰ τὴν Ξήρανσιν, ὅπου οἱ ρυθμοὶ μεταφοράς εἶναι σχετικῶς χαμηλοὶ. Εἰς ἄλλας ὁμως περιπτώσεις μὴ ἀντιστρεπτῶν διεργασιῶν μεταφοράς ὑψηλοῦ ρυθμοῦ, παρατηρεῖται ἀμοιβαία ἀλληλεπίδρασις ἐπὶ τῶν ἐ-

πί μέρους μεταφορών.

Από τās εξισώσεις (5-2) έπεται ότι ο ρυθμός Ξηράνσεως εξαρτάται από τούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και μάζης, τήν έπιφάνεια εξατμίσεως και τήν διαφοράν ύγρασίας μεταξύ τής ύγρας έπιφανείας και του άέρος. Δηλαδή, κατά τήν περίοδον ταύτην, ο ρυθμός Ξηράνσεως εξαρτάται κυρίως από τās έξωτερικās και όχι από τās έσωτερικās συνθήκας μεταφοράς ύγρασίας.

Ο ρυθμός Ξηράνσεως ( $\dot{W}$ ) εκφράζεται και επί Ξηρας βάσεως ήτοι ως (kg ύδατος/s kg Ξηροϋ στερεοϋ) και ισχύει η σχέση:

$$(\dot{W})_{\text{Ξηρας βάσεως}} = (1/A\rho d) (\dot{W})_{\text{ύγρας βάσεως}}$$

όπου  $\rho$  = πυκνότης Ξηροϋ στερεοϋ, kg/m<sup>3</sup>

A = έπιφάνεια εξατμίσεως (Ξηράνσεως), m<sup>2</sup>

d = πάχος στερεοϋ (κάθετον προς τήν A), m

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και μάζης εξαρτώνται από τās φυσικās ιδιότητας, τήν ταχύτητα του άέρος και τήν γεωμετρίαν (διαστάσεις, σχήμα) του Ξηραντήρος. Οϋτοι δύνανται νά υπολογισθοϋν προσεγγιστικώς από τās γνωστές έμπειρικās εξισώσεις αι όποϊαι ισχύουν διά τό μελετώμενον σύστημα.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (h), εις συστήματα παραλλήλου ροής άέρος ως προς τά στερεά, δίδεται υπό τής άπλοποιημένης διαστατικής εξισώσεως:

$$h = 8,85 G^{0,8} / D^{0,2} \quad \text{εις } W/m^2K \quad (5-3)$$

όπου G = ρυθμός ροής άέρος, kg/m<sup>2</sup>s

D = ίσοδύναμος διάμετρος άγωγοϋ ροής, 4 (έγκαρσία έπιφάνεια)/(περίμετρος), m.

Διά ροήν άέρος καθέτως επί τής έπιφανείας του στερεοϋ ισχύει η έμπειρική σχέση:

$$h = 24 G^{0,37} \quad \text{εις } W/m^2K \quad (5-4)$$

Εάν η μετάδοσις θερμότητας γίνεται μόνον δι' έπαφής με

ρεῦμα ἀέρος, ἡ θερμοκρασία τῆς ἐπιφανείας ἑξατμίσεως ( $T_w$ ) συμπίπτει μέ τήν θερμοκρασίαν ὑγροῦ θερμομέτρου καί προσδιορίζεται εὐκόλως ἀπό τόν Ψυχομετρικόν Χάρτην. Ἐάν ὅμως ὑφίσταται σημαντική ἀγωγή ἢ ἀκτινοβολία θερμότητος, ἡ θερμοκρασία τῆς ἐπιφανείας Ξηράνσεως εἶναι ὑψηλότερα τῆς θερμοκρασίας ὑγροῦ θερμομέτρου. Εἰς τὰς περιπτώσεις ταύτας εἶναι δυνατός ὁ ὑπολογισμός τῆς  $T_w$  καί τῆς  $H_w$  δι' ἀναλυτικῶν ἑξισώσεων αἱ ὁποῖαι βασίζονται εἰς τὰ ἰσοζύγια θερμότητος καί μάζης κατ'ἀναλογίαν πρὸς τήν ἀπλὴν περίπτωσιν μεταφορᾶς (ἑξισώσεις 5-2). Πρὸς τοῦτο ἀπαιτοῦνται δεδομένα μεταδόσεως θερμότητος δι'ἀγωγῆς ἢ δι'ἀκτινοβολίας (θερμικὴ ἀγωγιμότης καί πάχος στερεοῦ, συντελεστῆς μεταφορᾶς θερμότητος δι' ἀκτινοβολίας, συντελεστῆς ἰκανότητος ἐμπομπῆς), ἡ δέ ἐπίλυσις τῶν προκυπτουσῶν ἑξισώσεων γίνεται διὰ δοκιμῆς καί σφάλματος ἢ γραφικῶς.

#### δ) Περίοδος Ἐλαττουμένου Ρυθμοῦ Ξηράνσεως

Κατὰ τήν περίοδον ἐλαττουμένου ρυθμοῦ Ξηράνσεως (falling rate period) ἡ μεταφορὰ τῆς ὑγρασίας πρὸς τήν ἐπιφάνειαν ἑξατμίσεως εἶναι σχετικῶς βραδεία λόγῳ τῆς αὐξανομένης ἀντιστάσεως εἰς τήν μεταφορὰν μάζης ἐντὸς τοῦ στερεοῦ σώματος. Ἡ ἐπιφάνεια ἑξατμίσεως δέν εἶναι δυνατόν νά διατηρηθῇ κεκορεσμένη ὑγρασίας καί ὁ ρυθμὸς Ξηράνσεως ἐλαττοῦται συνεχῶς. Εἰς πολλάς περιπτώσεις παρατηροῦνται πλείονες τῆς μιᾶς περιοδοὶ ἐλαττουμένου ρυθμοῦ Ξηράνσεως.

Ὁ ρυθμὸς Ξηράνσεως κατὰ τήν περίοδον ταύτην ἐξαρτᾶται κυρίως ἀπὸ τήν ὑγρασίαν τοῦ στερεοῦ σώματος ( $W$ ) καί τήν θερμοκρασίαν τοῦ ἀέρος ( $T$ ), ἀσθενῶς δέ ἀπὸ τήν ὑγρασίαν ( $\Delta W$ ) καί τήν ταχύτητα τοῦ ἀέρος, ἦτοι:

$$\dot{W} = f(W, T, \Delta W) \quad (5-5)$$

Ἡ συνάρτησις (5-5) δέν εἶναι δυνατόν νά προβλεφθῇ πλήρως διὰ θεωρητικῆς ἀναλύσεως. Ἀπαιτοῦνται πειραματικὰ δεδομένα τῆς Ξηράνσεως, τὰ ὁποῖα προσαρμόζονται εἰς μίαν ἐμπειρικὴν ἑξίσωσιν ὡς ἡ:

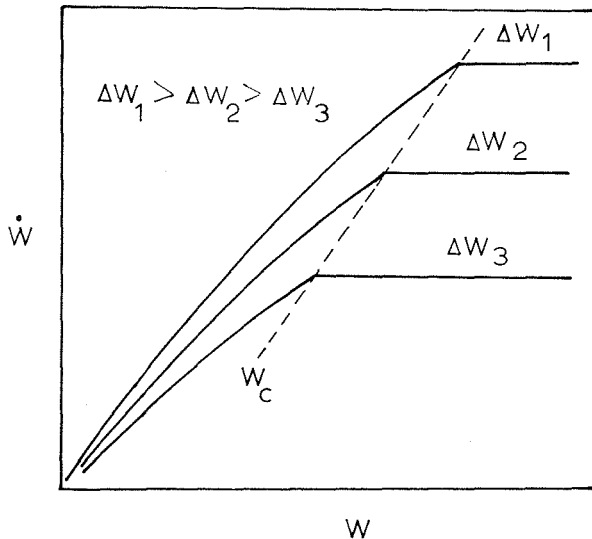
$$\dot{W} = K(W - W_e) \quad (5-6)$$

όπου  $K$  = έμπειρική σταθερά Ξηράνσεως,  $1/s$

$W_e$  = ύγρασία ίσορροπίας, σταθερά διά δοθέν σύστημα

Είς τήν έξίσωσιν (5-6) ή διαφορά  $(W - W_e)$  είναι τό δυναμικόν (δρῶσα δύναμις) τής Ξηράνσεως καί καλεῖται ή έλευθερά ύγρασία τοῦ στερεοῦ. Ἡ Ξήρανσις δύναται νά φθάσῃ άσυμπτωτικῶς τήν ύγρασίαν ίσορροπίας ( $W_e$ ). Είς τήν πράξιν ή Ξήρανσις διακόπτεται πρίν ή ύγρασία τοῦ σώματος φθάσῃ τήν  $W_e$  καί τά τελευταῖα ἔχνη ύγρασίας άπομακρύνονται δι' άποθηκεύσεως είς χῶρον χαμηλῆς σχετικῆς ύγρασίας (bin drying).

Ἡ περίοδος έλαττουμένου ρυθμοῦ Ξηράνσεως άρχίζει είς τήν κρίσιμον περιεκτικότητα ύγρασίας (critical moisture content)  $W_c$ , ή όποία προσδιορίζεται πειραματικῶς διά Ξηράνσεως δείγματος τοῦ στερεοῦ υπό καθωρισμένης συνθήκας. Ἡ  $W_c$



Σχ. 5-3. Ἐπίδρασις τής ύγρασίας τοῦ άέρος ( $\Delta W$ ) επί τοῦ ρυθμοῦ Ξηράνσεως

δύναται νά προσδιορισθῇ επίσης άναλυτικῶς δι' έξισώσεως τῶν ρυθμῶν Ξηράνσεως τῶν δύο περιόδων, ἥτοι:

$$k'_v A \Delta \bar{W}_A = K (W_c - W_e) \quad (5-7)$$

Ἐκ τῆς ἐξισώσεως (5-7) ἔπεται ὅτι ἡ  $W_c$  εἶναι συνάρτησις τῆς ὑγρασίας τοῦ ἀέρος ( $\Delta W$ ). Παραδείγματα καμπυλῶν ξηράνσεως εἰς διαφόρους διαφορὰς ὑγρασίας τοῦ ἀέρος ( $\Delta W$ ) δίδονται εἰς τὸ Σχ. (5-3).

Ὁ ρυθμὸς ξηράνσεως κατὰ τὴν περίοδον σταθεροῦ ρυθμοῦ ξηράνσεως αὐξάνει σημαντικῶς μετὰ τῆς  $\Delta W$ , ἥτοι τῆς διαφορᾶς ( $W_s - W$ ) τοῦ ἀέρος. Τοῦτο ἐπιτυγχάνεται δι' αὐξήσεως τῆς ὑγρασίας κορεσμοῦ ( $W_s$ ) ἥτοι τῆς θερμοκρασίας ὑγροῦ θερμομέτρου ( $T_w$ ), ἢ δι' ἐλαττώσεως τῆς ὑγρασίας τῆς κυρίας μάζης τοῦ ἀέρος ( $W$ ). Αἱ συνθήκαι αὗται ἐπιτυγχάνονται εἴτε δι' αὐξήσεως τῆς θερμοκρασίας τοῦ ἀέρος ( $T$ ) ἢ διὰ χρησιμοποίησεως ξηροῦ (ἀφυγραθέντος) ἀέρος.

Αὐξανόμενου τοῦ ρυθμοῦ ξηράνσεως αὐξάνεται ἡ κρίσιμος ὑγρασία ( $W_c$ ) διότι ἡ ἐπιφάνεια ἐξατμίσεως καθίσταται ἀκόρεστος ὕδατος ἐνωρίτερον. Πειραματικῶς εὐρίσκεται ὅτι αἱ κρίσιμοι ὑγρασῖαι ( $W_c$ ) κεῖνται ἐπ' εὐθείας εἰς τὸ διάγραμμα ρυθμοῦ ξηράνσεως (Σχ. 5-3).

Ἡ ἐξίσωσις (5-6) ὀλοκληρουμένη δίδει τὸν χρόνον ξηράνσεως ( $t$ ) τῆς περιόδου ἐλαττουμένου ρυθμοῦ ξηράνσεως ἀπὸ ὑγρασίας ( $W_c$ ) μέχρι ( $W$ ), ἐάν εἰς τὴν περιοχὴν ταύτην τὸ ( $K$ ) παραμένει σταθερόν:

$$t = (1/K) \ln \left( \frac{W - W_e}{W_c - W_e} \right) \quad (5-8)$$

Ἡ σταθερὰ ξηράνσεως ( $K$ ) εἶναι ἀρνητικὴ καὶ προσδιορίζεται ὡς ἡ κλίσις τῆς εὐθείας τῆς παριστώσεως τὰ πειραματικὰ δεδομένα εἰς ἡμιλογαριθμικὸν διάγραμμα  $\log \left( \frac{W - W_e}{W_c - W_e} \right)$  ὡς πρὸς  $t$ . Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις τὰ δεδομένα σχηματίζουν πλείονας τῆς μιᾶς εὐθείας, ἐκ τῶν ὁποίων προσδιορίζονται αἱ ἀντίστοιχοι σταθεραὶ  $K_1, K_2, \dots$

Ὁ χρόνος ξηράνσεως δύναται, νὰ προσδιορισθῇ καὶ γραφικῶς ὅταν εἶναι γνωστὰ πειραματικὰ δεδομένα τοῦ ρυθμοῦ ξηράνσεως. Πρὸς τοῦτο κατασκευάζεται διάγραμμα μέ συντεταγμένας  $1/\bar{W}$  καὶ  $W$  καὶ ὁ χρόνος ξηράνσεως προσδιορίζεται ὡς τὸ

έμβαδόν μεταξύ της καμπύλης ταύτης και του άξονος τών  $W$ , ήτοι  $t = \int_1^2 dW/\dot{W}$ .

### ε) Μηχανισμός Ξηράνσεως Στερεών

Ἡ μεταφορά τῆς ὑγρασίας ἐκ τοῦ ἐσωτερικοῦ πρὸς τὴν ἐπιφάνειαν ἐξατμίσεως γίνεται διὰ διαφόρων μηχανισμῶν ἐξαρτωμένων ἀπὸ τὴν φύσιν καὶ τὴν δομὴν τῶν στερεῶν καὶ τὰς συνθήκας Ξηράνσεως. Οἱ κυριώτεροι μηχανισμοὶ μεταφορᾶς ὑγρασίας εἶναι ἡ μοριακὴ διαχύσις καὶ ἡ ροὴ διὰ τριχοειδῶν ἀγωγῶν. Ἐπίσης ἡ ὑγρασία δύναται νὰ μεταφερθῆ διὰ ροῆς συνεπεία διαφορᾶς ὀλικῆς πιέσεως, διὰ ροῆς κατὰ Knudsen, διὰ τῆς βαρύτητος, διὰ τῶν πιέσεων συρρικνώσεως τοῦ στερεοῦ καὶ δι' ἐπανειλημμένων ἐξατμίσεων καὶ συμπυκνώσεων τῆς ὑγρασίας ἐντὸς τοῦ στερεοῦ.

Κατὰ τὴν θεωρίαν τῆς μ ο ρ ι α κ ῆ ς δ ι α χ ὑ σ ε ω ς, ἡ ὑγρασία μεταφέρεται πρὸς τὴν ἐξωτερικὴν ἐπιφάνειαν τοῦ στερεοῦ λόγῳ διαφορᾶς συγκεντρώσεως κατὰ τρόπον ἀνάλογον πρὸς τὴν μετάδοσιν θερμότητος εἰς τὴν μὴ μόνιμον κατάστασιν. Εἰς τὴν περίπτωσιν μονοδιαστάτου διαχύσεως ἰσχύει ἡ ἐξίσωσις Fick:

$$\partial W/\partial t = D(\partial^2 W/\partial x^2) \quad (5-9)$$

ὅπου  $D$  = συντελεστής μοριακῆς διαχύσεως,  $m^2/s$

Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις ὁ συντελεστής διαχύσεως μεταβάλλεται μετὰ τῆς ὑγρασίας τοῦ στερεοῦ καὶ ἡ ἐξίσωσις (5-9) γράφεται ὡς:

$$\partial W/\partial t = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial W}{\partial x} \right) \quad (5-10)$$

Ἡ ἐξίσωσις Fick (5-9) ἔχει λυθῆ δι' ὠρισμένα σχήματα στερεῶν (πλάξ, κύλινδρος, σφαῖρα) κατ' ἀναλογίαν πρὸς τὰς λύσεις τῆς ἐξισώσεως Fourier (1-14, 1-15, 1-16). Ἡ ἐξίσωσις (1-14) διὰ τὴν πλάκα γράφεται εἰς τὴν παρούσαν περίπτωσιν ὡς:

$$t = \frac{4x_0^2}{\pi^2 D} \ln \left[ \frac{8}{\pi^2} \left( \frac{W_c - W_e}{W - W_e} \right) \right] \quad (5-11)$$

Ἡ ἐξίσωσις (5-11) συμπίπτει μέ τήν ἐμπειρικὴν ἐξίσωσιν (5-8) ἐάν ληφθοῦν  $8/\pi^2 \approx 1$  καί

$$K = \frac{\pi^2}{4x_0^2} D, \quad \text{ὅπου } 2x_0 = \text{πάχος τῆς πλακός}$$

Αἱ λύσεις τῆς ἐξισώσεως (5-9) δίδονται ἐπίσης εἰς διαγράμματα παρόμοια πρός τὰ διαγράμματα Gurney-Lurie, ὡς τό Σχ. (1-4). Λεπτομερέστεραι λύσεις δίδονται εἰς τό βιβλίον J. Grank "The Mathematics of Diffusion".

Ἡ ἐπίλυσις τῆς ἐξισώσεως τῆς διαχύσεως μέ μεταβλητόν συντελεστήν διαχύσεως (5-10) γίνεται δι' ἀριθμητικῆς ἀναλύσεως καί δι' ἠλεκτρονικῶν ὑπολογιστῶν. Κατά κανόνα ὁ συντελεστής διαχύσεως (D) ἐλαττοῦται σημαντικῶς, ἐλαττουμένης τῆς ὑγρασίας τοῦ στερεοῦ. Ὁ συντελεστής (D) αὐξάνει σημαντικῶς μετά τῆς θερμοκρασίας τοῦ στερεοῦ καί ἡ μεταβολή αὕτη ἀκολουθεῖ τήν ἐξίσωσιν Arrhenius, εἰς τήν ὁποίαν ὑπεισέρχεται ἡ ἐνέργεια ἐνεργοποιήσεως διὰ τήν διάχυσιν.

Ἡ θεωρία τῆς μοριακῆς διαχύσεως ἐφαρμόζεται εἰς τήν ξήρανσιν τῶν ὁμοιογενῶν καί ὑγροσκοπικῶν στερεῶν, ὡς ἡ ζελατίνη, τό ἄμυλον, ἡ κυτταρίνη κλπ. Χαρακτηριστικὴ πειραματικὴ ἔνδειξις τῆς μοριακῆς διαχύσεως εἶναι ὅτι ὁ χρόνος ξήρανσεως εἶναι ἀνάλογος τοῦ τετραγώνου τοῦ πάχους τοῦ στερεοῦ (ἐξίσωσις 5-11).

Ἡ θεωρία τῆς τριχοειδοῦς ροῆς (capillary flow) ἐφαρμόζεται εἰς τήν ξήρανσιν τῶν πορωδῶν στερεῶν, εἰς τήν ὁποίαν ἡ μεταφορὰ τῆς ὑγρασίας ἐκ τοῦ ἐσωτερικοῦ πρός τήν ἐπιφάνειαν ξήρανσεως προκαλεῖται ὑπό τῶν ἀναπτυσσομένων τριχοειδῶν πιέσεων. Τό στερεόν θεωρεῖται ὅτι συνίσταται ἐκ συστήματος ἀλληλοσυνδεομένων πόρων μικρᾶς διαμέτρου. Εἰς τήν ἀπλοποιημένην περίπτωσιν τριχοειδοῦς σωλήνος διαβρεχομένου ὑπό ὑγροῦ ὕδατος ἀναπτύσσεται τριχοειδῆς πίεσις (p), ἡ ὁποία δι' ὑγροσκοπικά συστήματα δίδεται ὑπό τῆς ἐξισώσεως:

$$p=2\sigma/r$$

όπου  $\sigma$  = έπιφανειακή τάσις του ύδατος, dyn/cm

$r$  = άκτίς τριχοειδοϋς σωλήνος, cm

Αί άναπτυσσόμεναι πιέσεις είναι λίαν ύψηλαί εις τούς μικρούς πόρους, π.χ. ή silica gel έχει πόρους άκτίνος περίπου  $r=0,1$  μ καί ή άντιστοιχοϋσα τριχοειδής πίεσις θά είναι  $p=2 \cdot 70/10^{-5}=1,40 \cdot 10^7$  dyn/cm<sup>2</sup> ή  $p=14,0$  bar.

Παραδείγματα στερεών Ξηρανομένων διά του μηχανισμού τής τριχοειδοϋς ροής είναι ή άμμος, τά μεταλλεύματα, τά ύφάσματα κλπ. Χαρακτηριστικόν του μηχανισμού τριχοειδοϋς ροής είναι ότι ο χρόνος Ξηράνσεως είναι άνάλογος του πάχους του στερεοϋ.

Είς πολλά κολλοειδή καί ύγροσκοπικά στερεά ή Ξήρανσις έπιφέρει σημαντικήν έλάττωσιν του όγκου (συρρίκνωσις). Είς ώρισμένας περιπτώσεις, κατά την ταχείαν Ξήρανσιν, άναπτύσσονται ύψηλαί τάσεις προκαλοϋσαι άνεπιθυμήτους ρωγμάς εις τό στερεόν. Κατά την ταχείαν Ξήρανσιν ώρισμένων προϊόντων σχηματίζεται έπιφανειακώς έν Ξηρόν στρώμα τό όποιον προκαλει σημαντικήν μείωσιν του ρυθμοϋ Ξηράνσεως (case harde - ning). Είς την περίπτωση ταύτην ένδεικνυται ή Ξήρανσις εις ρεϋμα ύγρανθέντος άέρος οϋτως ώστε νά επέλθη μείωσις του ρυθμοϋ Ξηράνσεως καί νά άποφευχθῆ ό σχηματισμός του Ξηροϋ στρώματος.

Ο συνδυασμός μεταφοράς ύγρασίας διά μοριακής διαχύσεως καί διά τριχοειδοϋς ροής δίδεται υπό των κατωτέρω έξισώσεων Krischer:

Διά την διάχυσιν ύδρατμών έντός πορώδους στερεοϋ:

$$\dot{W}_D/A = - \frac{DPM_w}{\Phi RT(P-P_w)} \cdot \left( \frac{dP_w}{dx} \right) \quad (5-13)$$

Διά τριχοειδή ροήν:

$$\dot{W}_c/A = -K_w \rho \left( \frac{dW}{dx} \right) \quad (5-14)$$

Καί ό συνολικός ρυθμός Ξηράνσεως:



$$\dot{W} = \dot{W}_c + \dot{W}_D \quad (5-15)$$

όπου  $D$  = συντελεστής διαχύσεως ύδρατμών εις τόν άέρα,  $m^2/s$

$P$  = συνολική πίεσις συστήματος (π.χ.  $P=1 \text{ bar}$ )

$P_w$  = μερική πίεσις τών ύδρατμών,  $\text{bar}$

$x$  = κατεύθυνσις (μήκος) μεταφοράς ύγρασίας,  $m$

$K_w$  = άγωγιμότης ύγρασίας,  $m^2/s$

$\rho$  = πυκνότης ξηροϋ στερεοϋ,  $kg/m^3$

$\Phi$  = παράγων άντιστάσεως εις τήν διάχυσιν, άδιάστατος

$R$  = Σταθερά άερίων =  $0,0831 \text{ bar } m^3/kmol \text{ K}$

$T$  = άπόλυτος θερμοκρασία,  $K$

$M_w$  = μοριακόν βάρος του ύδατος  $18 \text{ kg/kmol}$

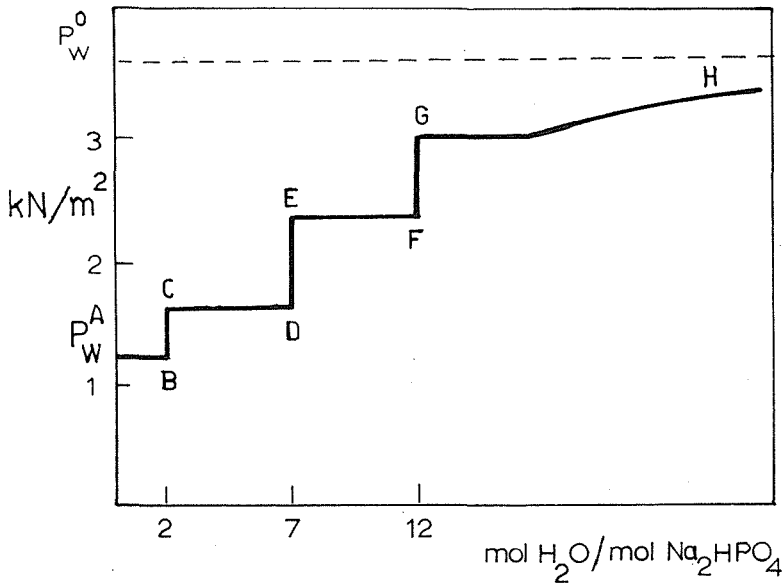
Ο παράγων άντιστάσεως εις τήν διάχυσιν ( $\Phi$ ) και ή άγωγιμότης ύγρασίας δια τριχοειδοϋς ροής ( $K_w$ ) έξαρτώνται άπό τήν γεωμετρίαν του συστήματος και τήν ύγρασίαν ( $W$ ) του στερεοϋ.

#### στ) Ξήρανσις Κρυσταλλικών Ένώσεων

Η Ξήρανσις αλάτων και άλλων ενώσεων περιεχουσών ύδωρ κρυσταλλώσεως εφαρμόζεται διά: 1) τήν άπομάκρυνσιν τής περισεείας τής ύγρασίας άνευ άπωλείας του κρυσταλλικοϋ ύδατος, και 2) τήν άπομάκρυνσιν του κρυσταλλικοϋ ύδατος πρός παραγωγήν του άνύδρου προϊόντος.

Διά τήν μελέτην τής Ξηράνσεως και τής άποθηκεύσεως τών κρυσταλλικών ενώσεων άπαιτούνται θερμοδυναμικά δεδομένα ίσορροπίας του συστήματος κρυστάλλων/ύδατος. Τά δεδομένα ίσορροπίας παρίστανται κυρίως εις διαγράμματα φάσεων μέ συντεταγμένας τήν μερικήν πίεσιν τών ύδρατμών και τήν περιεκτικότητα εις ύγρασίαν. Ως παράδειγμα αναφέρεται τό διάγραμμα φάσεων του συστήματος όξίνου φωσφορικοϋ νατρίου ( $Na_2HPO_4$ ) / ύδατος εις θερμοκρασίαν  $25^\circ C$  (Σχ. 5-4).

Τό  $Na_2HPO_4$  σχηματίζει κρυσταλλικά άλατα μέ 2, 7 και 12  $mol$  ύδατος. Η περιοχή GH του διαγράμματος άντιστοιχει εις διαλύματα του άλατος εις τό ύδωρ. Εις μεγάλας περιεκτικότητας εις ύδωρ ή μερική πίεσις του ύδατος τείνει άσυμπτωτικώς πρός τήν σταθεράν τιμήν τής τάσεως άτμών του ύδατος δια τήν



Σχ. 5-4. Ίσορροπία φάσεων  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-H}_2\text{O}$  εις  $25^\circ\text{C}$

δοθείσαν θερμοκρασίαν ( $P_W^0$ ).

Τό σημείον G ἀντιστοιχεῖ εἰς ἔνυδρον ὄλας μετὰ 12  $\text{H}_2\text{O}$ . Δι ἀπομακρύνσεως μέρους τοῦ κρυσταλλικοῦ τούτου ὕδατος ἐπέρχεται ἀπότομος πτώσις τῆς μερικῆς πιέσεως (σημεῖον F). Ἡ πίεσις αὕτη διατηρεῖται σταθερά ἕως ὅτου ἀπομείνουν μόνον κρύσταλλοι μέ 7  $\text{H}_2\text{O}$  (σημεῖον E). Μεταξύ τῶν σημείων E καί F ὑφίστανται μίγματα ἀλάτων μέ 7  $\text{H}_2\text{O}$  καί 12  $\text{H}_2\text{O}$ . Περαιτέρω ἀπομάκρυνσις τοῦ ὕδατος προκαλεῖ νέαν ἀπότομον πτώσιν τῆς μερικῆς πιέσεως (σημεῖον D). Ἡ πορεία αὕτη συνεχίζεται ἕως ὅτου τελικῶς ληφθῇ τό ἄνυδρον ὄλας εἰς μερικὴν πίεσιν κατωτέρα τῆς  $P_W^A$ .

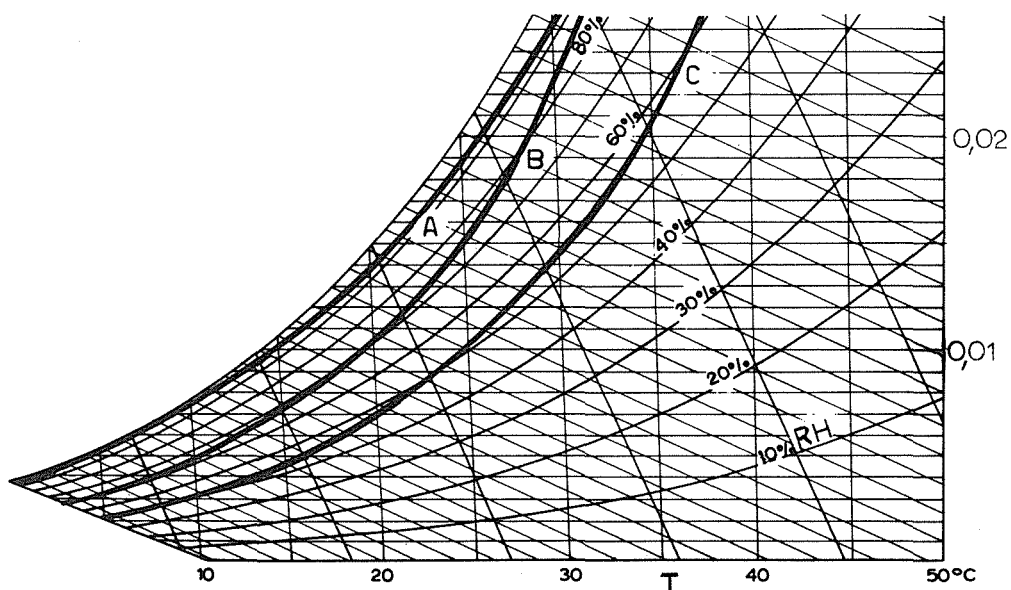
Ἐκ τοῦ διαγράμματος ἰσορροπίας (Σχ. 5-4) ἔπεται ὅτι διὰ τὴν ὑπαρξιν ἑνός ὠρισμένου κρυσταλλικοῦ ἄλατος ἀπαιτεῖται ἡ διατήρησις τῆς μερικῆς πιέσεως τῶν ὑδρατμῶν (ἢ τῆς σχετικῆς ὑγρασίας) εἰς ὠρισμένην τιμὴν. Τό (Σχ. 5-5) παριστᾶ τὰς καμπύλας ἰσορροπίας ἀλάτων  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  ἐπὶ τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου. Ἐκ τῶν διαγραμμάτων τούτων εὐρίσκεται ἡ ἀπαιτούμενη σχετικὴ ὑγρασία (RH) διὰ τὴν διατήρησιν ὠρισμένου μίγματος

κρυστάλλων. Π.χ. διά μίγμα αλάτων μετά ( $7\text{H}_2\text{O}+2\text{H}_2\text{O}$ ) απαιτείται  $\text{RH}=50\%$  εις  $25^\circ\text{C}$ .

### ζ) Ἀδιαβατικοὶ Ξηραντῆρες

Οἱ Ξηραντῆρες ρεύματος ἀέρος θεωροῦνται ὡς ἀδιαβατικοί, ἐάν αἱ ἀπώλειαι θερμότητος πρὸς τὸ περιβάλλον εἶναι ἀμελητέαι. Εἰς τοὺς ἀδιαβατικούς Ξηραντῆρας ἡ θερμότης Ξηράνσεως παρέχεται ὑπὸ τοῦ ρεύματος ἀέρος τὸ ὁποῖον ἀπάγει συγχρόνως τὴν ἐξατμιζομένην ὑγρασίαν. Κατὰ τὴν περίοδον τοῦ σταθεροῦ ρυθμοῦ Ξηράνσεως ἡ θερμοκρασία τοῦ προϊόντος, ὡς ἐξηγήθη προηγουμένως, λαμβάνεται κατὰ προσέγγισιν ὡς ἴση πρὸς τὴν θερμοκρασίαν ὑγροῦ θερμομέτρου.

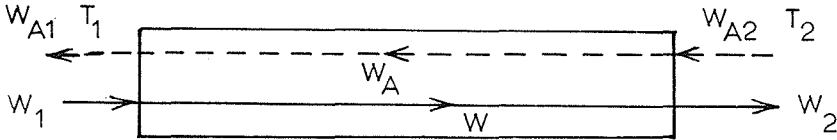
Τὸ Σχ. (5-6) παριστᾷ ἀδιαβατικὸν Ξηραντῆρα λειτουργοῦντα κατ'ἀντιρροήν πρὸς τὸ ρεῦμα ἀέρος.



Σχ. 5-5. Διάγραμμα ἰσορροπίας αλάτων  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ /ὑδατος ἐπὶ τοῦ ψυχομετρικοῦ χάρτου. Καμπύλη (A) κεκορεσμένον διάλυμα, (B)  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , (C)  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Τὸ ὑγρὸν προϊόν τροφοδοτεῖται μὲ ὑγρασίαν  $W_1$  καὶ ἐξέρχεται τοῦ Ξηραντῆρος μὲ ὑγρασίαν  $W_2$  ἐνῶ ὁ ἀήρ εἰσέρχεται μὲ

ύγρασιαν  $W_{A2}$  και έξέρχεται με  $W_{A1}$ . Ός βάσις ύπολογισμού λαμβάνεται ο ρυθμός ροής ξηρού αέρος  $\dot{m}$  εις kg/s kg στερεών. Η



Σχ. 5-6. Άδιαβατικός ξηραντήρ ρεύματος αέρος

έλαχίστη απαιτούμενη ροή αέρος εύρiσκεται από τήν σχέσιν:

$$\dot{m}_{\min} = (W_1 - W_2) / (W_{AW} - W_{A2}) \quad (5-16)$$

όπου  $W_{AW}$  = ύγρασία κεικορεσμένου αέρος εις τήν έξοδον αυτού εκ του ξηραντήρος, ήτοι εις θερμοκρασίαν  $T_{w1}$

Εις τήν πρῶξιν ο ρυθμός ροής του αέρος λαμβάνεται μεγαλύτερος του έλαχίστου, π.χ.  $\dot{m}=1,2 \dot{m}_{\min}$

Έάν τό νωπόν στερεόν εισέλθη εις τόν ξηραντήρα εις θερμοκρασίαν χαμηλοτέραν τής θερμοκρασίας ύγρου θερμομέτρου του αέρος, τουτο θά λάβη ταχέως τήν θερμοκρασίαν ταύτην, διότι ή απαιτούμενη αίσθητή θερμότης είναι άμελητέα έν σχέσει προς τήν θερμότητα έξατμίσεως του ύδατος.

Κατά τήν διάρκειαν τής περιόδου σταθερού ρυθμού ξηράνσεως έντός του άδιαβατικού ξηραντήρος τό δυναμικόν έξατμίσεως είναι ή διαφορά ύγρασίας του αέρος  $\Delta W_A = W_{AW} - W_A$ . Η διαφορά αύτη μεταβάλλεται από  $\Delta W_{A2} = W_{AW} - W_{A2}$  εις τήν είσοδον εις  $\Delta W_{A1} = W_{AW} - W_{A1}$  εις τήν έξοδον του αέρος, συνεπεία τής ύγράνσεως αυτού έντός του ξηραντήρος. Κατά συνέπειαν ο ρυθμός ξηράνσεως μεταβάλλεται μετά τής ύγρασίας του στερεού έντός του ξηραντήρος (έξιίσωσις 5-2).

Δέον νά σημειωθῆ ότι αι καμπύλαι σταθερού ρυθμού ξηράνσεως (Σχ. 5-3) λαμβάνονται πειραματικῶς εις έργαστηριακούς ή ήμιβιομηχανικούς ξηραντήρας εις τούς όποιους χρησι-

μποιοῦνται μικρά σχετικῶς δείγματα στερεῶν καί ὑψηλοί ρυθμοί ροῆς ἀέρος ξηράνσεως. Ὑπὸ τὰς συνθήκας ταύτας ἡ ὑγρασία τοῦ ἀέρος ( $W_A$ ) παραμένει πρακτικῶς σταθερά καί ἐπομένως ἡ διαφορά ὑγρασίας ( $\Delta W_A$ ) δύναται νά ληφθῆ ὡς σταθερά.

Ὁ ὀγκομετρικὸς συντελεστῆς μεταφορᾶς θερμότητος ( $U_v$ ) ἑνὸς ἀδιαβατικοῦ ξηραντήρος ἀέρος ὀρίζεται ὡς:

$$U_v = \frac{\dot{q}}{V\Delta T_L} \quad \text{εἰς } W/m^3K \quad (5-17)$$

ὅπου  $\dot{q} = \dot{m}C_s(T_2 - T_1) =$  ρυθμὸς θερμότητος ξηράνσεως, W

$V = AL =$  ὄγκος ξηραντήρος, διατομῆς A καί μήκους L,  $m^3$

$\Delta T_L =$  μέση λογαριθμικὴ διαφορά θερμοκρασίας ἀέρος/στερεοῦ εἰς τὸν ξηραντήρα, K

$\dot{m} =$  ρυθμὸς ροῆς ξηροῦ ἀέρος, kg/s

$C_s =$  μέση ὑγρὰ θερμότης τοῦ ἀέρος, J/kg K

Ὁ ἀριθμὸς μονάδων μεταφορᾶς (NTU) ἑνὸς ξηραντήρος συνεχοῦς λειτουργίας ὀρίζεται κατ'ἀναλογίαν πρὸς τὴν ἐξίσωσιν (2-18) ὡς:

$$NTU = (T_2 - T_1) / \Delta T_L \quad (5-18)$$

καί τὸ μήκος μονάδος μεταφορᾶς:

$$LNU = L / NTU = \frac{GC_s}{U_v} \quad (5-19)$$

ὅπου G = ρυθμὸς ροῆς ἀέρος, kg/s  $m^2$

#### η) Ξήρανσις εἰς Ρεῦμα Ἀέρος

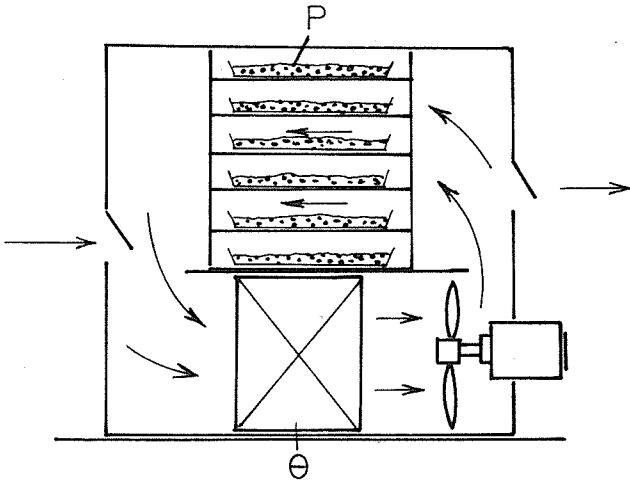
Εἰς τὴν βιομηχανίαν χρησιμοποιοῦνται πολλοὶ τύποι ξηραντήρων ἀναλόγως τῆς φύσεως τοῦ προϊόντος καί τῶν ἀπαιτούμενων συνθηκῶν ξηράνσεως. Οἱ ξηραντήρες κατατάσσονται εἰς διαφόρους κατηγορίας βάσει τοῦ τρόπου μεταδόσεως θερμότητος καί τοῦ τρόπου λειτουργίας (συνεχοῦς ἢ ἀσυνεχοῦς λειτουργίας).

Οἱ ξηραντήρες ρεύματος ἀέρος (air dryers) ἐφαρμόζον-

ται εύρύτητα λόγω τῆς σχετικῶς ἀπλῆς καί οἰκονομικῆς λειτουργίας αὐτῶν. Οὗτοι βασίζονται εἰς τὴν ξήρανσιν τοῦ προϊόντος εἰς ρεῦμα ἀέρος ὃ ὁποῖος ἀπομακρύνει συγχρόνως τὴν ἐξατμιζομένην ὑγρασίαν. Κατωτέρω ἀναφέρονται παραδείγματα τυπικῶν βιομηχανικῶν ξηραντῆρων.

### 1. Ξηραντῆρες μετὰ Ραφιῶν

Οἱ Ξηραντῆρες μετὰ ραφιῶν (shelf dryers) ἀποτελοῦν τὴν ἀπλουστέραν περίπτωσιν ξηραντῆρων εἰς ρεῦμα ἀέρος καί χρησιμοποιοῦνται εἰς ἐργαστηριακὰς, ἡμιβιομηχανικὰς ἢ περιορι-



Σχ. 5-7. Ξηραντῆρ μετὰ ραφιῶν. (P) Προῖον, (Θ) ἐναλλάκτης θερμότητος

σμένης κλίμακος βιομηχανικὰς ἐφαρμογὰς. Οὗτοι εἶναι ἀσυνεχοῦς λειτουργίας καί ἀποτελοῦνται ἀπὸ θάλαμον μετὰ ραφιῶν ἐπί τῶν ὁποίων τοποθετεῖται τὸ πρὸς ξήρανσιν προϊόν, συνήθως ἐντὸς μεταλλικῶν δίσκων (Σχ. 5-7).

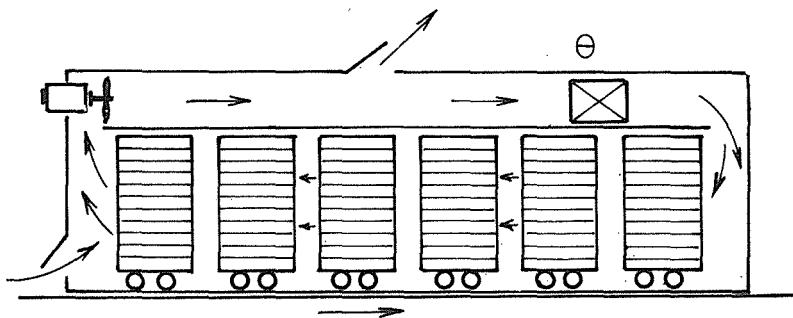
Ὁ ἀήρ ξηράνσεως θερμαίνεται εἰς ἐναλλάκτην θερμότητος (π.χ. σωλῆνων ἀτμοῦ μετὰ ἐξωτερικῶν πτερυγίων) καί διαβιβάζεται παραλλήλως πρὸς τοὺς δίσκους τοῦ προϊόντος, διὰ κα-

ταλλήλου άνεμιστήρος. Δι' οίκονομίαν θερμότητος μέρος τοῦ ἀέρος ἀνακυκλοῦται εἰς τόν ξηραντήρα, τό δέ ὑπόλοιπον ἐξέρχεται εἰς τήν ἀτμόσφαιραν.

Οἱ ξηραντήρες οὗτοι εἶναι ἐφωδιασμένοι μέ σύστημα ἐλέγχου τῆς θερμοκρασίας, τῆς ὑγρασίας καί τῆς ταχύτητος τοῦ ἀέρος. Εἰς ὀρισμένας περιπτώσεις ἀπαιτεῖται αὔξεις τῆς ὑγρασίας τοῦ ἀέρος, ἡ ὁποία ἐπιτυγχάνεται δι' εἰσαγωγῆς "ζωντανοῦ" ἀτμοῦ εἰς τό σύστημα.

## 2. Ξηραντήρες τύπου Σήραγγος

Οἱ Ξηραντήρες τύπου σήραγγος (tunnel dryers) ἀποτελοῦν ἐπέκτασιν τῶν ξηραντήρων μετά ραφιῶν εἰς μεγάλη κλίμακα. Οὗτοι εἶναι συνεχοῦς ἢ ἀσυνεχοῦς λειτουργίας καί ἀποτελοῦνται ἀπό μακράν σήραγγα ρεύματος ἀέρος ἐντός τῆς ὁποίας εὐρίσκονται ὀχήματα (trucks) μετά ραφιῶν. Τό προϊόν τοποθετεῖται ὑπό μορφήν στρώματος, μικροῦ σχετικῶς πάχους, ἐντός μεταλλικῶν ἢ ξυλίνων δίσκων, οἱ ὁποῖοι τοποθετοῦνται ἐπί τῶν ραφιῶν τοῦ ὀχήματος (Σχ. 5-8).



Σχ. 5-8. Ξηραντήρ τύπου σήραγγος. (θ) Ἐναλλάκτης θερμότητος

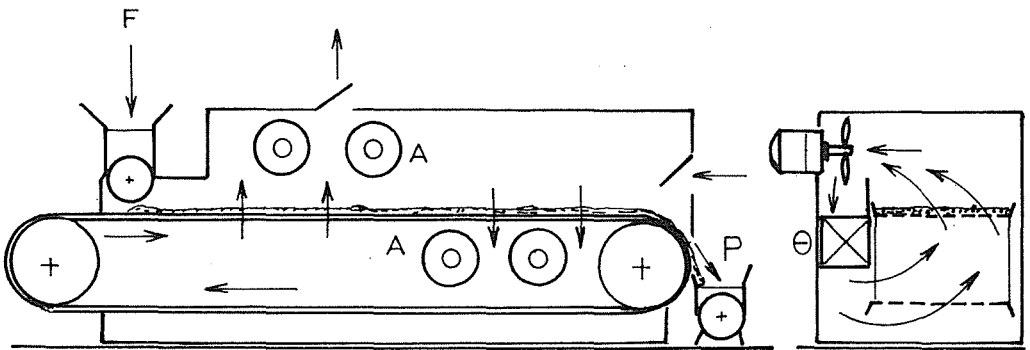
Τά ὀχήματα εἴτε παραμένουν ἀκίνητα κατά τήν διάρκειαν τῆς Ξηράνσεως ἢ κινοῦνται βραδέως ἐντός τῆς σήραγγος, διὰ καταλλήλου μηχανισμοῦ. Κατά τήν συνεχῆ λειτουργίαν ὀχήματα

μέ τό νωπόν προϊόν εισέρχονται περιοδικῶς εἰς τό "ὕγρον" ἄκρον τῆς σήραγγος ἐνῶ ὁ ἀντίστοιχος ἀριθμός ὀχημάτων μέ τό ξηρανθέν προϊόν ἐξέρχεται τοῦ "ξηροῦ" ἄκρου.

Θερμός ἀήρ κυκλοφορεῖ διά τοῦ φουσητήρος καί τοῦ ἐναλλάκτου θερμότητος, ὡς εἰς τήν περίπτωσιν τοῦ ξηραντήρος μετά ραφιῶν. Συνήθως χρησιμοποιεῖται ἀντιρροή ἀέρος/προϊόντος, εἰς ὠρισμένας ὁμως περιπτώσεις ἐνδείκνυται ἡ παράλληλος ροή. Εἶναι δυνατή ἡ λειτουργία δύο σήραγγων ἐν σειρᾷ, τῆς πρώτης λειτουργούσης εἰς παράλληλον ροήν, πρὸς ταχυτέραν ξήρανσιν τοῦ νωποῦ προϊόντος, καί τῆς δευτέρας κατ'ἀντιρροήν, πρὸς ἀπομάκρυνσιν τῆς τελευταίας ὑγρασίας εἰς ὑψηλοτέραν σχετικῶς θερμοκρασίαν.

### 3. Ξηραντήρες μετά Μεταφορικῆς Ταινίας

Εἰς τούς ξηραντήρας μετά μεταφορικῆς ταινίας (conveyor belt dryers) τό ξηραίνόμενον προϊόν μεταφέρεται συνεχῶς ἐπί μεταφορικῆς ταινίας ἐντός τοῦ ξηραντήρος, ἐρχόμενον εἰς ἐπαφήν μέ θερμόν ἀέρα (Σχ. 5-9).



Σχ. 5-9. Ξηραντήρ μετά μεταφορικῆς ταινίας, (A) Ἀνεμιστήρες, (F) τροφοδότῆσις, (P) προϊόν, (Θ) ἐναλλάκτης θερμότητος

Εἰς τούς ξηραντήρας τούτους ὁ θερμός ἀήρ διαβιβάζεται διά τῶν φουσητήρων καθέτως πρὸς τό στρῶμα τοῦ προϊόντος καί διά μέσου τῆς διατρήτου μεταφορικῆς ταινίας (through circu-



lation). Πρός ομοιόμορφον Ξηρανσιν ἡ φορά καί ἡ θερμοκρασία τοῦ ἀέρος μεταβάλλονται κατά μήκος τοῦ Ξηραντήρος. Ὁ ἀήρ εἰσέρχεται εἰς ἕν ἢ περισσότερα σημεῖα τοῦ Ξηραντήρος, καί ἐξέρχεται κατ'ἀνάλογον τρόπον.

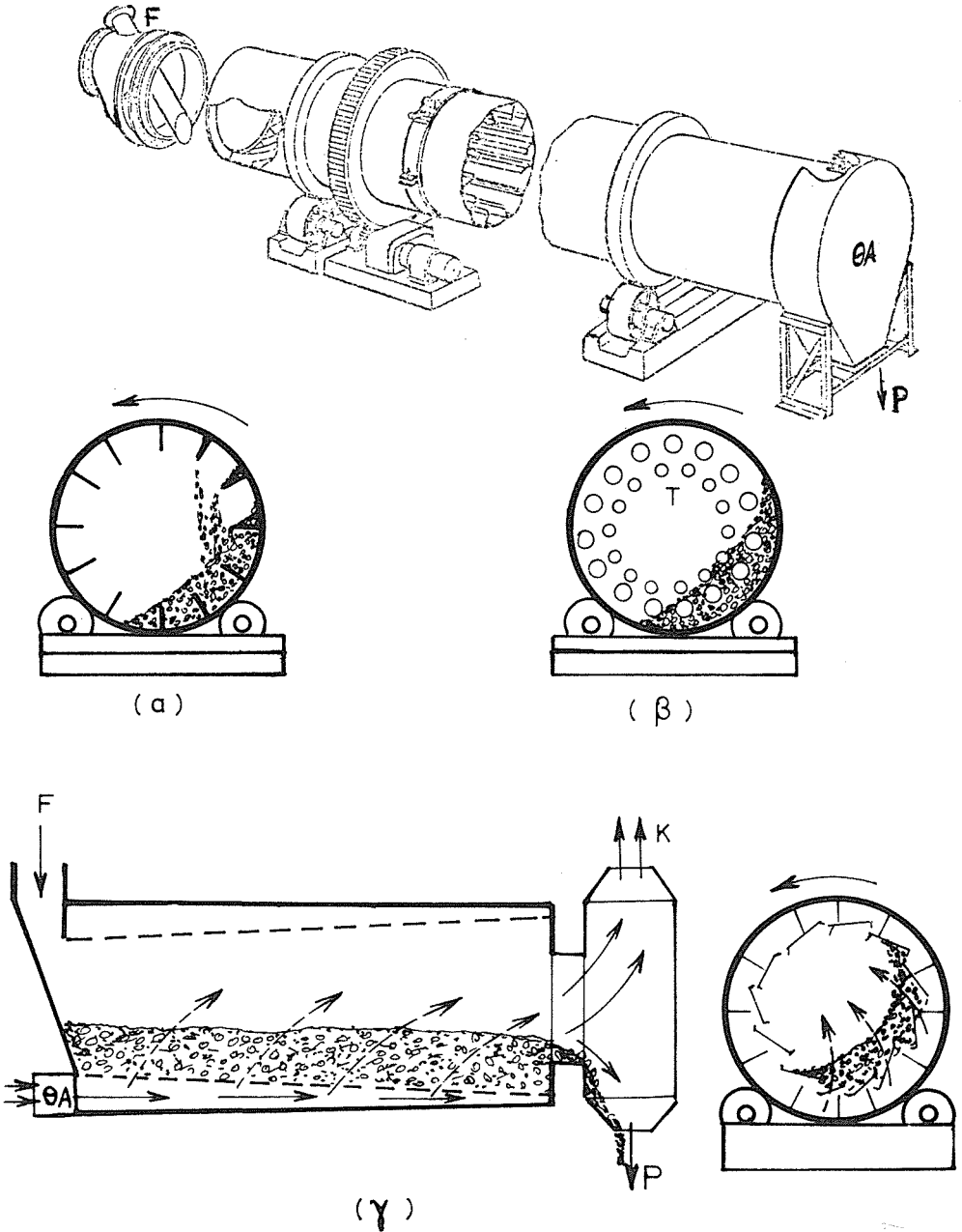
#### 4. Περιτροφικοί Ξηραντήρες

Οἱ περιστροφικοί Ξηραντήρες (rotary dryers) χρησιμοποιοῦνται εὐρύτατα εἰς τὴν βιομηχανίαν λόγῳ τοῦ σχετικῶς χαμηλοῦ κόστους, τῆς καλῆς θερμικῆς ἀποδόσεως καί τῆς συνεχοῦς λειτουργίας αὐτῶν. Οὗτοι ἐνδείκνυνται διὰ στερεά μικροῦ σχετικῶς μεγέθους (τεμαχίδια, κρυστάλλους κλπ.) τὰ ὁποῖα ρέουν εὐκόλως συνεπεία τῆς βαρύτητος καί τῆς περιστροφικῆς κινήσεως τοῦ Ξηραντήρος.

Οἱ περιστροφικοί Ξηραντήρες ἀποτελοῦνται βασικῶς ἀπὸ περιστρεφόμενον κεκλιμένον κύλινδρον ἐντός τοῦ οὐοῦ κινεῖται βραδέως τὸ Ξηραίνόμενον προϊόν. Ἡ διάμετρος τῶν βιομηχανικῶν Ξηραντήρων κυμαίνεται μεταξύ 1,5-2,5 m, τὸ δέ μήκος αὐτῶν μεταξύ 7,5-15 m.

Ἡ θέρμανσις γίνεται βασικῶς κατά δύο τρόπους: (α) Δι' ἐπαφῆς τοῦ προϊόντος μέ ρεῦμα θερμοῦ ἀέρος ἢ καυσαερίων (ἀμεσοί Ξηραντήρες). (β) Δι' ἀγωγῆς θερμότητος ἀπὸ τὰ κυλινδρικά τοιχώματα ἢ ἀπὸ θερμαινομένους σωλήνας. Τυπικοί Ξηραντήρες δεικνύονται διαγραμματικῶς εἰς τὸ Σχ. (5-10).

Οἱ Ξηραντήρες ἀμέσου ἐπαφῆς ἀέρος/προϊόντος χρησιμοποιοῦνται δι' ἀνθεκτικά εἰς τὴν ὀξειδωσιν προϊόντα ἐνῶ οἱ ἔμμεσοι Ξηραντήρες χρησιμοποιοῦνται διὰ προϊόντα εὐαίσθητα εἰς τὴν ὀξειδωσιν καί τὴν ἀνάφλεξιν. Οἰκονομικωτέρα εἶναι ἡ χρῆσις καυσαερίων προερχομένων ἀπὸ καυσιν πετρελαίου ἢ φυσικοῦ ἀερίου καί ἡ μέθοδος αὕτη θερμάνσεως χρησιμοποιεῖται δι' ἀνθεκτικά εἰς τὴν θερμοκρασίαν προϊόντα, ὡς τὰ διάφορα ἀνόργανα ὑλικά. Δι' εὐαίσθητα προϊόντα εἰς τὴν θερμοκρασίαν καί τὴν ρύπανσιν μέ προϊόντα καύσεως χρησιμοποιεῖται ἀήρ θερμαινόμενος δι' ἐναλλάκτου ἀτμοῦ. Ἡ ταχύτης τοῦ ἀέρος ἢ τῶν καυσαερίων ἐντός τοῦ Ξηραντήρος ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὸ εἶδος τοῦ προϊόντος καί κυμαίνεται μεταξύ 0,5-10 m/s.



Σχ. 5-10. Περιστροφικού ξηραντήρες. (α) Άμεσου θερμάνσεως, (β) έμμέσου θερμάνσεως, (γ) μετά πτερυγίων (λουνες), (F) Τροφοδότησις, (P) προϊόν, (ΘΑ) θερμός άηρ, (T) σωληνες ά-τιμού, (K) κυκλών

Είς τούς ξηραντήρας έμμέσου θερμάνσεως χρησιμοποιούνται καυσάερια ή άτμός έντός μανδύου περιβάλλοντος τόν κύλινδρον ή έντός σωλήνων τοποθετημένων είς τά τοιχώματα ή τό κέντρον τοϋ κυλίνδρου. Τό προϊόν θερμαίνεται έρχόμενον είς έπαφήν μέ τάς θερμαινομένας έπιφανείας καί οί παραγόμενοι άτμοί άπάγονται είς τήν άτμόσφαιραν διά μηχανικοϋ έλκυσμοϋ.

Τό κέλυφος τών περιστροφικών ξηραντήρων όμοιάζει πρός τό κέλυφος τών κλιβάνων φρύξεως π.χ. τοϋ τσιμέντου, μέ τήν διαφοράν ότι τό μήκος τών ξηραντήρων είναι συνήθως μικρότερον. Ό κεκλιμένος κύλινδρος στηρίζεται επί καταλλήλων έδράνων καί ή βραδεία περιστροφική κίνησις έπιτυγχάνεται διά κινητήρος καί συστήματος όδοντωτών τροχών.

Η τροφοδότησις τοϋ νωποϋ προϊόντος γίνεται συνεχώς είς τό άνω άκρον τοϋ ξηραντήρος ή δέ έξαγωγή είς τό κάτω άκρον αϋτοϋ. Τό προϊόν άναδεύεται περιστρεφόμενον έντός τοϋ ξηραντήρος διά καταλλήλων πτερυγίων (flights). Ό άριθμός καί τό σχήμα τών πτερυγίων έξαρτάται άπό τό είδος τοϋ στερεοϋ καί άπό τόν έπιθυμητόν χρόνον παραμονής έντός τοϋ ξηραντήρος. Είναι προφανές ότι ό χρόνος παραμονής αύξάνει μετά τοϋ άριθμοϋ τών πτερυγίων.

Η ταχύτης περιστροφής τοϋ ξηραντήρος κυμαίνεται μεταξύ 3-6 στροφών/min (RPM) καί ίσχύει ή σχέσις  $(RPM)D=8$  έως 10, όπου  $D =$  διάμετρος τοϋ κυλίνδρου, m. Η κλίσις τοϋ κυλινδρικοϋ κελύφους έξαρτάται άπό τήν ταχύτητα περιστροφής (RPM) καί κυμαίνεται μεταξύ 20-60 mm/m.

Η φόρτισις τοϋ ξηραντήρος κυμαίνεται μεταξύ 8-12% τοϋ όγκου τοϋ κυλίνδρου. Ό ρυθμός ξηράνσεως άνέρχεται είς 9-45 kg ύδατος/h m<sup>3</sup> μέ βάση τόν όγκον τοϋ κυλίνδρου.

Ό χρόνος παραμονής (τ) έχει μεγάλην σημασίαν είς τήν λειτουργίαν τοϋ ξηραντήρος. Οϋτος δύναται νά υπολογισθῆ έκ τοϋ συγκρατουμένου όγκου καί τοϋ όγκομετρικοϋ ρυθμοϋ ροής τοϋ προϊόντος (έξίσωσις 3-4), εάν ή ροή θεωρηθῆ ως έμβολική. Πειραματικώς ό (τ) προσδιορίζεται διά χρησιμοποιήσεως ίχνηθετών. Επίσης, ό χρόνος παραμονής είς περιστροφικούς ξηραντήρας δύναται νά υπολογισθῆ άπό τήν έμπειρικήν έξίσωσιν:

$$\tau = \frac{KL}{(\text{RPM})DS} + K'u \quad (5-20)$$

όπου  $K, K'$  = έμπειρικά σταθερά

$L$  = μήκος Ξηραντήρος, m

$D$  = διάμετρος Ξηραντήρος, m

$S$  = κλίσις Ξηραντήρος, mm/m

$u$  = ταχύτης άέρος, m/s

Ό χρόνος παραμονής τών βιομηχανικών περιστροφικών Ξηραντήρων κυμαίνεται μεταξύ 10-60 min.

Ή έξίσωσις (5-20) έφαρμόζεται είς Ξηραντήρας άντιρροής άέρος/προϊόντος είς τούς όποίους ό χρόνος παραμονής αύξάνεται, αύξανομένης τής ταχύτητος του άέρος. Τοϋτο συμβαίνει διότι ό άήρ, ίδιαιτέρως είς ύψηλάς ταχύτητας, παρασύρει μέρος του προϊόντος πρός τήν αντίθετον κατεύθυνσιν τής ροής του προϊόντος. Άντιθέτως είς τούς Ξηραντήρας όμορροής άέρος/προϊόντος ό χρόνος παραμονής έλαττοϋται αύξανομένης τής ταχύτητος του άέρος.

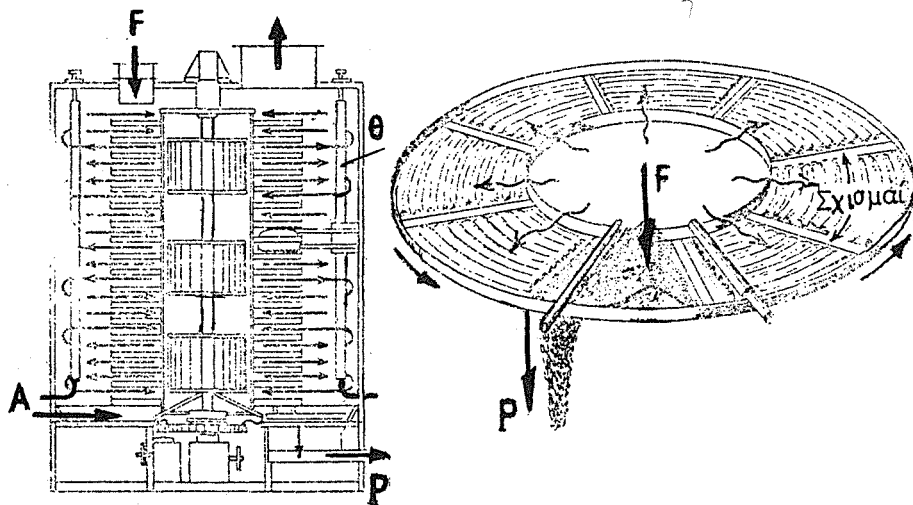
Είς τούς περιστροφικούς Ξηραντήρας μετά πτερυγίων (rotary lounvre dryers) ό θερμός άήρ ή τά καυσαέρια διαβιβάζονται μέσω πτερυγίων διά τής μάζης του Ξηραινομένου προϊόντος. Ή ταχύτης του άέρος κατά μήκος του Ξηραντήρος ρυθμίζεται είς τρόπον ώστε νά άποφεύγεται ή ρευστοποίησης καί ή παράσυρσις τών τεμαχιδίων του προϊόντος (Σχ. 5-10γ).

Είς τούς περιστροφικούς Ξηραντήρας, τούς λειτουργούντας είς ύψηλάς σχετικώς θερμοκρασίας, ένδεικνυται ή μόνωσις του κλιβάνου καύσεως καί του κυλινδρικού κελύφους πρός έλάττωσιν τών θερμικών άπωλειών. Πρός τοϋτο χρησιμοποιείται π.χ. περίβλημα έξ ύαλοβάμβακος καί άμιάντου, καλυμένον έξωτερικώς μέ στρώμα λευκού χρώματος.

##### 5. Ξηραντήρες μετά Περιστρεφομένων Δίσκων

Οί Ξηραντήρες μετά περιστρεφομένων δίσκων (turbo tray dryers) είναι Ξηραντήρες συνεχούς λειτουργίας, άντιρροής ά-

έρος/προϊόντος, ομοιάζοντες προς ώρισμένες καμίνους φρύξεως. Αποτελούνται από κατακόρυφον στήλην περιστρεφομένων δίσκων σχήματος δακτυλίου, επί τῶν ὁποίων κινούνται τὰ τεμάχια τοῦ προϊόντος, ἐρχόμενα εἰς ἐπαφήν μέ ρεῦμα θερμοῦ ἀέρος. Τό νωπὸν προϊόν τροφοδοτεῖται εἰς τὴν κορυφήν τοῦ ξηραντήρος τὸ δέ ξηρὸν ἐξέρχεται τοῦ πυθμένος αὐτοῦ (Σχ.5-11).



Σχ. 5-11. Ξηραντήρ μετά περιστρεφομένων δίσκων. (F) Τροφοδότησις, (P) προϊόν, (A) ἀήρ, (Θ) ἐναλλάκται θερμότητος

Οἱ Ξηραντήρες οὗτοι ἐνδείκνυνται διὰ προϊόντα ὑπό μορφήν κόνεως ἢ πολτοῦ ἀλλά ὄχι διὰ προϊόντα μέ ἴνας ἢ προσκολλώμενα ἐπί τῶν ραφιῶν. Τό προϊόν ἀπλοῦται μηχανικῶς ἐπί τοῦ δίσκου ὡς στρώμα ὁμοιομόρφου πάχους καί μετά μίαν περιστροφήν ἀπομακρύνεται διὰ μηχανικοῦ ξέστρου διὰ μέσου ἀκτινικῶν ἀνοιγμάτων (slots) πρὸς τόν ἀμέσως κάτωθεν εὐρισκόμενον δίσκον. Διὰ τοῦ τρόπου τούτου λειτουργίας ἐπιτυγχάνεται καλή ἀνάδευσις καί ὁμοιόμορφος Ξήρανσις τοῦ προϊόντος.

Ὁ ἀήρ Ξηράνσεως κυκλοφορεῖ παραλλήλως πρὸς τό προϊόν

δι' άνεμιστήρων τύπου στροβίλου, τοποθετημένων είς τόν άξονα τοϋ Ξηραντήρος. Ή θέρμανσις τοϋ άέρος γίνεται δι' έπαφής μέ έναλλάκτας θερμότητος εύρισκομένους είς τήν περιφέρεια τοϋ Ξηραντήρος καί θερμαινομένους δι' άτμοϋ ή διά καυσαερίων.

Οί Ξηραντήρες μετά περιστρεφομένων δίσκων περιέχουν 12-58 δίσκους συνολικής έπιφανείας 5-1500 m<sup>2</sup>. Τό ύψος αύτών κυμαίνεται μεταξύ 2-20 m, ή δέ διάμετρος φθάνει τά 10 m. Ή χρόνος παραμονής κυμαίνεται μεταξύ 10 min - 5 h.

### θ) Ξήρανσις δι' Αίωρήσεως είς Ήέρα

Είς τήν κατηγορίαν ταύτην άνήκουν ή Ξήρανσις στιγμιαίας δράσεως, ή Ξήρανσις διά διασκοπισμοϋ καί ή Ξήρανσις είς ρευστοποιημένην κλίνην. Αί μέθοδοι αύται έφαρμόζονται είς τήν Ξήρανσιν σωματιδίων, αίωρημάτων καί πολτών δι' αίωρήσεως είς ρεύμα θερμοϋ ή Ξηροϋ άέρος.

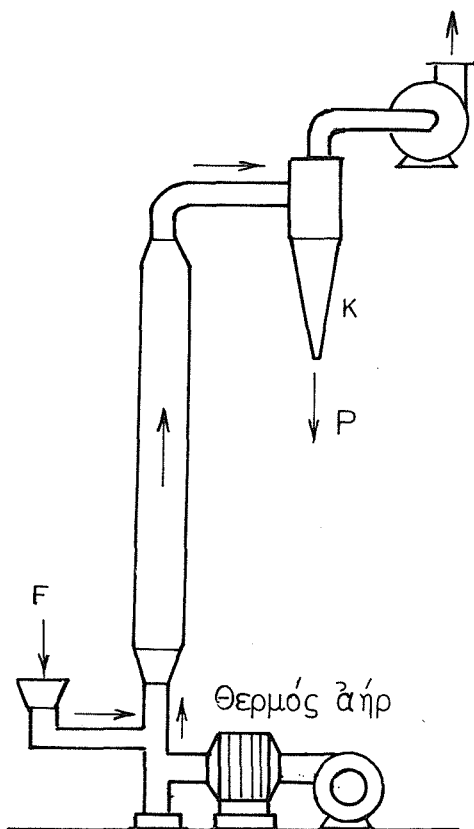
Τά φαινόμενα σχηματισμοϋ, αίωρήσεως καί ροής τών σωματιδίων είς ρεύμα άέρος έξετάζονται είς τήν Τεχνικήν τών Σωματιδίων.

#### 1. Ξηραντήρες Στιγμιαίας Δράσεως

Οί Ξηραντήρες στιγμιαίας δράσεως (flash dryers) καλούνται έπίσης καί Ξηραντήρες πνευματικής μεταφοράς (pneumatic conveyor dryers) καθ' όσον τά Ξηραινόμενα προϊόντα μεταφέρονται συγχρόνως υπό τοϋ ρεύματος άέρος έκτός τοϋ συστήματος Ξηράσεως. Τό Σχ. (5-12) δεικνύει διαγραμματικώς Ξηραντήρα στιγμιαίας δράσεως.

Τά ύγρά σωματίδια ή ό πολτός αίωροϋνται είς ρεύμα θερμοϋ άέρος ό όποιος μεταφέρει ταχέως τό Ξηραινόμενον προϊόν διά μακροϋ κυλινδρικοϋ δοχείου έντός τοϋ όποίου έπιτυγχάνεται ή Ξήρανσις. Χρησιμοποιοϋνται ύψηλαί ταχύτητες άέρος (10-30 m/s) καί σχετικώς μικροί χρόνοι παραμονής (1-10 s). Τό Ξηρόν προϊόν διαχωρίζεται τοϋ ρεύματος άέρος διά μηχανικών κυκλώνων καί ό άήρ έξέρχεται τοϋ συστήματος διά καταλλήλου φουσητήρος έλκυσμοϋ.

Ή Ξηραντήρ οϋτος δέν ένδεικνυται διά σωματίδια μεγάλου



Σχ. 5-12. Ξηραντήρ στιγμαιαίας δράσεως (flash dryer)

σχετικώς μεγέθους, ούτε διά νωπά προϊόντα περιέχοντα άνω των 80% ύγρασίας, λόγω του μικρού χρόνου παραμονής.

Αναλόγως της φύσεως του προϊόντος χρησιμοποιούνται διά την θέρμανσιν καυσαέρια ή έναλλάκται θερμότητας άέρος/άτμου. Είς ώρισμένα συστήματα ή ξήρανσις συνοδεύεται μέ έλάττωσιν μεγέθους (άλεσιν) των τεμαχιδίων είς κλειστόν κύκλωμα άνακυκλοφορίας του άέρος.

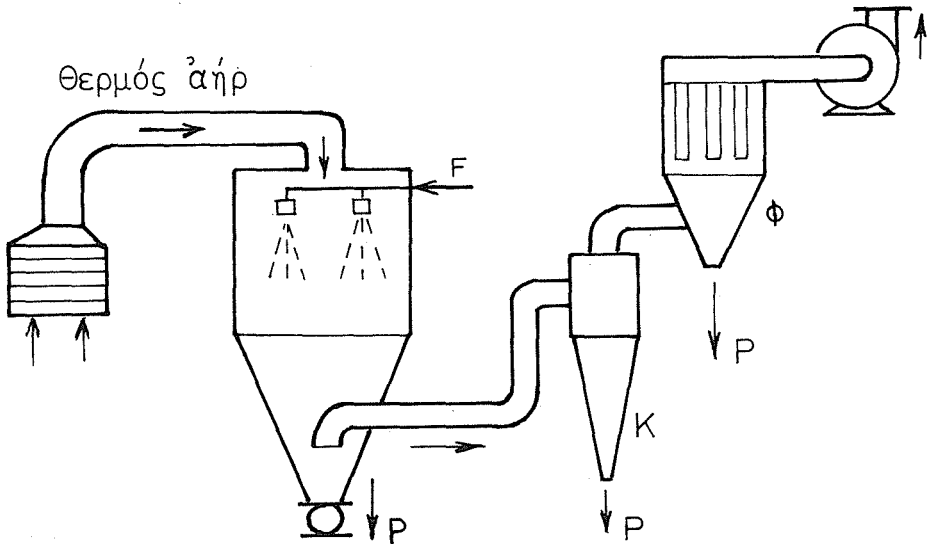
## 2. Ξηραντήρες διά Διασκορπισμού

Οι Ξηραντήρες διά διασκορπισμού ή διά ψεκασμού, (spray dryers) χρησιμοποιούνται εύρύτητα διά την ξήρανσιν διαλυμάτων ή αιώρημάτων δυναμένων νά άντληθούν. Η μέθοδος αύτη ξηράνσεως συνίσταται είς τόν διασκορπισμόν του διαλύματος ή

αίωρήματος εἰς μικρά σωματίδια, (σταγονίδια), τὰ ὁποῖα ἀκολούθως ξηραίνονται ἐντός ρεύματος θερμοῦ ἀέρος μικρᾶς σχετικῶς ταχύτητος. Ἐν ἀντιθέσει πρὸς τὴν ξήρανσιν στιγμιαίας δράσεως, ἡ ξήρανσις διὰ διασκορπισμοῦ ἐφαρμόζεται καὶ διὰ προϊόντα ὑψηλῆς περιεκτικότητος εἰς ὑγρασίαν (ἄνω τῶν 80%).

Τυπικὸν διάγραμμα ξηραντήρος διὰ διασκορπισμοῦ δίδεται εἰς τὸ Σχ. (5-13).

Τὸ διάλυμα τοῦ προϊόντος, συμπυκνωθὲν δι' ἐξατμίσεως εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις, τροφοδοτεῖται διὰ καταλλήλου ἀντλίας εἰς τὴν κορυφὴν τοῦ πύργου ξηράσεως ὅπου διασκορπίζεται πρὸς μικρά σωματίδια δι' εἰδικῆς βαλβίδος. Ἄηρ θερμανθεὶς εἰς τὴν κατάλληλον θερμοκρασίαν, εἰσέρχεται εἰς τὸ ἄνω τμή-



Σχ. 5-13. Ξηραντὴρ διὰ διασκορπισμοῦ (spray dryer). (F) Τροφοδότησις, (P) προϊόν, (K) κυκλῶν, (Φ) φίλτρον ἀέρος

μα τοῦ πύργου προκαλῶν τὴν ἐξάτμισιν καὶ ξήρανσιν τῶν σταγονιδίων τοῦ προϊόντος. Τὸ μίγμα ἀέρος/ξηρῶν σωματιδίων διαχωρίζεται εἰς κυκλῶνα καὶ ἀκολούθως εἰς φίλτρον, ἢ πλυντήριον ἀέρος. Ὁ καθαρὸς ἀήρ ἐξέρχεται τοῦ συστήματος πρὸς τὴν ἀτμόσφαιραν διὰ καταλλήλου ἀνεμιστήρος.

Ἡ ροὴ ἀέρος/προϊόντος εἰς τὸ παράδειγμα τοῦ Σχ. (5-13) εἶναι παράλληλος. Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις ἐφαρμόζονται ἐ-



πίσης συστήματα άντιρροής και μικτής ροής. Είς τήν τελευταίαν περίπτωσην ο άήρ και τό διάλυμα εισέρχονται είς τήν κορυφήν του πύργου, τό ξηρόν προϊόν έξέρχεται του πυθμένος αλλά ο ψυχθείς άήρ αλλάσει φοράν και έξέρχεται της κορυφής του πύργου.

Ο διασκορπισμός του διαλύματος προς σωματίδια έχει μεγάλην σημασίαν τόσον ως προς τόν ρυθμόν ξηράνσεως όσον και ως προς τάς ιδιότητας του ξηρού προϊόντος. Ούτος έπιτυγχάνεται διά μιὰς των τριών μεθόδων:

1. Διά πνευματικής βαλβίδος (pneumatic nozzle). Τό διάλυμα διασκορπίζεται διά ρεύματος πεπιεσμένου άέρος διαβιβαζομένου πλησίον του έξερχομένου υγρού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται είς πειραματικές και μικράς σχετικώς έγκαταστάσεις και έχει ως μειονέκτημα τόν σχηματισμόν σωματιδίων άνομοιομόρφου μεγέθους.

2. Διά Περιστρεφομένων Δίσκων (spinning disks). Τό διάλυμα διαβιβάζεται είς τό κέντρον ταχέως περιστρεφομένου δίσκου (3000-15000 RPM) και διασκορπίζεται προς σωματίδια συννεπία φυγοκέντρου δυνάμεως, έρχόμενον είς έπαφήν μέ τόν θερμόν άέρα του ξηραντήρος.

3. Διά Βαλβίδος Πίεσεως (pressure nozzle). Τό διάλυμα φέρεται δι' άντλίας είς ύψηλήν πίεσιν (50-500 bar) έντός είδικών βαλβίδων και διά περιστροφικής κινήσεως (whirl) ή διά ροής μέσω έγκοπών (grooved core) διασπάται προς σταγονίδια έκτονούμενον προς τόν θερμόν άέρα του ξηραντήρος. Διά της μεθόδου ταύτης έπιτυγχάνεται σχηματισμός σωματιδίων σχετικώς όμοιομόρφων και του αύτου μεγέθους. Αι βαλβίδες πίεσεως ύπόκεινται είς σημαντικήν μηχανικήν φθοράν έν των αιώρουμένων στερεών ώρισμένων διαλυμάτων. Είς τήν περίπτωση ταύτην, άντί του συνήθους άνοξειδώτου χάλυβος, ως κατασκευαστικά ύλικά χρησιμοποιούνται καρβίδια του Βολφραμίου ή είδικά κεραμικά ύλικά.

Τό μέγεθος των σχηματιζομένων σταγονιδίων κυμαίνεται μεταξύ 5-500 μm και έξαρτάται άπό τήν μέθοδον διασκορπισμού και τάς ιδιότητας του διαλύματος (ίξώδες, έπιφανειακήν τάσιν, συγκέντρωσιν των στερεών κλπ.). Η κατανομή μεγέθους

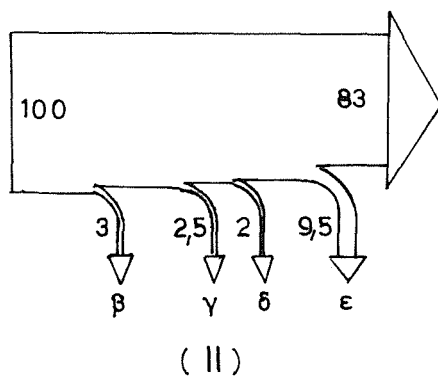
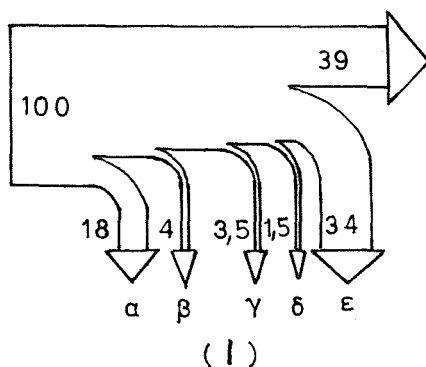
των σταγονιδίων ακολουθεῖ ὠρισμένες στατιστικὰς ἢ ἐμπειρικὰς σχέσεις, αἱ ὁποῖαι ἐξετάζονται εἰς τὴν Τεχνικὴν τῶν Σωματιδίων.

Ὡς θερμαντικὸν μέσον χρησιμοποιεῖται 1) Ἄηρ θερμαινόμενος εἰς ἐναλλάκτικὴν θερμότητος ἀέρος/ἀτμοῦ δι' εὐαίσθητα εἰς τὴν θερμοκρασίαν προϊόντα. Εἰς τὴν περίπτωσιν ταύτην ἡ μεγίστη θερμοκρασία τοῦ ἀέρος Ξηράνσεως εἶναι περί τούς 200 °C λόγω τῆς περιωρισμένης θερμοκρασίας τοῦ ἀτμοῦ θερμάνσεως. 2) Καυσαέρια ἀπὸ καυσίν πετρελαίου ἢ ἀερίων δι' ἀνθεκτικὰ εἰς ὑψηλὰς θερμοκρασίας προϊόντα. Ἡ θερμοκρασία τῶν καυσαερίων δύναται νὰ φθάσῃ τούς 700 °C. Ἀπὸ ἀπόψεως θερμικῆς ἀποδόσεως ἡ θέρμανσις διὰ καυσαερίων εἶναι πλεονεκτικωτέρα ὡς ἐμφαίνεται εἰς τὰ ἰσοζύγια θερμότητος τοῦ Σχ. (4-14).

Ὁ θερμὸς ἀήρ ἐρχόμενος εἰς ἐπαφὴν μὲ τὰ σταγονίδια προκαλεῖ ταχείαν ἐξάτμισιν τῆς ὑγρασίας, ἐνῶ ἡ θερμοκρασία τῶν σωματιδίων διατηρεῖται σταθερά καὶ ἴση κατὰ προσέγγισιν μὲ τὴν θερμοκρασίαν ὑγροῦ θερμομέτρου. Περί τὸ τέλος τῆς Ξηράνσεως ἡ θερμοκρασία τῶν σωματιδίων ἀνέρχεται καὶ πλησιάζει τὴν θερμοκρασίαν τοῦ ἀέρος, ἡ ὁποία πίπτει ἀποτόμως καὶ φθάνει τὴν περιοχὴν 60-70 °C εἰς τὴν ἔξοδον τοῦ θαλάμου Ξηράνσεως. Ἡ ὑψηλὴ ταχύτης Ξηράνσεως ὀφείλεται εἰς τὴν μεγάλην ἐπιφάνειαν τῶν σωματιδίων καὶ τὴν καλὴν ἀνάμιξιν αὐτῶν μετὰ τοῦ θερμοῦ ἀέρος.

Τὰ σχηματιζόμενα σταγονίδια ἔχουν κατὰ προσέγγισιν σφαιρικὸν σχῆμα, τὰ δὲ Ξηρά σωματίδια ἔχουν τὸ αὐτὸ περίπου σχῆμα. Καθίσταται προφανές ὅτι διὰ τὴν ὁμοιόμορφον Ξηράνσιν ἀπαιτοῦνται ὁμοιόμορφα σταγονίδια τοῦ αὐτοῦ περίπου μεγέθους. Εἰς ὠρισμένες περιπτώσεις ἐπιζητεῖται ἡ παραγωγή σωματιδίων μικρᾶς φαινομένης πυκνότητος, ὡς π.χ. διὰ τὴν ταχυτέραν διάλυσιν τοῦ Ξηροῦ προϊόντος. Τοῦτο ἐπιτυγχάνεται διὰ χρησιμοποίησεως ἀερίων ὑψηλῆς θερμοκρασίας διὰ τῆς ὁποίας ἐπέρχεται διαστολὴ τῶν σταγονιδίων καὶ σχηματισμὸς κοίλων Ξηρῶν σωματιδίων.

Δι' εὐαίσθητα εἰς τὴν θερμότητα προϊόντα ἐνδείκνυται ἡ παράλληλος ροὴ ἀέρος/προϊόντος (Σχ. 5-13), διότι τὸ ὑγρὸν προϊόν ἔρχεται εἰς ἐπαφὴν μὲ τὸν θερμὸν ἀέρα ἐνῶ τὸ Ξηρῶν



Σχ. 5-14. Ίσοζύγια θερμότητας Ξηραντήρων διά διασκορπισμού.  
 (I) Θέρμανσις δι' ατμού, (II) Θέρμανσις διά καυσαερίων. Ἀπώ-  
 λειαι θερμότητος εἰς (α) ἀτμολέβητα, (β) θερμαντήρα ἀέρος,  
 (γ) Ξηραντήρα, (δ) κόνιν προϊόντος, (ε) ἐξερχόμενον  
 ἀέρα

θὲν προϊόν ἔρχεται εἰς ἐπαφὴν μὲ τὸν ψυχθέντα ἀέρα. Τὸ μει-  
 ονέκτημα τοῦ συστήματος τούτου εἶναι ὅτι τὸ προϊόν δὲν δύ-  
 νεται νὰ Ξηρανθῆ πέραν ἑνὸς ὠρισμένου σημείου, ἀντιστοιχοῦν-  
 τος εἰς τὴν σχετικὴν ὑγρασίαν τοῦ ψυχθέντος ἀέρος. Ἡ ἐνα-  
 πομένουσα ὑγρασία δύναται νὰ ἀπομακρυνθῆ διά συμπληρωματι-  
 κῆς Ξηράνσεως εἰς ρεῦμα Ξηροῦ ἀέρος.

Ἡ Ξηράνσις κατ' ἀντιρροήν ἔχει καλυτέραν θερμικὴν ἀπό-  
 δοσιν, παράγει προϊόντα λίαν χαμηλῆς ὑγρασίας καὶ ἐνδείκνυ-  
 ται δι' ἀνθεκτικὰ εἰς τὴν θερμοκρασίαν προϊόντα. Ὁ Ξηραν-  
 τήρ μικτῆς ροῆς συνδυάζει τὰ πλεονεκτήματα ἀμφοτέρων τῶν προ-  
 ηγουμένων συστημάτων καὶ ἔχει τὴν μεγαλυτέραν ἀποδοτικότητα  
 εἰς kg/h προϊόντος διά δοθέντα ὄγκον θαλάμου Ξηράνσεως.

Κατά τήν Ξήρανσιν τῶν ὑγροσκοπικῶν προϊόντων χρησιμοποιοῦνται δύο κυκλώματα ἀέρος, ἤτοι τό σύνηθες ρεῦμα τοῦ θερμοῦ ἀέρος Ξηράνσεως ἕτερον ρεῦμα ξηροῦ ἀέρος χαμηλῆς θερμοκρασίας. Ὁ τελευταῖος διαβιβάζεται εἰς τήν βάση τοῦ θαλάμου Ξηράνσεως πρός ψύξιν τοῦ προϊόντος καί μεταφοράν αὐτοῦ εἰς τοὺς διαχωριστήρας ἀέρος/σωματιδίων.

Ἄρισμένα προϊόντα, λίαν εὐαίσθητα εἰς τήν θερμοκρασίαν, Ξηραίνονται πλήρως μέ ἀφυγρανθέντα ἀέρα χαμηλῆς θερμοκρασίας (π.χ. θερμοκρασίας δωματίου). Πρός τοῦτο χρησιμοποιοῦνται Ξηραντήρες μεγάλου ὕψους καί μικρᾶς ταχύτητος ἀέρος. Ὡς παραδείγματα εὐαίσθητων προϊόντων ἀπαιτούντων εἰδικούς Ξηραντήρας ἀναφέρονται οἱ χυμοί τῶν φρούτων καί τό νιτρικόν ἀμμώνιον. Τά διαλύματα τοῦ νιτρικοῦ ἀμμωνίου (καί τῆς οὐρίας) συμπυκνοῦνται πρῶτον εἰς ἔξατμιστήρας κενοῦ καί ἀκολούθως Ξηραίνονται πρός σφαιρίδια εἰς ὑψηλοῦς πύργους εἰς ρεῦμα ἀέρος χαμηλῆς ταχύτητος (prilling towers).

Οἱ ἔξατμιστήρες διά διασκορπισμοῦ χρησιμοποιοῦνται διά τήν Ξήρανσιν μεγάλων ποσοτήτων προϊόντων. Εἰς τὰς μεγάλας ἐγκαταστάσεις ἐπιτυγχάνεται ἔξατμισις 4000-5000 kg/h ὕδατος. Ἡ διάμετρος τῶν συνήθων Ξηραντῆρων κυμαίνεται μεταξύ 1-12m τό δέ ὕψος φθάνει μέχρι τὰ 30 m. Ὡς ὑλικά κατασκευῆς χρησιμοποιοῦνται ὁ ἀνοξειδωτος χάλυψ ἢ τό μπετόν, ἐπενδεδυμένον ἐσωτερικῶς μέ κατάλληλον στρώμα ὑλικοῦ.

Ἡ ἀπαιτουμένη ποσότης ἀέρος Ξηράνσεως εὐρίσκεται ἀπό τὰ ἰσοζύγια μάζης καί ἐνθαλπίας τοῦ συστήματος καί ἀπό τόν ψυχομετρικόν χάρτην. Ἐάν χρησιμοποιοῦνται καυσαέρια πρέπει νά ληφθῇ ὑπ' ὄψιν καί ἡ ὑγρασία ἢ προερχομένη ἀπό τήν καυσίν τῶν ὑδρογονανθράκων.

Ὁ σχεδιασμός τῶν πύργων Ξηράνσεως βασίζεται εἰς ὠρισμένας ἐμπειρικᾶς σχέσεις. Ἀρχικῶς ὑπολογίζεται ὁ ἀπαιτούμενος ρυθμός ροῆς τοῦ ἀέρος Ξηράνσεως ( $Q$  εἰς  $m^3/s$ ). Ἀκολούθως γίνεται δεκτός εἷς χρόνος παραμονῆς ( $\tau$  εἰς  $s$ ) καί ὁ ὄγκος τοῦ πύργου Ξηράνσεως ( $V$ ) ὑπολογίζεται ὡς  $V=Q\tau$  (ἐμβολική ροή). Ὁ χρόνος παραμονῆς λαμβάνεται κατά προσέγγισιν μεταξύ 4-10 s διά Ξηραντήρας διαμέτρου μέχρι 5 m καί μεταξύ 10-20 s διά μεγαλύτερας διαμέτρους. Ὁ λόγος ὕψους/διάμετρον ἐ-

Ξαρτάται από πολλούς παράγοντας ως ή μέθοδος διασκορπισμού, τό είδος καί ό ρυθμός τροφοδοτουμένου προϊόντος, εύρίσκεται δέ από ήμβιομηχανικάς δοκιμάς καί από τήν βιομηχανικήν πείραν.

### 3. Ξηραντήρες Ρευστοποιημένης Κλίνης

Οί Ξηραντήρες ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed dryers) χρησιμοποιούνται είς τήν Ξήρανσιν διαφόρων τεμαχιδίων δυναμένων νά αιώρηθουν είς ρεύμα άέρος. Θερμός άήρ ή καυσαέρια διαβιβάζονται διά μέσου κλίνης τεμαχιδίων είς ταχύτητα τοιαύτην ώστε νά έπέλθη ρευστοποίησις (fluidization) τής κλίνης, έπιτυγχανομένης ούτω ταχείας Ξηράνσεως λόγω τών ύψηλών ρυθμών μεταφοράς θερμότητος καί μάζης.

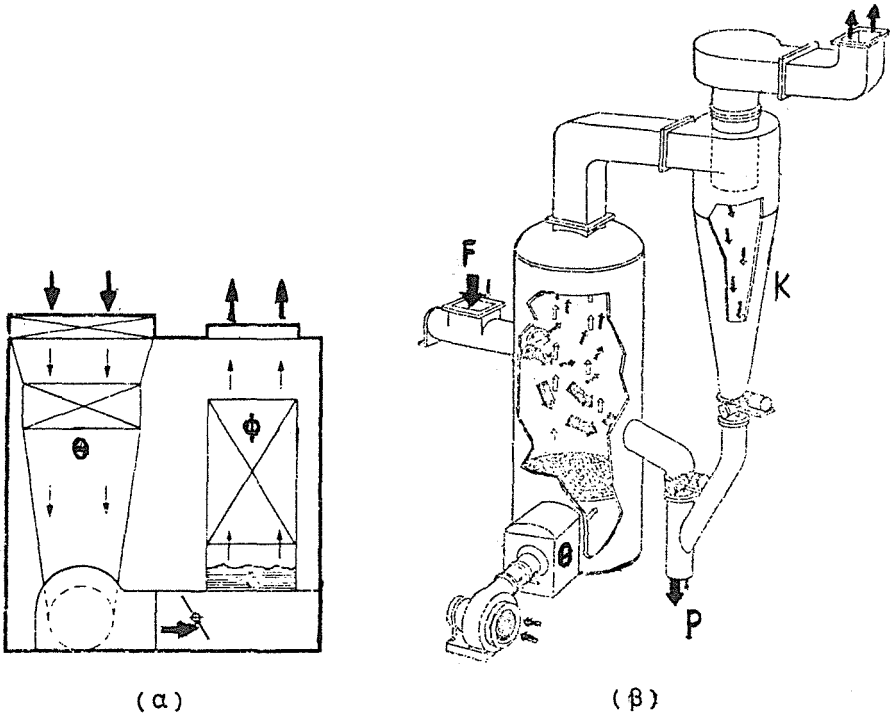
Ή ρευστοποίησις τών στερεών τεμαχιδίων έφαρμόζεται καί είς άλλας διεργασίας τής Χημικής Μηχανικής, ως τήν θέρμανσιν, ψύξιν καί τήν διεξαγωγήν τών χημικών άντιδράσεων.

Έν συγκρίσει πρός τάς έτέρας δύο μεθόδους Ξηράνσεως δι' αιώρήσεως, ή Ξήρανσις ρευστοποιήσεως κλίνης έφαρμόζεται είς τεμαχίδια στερεών μεγαλυτέρων διαστάσεων καί είς προϊόντα σχετικώς άνθεκτικά είς τήν θερμοκρασίαν, δεδομένου ότι ό χρόνος παραμονής είναι σημαντικώς μεγαλύτερος.

Είς τό Σχ. (5-15) δίδονται τά διαγράμματα δύο Ξηραντήρων ρευστοποιημένης κλίνης, ενός συνεχούς καί έτέρου άσυνεχούς λειτουργίας.

Ό θερμός άήρ ή τά καυσαέρια διαβιβάζονται είς τόν πυθμένα τής κλίνης τών τεμαχιδίων διά μέσου είδικου κατανομέως καί είς ταχύτητα διπλασίαν έως τριπλασίαν τής ταχύτητος ένάρξεως ρευστοποίησεως. Ή τελευταία προσδιορίζεται πειραματικώς καί έξαρτάται από τό είδος, τό μέγεθος, τό σχήμα, τήν πυκνότητα καί τήν διάταξιν τών τεμαχιδίων είς τήν κλίνην.

Ή ταχύτης του άέρος κατά τήν λειτουργίαν τών Ξηραντήρων ρευστοποιημένης κλίνης προσδιορίζεται καί διά του έμπειρικού κανόνος του Barple: Αυτή λαμβάνεται ως ίση πρός τό 1/10 τής ταχύτητος έλευθέρας πτώσεως τών τεμαχιδίων διά με-



Σχ. 5-15. Ξηραντήρες ρευστοποιημένης κλίνης. (α) 'Ασυνεχοῦς καὶ (β) συνεχοῦς λειτουργίας. (F) Τροφοδότσεις, (P) προϊόν, (Θ) θερμὸς ἀήρ, (K) κυκλών, (Φ) φύλτρον ἀέρος

γέθη μικρότερα τοῦ 1,5 mm καὶ ἴση πρὸς τὸ 1/5 τῆς ταχύτητος ταύτης διὰ τὰ μεγαλύτερα σωματίδια.

Ἡ ρευστοποίηση προκαλεῖ καλὴν ἀνάδευσιν τῶν τεμαχιδίων καὶ ταχεῖαν ξήρανσιν αὐτῶν. Οἱ ἐπιτυγχανόμενοι συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητος ἀέρος/τεμαχιδίων εἶναι τῆς τάξεως τῶν 250 W/m<sup>2</sup>K. Ἡ θερμοκρασία τῆς κλίνης λαμβάνει μίαν περίπου σταθεράν τιμὴν ἐφ' ὅσον συνεχίζεται ἡ ἐξάτμισις τῆς ὑγρασίας τῶν στερεῶν. Εἰς τοὺς Ξηραντήρας συνεχοῦς λειτουργίας ἔχομεν συνεχῆ τροφοδότσησιν νωπῶν τεμαχιδίων καὶ συνεχῆ ἀπομάκρυνσιν τοῦ Ξηροῦ προϊόντος. Εἰς τοὺς Ξηραντήρας ἀσυνεχοῦς λειτουργίας ἡ ξήρανσις διακόπτεται ὅταν τὸ προϊόν φθάσῃ τὴν ἐπιθυμητὴν περιεκτικότητα ὑγρασίας. Μέρος τοῦ Ξηροῦ προϊόντος ὑπὸ μορφήν λεπτῆς κόνεως παρασύρεται ὑπὸ τοῦ ἀέρος καὶ συλλέγεται εἰς κατάλληλον κυκλώνα ἢ ἄλλον διαχωρι-

στήρα άέρος/στερεών.

Ό σχεδιασμός τών Ξηραντήρων ρευστοποιημένης κλίνης γίνεται βάσει έργαστηριακών δοκιμών μέ κλίνας μικροϋ μεγέθους, π.χ. διάμετρον 10 cm καί ύψος 30 cm. Οί βιομηχανικοί Ξηραντήρες έχουν διάμετρον μεταξύ 1-2,5 m καί ύψος κλίνης στερεών σωματιδίων 0,3-0,6 m. Ό χρόνος παραμονής κυμαίνεται μεταξύ 0,5-3 min.

Ή Ξήρανσις διά ρευστοποιήσεως δύναται νά συνδυασθή μέ χημικάς άντιδράσεις, μέ συσσωμάτωσιν τών λεπτών σωματιδίων ή μέ κάλυψιν τών σωματιδίων δι' ώρισμένης ούσίας.

#### ι) Ξήρανσις Λεπτών Στρωμάτων καί Φύλλων

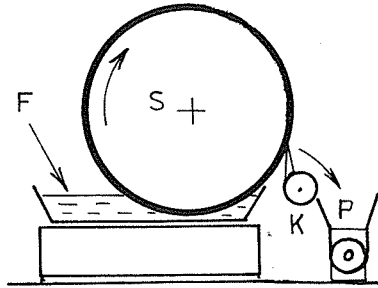
Ή Ξήρανσις λεπτών στρωμάτων διαλυμάτων ή αιώρημάτων καί ή Ξήρανσις φύλλων έφαρμόζονται είς πολλές βιομηχανίας είς μεγάλην κλίμακα καί θεωρούνται οίκονομικά μέθοδοι Ξηράσεως δι' ώρισμένης κατηγορίας ύλικών.

#### 1. Ξηραντήρες μετά Τυμπάνων

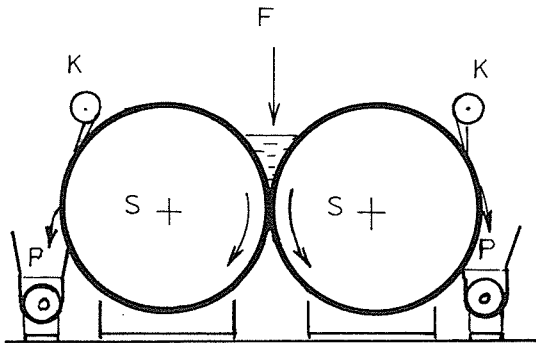
Οί Ξηραντήρες μετά τυμπάνων (drum dryers) έφαρμόζονται είς τήν Ξήρανσιν διαλυμάτων, αιώρημάτων καί πολτών, σχετικώς άνθεκτικών είς τήν θερμοκρασίαν. Οϋτοι άποτελούνται άπό έν ή δύο περιστρεφόμενα όριζόντια τύμπανα θερμαινόμενα έσωτερικώς δι' άτμοϋ. Τό πρός Ξήρανσιν ύλικόν κατανέμεται ύπό μορφήν λεπτοϋ στρώματος επί τής έξωτερικής έπιφανείας τοϋ τυμπάνου. καί Ξηραίνεται ταχέως δι' άγωγής θερμότητος άπό τό θερμαινόμενον τοίχωμα.

Δύο συνήθεις τύποι Ξηραντήρων, άπλοϋ καί διπλοϋ τυμπάνου, δεικνύονται είς τό Σχ. (5-16).

Ή τροφοδότησις καί ή κατανομή τοϋ ύγροϋ επί τής έπιφανείας τοϋ τυμπάνου γίνονται διά διαφόρων διατάξεων, ώς αί παριστώμεναι είς τό Σχ. (5-16). Είς τόν Ξηραντήρα άπλοϋ τυμπάνου τό ύγρόν τροφοδοτείται είς άνοικτόν δοχεΐον έντός τοϋ όποΐου περιστρέφεται τό θερμαινόμενον τύμπανον. Στρωμα τοϋ ύγροϋ προσκολλάται επί τής περιστρεφόμενης έξωτερικής έπιφανείας τοϋ τυμπάνου καί Ξηραίνεται ταχέως λόγω τής ύψηλης θερ-



( α )



( β )

Σχ. 5-16. Ξηραντήρες (α) άπλοϋ τυμπάνου καϋ (β) διπλοϋ τυμπάνου. (F) Τροφοδότσεις, (P) προϊόν, (S) άτμός θερμάνσεως, (K) αποξέουσα μάχαιρα



μοκρασίας του τοιχώματος. Το Ξηρανθέν στρώμα προϊόντος απομακρύνεται συνεχώς του τοιχώματος δι' άποξεούσης μαχαίρας (doctor knife), τοποθετημένης εις την έτεραν πλευράν του τυμπάνου. Το Ξηρόν προϊόν λαμβάνεται υπό μορφήν φύλλων ή κόνεως, αναλόγως των φυσικοχημικών ιδιοτήτων αυτού, και άπομακρύνεται διά μεταφορικού κοχλίου.

Είς τόν Ξηραντήρα διπλών τυμπάνων τό υγρόν τροφοδοτείται εις τόν χῶρον μεταξύ των δύο ΐσων τυμπάνων, τά όποια εύρίσκονται σχεδόν εις έπαφήν μεταξύ των. Ή απόστασις μεταξύ των δύο τυμπάνων είναι μεταβλητή, ρυθμιζομένη αναλόγως του προϊόντος, ούτως ὥστε να άντιστοιχη εις τό διπλάσιον του έπιθυμητου πάχους του στρώματος του υγρου. Τά τύμπανα περιστρέφονται κατ' άντίθετον φοράν και σχηματίζουν λεπτά στρώματα υγρου, τά όποια Ξηραίνόμενα απομακρύνονται διά των άποξεουσών μαχαιρών ὡς εις την περίπτωσην του άπλου τυμπάνου.

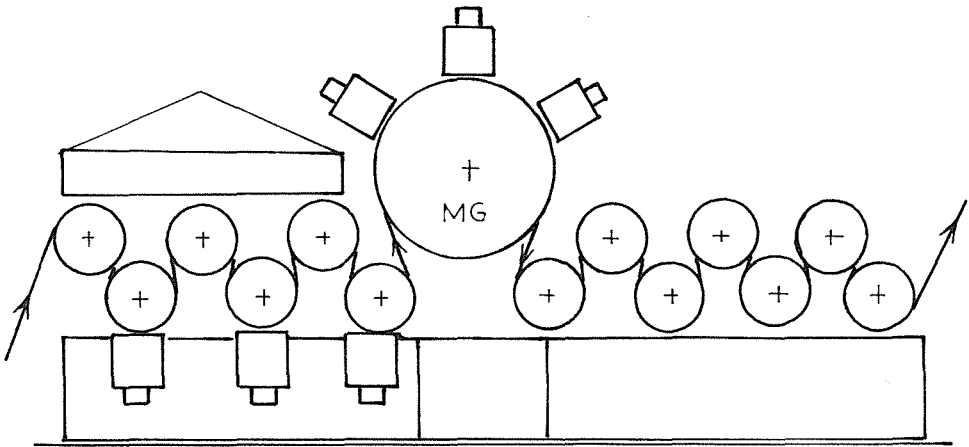
Οί Ξηραντήρες μετά τυμπάνων λειτουργοῦν κατά κανόνα εις την άτμοσφαιρικήν πίεσιν, οί δέ παραγόμενοι άτμοί διαχέονται εις τόν άέρα ή απομακρύνονται δι' άπαγωγού. Διά την Ξηρανσιν ὠρισμένων εύαισθήτων εις την θερμοκρασίαν προϊόντων δύνανται να χρησιμοποιηθοῦν Ξηραντήρες κενου, οί όποιοι όμοιάζουν μέ τά περιγραφέντα συστήματα και εύρίσκονται έντός καταλλήλων κυλινδρικών δοχείων κενου μετά των άπαραιτήτων έξαρτημάτων.

Ή διάμετρος των τυμπάνων των βιομηχανικών Ξηραντήρων κυμαίνεται μεταξύ 0,5-1,5 m τό δέ μήκος μεταξύ 1-3 m. Ή ταχύτης περιστροφής κυμαίνεται μεταξύ 5-20 RPM και ό χρόνος έπαφής μέ την έπιφάνειαν θερμάνσεως είναι 3-12 s.

Διά την θέρμανσιν των τυμπάνων χρησιμοποιείται άτμός πιέσεως 4-6 bar. Αναλόγως της διατάξεως των τυμπάνων ή ενεργός έπιφάνεια (Ξηράνσεως) είναι 60-90% της συνολικής έπιφανείας των κυλίνδρων. Είς την πράξιν έπιτυγχάνονται ρυθμοί έξατμίσεως μεταξύ 10-25 kg/h m<sup>2</sup> (συνολικής έπιφανείας τυμπάνου) και συνολικοί συντελεσταί μεταφοράς θερμότητος, 1000-1500 W/m<sup>2</sup>K. Ή κατανάλωσις άτμου κυμαίνεται μεταξύ 1,2-1,5 kg/kg έξατμιζομένου ὕδατος.

## 2. Ξηραντήρες μετά Κυλίνδρων

Οι Ξηραντήρες μετά κυλίνδρων (cylinder dryers) χρησιμοποιούνται εις τήν Ξήρανσιν φύλλων χάρτου, ύφασμάτων, πλαστικών κλπ. Όμοιάζουν βασικῶς πρὸς τοὺς Ξηραντήρας μετά τυμπάνων ἀλλὰ ἀποτελοῦνται ἀπὸ μεγαλύτερον ἀριθμὸν ὀριζοντίων κυλίνδρων ἐν σειρᾷ διὰ τῆς ἐπιφανείας τῶν ὁποίων διέρχεται τὸ Ξηραίνόμενον ὑλικὸν ὑπὸ μορφὴν φύλλου. Οἱ κύλινδροι θερμαίνονται ἐσωτερικῶς δι' ἀτμοῦ καὶ τὸ φύλλον τοῦ ὑλικοῦ διέρχεται ἐναλλάξ ἄνωθεν καὶ κάτωθεν αὐτῶν, πρὸς ἐπίτευξιν καλύτερας ἐπαφῆς. Τυπικὸς Ξηραντὴρ μετά κυλίνδρων, χρησιμοποιούμενος εἰς τήν βιομηχανίαν χάρτου δεικνύεται διαγραμματικῶς εἰς τὸ Σχ. (5-17).



Σχ. 5-17. Ξηραντὴρ μετά κυλίνδρων

Ὁ Ξηραντὴρ τοῦ Σχ. (5-17) ἀποτελεῖται ἀπὸ δύο ὀριζοντίας σειρᾶς κυλίνδρων μεταξὺ τῶν ὁποίων διέρχεται ταχέως τὸ Ξηραίνόμενον φύλλον τοῦ ὑλικοῦ. Διὰ θερμάνσεως ἀμφοτέρων τῶν πλευρῶν τοῦ φύλλου ἐπέρχεται ταχεῖα καὶ ὁμοίομορφος Ξήρανσις αὐτοῦ. Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις ἐφαρμόζεται θέρμανσις τῆς μιᾶς μόνον ἐπιφανείας τοῦ φύλλου καὶ τοῦτο ἐπιτυγχάνεται δι' ἀντικαταστάσεως τῆς μιᾶς ὀριζοντίας σειρᾶς διὰ μὴ θερμαινομένων κυλίνδρων μικρᾶς διαμέτρου.

Ἡ Ξήρανσις τοῦ νωποῦ φύλλου εἶναι ταχεία εἰς τοὺς πρώτους κυλίνδρους καὶ ἐπιταχύνεται περαιτέρω διὰ διαβιβάσεως ρεύματος ἀέρος πλησίον τῆς ἐπιφανείας τῶν κυλίνδρων. Τοῦτο ἐπιτυγχάνεται δι' ἐγκαταστάσεως εἰς τὸ "ὕγρον" τμήμα τοῦ Ξηραντήρος σειρᾶς ἀπαγωγῶν, ἐντὸς τῶν ὁποίων κυκλοφορεῖ δι' ἀνεμιστήρων ρεῦμα θερμαινομένου ἀέρος. Οἱ ἀρχικοὶ κύλινδροι καλύπτονται ἐνίοτε δι' ἀνθεκτικοῦ εἰς τὴν θερμοκρασίαν πηλῆματος (felt), τὸ ὁποῖον ἐπιταχύνει τὴν ἐξάτμισιν τοῦ ἐλευθέρου ὕδατος τοῦ ὑγροῦ φύλλου.

Εἰς τὸ μέσον τῆς σειρᾶς εὐρίσκεται εἷς κύλινδρος (MG) μεγάλης διαμέτρου (περίπου 5 m) ἐπὶ τοῦ ὁποίου δύνανται νὰ ἐγκατασταθοῦν ἀπαγωγοὶ θερμοῦ ἀέρος. Ἡ ταχύτης περιστροφῆς τῶν κυλίνδρων ἐλαττοῦται πρὸς τὸ "Ξηρόν" ἄκρον τῆς σειρᾶς διότι τὸ ὑλικὸν ὑφίσταται σημαντικὴν ἐλάττωσιν ὄγκου (συρρίκνωσιν) εἰς τὸ τελευταῖα στάδιον τῆς Ξηράσεως.

Εἰς τοὺς Ξηραντήρας μετὰ κυλίνδρων χρησιμοποιεῖται ἀτμός θερμάνσεως ὑπὸ πίεσιν 6-8 bar καὶ ἐπιτυγχάνονται ρυθμοὶ ἐξάτμισεως 10-20 kg/h m<sup>2</sup> (συνολικῆς ἐπιφανείας κυλίνδρων). Οἱ συνολικοὶ συντελεσταὶ μεταφορᾶς θερμότητος κυμαίνονται μεταξὺ 500-1000 W/m<sup>2</sup>K.

#### ια) Ξήρανσις εἰς Ράφια δι' Ἐμμέσου Θερμάνσεως

Οἱ Ξηραντήρες μετὰ ραφιῶν δι' ἐμμέσου θερμάνσεως (jacket shelf dryers) χρησιμοποιοῦνται κατὰ κανόνα διὰ τὴν Ξήρανσιν ὑπὸ κενὸν διαφόρων στερεῶν σωμάτων, εὐαίσθητων εἰς τὰς ὑψηλὰς θερμοκρασίας. Ἡ Ξήρανσις ὑπὸ κενὸν ἐνδείκνυται ἐπίσης ὅταν ἐπιζητεῖται ἡ ἀνάκτησις τοῦ διαλύτου, ὅταν τὸ προϊόν εἶναι εὐαίσθητον εἰς τὸ Ὄξυγόνον τοῦ ἀέρος καὶ ὅταν ἀπαιτεῖται ἡ ἀποφυγὴ τῆς μολύνσεως. Διὰ τῆς Ξηράσεως ὑπὸ κενὸν ἐπιτυγχάνονται ὑψηλότεροι ρυθμοὶ Ξηράσεως καὶ ἀποφεύγεται ἡ δημιουργία ἐπιφανειακοῦ Ξηροῦ στρώματος ἀδιαπερατοῦ εἰς τὴν ὑγρασίαν (case hardening).

Οἱ Ξηραντήρες οὗτοι ἀποτελοῦνται ἀπὸ θάλαμον ἐντὸς τοῦ ὁποίου περιέχεται ἀριθμὸς ραφιῶν (3-20) ἐπὶ τῶν ὁποίων τοποθετοῦνται οἱ δίσκοι μέ τὸ προϊόν. Ἡ θέρμανσις γίνεται δι'

άτμοῦ ἢ διὰ θερμοῦ ὕδατος διαβιβαζομένων διὰ τῶν κοίλων ραφιῶν. Ἡ διάταξις τῶν ξηραντῆρων τούτων εἶναι παρομοία πρὸς τὴν διάταξιν τῶν ξηραντῆρων διὰ καταψύξεως, ὡς δεικνύεται εἰς τὸ Σχ. (5-20).

Ὁ θάλαμος τῶν ραφιῶν συνδέεται μὲ συμπτυκνωτῆρα ἀτμῶν καὶ σύστημα κενοῦ πρὸς ἀπομάκρυνσιν τῶν μὴ συμπτυκνυμένων ἀερίων. Κατὰ τὴν ξήρανσιν ὑπὸ κενόν χρησιμοποιοῦνται ἀπόλυτοι πιέσεις 10-50 Torr.

Οἱ ξηραντῆρες κενοῦ μετὰ ραφιῶν δίδουν χαμηλὸν βαθμὸν ἀποδόσεως καὶ χαμηλοὺς ρυθμοὺς ξηράνσεως. Τοῦτο ὀφείλεται εἰς τὴν δυσχέρειαν μεταδόσεως θερμότητος δι' ἀγωγῆς μεταξὺ ραφιῶν καὶ τεμαχιδίων τοῦ προϊόντος, ἄνευ ἐπαφῆς μετ' αἰέρος (κενόν). Τὸ σύστημα τοῦτο ἐνδείκνυται δι' εὐαίσητα καὶ δαπανηρὰ προϊόντα ὑπὸ μορφὴν τεμαχιδίων τὰ ὅποια δέν δύνανται νὰ ὑποστοῦν τὴν μηχανικὴν ἀνάδευσιν τῆς ἐπομένης μεθόδου, (ιβ).

#### ιβ) Ξήρανσις δι' Ἐμμέσου Θερμάνσεως ὑπὸ Ἀνάδευσιν

Ἡ ξήρανσις τῶν στερεῶν τεμαχιδίων δι' ἐμμέσου θερμάνσεως, ἥτοι δι' ἀγωγῆς θερμότητος ἀπὸ θερμαινομένην ἐπιφάνειαν, ἐπιτυγχάνεται δι' ἀναδέυσεως. Ἡ ἀνάδευσις φέρει εἰς ἐπαφὴν ὅλα τὰ τεμαχίδια μὲ τὴν θερμαινομένην ἐπιφάνειαν καὶ οὕτως ἀποφεύγεται ἡ ὑπερθέρμανσις μερικῶν καὶ ἡ μὴ ξήρανσις ἐτέρων τεμαχιδίων. Ἡ ἀνάδευσις γίνεται εἴτε μηχανικῶς (ἀναδευτῆρες) ἢ διὰ περιστροφῆς τοῦ θαλάμου ξηράνσεως. Οἱ ξηραντῆρες εἶναι συνεχοῦς ἢ ἀσυνεχοῦς λειτουργίας καὶ λειτουργοῦν εἰς ἀτμοσφαιρικὴν πίεσιν ἢ ὑπὸ κενόν.

#### 1. Ξηραντῆρες τύπου Ἀναδευομένου Λέβητος

Οἱ ξηραντῆρες τύπου ἀναδευομένου λέβητος (agitated pan dryers) ἀποτελοῦνται ἀπὸ ἀβαθῆ κυλινδρική δοχεῖα ἐφωδιασμένα διὰ βραδέως περιστρεφομένου ἀναδευτῆρος. Ἡ θέρμανσις γίνεται δι' ἀτμοῦ ἢ διὰ καυσαερίων διαβιβαζομένων εἰς τὰ κοίλα τοιχώματα ἢ τὸν πυθμένα τοῦ λέβητος.

Οἱ ξηραντῆρες οὔτοι ἔχουν διάμετρον μεταξὺ 1-3 m, ὕψος 0,3-0,6 m καὶ θερμαντικὴν ἐπιφάνειαν 2-30 m<sup>2</sup>. Οἱ συνολικοὶ

συντελεσταί μεταφοράς θερμότητας κυμαίνονται μεταξύ 150-400  $W/m^2K$  εις τό νωπόν προϊόν καί 25-250  $W/m^2K$  εις τήν περιόχην τών χαμηλών υγρασιών του προϊόντος. Οι Ξηραντήρες οὔτοι ένδεικνυνται μόνον δι' άνθεκτικά προϊόντα δεδομένου ότι τά τεμαχίδια ύφίστανται μηχανικήν άνάδευσιν ό δέ χρόνος Ξηράνσεως κυμαίνεται μεταξύ 2-8 h.

## 2. Περιστροφικοί Ξηραντήρες Κενού

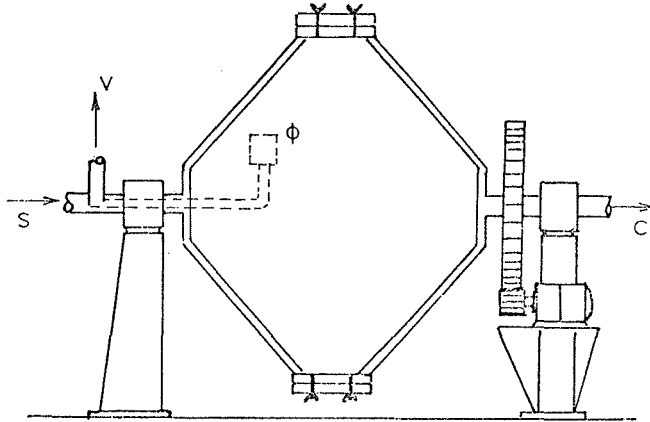
Οι περιστροφικοί Ξηραντήρες κενού (rotary vacuum dryers) έφαρμόζονται διά τήν Ξήρανσιν εύπαθών προϊόντων υπό μορφήν τεμαχιδίων. Ή συνηθεστέρα διάταξις άποτελεΐται από σταθερόν όριζόντιον κέλυφος καί έσωτερικόν άναδευτήρα μετά Ξέστρων. Είς ώρισμένας περιπτώσεις χρησιμοποιεΐται περιστρεφόμενος όριζόντιος κύλινδρος μετά έσωτερικών πτερυγίων.

Οι περιστροφικοί Ξηραντήρες κενού συνήθως έχουν όγκον μέχρι 10  $m^3$  καί περιστροφικήν ταχύτητα 3-5 RPM. Οι έπιτυχανόμενοι ρυθμοί Ξηράνσεως είναι σχετικώς χαμηλοί, ήτοι 5-10  $kg/h m^2$ , ό δέ χρόνος Ξηράνσεως κυμαίνεται μεταξύ 3-8 h.

## 3. Ξηραντήρες τύπου Διπλού Κώνου

Οι Ξηραντήρες τύπου διπλού κώνου (double-cone dryers) χρησιμοποιοΐνται διά τήν Ξήρανσιν υπό κενόν τεμαχιδίων εύαισθήτων εις τήν θερμοκρασίαν καί τήν μηχανικήν άνάδευσιν, ως φαρμάκων, κρυσταλλικών ένώσεων καί πλαστικών. Οὔτοι άποτελοΐνται από δύο ήνωμένους εις τό μέσον κολούρους κώνους, τά τοιχώματα τών όποιών θερμαίνονται δι' άτμοϋ. Τό έσωτερικόν τών κώνων συνδέεται μέσω φίλτρου κόνεως μέ συμπυκνωτήρα άτμών καί σύστημα κενού. Ό Ξηραντήρ περιστρέφεται βραδέως (4-12 RPM) καί αι σωληνώσεις άτμοϋ/κενού συνδέονται μετ' αύτοϋ διά καταλλήλου συστήματος (trunnion), έπιτρέποντος τήν περιστροφικήν κίνησιν (Σχ. 5-18).

Οι Ξηραντήρες οὔτοι έχουν τό πλεονέκτημα τής ταχείας έκκενώσεως του Ξηροϋ προϊόντος μετά τό πέρας τής Ξηράνσεως. Χρησιμοποιοΐνται διάφορα μεγέθη Ξηραντήρων μεταξύ 0,03 - 10  $m^3$  καί ό χρόνος Ξηράνσεως (άσυνεχοϋς λειτουργίας) κυμαίνεται μεταξύ 2-8 h.



Σχ. 5-18. Ξηραντήρ τύπου διπλού κώνου. (S) Άτμος θερμάνσεως, (C) συμπύκνωμα άτμοϋ, (V) κενόν, (Φ) φίλτρον κενού

#### 4. Ξηραντήρες μετά Μεταφορικῆς Ήλικος

Οἱ Ξηραντήρες μετά μεταφορικῆς ἔλικος (screw - conveyor dryers) ἀποτελοῦνται ἀπό ὀριζόντιον δοχεῖον, θερμαινόμενον εἰς τὰ τοιχώματα αὐτοῦ δι' αἵτου, ἐντός τοῦ ὁποῦ περιστρέφονται εἰς ἢ περισσότεροι ἀναδευτήρες τύπου ἔλικος, ταινίας (ribbon), ἢ κωπίων (raddles). Εἰς ὀρισμένας περιπτώσεις ἢ περιστρεφόμενη ἔλιξ εἶναι κοίλη καί ἐντός αὐτῆς διαβιβάζεται αἵτος ἢ θερμόν ὕδωρ.

Ὁ ἀναδευτήρ βελτιώνει τὴν μετάδοσιν θερμότητος καί μεταφέρει συγχρόνως τὸ Ξηραίνόμενον προϊόν πρὸς τὸ "Ξηρόν" ἄκρον τοῦ ὀριζοντίου δοχεῖου. Οἱ Ξηραντήρες οὗτοι λειτουργοῦν κυρίως εἰς τὴν αἵτοσφαιρικὴν πίεσιν καί εἶναι ἀνοικτοί εἰς τὸ ἄνω μέρος αὐτῶν πρὸς ἀπομάκρυνσιν τῶν παραγομένων ὑδρατμῶν.

#### 5. Ξηραντήρες Ἀναδευομένου Λεπτοῦ Στρώματος

Οἱ Ξηραντήρες ἀναδευομένου λεπτοῦ στρώματος (agitated film dryers) ὁμοιάζουσι βασικῶς πρὸς τοὺς ἔξατμιστήρας ἀναδευομένου λεπτοῦ στρώματος (σχ. 3-9). Χρησιμοποιοῦνται διὰ τὴν ταυτόχρονον συμπύκνωσιν καί Ξήρανσιν διαλυμάτων καί αἵ-

ωρημάτων εύαισθήτων είς τήν θερμοκρασίαν. Οί Ξηραντήρες οὗτοι ἀποτελοῦνται ἀπό κατακόρυφον κυλινδρικόν δοχεῖον, θερμαινόμενον είς τά τοιχώματα, ἐντός τοῦ ὁποίου ἐξατμίζεται καί Ξηραίνεται τό προϊόν ὑπό μορφήν λεπτοῦ στρώματος, ἀναδευομένου μηχανικῶς. Οί μηχανικοί ἀναδευτήρες φέρουν κατάλληλα Ξέστρα πρὸς ἀνάδευσιν καί ἀπομάκρυνσιν τοῦ αἰωρήματος καί τοῦ Ξηροῦ προϊόντος.

Οί κατακόρυφοι Ξηραντήρες παρέχουν πολύ μικροῦς χρόνους παραμονῆς (20-30 s). Ὁρισμένα προϊόντα ἀπαιτοῦν μεγαλύτερους χρόνους παραμονῆς (ἄνω τοῦ 1 min), οἱ ὁποιοί ἐπιτυγχάνονται δι' ὀριζοντίων συμπυκνωτῶρων/Ξηραντῶρων, ἐφωδιασμένων μέ κατάλληλον διατάξιιν ἀναδεύσεως καί ἀπομακρύνσεως τοῦ Ξηροῦ προϊόντος. Εἰς μερικάς περιπτώσεις ἐνδείκνυται ὁ συνδυασμός κατακορύφου συμπυκνωτῆρος-ὀριζοντίου Ξηραντῆρος.

#### ιγ) Ξήρανσις δι' Ἀφρισμοῦ

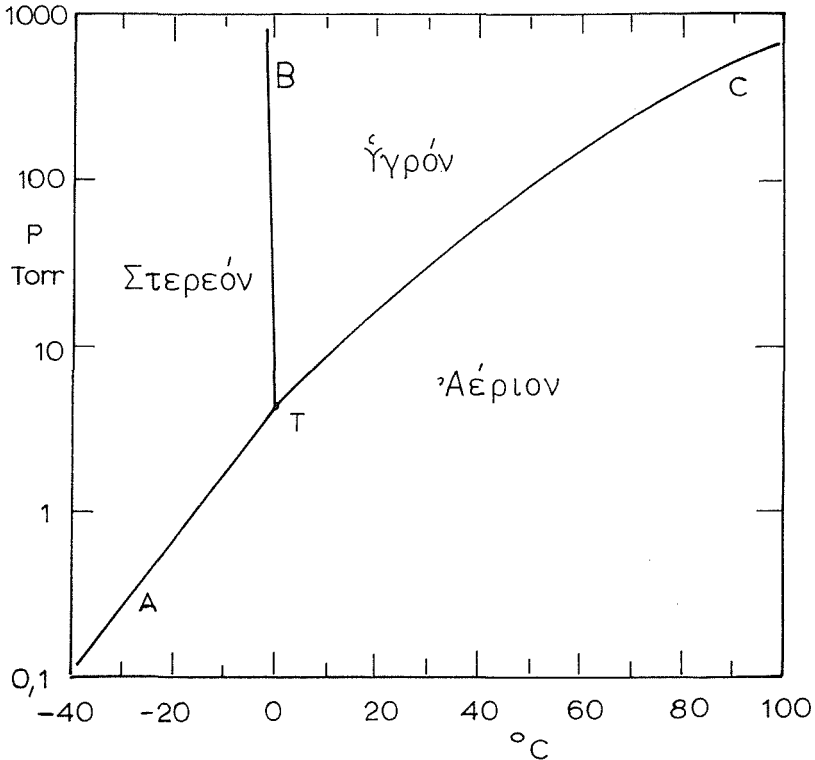
Ἡ Ξήρανσις δι' ἀφρισμοῦ (foam drying) ἐφαρμόζεται δι' εύαίσθητα είς τήν θερμοκρασίαν διαλύματα καί αἰωρήματα, ὡς χυμούς φρούτων καί γάλα. Αὕτη βασίζεται είς τόν σχηματισμόν ἀφρώδους μάζης τοῦ προϊόντος ἥτις, ὡς ἔχουσα μεγάλην ἐπιφάνειαν, Ξηραίνεται ταχέως. Εἰς τήν πρᾶξιιν χρησιμοποιοῦνται δύο τύποι Ξηραντῶρων:

1. Ξηραντήρες Κενοῦ: Οὔτοι εἶναι Ξηραντήρες μετά ραφιῶν ἢ μεταφορικῆς ταινίας ἐπί τῶν ὁποίων κατανέμεται ὡς ἀφρός τό προθερμανθέν ὑγρόν προϊόν. Ἡ εἰσαγωγή ὀρισμένων προϊόντων είς τό κενόν προκαλεῖ ἀφρισμόν, ὁ ὁποῖος δύναται νά καταστή ἐντονώτερος διά διαβιβάσεως ἀδρανοῦς ἀερίου. Ἡ Ξήρανσις ὑπό κενόν διεξάγεται διά συνδυασμοῦ θερμικῆς ἀγωγῆς καί ἀκτινοβολίας.

2. Ξηραντήρες Ἀέρος. Εἰς τό πρὸς Ξήρανσιν διάλυμα ἢ αἰώρημα προστίθεται μικρά ποσότης ἀφριστικῆς οὐσίας (ἐπιφανειακῶς ἐνεργοῦ οὐσίας), καί διαβιβάζεται ἀήρ ὑπό πίεσιν, σχηματιζομένου οὕτως ἐνός σταθεροῦ ἀφροῦ (foam mat). Ὁ σταθερός ἀφρός Ξηραίνεται ταχέως ἐπί μεταφορικῆς ταινίας είς ρεῦμα θερμοῦ ἀέρος.

## ιδ) Ξήρανση διά Καταψύξεως

Ἡ Ξήρανσις διά καταψύξεως (freeze-drying) εἶναι ἡ Ξήρανσις ἑνός κατεψυγμένου προϊόντος δι' ἔξαχνώσεως τοῦ πάγου.



Σχ. 5-19. Διάγραμμα φάσεων τοῦ ὕδατος. Τριπλοῦν σημείου (T) εἰς  $P=4,58$  Torr καὶ  $T=0^{\circ}\text{C}$

Ἡ μέθοδος αὕτη ἐφηρμόσθη ἀρχικῶς διά τήν Ξήρανσιν εὐπαθῶν βιολογικῶν καί φαρμακευτικῶν προϊόντων, ὀνομάζεται δέ καί λυοφίλισις (lyophilization) διότι τά οὕτω Ξηραίνόμενα προϊόντα εἶναι λυόφιλα, ἥτοι ἀπορροφοῦν εὐκόλως τό ὕδωρ. Ἡ Ξήρανσις διά καταψύξεως ἐφαρμόζεται προσφάτως εἰς τήν βιομηχανίαν τροφίμων διά τήν ἀφυδάτωσιν ὠρισμένων εὐαισθητῶν προϊόντων ὑψηλῆς ποιότητος, ἐνδείκνυται δέ διά τήν Ξήρανσιν ὠρισμένων ἀνοργάνων ὑλικῶν, ὡς προσροφητικῶν οὐσιῶν καί φορέων καταλυτῶν.



Ἡ Ξήρανσις διὰ καταψύξεως ἔχει δύο σημαντικά πλεονεκτήματα ἔναντι τῶν ἄλλων μεθόδων Ξηράνσεως: Ἀφ' ἑνός μὲν λαμβάνει χώραν εἰς πολὺ χαμηλᾶς θερμοκρασίας, ἀφ' ἑτέρου δέ τὰ ἀφυδατωμένα προϊόντα διατηροῦν τὸν ἀρχικὸν τῶν ὀγκον, καὶ εἶναι λίαν πορώδη. Τὰ Ξηρά πορώδη προϊόντα ἔχουν μεγάλην εἰδικὴν ἐπιφάνειαν, ἡ ὁποία εἶναι ἐπιθυμητὴ διὰ τὴν ταχείαν ἀπορρόφησιν τοῦ ὕδατος ἢ διὰ τὴν ταχείαν διεξαγωγὴν τῶν χημικῶν ἀντιδράσεων.

Θερμοδυναμικῶς, ἡ ἐξάχνωσις τοῦ πάγου βασίζεται εἰς τὸ διάγραμμα φάσεων τοῦ ὕδατος (Σχ. 5-19).

Ὡς δεικνύεται εἰς τὸ διάγραμμα φάσεων, τὸ τριπλοῦν σημεῖον (triple point) τοῦ ὕδατος (T) ἀντιστοιχεῖ εἰς τὴν θερμοκρασίαν 273,16 K καὶ πίεσιν 4,58 Torr. Ἡ γραμμὴ (TA) ἀντιστοιχεῖ εἰς τὴν καμπύλην ἐξαχνώσεως, ἡ (TB) εἰς τὴν καμπύλην τήξεως καὶ ἡ (TC) εἰς τὴν καμπύλην ἐξατμίσεως τοῦ ὕδατος. Καθίσταται προφανές ὅτι διὰ τὴν ἐξάχνωσιν τοῦ ὕδατος (ἢτοι τὴν ἐξάτμισιν ἄνευ τήξεως) ἀπαιτεῖται ὅπως ἡ τάσις ἀτμῶν τοῦ ὕδατος εἶναι μικροτέρα τῶν 4,58 Torr. Εἰς τὴν πράξιν ἡ Ξήρανσις δι' ἐξαχνώσεως τοῦ πάγου διεξάγεται εἰς πίεσιν κάτω τοῦ 1 Torr, συνήθως μεταξύ 0,2-0,5 Torr. Ὁ Πίναξ 5-3 δίδει ὠρισμένας θερμοδυναμικὰς ιδιότητες τοῦ συστήματος πάγου-ὕδρατμῶν, αἱ ὁποῖαι θεωροῦνται χρήσιμοι εἰς τὴν Ξήρανσιν διὰ καταψύξεως.

Πολλὰ προϊόντα περιέχουν διαφόρους διαλελυμένας οὐσίας εἰς τὸ ὕδωρ, ὡς σάκχαρα, ἄλατα κλπ. Τὰ διαλύματα ταῦτα σηματίζουν εὐτηκτικά μίγματα, τὰ ὁποῖα καταβιβάζουν σημαντικῶς τὸ σημεῖον πήξεως, εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις μέχρι  $-30^{\circ}\text{C}$ . Διὰ τοῦτο ἡ κατάψυξις τοῦ νωποῦ προϊόντος πρό τῆς Ξηράνσεως πρέπει νὰ γίνεται εἰς ἐπαρκῶς χαμηλὴν θερμοκρασίαν ὥστε τὸ προϊόν νὰ στερεοποιηθῇ πλήρως.

Ἡ Ξήρανσις διὰ καταψύξεως διεξάγεται κυρίως εἰς Ξηραντήρας ἀσυνεχοῦς λειτουργίας παρομοίους πρὸς τοὺς Ξηραντήρας κενοῦ μετὰ ραφιῶν (Ia). Τυπικὴ ἐγκατάστασις δεικνύεται διαγραμματικῶς εἰς τὸ Σχ. (5-20).

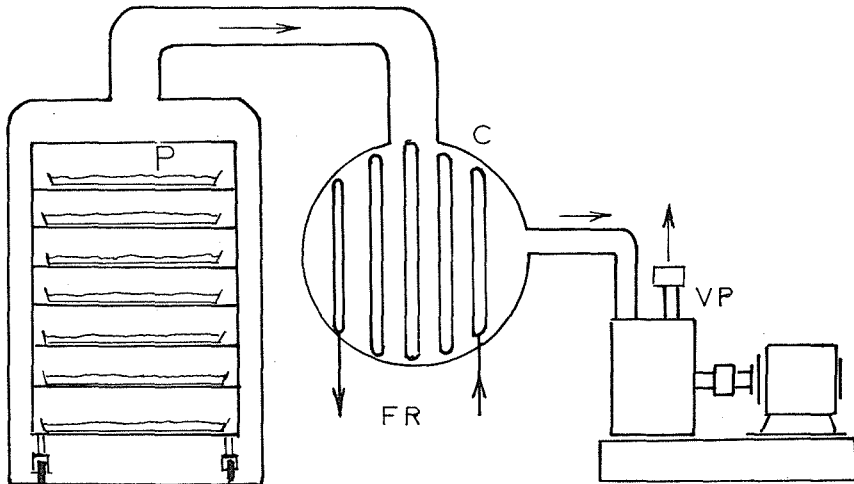
Τὸ νωπὸν προϊόν, ὑπὸ μορφήν τεμαχιδίων ἢ στρώματος μικροῦ πάχους, καταψύχεται ἐντὸς ἀβαθῶν δίσκων εἰς κατάλληλον

## Θερμοδυναμικαί Ἰδιότητες Πάγου/Ὑδρατμῶν

| Θερμοκρασία<br>°C | Τάσις ἀτμῶν<br>Torr | Θερμότης<br>ἐξαχνώσεως<br>kJ/kg | Εἰδικός ὄγκος<br>ἀτμῶν<br>m <sup>3</sup> /kg |
|-------------------|---------------------|---------------------------------|--|
| 0                 | 4,6                 | 2836                            | 205,0  |
| -1,1              | 4,2                 | 2836                            | 223,7  |
| -3,9              | 3,3                 | 2837                            | 279,5  |
| -6,7              | 2,6                 | 2837                            | 350,8  |
| -9,4              | 2,0                 | 2838                            | 442,7  |
| -12,2             | 1,6                 | 2839                            | 561,0  |
| -15               | 1,2                 | 2839                            | 716,0  |
| -17,8             | 0,95                | 2839                            | 915,7  |
| -20,6             | 0,73                | 2840                            | 1180   |
| -23,3             | 0,56                | 2840                            | 1529   |
| -26,1             | 0,42                | 2840                            | 1990   |
| -28,9             | 0,32                | 2840                            | 2618   |
| -31,7             | 0,24                | 2840                            | 3460   |
| -34,4             | 0,18                | 2840                            | 4594   |
| -37,2             | 0,13                | 2840                            | 6157   |
| -40               | 0,10                | 2840                            | 8302   |

ἐγκατάστασιν καταψύξεως (π.χ. ρεῦμα ψυχροῦ ἀέρος). Τό κατεψυγμένον προϊόν τοποθετεῖται ἐπὶ τῶν ραφιῶν τοῦ Ξηραντήρος καὶ ἐφαρμόζεται ταχέως ὑψηλὸν κενὸν οὕτως ὥστε νά μὴν ἐπέλθῃ τῆξις αὐτοῦ. Ἡ κατάψυξις δυνατόν νά ἐπιτευχθῇ καὶ ἀπ'εὐθείας ἐντὸς τοῦ Ξηραντήρος διὰ ταχείας ἐξατμίσεως μέρους τῆς ὑγρασίας ὑπὸ ὑψηλὸν κενόν.

Ἡ ἐξάχνωσις τοῦ ὕδατος καὶ ἡ Ξήρασις τοῦ προϊόντος ἀπαιτεῖ σημαντικὰς ποσότητας θερμότητος ἢ ὁποία μεταδίδεται εἰς τὸ προϊόν δι'ἀγωγῆς καὶ ἀκτινοβολίας ἀπὸ τὰ ράφια, τὰ **ὅποια** θερμαίνονται ἐσωτερικῶς διὰ κυκλοφορίας θερμοῦ ὕδατος. **Οἱ** ὕδρατμοὶ συμπυκνοῦνται εἰς συμπυκνωτήρας χαμηλῆς θερμοκρασίας καὶ τὸ κενόν διατηρεῖται διὰ καταλλήλου ἀντλίας.



Σχ. 5-20. Ξηραντήρ διά καταψύξεως (freeze-dryer). (P) Προϊόν, (C) συμπυκνωτήρ, (FR) ψυκτικόν κύκλωμα, (VP) άντλία κενού

Ἡ ἐλευθέρα ὑγρασία τοῦ νωποῦ προϊόντος σχηματίζει πάγον κατά τήν κατάψυξιν καί ἀπομακρύνεται δι' ἔξαχνώσεως, σχηματιζομένου ἑνός πορώδους στερεοῦ. Ἡ προσροφημένη ὑγρασία ἀπομακρύνεται δι' ἀνυψώσεως τῆς θερμοκρασίας τοῦ πορώδους στερεοῦ. Ἡ θερμοκρασία τοῦ προϊόντος κατά τό πρῶτον στάδιον τῆς Ξηράνσεως ἀντιστοιχεῖ εἰς τήν θερμοκρασίαν ἰσορροπίας πάγου/ἀτμῶν διά τήν ἐπικρατούσαν πίεσιν. Κατά τά τελευταῖα στάδια τῆς Ξηράνσεως, ἡ θερμοκρασία τοῦ Ξηροῦ προϊόντος ἀνέρχεται σημαντικῶς, προσεγγίζουσα τήν θερμοκρασίαν τοῦ περιβάλλοντος θαλάμου.

Εἰς τήν Ξήρανσιν διά καταψύξεως ἡ ἀντίστασις εἰς τήν μετάδοσιν θερμότητος εἶναι μεγαλυτέρα τῆς ἀντιστάσεως εἰς τήν μεταφοράν μάζης. Τοῦτο συμβαίνει διότι τό σύστημα λειτουργεῖ κυρίως ὑπό κενόν, ὅποτε ἡ θερμότης δύναται νά μεταδοθῆ μόνον δι' ἀγωγῆς καί δι' ἀκτινοβολίας. Ὁ ρυθμός Ξηράνσεως αὐξάνεται, 1) Διά καλυτέρας ἐπαφῆς προϊόντος/θερμαινομένης ἐπιφανείας, ὡς διά συμπίεσεως τοῦ προϊόντος μεταξύ θερμαινομένων πλακῶν (accelerated freeze-drying). 2) Δι' ὑπερύθρου ἀκτινοβολίας. 3) Διά διηλεκτρικῆς θερμάνσεως (βλέπε 5 ιε). 4) Διά διαβιβάσεως θερμοῦ ἀέρος εἰς κατάλληλον πίεσιν. Ἡ θερμική ἀγωγιμότης τοῦ πορώδους Ξηροῦ στρώματος προϊόντος

είναι λίαν χαμηλή, τῆς τάξεως μεγέθους τῶν μονωτικῶν ὑλικῶν.

Δόγω τοῦ ὑψηλοῦ κενοῦ, οἱ παραγόμενοι ἀτμοί κατὰ τὴν ξήρανσιν διὰ καταψύξεως ἔχουν πολὺ μεγάλον εἰδικόν ὄγκον (βλέπε Πίνακα 5-3). Διὰ τοῦτο οἱ ἀγωγοί ἀτμῶν ἐκ τοῦ ξηραντήρος πρὸς τὸν συμπυκνωτήρα πρέπει νὰ εἶναι μεγάλης διαμέτρου πρὸς ἀποφυγὴν μεγάλων πτώσεων πιέσεως. Ἡ ἐπιτρεπομένη πτώσις πιέσεως εἶναι μικρά, ἥτοι τῆς τάξεως 1-3 mmHg, δεδομένου ὅτι μεγαλύτερα πτώσις πιέσεως ἐπιφέρει τῆξιν τοῦ πάγου εἰς τὸ προϊόν. Ἡ ταχύτης σχεδιασμοῦ τῶν ὑδρατμῶν εἰς πίεσιν 1 Torr εἶναι περίπου 100 m/s.

Οἱ συνήθεις συμπυκνωτήρες ἀποτελοῦνται ἀπὸ πλάκας, ψυχομένας εἰς θερμοκρασίαν κάτω τῶν  $-30^{\circ}\text{C}$  διὰ κυκλοφορίας ἀμμωνίας, Freon κλπ.

Οἱ ὑδρατμοί συμπυκνοῦνται ὑπὸ μορφὴν πάγου, ὃ ὁποῖος ἀπομακρύνεται διὰ τήξεως μετὰ τὸ πέρασ τῆς περιοδικῆς λειτουργίας τοῦ συστήματος, ὁπότε ἀποκαθίσταται ἡ ἀτμοσφαιρική πίεσις. Τὰ μὴ συμπυκνούμενα ἀέρια ἀπομακρύνονται δι' ἀντλίας κενοῦ, ἱκανῆς νὰ διατηρήσῃ τὴν ἀπαιτούμενη λίαν χαμηλὴν πίεσιν τοῦ συστήματος. Πρὸς τοῦτο χρησιμοποιοῦνται ἀντλίας ἐλαίου μεγάλης χωρητικότητος, λειτουργοῦσαι εἰς ὑψηλὰς σχετικῶς θερμοκρασίας καὶ ἀκομακρύνουσαι τὰς μικρὰς ποσότητας ὑδρατμῶν, οἱ ὁποῖοι διέρχονται τοῦ συμπυκνωτήρος. Τὸ ὅλον σύστημα πρέπει νὰ εἶναι ὅσον τὸ δυνατόν ἀεροστεγές πρὸς ἀποφυγὴν τῶν διαρροῶν ἀέρος ὑπὸ τὸ ὑψηλὸν κενόν.

Ἐντὶ τῶν ψυχομένων συμπυκνωτήρων, εἰς μερικὰς περιπτώσεις χρησιμοποιοῦνται στερεὰ προσροφητικὰ οὐσίαι αἱ ὁποῖαι ἀπομακρύνουν τοὺς ὑδρατμούς εἰς πολὺ χαμηλὴν πίεσιν, ὡς τὰ μοριακὰ κόσκινα (molecular sieves). Εἰς μικρὰς ἐγκαταστάσεις εἶναι δυνατὴ ἡ ἀπομάκρυνσις τῶν ὑδρατμῶν διὰ μιᾶς καταλλήλου ἀντλίας κενοῦ, ἀνευ χρησιμοποιήσεως χωριστοῦ συμπυκνωτήρος.

Ἡ ξήρανσις διὰ καταψύξεως δύναται νὰ ἐπιτευχθῇ καὶ εἰς τὴν ἀτμοσφαιρικήν πίεσιν εἰς ρεῦμα ψυχροῦ ἀέρος. Πρὸς τοῦτο ἀπαιτεῖται ἀήρ πολὺ χαμηλῆς ὑγρασίας, ἐπιτυγχανόμενος διὰ ψύξεως καὶ ἀφυγάνσεως τοῦ ἀτμοσφαιρικοῦ ἀέρος. Ὁ ἀήρ οὗτος, διαβιβαζόμενος διὰ τοῦ κατεψυγμένου ὑλικοῦ, προκαλεῖ

έξαχνωσιν τοῦ πάγου μέ δρῶσαν δύναμιν τήν διαφοράν μερικῶν πιέσεων ὑδρατμῶν μεταξύ τῆς ἐπιφανείας τοῦ πάγου καί τῆς κυρίας μάζης τοῦ ἀέρος. Ἡ ἀτμοσφαιρική ξήρανσις δι'έξαχνώσεως εἶναι βραδεία καί ἀντιοικονομική λόγω τοῦ χαμηλοῦ ρυθμοῦ ξηράνσεως. Ὡς πλεονεκτήματα αὐτῆς θεωροῦνται ἡ ἔλλειψις συστήματος κενοῦ καί ἡ καλυτέρα μεταφορά θερμότητος.

Ἡ ξήρανσις διὰ καταψύξεως ἀπαιτεῖ σημαντικόν χρόνον ξηράνσεως κυμαινόμενον μεταξύ 6-18 h. Αἱ κυριώτεραι παράμετροι αἱ ἐπιδρῶσαι ἐπί τοῦ χρόνου ξηράνσεως εἶναι ἡ μετάδοσις θερμότητος καί τό μέγεθος τῶν τεμαχιδίων. Οἱ μεγάλοι χρόνοι ξηράνσεως καί αἱ ὑψηλαί δαπάναι ἐγκαταστάσεως (κενοῦ καί ψύξεως) καθιστοῦν τήν μέθοδον σχετικῶς δαπανηράν καί ἐφαρμοσίμον εἰς εἰδικάς περιπτώσεις εὐαισθητῶν προϊόντων ὑψηλῆς ἀξίας.

#### ιε) Ὑπέρυθρος καί Διηλεκτρική Ξήρανσις

Ἡ ὑπέρυθρος ἀκτινοβολία χρησιμοποιεῖται εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις ὡς πηγή θερμότητος διὰ τήν ξήρανσιν διαφόρων ὑλικῶν. Ὡς πλέον κατάλληλος διὰ τήν ταχείαν θέρμανσιν θεωρεῖται ἡ ἀκτινοβολία μήκους κύματος 0,7-7 μμ.

Ἡ ὑπέρυθρος ἀκτινοβολία ἀκολουθεῖ τὰς γενικὰς γραμμάς τῆς ἀκτινοβολίας θερμότητος (Κεφ. 1). Ἡ θερμοκρασία τῶν ἐπιφανειῶν ὑπερύθρου ἀκτινοβολίας κυμαίνεται μεταξύ 300-2000 °C καί τό μήκος κύματος ἐλαττοῦται ἀξανομένης τῆς θερμοκρασίας.

Ὡς πηγαί ὑπερύθρου ἀκτινοβολίας χρησιμοποιοῦνται ἠλεκτρικαί ἀντιστάσεις (λαμπτήρες) καταλλήλου θερμοκρασίας καί μεταλλικαί ἐπιφάνειαι θερμαινόμεναι διὰ καύσεως ἀερίων. Αἱ πηγαί αὗται τοποθετοῦνται συνήθως εἰς τό ἐσωτερικόν κλιβάνων, ἐντός τῶν ὁποίων διέρχονται ἐπί μεταφορικῆς ταινίας τά ξηραίνόμενα ὑλικά.

Ἡ ὑπέρυθρος ἀκτινοβολία ἀπορροφᾶται ὑπό τῆς ἐπιφανείας τῶν στερεῶν καί ὡς ἐκ τούτου ἐνδείκνυται διὰ τήν ξήρανσιν λεπτῶν στρωμάτων, ὡς τοῦ χάρτου, τῶν ὑφασμάτων καί τῶν ἐπιχρισμάτων (χρωμάτων) τῶν διαφόρων μεταλλικῶν καί ξυλίνων κατασκευῶν.

Ἡ διηλεκτρική θέρμανσις ἐνός σώματος (κακοῦ ἀγωγοῦ τοῦ ἠλεκτρισμοῦ) ἐπιτυγχάνεται δι' ἐφαρμογῆς ἐναλλασσομένου ρεύματος ὑψηλῆς συχνότητος, τό ὁποῖον προκαλεῖ ἔντονον τριβήν τῶν μορίων. Αἱ χρησιμοποιούμεναι συχνότητες κυμαίνονται μεταξύ 2 ἕως 100 Mcycles/s. Τό κυριώτερον πλεονέκτημα τῆς διηλεκτρικῆς θερμάνσεως εἶναι ἡ ταχεία κι' ὁμοιόμορφος θέρμανσις ἐνός σώματος καθ' ὅλον τό πάχος αὐτοῦ, λόγω τῆς ἀπορροφήσεως τῆς ἠλεκτρικῆς ἐνεργείας ἀπό ὅλην τήν μάζαν.

Ἡ διηλεκτρική θέρμανσις ἐφαρμόζεται εἰς τήν ξήρανσιν διαφόρων προϊόντων ξύλου, πλαστικῶν, ὑφασμάτων καί διαφόρων τροφίμων. Διά τῆς μεθόδου ταύτης ἐπιτυγχάνεται σημαντική ἐλάττωσις τοῦ χρόνου ξηράνσεως καί παραγωγή προϊόντων ἀνωτέρας ποιότητος. Λόγῳ τῆς ὑψηλῆς σχετικῶς δαπάνης ἡ διηλεκτρική θέρμανσις ἐφαρμόζεται εἰς τήν ξήρανσιν προϊόντων χαμηλῆς ὑγρασίας, τά ὁποῖα δέν δύνανται νά ξηρανθοῦν εὐχερῶς διά τῶν συνήθων μεθόδων.

Ἡ ἀπαιτουμένη ἰσχὺς ἐξαρτᾶται ἀπό τὰς διηλεκτρικὰς ἰδιότητος, τήν μάζαν τοῦ ξηρανομένου προϊόντος καί τήν μάζαν τοῦ ἐξατμιζομένου ὕδατος. Κατά προσέγγισιν ἐπιτυγχάνεται ἐξάτμισις 0,7-1 kg ὕδατος/kWh.

#### ιστ) Ἡλιακή Ξήρανσις

Ἡ ξήρανσις τῶν στερεῶν μέ ἠλιακὴν ἀκτινοβολίαν ἐφαρμόζεται ἀπό ἀρχαιοτάτων χρόνων εἰς διάφορα γεωργικά προϊόντα, ὅπως ὁ καπνός καί ὠρισμένα φρούτα. Ἡ ἠλιακή ξήρανσις ἐφαρμόζεται εἰς χώρας μέ μεγάλην ἠλιοφάνειαν, ὅπως ἡ Ἑλλάς.

Ἡ ἀπλουστέρα μέθοδος ξηράνσεως εἶναι ἡ ἐκθεσις τῶν προϊόντων εἰς τό ὑπαιθρον ὅπου ἡ ἠλιακή ἀκτινοβολία ἐπιφέρει τήν βραδείαν θέρμανσιν καί ξήρανσιν αὐτῶν. Ἡ θέρμανσις τῶν προϊόντων προκαλεῖται μερικῶς ἀπό τόν θερμόν ἀέρα, ὁ ὁποῖος κινεῖται βραδέως μέ φυσικὴν κυκλοφορίαν.

Τά πρὸς ξήρανσιν προϊόντα τοποθετοῦνται ὡς λεπτά στρώματα εἰς δίσκους ἢ ἀναρτῶνται εἰς ὑπαιθρούς ξηραντήρας. Ἡ ξήρανσις εἶναι βραδεία καί ἀπαιτοῦνται ἀρκεταὶ ἡμέραι ἐκθέσεως εἰς τό ὑπαιθρον. Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις ἡ ἠλιακή ξήρανσις δίδει προϊόντα καλυτέρας ποιότητος ἀπό τήν ξήρανσιν

είς ρεῦμα θερμοῦ ἀέρος. Τοῦτο εἶναι ἀποτέλεσμα ὠρισμένων φωτοχημικῶν ἀντιδράσεων, αἱ ὁποῖαι προκαλοῦνται εἰς μερικά προϊόντα κατά τήν διάρκειαν τῆς ξηράνσεως (π.χ. σῦκα, σταφίδες καί βερύκοκα).

Κατά τά τελευταῖα ἔτη ἡ ξήρανσις μέ ἡλιακὴν ἐνέργειαν ἀποκτᾷ νέον ἐνδιαφέρον, λόγω τοῦ ἠϋξημένου κόστους τῆς ἐνεργείας. Μελετῶνται νέαι μέθοδοι ἐκμεταλλεύσεως τῆς ἡλιακῆς ἐνεργείας, ὅπως ἡ θέρμανσις ἀέρος εἰς ἡλιακοῦς συλλέκτας, ὁ ὁποῖος διαβιβάζεται μέ ἐξηναγκασμένην κυκλοφορίαν εἰς κατάλληλον ξηραντήρα στερεῶν.

## ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΞΗΡΑΝΣΕΩΣ

1. Ξηραντήρ χρησιμοποιείται διά τήν Ξήρανσιν 700 kg/h ενός στερεοῦ προϊόντος, ἀπό 50 εἰς 10% ὑγρασίας. Ὁ ἀήρ εἰσέρχεται εἰς τόν Ξηραντήρα εἰς 95 °C καί σημεῖον δρόσου 52 °C καί ἐξέρχεται εἰς 60 °C καί 70% RH. Μέρος τοῦ θερμοῦ ὑγροῦ ἀέρος ἀνακυκλοῦται ἀναμιγνυόμενος μέ ἀτμοσφαιρικόν ἀέρα 25 °C καί 50% RH.

Ζητοῦνται:

- α) Ἡ ἀπαιτούμενη ποσότης ἀτμοσφαιρικοῦ ἀέρος εἰς m<sup>3</sup>/s
- β) Ἡ ἀπαιτούμενη θερμότης ἀνά kg ἐξατμιζομένης ὑγρασίας.

γ) Ἐάν ὁ ἀνωτέρω Ξηραντήρ λειτουργεῖ ἄνευ ἀνακυκλοφορίας καί ὁ ἀήρ ἐξέρχεται εἰς 70% RH, ποία ἡ θερμοκρασία ἐξόδου τοῦ ἀέρος, ποία ἡ ἀπαιτούμενη ποσότης τοῦ ἀέρος καί ποία ἡ ἀπαιτούμενη θερμότης;

Λύσις

Γίνεται δεκτόν ὅτι ὁ Ξηραντήρ εἶναι καλῶς μονωμένος καί ὅτι αἱ θερμικαί ἀπώλειαι εἶναι ἀμελητέαι.

Μέ βάσιν ὑπολογισμοῦ 1 h προκύπτουν:

$$\text{Ξηρά στερεά} = 700 \cdot 0,5 = 350 \text{ kg}$$

$$\text{Ἐξατμιζομένη ὑγρασία} = 350 (1 - 0,111) = 311 \text{ kg}$$

Ὁ ἀτμοσφαιρικός ἀήρ ἔχει ἀπόλυτον ὑγρασίαν 0,01 καί ἐνθαλπίαν 51 kJ/kg. Μετά τήν ἀνάμιξιν μέ τόν ἀέρα ἀνακυκλοφορίας τό μίγμα ἀποκτᾷ ἀπόλυτον ὑγρασίαν 0,095 καί ἐνθαλπίαν 340 kJ/kg. Εἰς τήν ἔξοδον τοῦ Ξηραντήρος ὁ θερμός ἀήρ ἔχει ἀπόλυτον ὑγρασίαν 0,11 καί ἐνθαλπίαν 347 kJ/kg.

Ἡ ἀπαιτούμενη συνολική ποσότης ἀέρος ἐντός τοῦ Ξηραν-



τῆρος θά εἶναι :

$$311 / (0,11 - 0,095) = 20733 \text{ kg/h}$$

Ἡ ἀπαιτουμένη ποσότης τοῦ ἀτμοσφαιρικοῦ ἀέρος θά εἶναι :

$$311 / (0,11 - 0,01) = 3110 \text{ kg/h}$$

καί ἡ ποσότης τοῦ ἀνακυκλοφοροῦντος ἀέρος θά εἶναι :

$$20733 - 3110 = 17623 \text{ kg/h}$$

Ὁ ἀτμοσφαιρικός ἀήρ ἔχει εἰδικόν ὄγκον  $0,86 \text{ m}^3/\text{kg}$  καί συνεπῶς ἡ ἀπαιτουμένη ποσότης αὐτοῦ θά εἶναι :

$$3110 \cdot 0,86 / 3600 = 0,74 \text{ m}^3/\text{s}$$

β) Ἡ θερμότης ἡ ἀπαιτουμένη διά τήν προθέρμανσιν τοῦ μίγματος προκύπτει ἀπό τό ἰσοζύγιον ἐνθαλπίας :

$$\dot{q} + 3110 \cdot 51 + 17623 \cdot 347 = 20733 \cdot 347$$

ἐκ τοῦ ὁποίου  $\dot{q} = 920560 \text{ kJ/h}$

Ἐπομένως ἡ ἀπαιτουμένη θερμότης διά τήν ἐξάτμισιν ἐνός kg ὑγρασίας εἶναι  $920560 / 311 = 2960 \text{ kJ/kg}$ .

γ) Ὁ ξηραντήρ λαμβάνεται, ὡς καί προηγουμένως, ὡς ἀ-διαβατικός. Ὁ ἀτμοσφαιρικός ἀήρ ὑγρασίας  $0,01$  καί ἐνθαλπί-ας  $51 \text{ kJ/kg}$  θερμαίνεται εἰς  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ , ὁπότε ἡ ἐνθαλπία αὐτοῦ γίνεται  $120 \text{ kJ/kg}$ . Ὁ ἀήρ ἐξέρχεται τοῦ ξηραντήρος μέ ὑγρα-σίαν  $0,032$  καί τήν αὐτήν ἐνθαλπίαν.

Ἀπαιτουμένη ποσότης ἀέρος =  $311 / (0,032 - 0,01) = 14136 \text{ kg/h}$

$$\eta \quad 14136 \cdot 0,86 / 3600 = 3,4 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Ἡ θερμοκρασία ἐξόδου τοῦ ἀέρος (ψυχομετρικός χάρτης) θά εἶναι  $39 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ἴσοζύγιον ἐνθαλπίας δίδει :

$$\dot{q} = 14136 (120 - 51) = 975384 \text{ kJ/h}$$

ήτοι

$$975384/311=3136 \text{ kJ/kg ύγρασίας}$$

Έπομένως με την ανακυκλοφορία του αέρος έπιτυγχάνεται είς την παρούσαν περίπτωση οίκονομία θερμότητας  $100(3136-2960)/3136=5,6\%$ .

2. Είς άδιαβατικόν Ξηραντήρα άέρος κατ'άντιρροήν Ξηραίνεται προϊόν από  $W_1=0,9$  είς  $W_2=0,1$ .

Ζ η τ ο ũ ν τ α ι :

α) Έ ποσότης Ξηροũ άέρος είς kg/kg Ξηροũ προϊόντος έ-  
άν αυτη είναι κατά 20% άνωτέρα τής έλαχίστης άπαιτουμένης.

β) Έ κρίσιμος περιεκτικότης είς ύγρασίαν,  $W_c$ .

γ) Έ άπαιτούμενος χρόνος Ξηράνσεως.

Δ ε δ ο μ έ ν α :

Έ θερμοκρασία είσόδου άέρος  $T=50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_w=21 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Έ ρυθμός Ξηράνσεως κατά την περίοδον σταθεροũ ρυθμοũ καί κατά την περίοδον μεταβαλλομένου ρυθμοũ Ξηράνσεως δίδε-  
ται άντιστοίχως από τάς έξισώσεις:

$$\dot{W}=10 \Delta W_A \text{ καί } \dot{W}=0,5 W$$

όπου  $W$  = ύγρασία του προϊόντος

$W_A$  = απόλυτος ύγρασία του άέρος

α) Έ ισozύγιον μάζης δίδει:

$$m(W_{A1} - W_{A2}) = W_1 - W_2$$

όπου  $m$ =kg Ξηροũ άέρος/kg Ξηροũ στερεοũ

(1) καί (2) = τό "ŕγρόν" καί τό "Ξηρόν" άκρον του Ξη-  
ραντήρος 'άντιστοίχως.

Έκ του ψυχομετρικοũ χάρτου εύρίσκεται:  $W_{A2} = 0,0036$

Έ έλαχίστη τιμή του άπαιτουμένου άέρος άντιστοιχεί είς την περίπτωση κατά την όποίαν ό άήρ έξέρχεται του Ξηραν-

τῆρος κεκορεσμένος

ἦτοι  $\dot{W}_{A1} = \dot{W}_{AW} = 0,0156$

Οὕτως εὐρίσκεται  $m_{\min} = 66,7$

Ἐάν ληφθῆ:  $m = 1,2 m_{\min}$  προκύπτει  $m = 80$  kg ἀέρος/kg ξηροῦ στερεοῦ.

β) Κατά τήν περίοδον σταθεροῦ ρυθμοῦ ξηράνσεως ἰσχύει ἡ σχέση:

$$\dot{W} = 10 \Delta W_A$$

ὅπου  $\Delta W_A = W_{AW} - W_A$

$$m(W_A - W_{A2}) = W - W_2$$

καί  $W_A = 0,0125(W - 0,1) + 0,0036$

ἦ  $\Delta W_A = 0,012 - 0,0125(W - 0,1)$

Εἰς τό κρίσιμον σημεῖον ἰσχύει ἡ ἐξίσωσις:

$$10 \Delta W_A = 0,5 W_C$$

ἦ  $10 [0,012 - 0,0125(W - 0,1)] = 0,5 W_C$

Ἐκ τῆς ὁποίας εὐρίσκεται

$$W_C = 0,212$$

γ) Ἐκ τῆς ἐξισώσεως τῆς περιόδου σταθεροῦ ρυθμοῦ ξηράνσεως:

$$\dot{W} = dW/dt = 10 [0,012 - 0,0125(W - 0,1)]$$

ἦ  $dW/dt = 0,1325 - 0,125 W$  προκύπτει:

$$t = \int_{0,212}^{0,900} \frac{dW}{0,1325 - 0,125 W} = 13,3 \text{ h}$$

Διά τήν περίοδον ἐλαττουμένου ρυθμοῦ ξηράνσεως ἰσχύει ἡ ἐξίσωσις:

$$\dot{W} = dW/dt = 0,5 W$$

καί

$$t = \int_{0,1}^{0,212} \frac{dW}{0,5 W} = 1,5 \text{ h}$$

Συνολικός χρόνος Ξηράνσεως = 13,3+1,5=14,8 h

3. Ξηραντήρ ρεύματος αέρος κατ'άντιρροήν χρησιμοποιείται διά τήν απομάκρυνσιν τῆς ἐλευθέρως ὑγρασίας ἀπό κρυστάλλους  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  ἀπό 5 εἰς 0,5% χωρίς νά απομακρυνθῆ τό κρυσταλλικόν ὕδωρ. Ἄηρ θερμοκρασίας 15 °C καί ἀπολύτου ὑγρασίας 0,009 χρησιμοποιεῖται εἰς ρυθμόν  $m=2,82 \text{ kg/kg}$  Ξηροῦ  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ .

Νά ὑπολογισθῆ ὁ χρόνος Ξηράνσεως, ἐάν ὁ ρυθμός Ξηράνσεως ἀκολουθῆ τήν ἐξίσωσιν:

$$dW/dt=0,05 W \Delta W_A$$

ὅπου  $t$  = χρόνος Ξηράνσεως εἰς  $s$

Λ ὕ σ ι ς

Εἰς τό ψυχομετρικόν διάγραμμα τοῦ Σχ. (5-5) δεικνύονται αἱ καμπύλαι τῶν διαφόρων κρυσταλλικῶν ἀλάτων τοῦ  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ .

Αἱ συνθῆκαι ὑγρασίας καί θερμοκρασίας τοῦ αέρος πρέπει νά ἀντιστοιχοῦν εἰς σημεῖα εὐρισκόμενα ἄνωθεν τῶν καμπυλῶν τούτων. Ἐκ τοῦ Σχ. (5-5) προκύπτει ὅτι ὁ ἀήρ δύναται νά θερμανθῆ μέχρι 18 °C πρό τῆς εἰσαγωγῆς αὐτοῦ εἰς τόν Ξηραντήρα.

Ἡ Ξήρανσις δύναται νά ἐπιτευχθῆ δι'ἐπανειλημμένης θερμάνσεως καί ὑγράνσεως τοῦ αέρος μεταξὺ τῆς καμπύλης τοῦ φωσφορικοῦ ἄλατος καί τῆς καμπύλης κορεσμοῦ τοῦ αέρος. Εἰς τήν πρᾶξιν τοῦτο ἐπιτυγχάνεται διά χρησιμοποίησεως ἐναλλακτῶν θερμότητος (σπειρῶν θερμάνσεως) ἐντός τοῦ Ξηραντήρος.

Ὁ ὑπολογισμός τοῦ χρόνου Ξηράνσεως γίνεται διά γραφικῆς ὀλοκληρώσεως:

## Περίληπτικός Πίναξ Ὑπολογισμῶν

|              |  |        |        |        |        |        |              |
|--------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| $W_A$        | 0,0086   | 0,0124 | 0,0166 | 0,0202 | 0,0240 | 0,0282 |              |
| $W_{AW}$     | 0,0099   | 0,0136 | 0,0176 | 0,0211 | 0,0245 | 0,0285 |              |
| $\Delta W_A$ | 0,0013   | 0,0012 | 0,0010 | 0,0009 | 0,0005 | 0,0003 |              |
| $W$          | 0,004  | 0,014  | 0,026  | 0,037  | 0,047  | 0,059  |              |
| $dt/dW$      | [38,6  | 11,9   | 7,69   | 5,98   | 8,47   | 11,23] | $\cdot 10^5$ |
| ὅπου         | $\frac{dt}{dW} = \frac{1}{0,05W \cdot \Delta W_A}$ καὶ $W - 0,005 = 2,82(W_A - 0,009)$ |        |        |        |        |        |              |

Κατασκευάζεται διάγραμμα  $(dt/dW)$  ὡς πρὸς  $(W)$  καὶ διὰ γραφικῆς ὁλοκληρώσεως εὐρίσκεται  $t = 12,8$  h.

## 6. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΙΣ ΤΑΣ ΘΕΡΜΙΚΑΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Είς τόν σχεδιασμόν καί τήν λειτουργίαν τών διαφόρων θερμικῶν διεργασιῶν πρέπει νά ἐπιζητεῖται ἡ κατανάλωσις ὅσον τό δυνατόν μικροτέρας ποσότητος ἐνεργείας διά τήν ἐπίτευξιν ἑνός συγκεκριμένου ἀποτελέσματος. Ἡ ἀρχή αὕτη ἀπέκτησε μεγάλην σημασίαν κατά τά τελευταῖα ἔτη, λόγω τοῦ ἠυξημένου κόστους τῆς ἐνεργείας εἰς παγκόσμιον κλίμακα.

Ἡ ἐξοικονόμησις ἐνεργείας βασίζεται εἰς τήν ὀρθήν ἐφαρμογήν τών ἀρχῶν τῆς Ἐφηρμοσμένης Θερμοδυναμικῆς, τών Φαινομένων Μεταφοῶς καί τῆς Τεχνικῆς τών Φυσικῶν καί Χημικῶν Διεργασιῶν. Αἱ διάφοροι θερμικά διεργασίαι πρέπει νά ἀναλύωνται εἰς τρόπον ὥστε νά ἐκτιμῶνται αἱ δυνατότητες διά τήν ἀποδοτικώτεραν χρησιμοποίησιν τῆς ἐνεργείας.

### α) Διαθέσιμος Ἐνέργεια

Εἰς τήν συνήθη ἀνάλυσιν τών θερμικῶν διεργασιῶν χρησιμοποιεῖται εὐρύτατα τό Α' Θερμοδυναμικόν Ἀξίωμα (Διατήρησις τῆς Ἐνεργείας), διά τοῦ ὁποῦ ὑπολογίζονται τά ἀπαραίτητα ἰσοζύγια ἐνεργείας (θερμότητος). Συμφώνως πρός τό Β' Θερμοδυναμικόν Ἀξίωμα, ἡ ποιότης τῆς ἐνεργείας εἶναι καλυτέρα ὅσον ὑψηλότερα εἶναι ἡ θερμοκρασία εἰς τήν ὁποίαν παρέχεται. Ἡ θερμότης, χρησιμοποιουμένη εἰς διαφόρους διεργασίας, ὑποβαθμίζεται δι' ἐλαττώσεως τῆς θερμοκρασίας μέχρις

δου φθάσει τήν θερμοκρασίαν του περιβάλλοντος, όποτε δέν δύναται νά παραχθῆ περαιτέρω ἔργον ἢ νά μεταφερθῆ θερμότης.

Ἡ ἔξοικονόμησις ἑνεργείας ἐπιτυγχάνεται διά χρησιμοποιοῦσας θερμικῆς ἑνεργείας τῆς χαμηλοτέρας δυνατῆς ποιότητος (θερμοκρασίας) ἢ διά συστημάτων μέ τά ὁποῖα ἐπιτυγχάνεται ὁ μικρότερος δυνατός ὑποβιβασμός τῆς ποιότητος τῆς ἑνεργείας.

Εἰς τάς θερμικᾶς διεργασίας ἐπιζητοῦνται ὑψηλοί ρυθμοί μεταφορᾶς θερμότητος ( $\dot{q}=U\Delta T$ ), οἱ ὁποῖοι ἐπιτυγχάνονται μέ ὑψηλούς συντελεστάς μεταφορᾶς θερμότητος ( $U$ ) ἢ μέ μεγάλας ἐπιφανείας ἐναλλαγῆς ( $A$ ). Ἡ διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) πρέπει νά διατηρεῖται ὅσον τό δυνατόν χαμηλή, διά τόν μικρότερον δυνατόν ὑποβιβασμόν τῆς ἑνεργείας.

Εἰς τήν ἀνάλυσιν τῶν διαφόρων βιομηχανικῶν διεργασιῶν πρέπει νά λαμβάνεται ὑπ' ὄψιν ἡ μεταβολή τῆς διαθεσίμου ἑνεργείας ἢ ἑξεργείας, ἡ ἐλάττωσις τῆς ὁποίας ἀντιστοιχεῖ εἰς τήν αὔξησιν τῆς ἑντροπίας. Ἡ διαθέσιμος ἑνέργεια ( $E'$ ) δίδεται ἀπό τήν ἀπλοποιημένην ἐξίσωσιν:

$$E' = C \cdot E$$

ὅπου:  $E$  = ποσότης ἑνεργείας

$$C = \text{συντελεστής ποιότητος ἑνεργείας } (0 < C < 1)$$

Ὁ θερμικός βαθμός ἀποδόσεως μιᾶς διεργασίας ὀρίζεται ὡς ὁ λόγος τῆς θεωρητικῶς ἀπαιτουμένης ἑνεργείας ( $E_0$ ) ὡς πρός τήν πραγματικῶς καταναλισκομένην ἑνέργειαν ( $E$ ):

$$\eta = E_0 / E \quad (6-2)$$

ὅπου:  $0 < \eta < 1$

Ὁ θερμοδυναμικός βαθμός ἀποδόσεως θά εἶναι:

$$\eta' = \frac{E'_0}{E'} = \left( \frac{E_0}{E} \right) \left( \frac{C_0}{C} \right) = \eta \left( \frac{C_0}{C} \right) \quad (6-3)$$

ὅπου:  $C_0, C$  = ἀντίστοιχοι συντελεσταί ποιότητος ἑνεργείας

Ὁ θερμοδυναμικός βαθμός ἀποδόσεως συνθέτων διεργασιῶν,

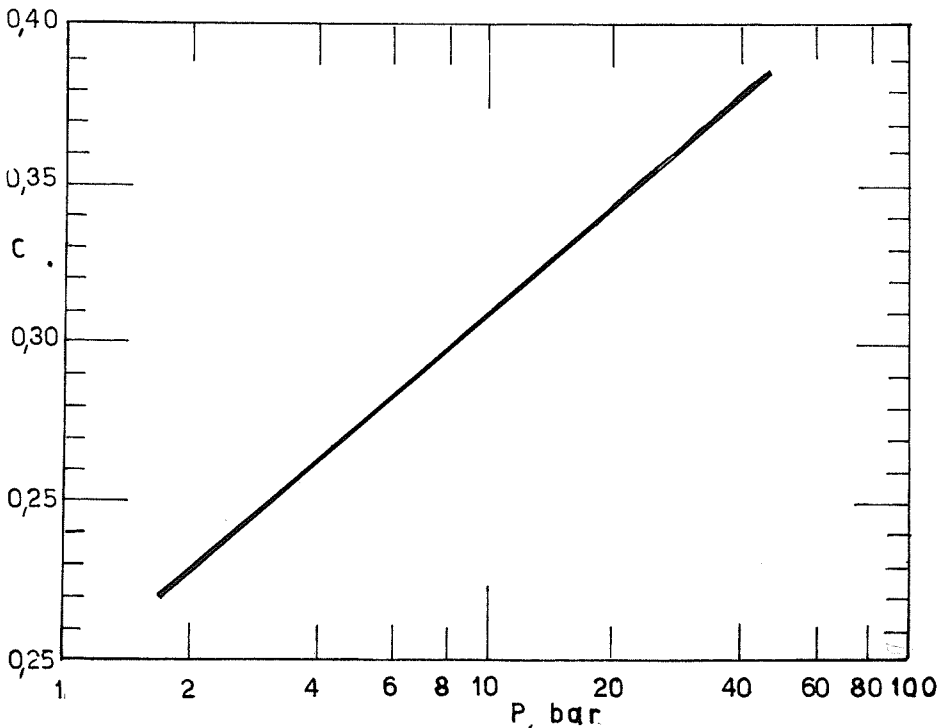
δηλαδή διεργασιών εις τάς οποίας υπεισέρχονται διάφοροι μορφάί ένεργείας, δίδεται από τήν έξίσωσιν:

$$\eta' = \frac{\sum E_0 C_0}{\sum EC} \quad (6-4)$$

Ό θερμικός βαθμός αποδόσεως ( $\eta$ ) είναι σχετικώς ύψηλός, κυμαινόμενος μεταξύ (0,50-0,99). Άντιθέτως, ό θερμοδυναμικός βαθμός αποδόσεως είναι κατά πολύ μικρότερος, κυμαινόμενος μεταξύ (0,01-0,2).

Ό συντελεστής ποιότητας ένεργείας ( $C$ ) είναι συνάρτησις τής θερμοκρασίας τοϋ συστήματος ( $T$ ) καί τής θερμοκρασίας τοϋ περιβάλλοντος ( $T_0$ ), συμφώνως μέ τήν θερμοδυναμικήν έξίσωσιν:

$$C = 1 - \left( \frac{T_0}{T - T_0} \right) \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (6-5)$$



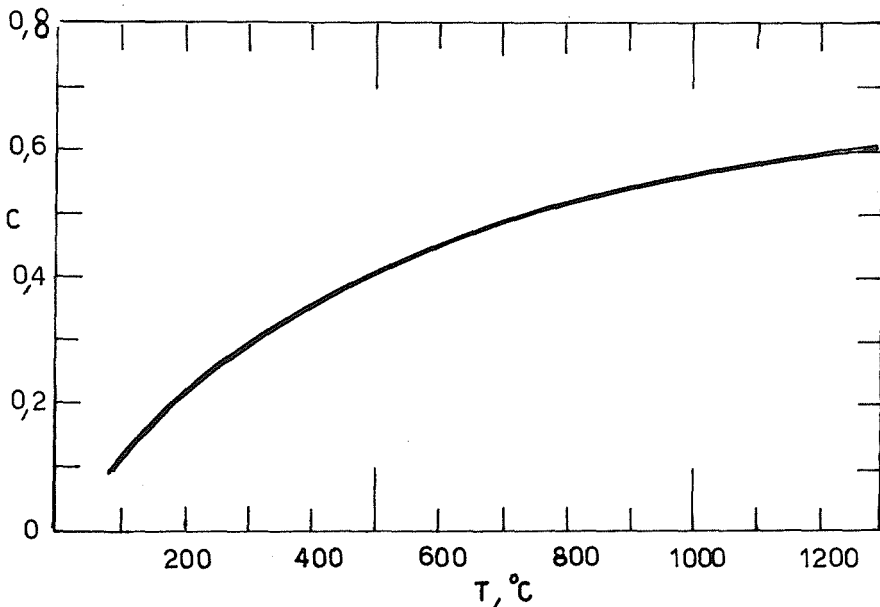
Σχ. 6-1. Συντελεσταί ποιότητας ένεργείας ( $C$ ) κεκορεσμένου άτμοϋ



Συμφώνως μέ τήν ἐξίσωσιν (6-5) ὁ συντελεστής ποιότητος ἐνεργείας αὐξάνει, αὐξανομένης τῆς θερμοκρασίας τῆς διεργασίας, ἢ ἐλαττουμένης τῆς θερμοκρασίας τοῦ περιβάλλοντος.

Αἱ πρωτογενεῖς πηγαί ἐνεργείας (πετρέλαιον, ἄνθραξ κ. λ.π.) καί ἡ ἠλεκτρική ἐνέργεια ἔχουν πολύ ὕψηλούς συντελεστές ποιότητος ἐνεργείας (0,97-1).

Αἱ δευτερογενεῖς καί τριτογενεῖς πηγαί ἐνεργείας (ἄτμός, καυσαέρια κλπ) ἔχουν μικροῦς συντελεστές ποιότητος ἐνεργείας, οἱ ὁποῖοι αὐξάνουν μετά τῆς θερμοκρασίας. Τό Σχ. (6-1) δίδει τούς συντελεστές (C) διά τόν κεκορεσμένον ἄτμόν καί τό Σχ. (6-2) δίδει τούς ἰδίους συντελεστές δι' ὅλα τὰ ὑπόλοιπα θερμαντικά μέσα, ὡς συναρτήσεις τῆς θερμοκρασίας.



Σχ. 6-2. Συντελεσταί ποιότητος ἐνεργείας (C) διαφόρων θερμαντικῶν μέσων

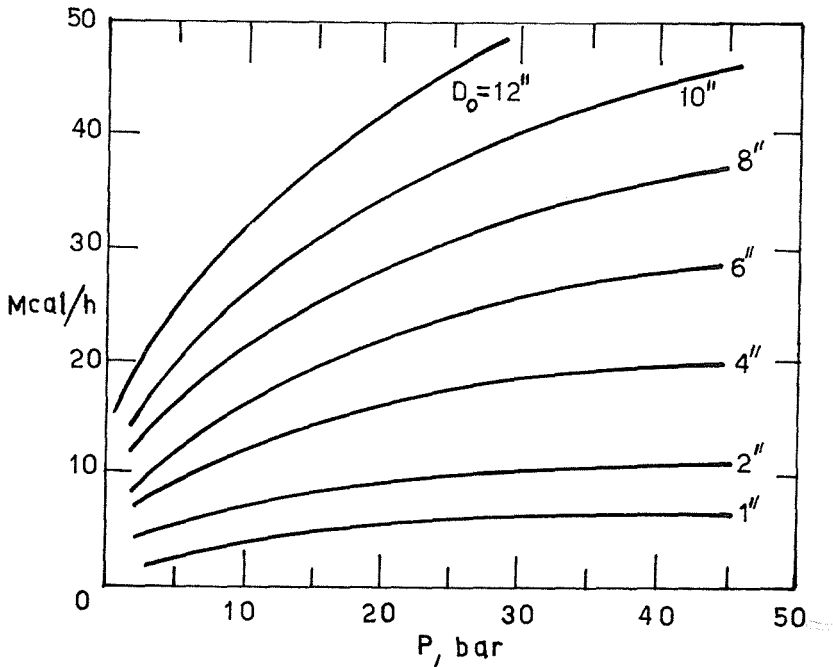
### β) Ἐξοικονόμησις Ἐνεργείας εἰς τὰς θερμικάς Διεργασίας

Τό μεγαλύτερον ποσοστόν τῆς ἐνεργείας τῆς χρησιμοποιουμένης εἰς τὰς χημικάς καί συναφεῖς βιομηχανίας ἀποτελεῖται ἀπό θερμότητα προερχομένην ἀπό τήν καύσιν τῶν διαφόρων στερεῶν, ὑγρῶν καί ἀερίων καυσίμων. Ὁ βαθμός ἀποδόσεως τῶν ἐγκαταστάσεων καύσεως δύναται νά βελτιωθῇ διά χρησιμοποίησιν τῆς ἀπαιτουμένης περισεύας τοῦ ἀέρος καύσεως, διά μει-

ώσεως τών αποθέσεων εἰς τὰς ἐπιφανείας ἐναλλαγῆς θερμότητος καί διὰ ρυθμίσεως τών καυστήρων.

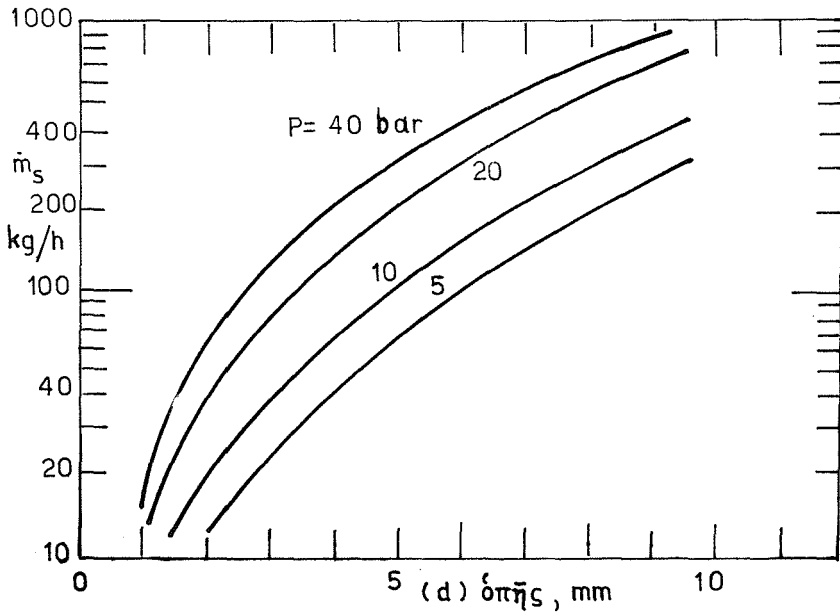
Ὁ ἀτμός ἀποτελεῖ τὴν σπουδαιότεραν μορφήν δευτερογενε-  
νοῦς ἐνεργείας εἰς τὰς βιομηχανίας. Ἡ ἐξοικονόμησις καί ἡ  
ἀποδοτικώτερα χρησιμοποίησις τοῦ ἀτμοῦ ἀπαιτεῖ τὴν κατάστρω-  
σιν τοῦ ἰσοζυγίου ἀτμοῦ τῆς ὑπ' ὄψιν ἐγκαταστάσεως, εἰς τὸ ὀ-  
ποῖον δεικνύεται ἡ παραγομένη ποσότης καί αἱ καταναλισκόμε-  
ναι ποσότητες ἀτμοῦ εἰς τὰς διαφόρους διεργασίας. Ἡ ἀρι-  
στοποίησις τοῦ συστήματος ἀπαιτεῖ τὴν βελτίωσιν τοῦ βαθμοῦ  
ἀποδόσεως τοῦ ἀτμολέβητος, τὴν μόνωσιν τών σωληνώσεων μετα-  
φορᾶς ἀτμοῦ, τὴν ἀποφυγὴν τών διαρροῶν ἀτμοῦ καί τὴν ἀποδο-  
τικὴν χρησιμοποίησιν τών συμπυκνωμάτων.

Ἡ σημασία τῆς μονώσεως φαίνεται ἀπὸ τὸ Σχ. (6-3), τὸ ὀ-  
ποῖον δίδει τὰς ἀπωλείας θερμότητος (kcal/h) ἀπὸ ἀτμοσωλήνα  
μῆκους 10 m, διαφόρων διαμέτρων.



Σχ. 6-3. Ἀπώλειαι θερμότητος ἀπὸ μὴ μονωμένους ἀτμοσωλήνας  
διαμέτρου D (inches) καί μῆκους 10 m

Σημαντικάί απώλειαι άτμοϋ έπέρχονται διά διαρροής άτμοϋ διά μέσου όπών, άνοιγμάτων κλπ τών σωληνώσεων. Τό Σχ. (6-4) δεικνύει τήν διαρροήν άτμοϋ από όπάς διαφόρων ίσοδυνάμων διαμέτρων.



Σχ. 6-4. Διαρροές άτμοϋ ( $\dot{m}_s$ ) από όπάς ίσοδυνάμου διαμέτρου (d) εϊς διαφόρους πιέσεις (P)

Εϊς τούς έναλλάκτας θερμότητος ή έξοικονόμησις ένεργείας βελτιούται διά τών ύψηλών συντελεστών μεταφοράς θερμότητος (U). Ύψηλοί (U) έπιτυγχάνονται μέ ύψηλάς ταχύτητας τών ρευστών καί μέ καθαράς έπιφανείας έναλλαγής θερμότητος (άποφυγή άποθέσεων άλάτων, πολυμερών κλπ). Αϊ ύψηλαί ταχύτητες τών ρευστών δημιουργούσιν ύψηλάς πτώσεις πίεσεως (δαπάνη ένεργείας άντλήσεως) καί διά τούτο πρέπει νά χρησιμοποιείται ή βελτίστη ταχύτης διά κάθε σύστημα.

Εϊς τάς μεγάλας χημικάς καί συναφεϊς βιομηχανίας χρησιμοποιούσιν πολλοί έναλλάκται θερμότητος εϊς τούς όποιους κυκλοφορούσιν τά διαφόρα θερμά καί ψυχρά ρεύματα τής έγκαταστάσεως. Ή βελτίστη διάταξις τών δικτύων έναλλακτών θερμότητος, διά τής όποιας έπιτυγχάνεται ή μεγαλυτέρα οίκονομία ένεργείας εϊς τό σύστημα, μελετάται εϊς τήν βελτιστοποίησιν

των Διεργασιών (Process Optimization) και την Τεχνικοοικονομική Μελέτη των Χημικών Βιομηχανιών (Plant Design).

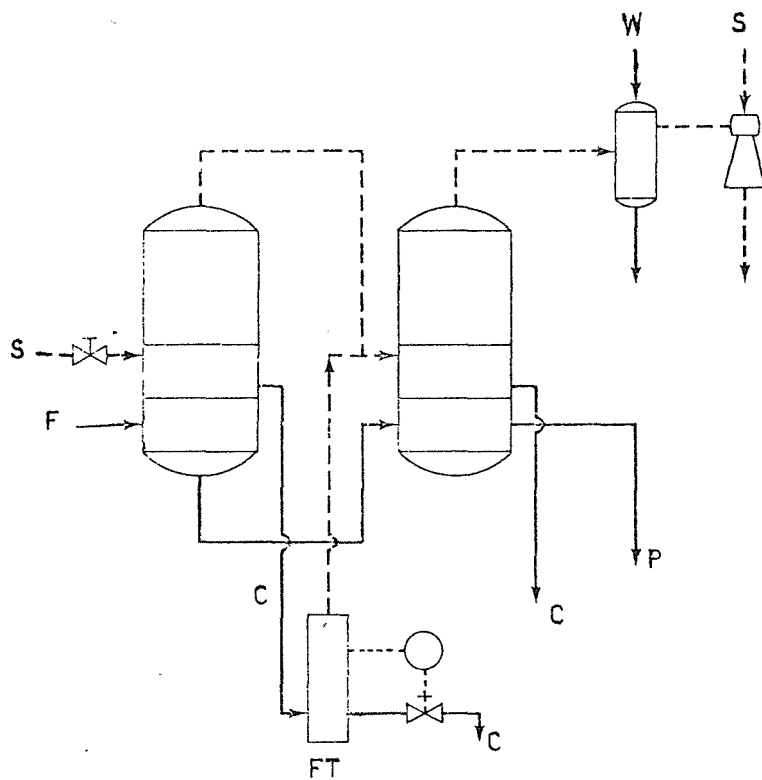
Ἡ ἔξοικονόμησις ἑνεργείας εἰς τὴν ἑξάτμισιν ἐπιτυγχάνεται μὲ συστήματα ἑξατμιστῆρων πολλαπλῶν βαθμίδων, μὲ ἀνασυμπιέσιν τῶν ἀτμῶν ἢ μὲ τὴν ἀντλίαν θερμότητος (Κεφ.3). Εἰς ὠρισμένας περιπτώσεις ἐνδείκνυται ἡ χρησιμοποίησις μικτοῦ συστήματος ἑξατμιστῆρων πολλαπλῶν βαθμίδων - ἀνασυμπιέσεως ἀτμῶν.

Εἰς τοὺς ἑξατμιστῆρας πολλαπλῶν βαθμίδων σημαντικὴ ἔξοικονόμησις ἑνεργείας δύναται νὰ ἐπιτευχθῇ διὰ χρησιμοποίησεως μέρους τῆς ἐνθαλπίας τῶν συμπυκνωμάτων ἀτμῶν τῶν διαφόρων βαθμίδων. Τὸ συνηθέστερον σύστημα ἐκμεταλλεύσεως βασίζεται εἰς τὴν ἐκτόνωσιν (flashing) τοῦ συμπυκνώματος εἰς τὴν πίεσιν ἑξατμίσεως τῆς ἰδίας βαθμίδος καὶ τὴν χρησιμοποίησιν τῶν παραγομένων ἀτμῶν διὰ τὴν θέρμανσιν τῆς ἐπομένης βαθμίδος.

Τὸ Σχ. (6-5) δεικνύει σύστημα χρησιμοποίησεως τῆς ἐνθαλπίας τοῦ συμπυκνώματος ἀτμῶν εἰς ἑξατμιστῆρα δύο βαθμίδων. Τὸ συμπύκνωμα τοῦ ἀτμοῦ θερμάνσεως τῆς πρώτης βαθμίδος ἐκτονοῦται εἰς δοχεῖον στιγμιαίας ἑξατμίσεως FT (flash tank), εἰς πίεσιν ἴσῃ μὲ τὴν πίεσιν λειτουργίας τῆς αὐτῆς (πρώτης) βαθμίδος. Ἡ ποσότης τῶν παραγομένων ἀτμῶν ἑξαρτᾶται ἀπὸ τὴν διαφορὰν πίεσεως ἀτμοῦ θερμάνσεως - πρώτης βαθμίδος. Οἱ ἀτμοὶ ἐκτονώσεως συνενώνονται μὲ τοὺς ἀτμοὺς τῆς πρώτης βαθμίδος καὶ χρησιμοποιοῦνται διὰ τὴν θέρμανσιν τῆς δευτέρας βαθμίδος. Τὸ ὑπόλοιπον ὑγρὸν συμπύκνωμα ἀπομακρύνεται ἀπὸ τὸ δοχεῖον ἐκτονώσεως μὲ εἰδικὴν βαλβίδα.

### γ) Ἀνάκτησις Βιομηχανικῆς Θερμότητος

Σημαντικὴ ἔξοικονόμησις ἑνεργείας ἐπιτυγχάνεται διὰ τῆς ἀνακτῆσεως θερμότητος, ἡ ὁποία ἐκλύεται κατὰ τὰς διαφόρους χημικὰς διεργασίας ἢ περιέχεται εἰς τὰ διάφορα ρεύματα, τὰ ὁποῖα πρέπει νὰ ψυχθοῦν εἰς χαμηλοτέρας θερμοκρασίας. Διὰ τῆς ἀνακτῆσεως θερμότητος (heat recovery) ἐπιτυγχάνεται συγχρόνως καὶ ἡ μείωσις τῆς θερμικῆς ρυπάνσεως (thermal pollu-



Σχ. 6-5. Χρησιμοποίησης δοχείου στιγμιαίας εξεταμύσεως (flash tank, FT) του συμπυκνώματος εις εξεταμιστήρα δύο βαθμίδων

tion), η οποία προκαλείται διά της άπορρίψεως μεγάλων ποσών θερμότητας είς τό περιβάλλον.

Ὡς πηγαί θερμότητος χρησιμοποιούνται κυρίως αέρια ύψηλης θερμοκρασίας, ὅπως τά προϊόντα έξωθέρμων χημικῶν ἀντιδράσεων, τά καυσαέρια τῶν ἀτμολεβήτων, τά καυσαέρια τῶν κλιβάνων τῶν χημικῶν διεργασιῶν κλπ. Ἐπίσης χρησιμοποιούνται ὑγρά ύψηλης θερμοκρασίας ὅπως τά συμπυκνώματα τοῦ ἀτμοῦ καί τό θερμόν ὑπόλειμμα τῶν ἀποστακτικῶν στηλῶν.

Αἱ κυριώτεραι μέθοδοι ἀνακτήσεως τῆς βιομηχανικῆς θερμότητος ἀπό αέρια ύψηλης θερμοκρασίας εἶναι αἱ ἀκόλουθοι:

1. Ἀτμοπαραγωγή. Ἀναλόγως τῆς θερμοκρασίας τῶν ἀερίων δύναται νά παραχθῆ ἀτμός ύψηλης πιέσεως (40-100 bar) ἢ ἀτμός θερμάνσεως (7-40 bar). Διά τόν σκοπόν αὐτόν χρησιμοποιούνται ἀτμολέβητες μέ ὑδροσωλῆνες ἢ φλογοσωλῆνες.
2. Προθέρμανσις ὕδατος ἀτμολεβήτων.
3. Προθέρμανσις αέρος καύσεως ἢ ξηράνσεως.
4. Παραγωγή ὑπερθέρμου ἀτμοῦ.
5. Προθέρμανσις βιομηχανικῶν ρευστῶν.
6. Ἐξάτμισις βιομηχανικῶν διαλυμάτων.
7. Ξήρανσις βιομηχανικῶν προϊόντων.
8. Θέρμανσις βιομηχανικῶν χώρων.

Αἱ χρησιμοποιούμεναι ἐγκαταστάσεις ἀνακτήσεως τῆς θερμότητος εἶναι γενικῶς παρόμοιαι πρός τούς διαφόρους τύπους ἐναλλακτῶν θερμότητος οἱ ὁποῖοι περιγράφονται είς τό Κεφ. (2).

Ἐκτός τῶν συνήθων τύπων ἐναλλακτῶν θερμότητος χρησιμοποιούνται καί ὠρισμένοι εἰδικοί ἐναλλάκται ὅπως οἱ σωλῆνες θερμότητος (Κεφ. 2ιβ), οἱ ἐναλλάκται ἀνακυκλοφοροῦντος ρευστοῦ καί οἱ ἀναγεννηταί θερμότητος.

Οἱ ἐναλλάκται ἀνακυκλοφοροῦντος ρευστοῦ βασίζονται είς τήν ἐξηναγκασμένην κυκλοφορίαν ἐνός ὑγροῦ τό ὁποῖον παραλαμβάνει θερμότητα π.χ. ἀπό θερμά καυσαέρια καί τήν μεταφέρει είς τόν ἀέρα καύσεως.

Οἱ ἀναγεννηταί θερμότητος χρησιμοποιοῦν συνήθως τό σύστημα περιστρεφομένης θερμαινομένης μάζης. Ἀποτελοῦνται ἀπό κύλινδρον πλήρη μέ ὑλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητος, ὁ

ὁποῖος περιστρέφεται βραδέως μεταξύ ἑνός θερμοῦ καί ἑνός ψυχροῦ ρεύματος, μεταφέροντος οὕτως θερμότητα π.χ. ἀπό καυσαέρια πρὸς ἀέρα καύσεως.

Ἡ ἀνάκτησις τῆς θερμότητος πρέπει νά εἶναι οἰκονομικῶς συμφέρουσα, δηλαδή αἱ δαπάναι ἐγκαταστάσεως τῶν ἐναλλακτικῶν θερμότητος καί τῆς ἐνεργείας λειτουργίας αὐτῶν πρέπει νά καλύπτονται ἀπό τό ὄφελος τῆς ἐξοικονομουμένης ἐνεργείας εἰς σχετικῶς μικρόν χρονικόν διάστημα (π.χ. 1-2 ἔτη).

Τό ὀλικόν ἐτήσιον κόστος τῆς ἀνακτῆσεως θερμότητος ( $C_T$ ) δίδεται ἀπό τήν ἐξίσωσιν:

$$C_T = K_1 A + K_2 (1 - \epsilon) \quad (6-6)$$

ὅπου:  $A$  = ἐπιφάνεια ἐναλλαγῆς θερμότητος

$K_1, K_2$  = σταθεραί

$\epsilon$  = λόγος τῆς πρακτικῶς ἀνακτουμένης θερμότητος πρὸς τήν μεγίστην δυνατήν ἀνακτουμένην θερμότητα.

Ἡ μεγάλη αὔξησις τοῦ κόστους τῆς ἐνεργείας (καυσίμων) κατὰ τά τελευταῖα ἔτη καθιστᾷ οἰκονομική τήν ἀνάκτησιν θερμότητος εἰς πολλάς βιομηχανίας.





## ΣΥΜΒΟΛΑ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΕΣ

| Σύμβολον                        | Μέγεθος                                | Μονάδες<br>S. I.      |
|---------------------------------|--|-----------------------|
| A(S)                            | Επιφάνεια                              | m <sup>2</sup>        |
| α                               | Θερμική διαχυτότης                     | m <sup>2</sup> /s     |
| α                               | Επιφάνεια ανά μονάδα όγκου             | 1/m                   |
| C                               | Θερμοχωρητικότητα                      | J/K                   |
| C <sub>p</sub>                  | Είδιική θερμότης                       | J/kg K                |
| C                               | Συμπύκνωμα                             | -                     |
| D                               | Διάμετρος                              | m                     |
| E                               | Έξατμιστήρ                             | -                     |
| F                               | Τροφοδότησις                           | -                     |
| F                               | Παράγων μορφής                         | -                     |
| f                               | Συντελεστής τριβής Fanning             | -                     |
| f                               | Συντελεστής τριβής Moody=4f (Fanning)  | -                     |
| G                               | Ρυθμός ροής μάζης                      | kg/m <sup>2</sup> s   |
| g                               | Επιτάχυνσις βαρύτητος                  | 9,81 m/s <sup>2</sup> |
| H                               | Ένθαλπία                               | J                     |
| HTU                             | Ύψος μονάδος μεταφοράς                 | m                     |
| h                               | Συντελεστής μεταφοράς θερμότητος       | W/m <sup>2</sup> K    |
| j <sub>H</sub> , j <sub>D</sub> | Παράγοντες μεταφοράς θερμότητος, μάζης | -                     |
| k(λ)                            | Θερμική αγωγιμότης                     | W/mK                  |
| k <sub>y</sub>                  | Συντελεστής μεταφοράς μάζης            | kmol/m <sup>2</sup> s |
| k <sub>y</sub> '                | Συντελεστής μεταφοράς μάζης            | kg/m <sup>2</sup> s   |
| L                               | Μήκος                                  | m                     |
| L                               | Ρυθμός ροής υγροῦ                      | kg/m <sup>2</sup> s   |
| M                               | Μοριακόν βάρος                         | kg/kmol               |
| m                               | Μάζα                                   | kg                    |
| ṁ                              | Ρυθμός ροής μάζης                      | kg/s                  |

| Σύμβολον        | Μέγεθος   | Μονάδες<br>S.I.             |
|-----------------|---|-----------------------------|
| NTU             | Αριθμός μονάδων μεταφοράς                                   | -                           |
| n               | Ποσότητα ουσίας   | kmol                        |
| P               | Προϊόν  | -                           |
| P               | Ισχύς   | kW                          |
| P               | Πίεσις  | bar, Pa (N/m <sup>2</sup> ) |
| ḡ               | Ρυθμός ροής θερμότητας                                      | W                           |
| R               | Θερμική αντίσταση   | K/W                         |
| R               | Σταθερά αερίων  | 8,314 kJ/kmol K             |
| RH              | Σχετική υγρασία   | -                           |
| r               | Ακτίς   | m                           |
| S               | Ατμός   | -                           |
| T               | Θερμοκρασία   | K                           |
| t               | Χρόνος  | s                           |
| U               | Συνολικός συντελεστής μεταφοράς<br>θερμότητας               | W/m <sup>2</sup> K          |
| u               | Ταχύτης   | m/s                         |
| V               | Όγκος   | m <sup>3</sup>              |
| W               | Περιεκτικότητα εις υγρασίαν<br>ή απόλυτος υγρασία           | kg υγρασίας/<br>kg Ξηροῦ    |
| w               | Κλάσμα μάζης (βάρους)                                       | kg/kg συν/κῆς μάζης         |
| x               | Απόστασις, μήκος  | m                           |
| x               | Μοριακόν κλάσμα υγρᾶς φάσεως                                | -                           |
| y               | Μοριακόν κλάσμα αερίου φάσεως                               | -                           |
| Z               | Ύψος  | m                           |
| ΑΣΖ             | Ανύψωσις σημείου ζέσεως                                     | K                           |
| β               | Όγκομετρικόν συντελεστής διαστολῆς                          | 1/K                         |
| Γ               | Ρυθμός ροής ανά μονάδα μήκους δια-<br>βρεχομένης περιμέτρου | kg/m s                      |
| Δ               | Διαφορά (π.χ. ΔT, ΔH, ΔP)                                   | -                           |
| ΔT <sub>L</sub> | Λογαριθμική μέση διαφορά θερμοκρασίας                       | K                           |
| δ               | Πάχος λεπτοῦ στρώματος                                      | m                           |
| ε               | Συντελεστής ικανότητος έκπομῆς                              |                             |
| η(μ)            | Ιξῶδες (δυναμικόν)  | kg/m s                      |

| Σύμβολον | Μέγεθος                            | Μονάδες<br>S.I. |
|----------|------------------------------------|-----------------|
| $\nu$    | Ίξῶδες (κινηματικόν)               | $m^2/s$         |
| $\rho$   | Πυκνότης                           | $kg/m^3$        |
| $\Sigma$ | "Αθροισμα                          | -               |
| $\tau$   | Διατμητική τάσις                   | $N/m^2$         |
| $\tau$   | Χαρακτηριστικός χρόνος (παραμονής) | s               |
| $\Phi$   | Παράγων μορφής                     | -               |

'Αδιάστατοι 'Αριθμοί

| Σύμβολον | 'Αντιστοιχία                                   | 'Αριθμός |
|----------|--|----------|
| $N_{Re}$ | $\frac{D\bar{u}\rho}{\eta} = \frac{DG}{\eta}$  | Reynolds |
| $N_{Pr}$ | $\frac{C_p\eta}{k}$                            | Prandtl  |
| $N_{Nu}$ | $\frac{hD}{k}$                                 | Nusselt  |
| $N_{Gz}$ | $\frac{\dot{m}C_p}{kL}$                        | Graetz   |
| $N_{Gr}$ | $\frac{D_0^3\rho^2\beta g \Delta T_0}{\eta^2}$ | Grashof  |
| $N_{St}$ | $\frac{h}{C_p G}$                              | Stanton  |
| $N_{Pe}$ | $\frac{D G C_p}{k}$                            | Peclet   |
| $N_{Le}$ | $N_{Pr} / N_{Sc}$                              | Lewis    |
| $N_{Sc}$ | $\frac{\eta}{\rho D}$                          | Schmidt  |

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## Γενικά Βιβλία Θερμικῶν Διαργασιῶν

1. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 5th Ed. McGraw-Hill, 1973.
2. McAdams W. Heat Transmission. McGraw-Hill, 1954.
3. Bird R., Stewart W. and Lightfoot E. Transport Phenomena. Wiley, 1960.
4. Blackadder D. and Nedderman R. A Handbook of Unit Operations. Academic Press, 1971.
5. Eckert E. and Drake R. Analysis of Heat and Mass Transfer. McGraw-Hill, 1972.
6. Grassmann P. Physikalische Grundlagen der Chemie-Ingenieur Technik. Verlag Sauerländer, 1961.
7. Grassmann P. Einführung in die Thermische Verfahrenstechnik. Walter de Gruyter, 1967.
8. Greenkorn R. and Kessler D. Transfer Operations. McGraw-Hill, 1972.
9. Keenan J. and Keys C. Thermodynamic Properties of Steam. Wiley, 1936.
10. Kern D. Process Heat Transfer. McGraw-Hill, 1950.
11. Rohsenow W. and Hartnett J. Handbook of Heat Transfer. McGraw-Hill, 1973.
12. Siegel R. and Howell J. Thermal Radiation Heat Transfer. McGraw-Hill, 1972.
13. Afgan N. and Schlünder E. Heat Exchangers: Design and Theory Sourcebook. McGraw-Hill, 1974.
14. Ludwig E. Applied Process Design for Chemical and Petro-

- chemical Plants. Volume III. Gulf Publishing Co., 1965.
15. Peters M. and Timmerhaus K. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. McGraw-Hill, 1969.
  16. Charm S. Fundamentals of Food Engineering. Avi Publishing Co., 1971.
  17. Luikov A. Analytical Heat Diffusion Theory. Academic Press, 1968.
  18. Luikov A. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies. Pergamon Press, 1970.
  19. Loncin M. Die Grundlagen der Verfahrenstechnik in der Lebensmittelindustrie. Sauerländer Verlag, 1969.
  20. Leniger H. and Beverloo W. Food Process Engineering. D. Reidel Publ. Co., 1975.
  21. McCabe W. and Smith J. Unit Operations of Chemical Engineering. McGraw-Hill, 1976.
  22. Reid R. and Sherwood T. The Properties of Gases and Liquids. McGraw-Hill, 1977.
  23. Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie. Urban/Schwarzenberg München/Berlin.
  24. Walker W., Lewis W., McAdams W. and Gilliland E. Principles of Chemical Engineering McGraw-Hill 1937.
  25. Κουμούτσου Ν. Έφρημοσμένη Θερμοδυναμική. Άθήναι, 1974.
  26. Κουμούτσου Ν. Φαινόμενα Μεταφοράς. Άθήναι, 1973.
  27. Μαραγκόζη Ι. Τεχνική Χημικών Δράσεων. Άθήναι, 1975.
  28. Σαραβάκου Γ. Τεχνική Σωματιδίων-Μηχανικοί Διαχωρισμοί, Άθήναι, 1978.
- Μετάδοσις Θερμότητοσ/Έναλλάκται Θερμότητοσ
29. A.S.R.E. Air Conditioning Refrigerating Data Book 1958.
  30. Ball O. and Olson F. Sterilization in Food Technology. McGraw-Hill, 1957.

31. Carlslaw H. and Jaeger J. Conduction of Heat in Solids. Oxford, 1959.
32. Ellwood P. and Danatos S. Process Furnaces. Chem. Engineering, April 11, 1966.
33. Gregorig R. Wärmeaustauscher. Verlag Sauerländer, 1959.
34. Grober/Erk und Grigull U. Grundgesetze der Wärmeübertragung. Springer Verlag, 1961.
35. Handbook of Chemistry and Physics. Chemical Rubber, Cleveland, Ohio.
36. Hottel H. and Sarofin A. Radiative Heat Transfer. McGraw-Hill, 1967.
37. Jakob M. Heat Transfer. Wiley, 1957.
38. Lord R. et al. Design of Heat exchangers. Chemical Engineering Jan. 26, 1970.
39. Schenk H. Heat Transfer Engineering. Prentice Hall, 1959.
40. Skelland A. Non-Newtonian Flow and Heat Transfer. Wiley, 1967.
41. Saravacos G. Effect of temperature on the viscosity of pseudoplastic fluids. Journal of Food Science 35, 122, 1970.
42. Tsederberg N. Thermal Conductivity of Gases and Liquids. M.I.T. Press, 1965.
43. Woolrich W. Handbook of Refrigerating Engineering. Avi Publishing Co. 1965.
44. Taborek J. et al. Predictive methods for fouling behavior. Chem. Eng. Progress, 68, 69-78, 1972.
45. Stumbo C. Thermobacteriology in Food Processing. Academic Press, 1965.
46. National Canners Association. Laboratory Manual for Food Canners and Processors. Avi Publishing Co. 1968.

47. Cheftel H. and Thomas G. Principles and Methods for Establishing Thermal Processes for Canned Foods. Office of Technical Services, U.S. Department of Commerce, Washington D.C. 1965.
  48. Vinters J. Thermal process evaluation by programmable calculator. Food Technology, March 1975.
  49. Applying quantitative analysis to sterilisation. Food Technology, March 1978, pp. 57-83.
  50. ΄Εξάρου Κ. ΄Αποστείρωσις Κονσερβών. ΄Αγροτική Τράπεζα τής ΄Ελλάδος, ΄Αθήναι, 1971.
  51. Ραουζαίου Γ. Προγράμματα ύπολογισμού έναλλακτών θερμότητος. Διπλωματική ΄Εργασία, ΄Εργ. Τεχνικής Φυσικών Διεργασιών Ε.Μ.Π. ΄Αθήναι, 1978.
- ΄Εξάτμισις
52. Agitated thin-film evaporators, Chemical Engineering, Sept. 13, 1965.
  53. Beagle M. Recompression evaporation. Chemical Engineering Progress, October 1962.
  54. Moore J. and Pinkel E. When to use single pass evaporators. Chemical Engineering Progress, July 1968.
  55. Morgan A. Evaporator concepts and evaporator design. Food Technology, 21, 1353, 1967.
  56. Morgan A. and Carlson R. Fouling inside heat exchanger tubes. Food Technology 14, 594, 1960.
  57. Newman H. How to test evaporators. Chemical Engineering Progress, July 1968.
  58. Rant Z. Verdampfer in Theorie und Praxis. T. Steinkopff, 1959.
  59. Saravacos C., Moyer J and Wooster G. Concentration of liquid foods in a pilot scale falling film evaporator. Food Science Bulletin, Cornell University, Geneva N.Y. No. 4, Sept. 1970.

60. Standiford F. Evaporation. Chemical Engineering, Dec. 9, 1963.
61. Wetherhorn D. Guide to trouble-free Evaporators. Chemical Engineering, June 1, 1970.
62. Delyannis A. and Delyannis E. Solar Desalting. Chem.Eng. Oct. 19, 1970.
63. Σαραβάκου Γ. Ἀφαλάτωσης τοῦ ὕδατος. Τεχνικά Χρονικά, Νοέμβριος 1973.
64. Σιμιτζή Ι. Ὑπολογισμός ἐξατμιστηρίου τριῶν βαθμίδων μέσω ἠλεκτρονικῶν Ὑπολογιστῶν. Τεχνικά Χρονικά, 5/551, 1972.

#### Ὑγρασις καὶ Εἶρασις

65. Am. Inst. Chem. Engineers. Cooling Towers. 1972.
66. De Monbrun J. Factors to Consider in selecting a cooling tower. Chemical Engineering Sept. 9, 1968.
67. Drying. Chemical Engineering, 1963.
68. Drying systems and equipment. Chemical Engineering, June 19, 1967.
69. Görling P. Untersuchungen zur Aufklärung des Trocknungsverhaltens pflanzlicher Stoffe. VDI-Forsch. Heft 458, 1956.
70. King J. Freeze-drying. Chemical Rubber, 1970.
71. Kneule F. Das Trocknen. Verlag Sauerlander, 1959.
72. Krischer O. und K. Kroll; Trocknungstechnik. Springer Verlag, 1963.
73. Keey R. Drying Principles and Practice. Pergamon Press, 1972.
74. Nonhebel G. and Moss A. Drying of Solids in the Chemical Industry. Butterworths, 1971.
75. Marshall W. Atomization and Spray Drying. Am. Inst.Chem. Engineers, 1954.



76. Saravacos G. and Charm S. A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. Food Technology 16,78,1962.
77. Van Arsdel W. and Copley M. Food Dehydration. Avi Publishing. Co., 1963.
78. Williams-Gardner A. Industrial Drying. Leonard-Hill, 1971.
79. Σαραβάκου Γ. Τεχνική Συμπυκνώσεως και Ύφυδατώσεως. Τεχνικά Χρονικά, Νοέμβριος 1973.
80. Σαραβάκου Γ. Τεχνική Φυσικών Διαχωρισμών. ΎΑθηναι, 1976.

#### ΎΞοικονόμησις ΎΕνεργείας

81. Upgrading existing evaporators to reduce energy consumption. ERDA COO/2870-2, 1977.
82. Χριστοδούλου Π. ΎΞοικονόμησις ένεργείας κατά τήν συμπύκνωσιν τεχνικών διαλυμάτων σακχάρεως-Διδακτορική Διατριβή. ΎΕργαστήριον Τεχνικής Φυσικών Διεργασιών Ε.Μ.Π., 1976.
83. ΛυγεροΎ Α. ΎΟ Παράγων ΎΕνέργεια. Σεμινάριο "ΎΕλληνική Χημική Βιομηχανία και ΎΑριστοποίηση". Τ.Ε.Ε., ΎΑθηναι, Μάρτιος 1978.
84. Πίττα Α. Ποιότης ΎΕνεργείας και ΎΑπόδοσις Μετατροπής. ΎΕργαστήριον Είδιικής Μηχανολογίας Ε.Μ.Π., ΎΑθηναι, 1976.
85. ΎΕπιτροπή ΎΞοικονομήσεως ΎΕνεργείας είς τήν Βιομηχανίαν (ΎΕθνικόν Συμβούλιον ΎΕνεργείας). (α) ΎΙσολογισμός ΎΕνεργείας, (β) Βασικές ΎΑρχές ΎΞοικονομήσεως ΎΑτμοΎ είς τήν Βιομηχανίαν, (γ) ΎΑρχές ΎΟρθής Λειτουργίας Καυστήρων ΎΥγρών και ΎΑερίων Καυσίμων, (δ) Παραδείγματα ΎΞοικονομήσεως ΎΕνεργείας στήν Βιομηχανία Βορείου ΎΕλλάδος (ε) Βασικά ΣημεΎα για τήν καλλίτερη Χρησιμοποίηση τής ΎΕνέργειας, (στ) Βελτιστοποίηση τής Καύσεως ΎΥγρών και ΎΑερίων Καυσίμων. (ζ) Βαθμός ΎΑποδόσεως ΎΑτμολεβήτων. ΎΑθηναι, 1976-1978.



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**



ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ

Π ί ν α ξ Π-1

Μετατροπή Μονάδων Μετρικού Τεχνικού Συστήματος (Μ.Τ.Σ.)  
είς Μονάδες Διεθνούς Συστήματος (S.I.)

| ΄Από (Μ.Τ.Σ.)            | Είς (S.I.)             | Πολλαπλασιάσατε επί    |
|--------------------------|------------------------|------------------------|
| at (kp/cm <sup>2</sup> ) | bar                    | 0,981                  |
| at                       | Pa (N/m <sup>2</sup> ) | 9,81·10 <sup>4</sup>   |
| atm                      | bar                    | 1,013                  |
| atm                      | Pa                     | 1,013·10 <sup>5</sup>  |
| h                        | s                      | 3600                   |
| kcal                     | kJ                     | 4,187                  |
| kcal/h                   | W                      | 1,163                  |
| kcal/kg                  | kJ/kg                  | 4,187                  |
| kcal/m h °C              | W/m K                  | 1,163                  |
| kcal/m <sup>2</sup> h °C | W/m <sup>2</sup> K     | 1,163                  |
| kp                       | N                      | 9,81                   |
| kp/m <sup>2</sup>        | bar                    | 9,81·10 <sup>-5</sup>  |
| kp/m <sup>2</sup>        | Pa                     | 9,81                   |
| kp.m                     | J                      | 9,81                   |
| kp.m/s                   | W                      | 9,81                   |
| kp.s                     | kg.m/s                 | 9,81                   |
| mm water                 | Pa                     | 9,81                   |
| m <sup>2</sup> /h        | m <sup>2</sup> /s      | 2,78·10 <sup>-4</sup>  |
| PS                       | W                      | 735,5                  |
| Torr (mmHg)              | bar                    | 1,333·10 <sup>-3</sup> |
| Torr                     | Pa                     | 1,333·10 <sup>2</sup>  |

(K=°C+273)

## Π ί ν α ξ Π-2

Μετατροπή Μονάδων Άγγλοαξωνικού Τεχνικού Συστήματος  
(Α.Τ.Σ.) εἰς Μονάδας Διεθνούς Συστήματος (S.I.)

| Άπό (Α.Τ.Σ.)                     | εἰς (S.I.)         | Πολλαπλασιάσατε ἐπί     |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| barrel (oil)                     | m <sup>3</sup>     | 0,159                   |
| B.t.u.                           | kJ                 | 1,055                   |
| B.t.u./h                         | W                  | 0,293                   |
| B.t.u./h.sq.ft                   | W/m <sup>2</sup>   | 3,154                   |
| B.t.u/h.sq.ft. <sup>0</sup> F    | W/m <sup>2</sup> K | 5,678                   |
| B.t.u/h.ft. <sup>0</sup> F       | W/m K              | 1,729                   |
| B.t.u/h.sq.ft. <sup>0</sup> F/in | W/m K              | 0,144                   |
| B.t.u/lb                         | kJ/kg              | 2,326                   |
| cu.ft                            | m <sup>3</sup>     | 0,0283                  |
| cu.ft/min (CFM)                  | m <sup>3</sup> /s  | 0,5.10 <sup>-3</sup>    |
| cu.ft/lb                         | m <sup>3</sup> /kg | 0,0624                  |
| cu.in                            | m <sup>3</sup>     | 0,0164.10 <sup>-3</sup> |
| ft                               | m                  | 0,305                   |
| ft/min (FPM)                     | m/s                | 0,005                   |
| ft of water                      | bar                | 0,0299                  |
| ft of water                      | Pa                 | 2990                    |
| ft.lb                            | J                  | 1,355                   |
| gallons (U.S.)                   | m <sup>3</sup>     | 3,785.10 <sup>-3</sup>  |
| gallons (Imperial)               | m <sup>3</sup>     | 4,543.10 <sup>-3</sup>  |
| gal/min (g.p.m.)                 | m <sup>3</sup> /s  | 0,063.10 <sup>-3</sup>  |
| grains                           | kg                 | 6,48.10 <sup>-5</sup>   |
| HP                               | kW                 | 0,745                   |
| HP (boiler)                      | kW                 | 9,80                    |
| in (")                           | m                  | 2,54.10 <sup>-2</sup>   |
| in Hg                            | bar                | 0,0338                  |
| in Hg                            | Pa                 | 3386,4                  |
| in of water                      | bar                | 0,0025                  |
| in of water                      | Pa                 | 249                     |
| lb                               | kg                 | 0,454                   |
| lb/cu.ft                         | kg/m               | 16,02                   |

| Άπό (Α.Τ.Σ.)         | Είς (S.I.)     | Πολλαπλασιάσατε επί    |
|----------------------|----------------|------------------------|
| lb/ft.h              | kg/m s         | 0,0004                 |
| lb/ft.s              | kg/m s         | 1,487                  |
| lb/sq.ft             | bar            | 4,789.10 <sup>-4</sup> |
| lb/sq.ft             | Pa             | 47,89                  |
| lb/sq.ft.h           | kg/m s         | 0,0014                 |
| lb/sq.in (p.s.i.)    | bar            | 0,0689                 |
| lb/sq.in             | Pa             | 6894,7                 |
| miles                | km             | 1,609                  |
| sq.ft                | m <sup>2</sup> | 0,0929                 |
| sq.in                | m <sup>2</sup> | 6,452.10 <sup>-4</sup> |
| tons (short)         | kg             | 907,2                  |
| tons (refrigeration) | kW             | 3,51                   |

$$K = \frac{(^{\circ}F - 32)}{1,8} + 273$$

## ΠΙΝΑΚΕΣ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

## Π ί ν α ξ Π-3

Θερμοδυναμικά Ιδιότητες Κεκορεσμένου Ύδρατμου

| Θερμοκρασία<br>°C | Πίεσις<br>Torr | Πίεσις<br>bar | Είδικός<br>όγκος ατμού<br>m <sup>3</sup> /kg | Θερμότης<br>εξατμίσεως<br>kJ/kg |
|-------------------|----------------|---------------|--|---------------------------------|
| 0                 | 4,58           | 0,0061        | 206,3  | 2492,9                          |
| 1                 | 4,92           | 0,0066        | 192,7  | 2490,8                          |
| 2                 | 5,29           | 0,0071        | 180,0  | 2488,7                          |
| 3                 | 5,68           | 0,0075        | 168,2  | 2486,6                          |
| 4                 | 6,10           | 0,0081        | 157,2  | 2484,1                          |
| 5                 | 6,54           | 0,0087        | 147,1  | 2482,0                          |
| 6                 | 7,01           | 0,0093        | 137,7  | 2480,0                          |
| 7                 | 7,51           | 0,0100        | 129,0  | 2477,9                          |
| 8                 | 8,04           | 0,0107        | 120,9  | 2475,3                          |
| 9                 | 8,61           | 0,0115        | 113,4  | 2473,2                          |
| 10                | 9,20           | 0,0123        | 106,3  | 2471,0                          |
| 12                | 10,51          | 0,0140        | 93,7   | 2466,5                          |
| 14                | 11,98          | 0,0160        | 82,9   | 2462,4                          |
| 16                | 13,62          | 0,0181        | 73,3   | 2457,8                          |
| 18                | 15,46          | 0,0206        | 65,1   | 2453,2                          |
| 20                | 17,51          | 0,0233        | 57,8   | 2449,0                          |
| 22                | 19,79          | 0,0264        | 51,5   | 2444,8                          |
| 24                | 22,32          | 0,0297        | 45,92  | 2440,2                          |
| 26                | 25,13          | 0,0335        | 41,05  | 2436,0                          |
| 28                | 28,25          | 0,0377        | 36,74  | 2431,4                          |
| 30                | 31,71          | 0,0423        | 32,95  | 2426,8                          |
| 35                | 42,02          | 0,0560        | 25,25  | 2415,5                          |



| Θερμοκρασία<br>°C | Πίεσις<br>Torr | Πίεσις<br>bar | Είδικός<br>όγκος ατμού<br>m <sup>3</sup> /kg | Θερμότης<br>εξατμίσεως<br>kJ/kg |
|-------------------|----------------|---------------|--|---------------------------------|
| 40                | 55,13          | 0,0735        | 19,57  | 2404,2                          |
| 45                | 71,66          | 0,0955        | 15,25  | 2392,0                          |
| 50                | 92,30          | 0,1231        | 12,02  | 2380,0                          |
| 55                | 117,85         | 0,1571        | 9,56   | 2368,2                          |
| 60                | 149,2          | 0,1989        | 7,66   | 2356,4                          |
| 65                | 187,4          | 0,2499        | 6,19   | 2344,3                          |
| 70                | 233,5          | 0,3115        | 5,04   | 2331,7                          |
| 75                | 289,0          | 0,3854        | 4,13   | 2319,6                          |
| 80                | 355,0          | 0,4736        | 3,40   | 2307,5                          |
| 85                | 433,5          | 0,5782        | 2,82   | 2295,0                          |
| 90                | 525,8          | 0,7013        | 2,36   | 2281,5                          |
| 95                | 634,0          | 0,8456        | 1,98   | 2269,0                          |
| 100               | 760,0          | 1,0133        | 1,67   | 2255,5                          |
| 105               |                | 1,208         | 1,42   | 2242,5                          |
| 110               |                | 1,433         | 1,21   | 2228,7                          |
| 115               |                | 1,691         | 1,036  | 2214,5                          |
| 120               |                | 1,986         | 0,891  | 2200,7                          |
| 125               |                | 2,321         | 0,770  | 2186,0                          |
| 130               |                | 2,702         | 0,668  | 2171,4                          |
| 135               |                | 3,131         | 0,581  | 2156,7                          |
| 140               |                | 3,614         | 0,508  | 2141,6                          |
| 145               |                | 4,155         | 0,446  | 2126,2                          |
| 150               |                | 4,760         | 0,392  | 2110,7                          |
| 160               |                | 6,180         | 0,306  | 2078,8                          |
| 170               |                | 7,918         | 0,242  | 2046,2                          |
| 180               |                | 10,022        | 0,194  | 2012,3                          |
| 190               |                | 12,543        | 0,156  | 1977,5                          |
| 200               |                | 15,534        | 0,127  | 1942,0                          |
| 210               |                | 19,059        | 0,104  | 1905,0                          |
| 220               |                | 23,190        | 0,086  | 1867,4                          |
| 240               |                | 32,2          | 0,060  | 1760,0                          |

| Θερμοκρασία<br>°C | Πίεσις<br>Torr | Πίεσις<br>bar | Είδιμός<br>όγκος ατμού<br>m <sup>3</sup> /kg | Θερμότης<br>έξατμίσεως<br>kJ/kg |
|-------------------|----------------|---------------|--|---------------------------------|
| 260               |                | 46,0          | 0,041  | 1652,0                          |
| 280               |                | 63,2          | 0,028  | 1535,0                          |
| 300               |                | 87,5          | 0,021  | 1410,0                          |

1 atm=1,013 bar=760 Torr

1 kp/cm<sup>2</sup>=0,98067 bar

1 kcal=4,187 kJ

## Π ί ν α ξ Π-4

Θερμοφυσικαί Ιδιότητες του Ύδατος

| T (°C) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\eta$ (cP) | k(W/mK) |
|--------|-----------------------------|-------------|---------|
| 0      | 999,87                      | 1,79        | 0,552   |
| 5      | 999,99                      | 1,52        | 0,566   |
| 10     | 999,73                      | 1,31        | 0,576   |
| 15     | 999,13                      | 1,14        | 0,587   |
| 20     | 998,23                      | 1,00        | 0,597   |
| 25     | 997,08                      | 0,89        | 0,606   |
| 30     | 995,68                      | 0,80        | 0,616   |
| 35     | 994,06                      | 0,72        | 0,624   |
| 40     | 992,25                      | 0,66        | 0,628   |
| 45     | 990,25                      | 0,60        | 0,637   |
| 50     | 988,07                      | 0,55        | 0,644   |
| 60     | 983,24                      | 0,47        | 0,651   |
| 70     | 977,81                      | 0,41        | 0,664   |
| 80     | 971,83                      | 0,36        | 0,668   |
| 90     | 965,34                      | 0,32        | 0,676   |
| 100    | 958,38                      | 0,28        | 0,680   |
| 120    | 943,40                      | 0,23        | 0,685   |
| 140    | 926,40                      | 0,19        | 0,684   |
| 160    | 907,50                      | 0,17        | 0,680   |
| 180    | 886,60                      | 0,16        | 0,675   |
| 200    | 862,80                      | 0,15        | 0,665   |

Μέση  $C_p$  ύδατος = 4,18 kJ/kg K

## Π ί ν α ξ Π-5

Θερμοφυσικά Ίδιότητες του Ξηροϋ Άέρου (1 bar)

| T (K) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\eta$ (kg/ms)        | k (W/m K) |
|-------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| 270   | 1,291                       | $1,69 \times 10^{-5}$ | 0,0239    |
| 280   | 1,245                       | 1,74                  | 0,0247    |
| 290   | 1,202                       | 1,79                  | 0,0255    |
| 300   | 1,161                       | 1,84                  | 0,0263    |
| 320   | 1,089                       | 1,94                  | 0,0278    |
| 350   | 0,9950                      | 2,08                  | 0,0300    |
| 400   | 0,8711                      | 2,30                  | 0,0336    |
| 500   | 0,6964                      | 2,70                  | 0,0403    |
| 600   | 0,5804                      | 3,05                  | 0,0466    |
| 700   | 0,4975                      | 3,38                  | 0,05234   |
| 800   | 0,4354                      | 3,69                  | 0,05769   |
| 900   | 0,3868                      | 3,98                  | 0,06288   |
| 1000  | 0,3482                      | 4,24                  | 0,0680    |
| 1100  | 0,3166                      | 4,49                  | 0,0732    |
| 1200  | 0,2902                      | 4,73                  | 0,0782    |
| 1300  | 0,2679                      | 4,96                  | 0,0831    |

Μέση  $C_p$  άέρος = 1,1 kJ/kg K

## Π ί ν α ξ Π-6

## Θερμοφυσικά Ίδιότητες Διαφόρων Ρευστών

| Ρευστόν                 | T (°C) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\eta$ (cP) | k (W/m K) |
|-------------------------|--------|-----------------------------|-------------|-----------|
| <u>Ύγρὰ</u>             |        |                             |             |           |
| Ύδωρ                    | 20     | 998,23                      | 1,00        | 0,597     |
| Ύδατικόν διάλυμα        |        |                             |             |           |
| 20% σακχαρόζης          | 20     | 1083,00                     | 1,95        | 0,540     |
| 40% "                   | 20     | 1179,80                     | 6,17        | 0,470     |
| 60% "                   | 20     | 1291,40                     | 58,50       | 0,400     |
| Μεθανόλη                | 20     | 792                         | 0,60        | 0,214     |
| Αίθανόλη                | 20     | 791                         | 1,30        | 0,193     |
| Γλυκερίνη               | 80     | 1261                        | 60,00       | 0,283     |
| Πεντάνιον               | 0      | 630                         | 0,30        | 0,135     |
| Όκτάνιον                | 0      | 703                         | 0,70        | 0,143     |
| Freon 12                | 0      | 1400                        | 0,30        | 0,100     |
| Άμμωνία                 | -50    | 700                         | 0,12        | 0,500     |
| Θειϊκόν όξύ 98%         | 20     | 1836                        | 25,00       | 0,345     |
| Βενζένιον               | 20     | 870                         | 0,70        | 0,156     |
| Βενζίνη                 | 20     | 700                         | 0,80        | 0,135     |
| Πετρέλαιον Diesel       | 20     | 800                         | 3,00        | 0,150     |
| Άργόν πετρέλαιον        | 20     | 850                         | 20,00       | 0,156     |
| <u>Άέρια (1 bar)</u>    |        |                             |             |           |
| Άήρ                     | 20     | 1,190                       | 0,018       | 0,0258    |
| Άτμός                   | 100    | 0,600                       | 0,013       | 0,0236    |
| Άέριος άμμωνία          | 0      | 0,771                       | 0,010       | 0,0221    |
| Διοξειδιον τοϋ Άνθρακος | 0      | 1,976                       | 0,014       | 0,0147    |
| Διοξειδιον τοϋ θείου    | 0      | 2,926                       | 0,011       | 0,0086    |
| Χλώριον                 | 0      | 3,214                       | 0,013       | 0,0074    |
| Ύδρογόνον               | 0      | 0,089                       | 0,008       | 0,1730    |
| Μεθάνιον                | 0      | 0,717                       | 0,010       | 0,0304    |
| Αίθάνιον                | 0      | 1,356                       | 0,009       | 0,0184    |
| Αίθυλένιον              | 0      | 1,260                       | 0,010       | 0,0175    |
| Άκετυλένιον             | 0      | 1,173                       | 0,010       | 0,0187    |

## Π ί ν α ξ Π-7

## Είδικαί Θερμότητες Διαφόρων Ρευστών

| Ρευστόν                 | T (°C) | C <sub>p</sub> (kJ/kg K) |
|-------------------------|--------|--------------------------|
| <u>Υγρά</u>             |        |                          |
| Ύδωρ                    | 20     | 4,18                     |
| Ύδατικόν διάλυμα        |        |                          |
| 20% σακχαρόζης          | 20     | 3,60                     |
| 40% "                   | 20     | 3,36                     |
| 60% "                   | 20     | 2,94                     |
| Μεθανόλη                | 20     | 2,72                     |
| Αίθανόλη                | 20     | 3,10                     |
| Γλυκερίνη               | 20     | 2,64                     |
| Βουτάνιον               | 0      | 2,30                     |
| Προπάνιον               | 0      | 2,42                     |
| Πεντάνιον               | 0      | 2,18                     |
| Όκτάνιον                | 0      | 2,10                     |
| Freon 12                | 0      | 1,17                     |
| Άμμωνία                 | -50    | 4,42                     |
| Θειϊκόν Όξύ 98%         | 20     | 1,50                     |
| Βενζένιον               | 20     | 1,88                     |
| Βενζίνη                 | 20     | 2,20                     |
| Πετρέλαιον Diesel       | 20     | 1,96                     |
| Άργόν πετρέλαιον        | 20     | 1,75                     |
| <u>Αέρια</u>            |        |                          |
| Άηρ                     | 20     | 1,04                     |
| Άτμός                   | 100    | 1,88                     |
| Άέριος άμμωνία          | 20     | 2,10                     |
| Διοξειδιον τοϋ άνθρακος | 20     | 0,88                     |
| Διοξειδιον τοϋ θείου    | 20     | 0,63                     |
| Χλώριον                 | 20     | 0,46                     |
| Ύδρογόνον               | 20     | 14,40                    |
| Μεθάνιον                | 20     | 2,28                     |
| Αίθάνιον                | 20     | 1,80                     |
| Αίθυλένιον              | 20     | 1,46                     |
| Άκετυλένιον             | 20     | 1,68                     |

## Π ί ν α ξ Π-8

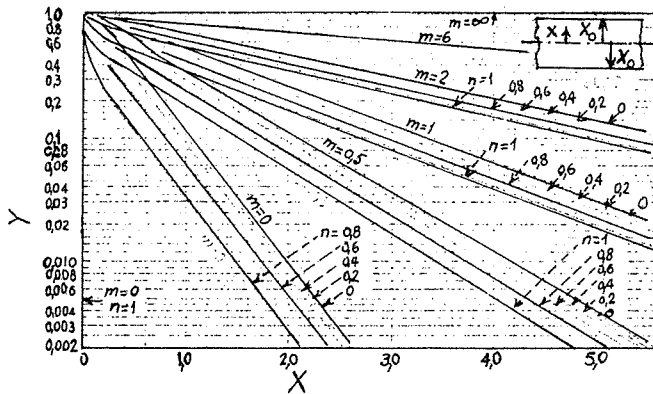
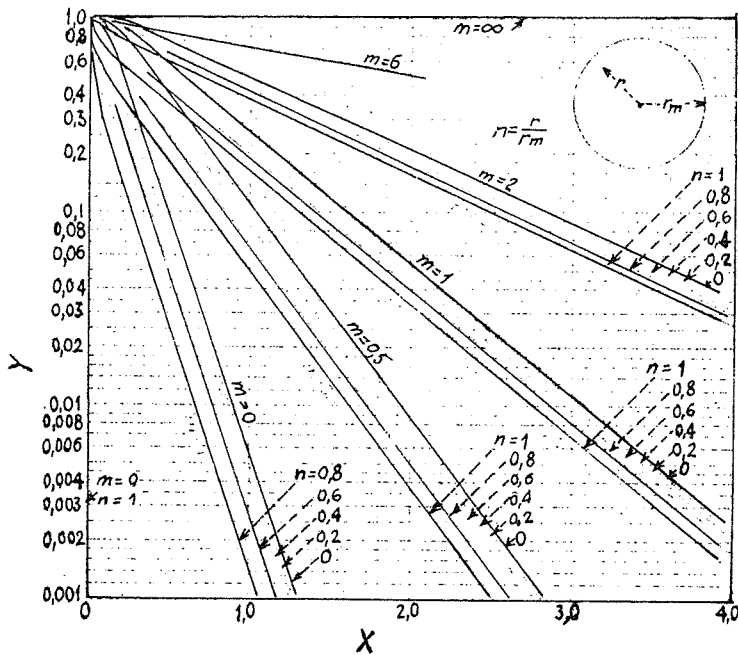
Διαστάσεις Χαλυβδίνων Σωλήνων (Pipes)

| Όνομαστική Διάμετρος<br>inches | Εξωτερική Διάμετρος |        | Schedule N <sup>o</sup> | Εσωτερική Διάμετρος<br>mm | Εσωτερική Διατομή<br>m <sup>2</sup> |
|--------------------------------|---------------------|--------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
|                                | inches              | mm     |                         |                           |                                     |
| 1/8                            | 0,405               | 10,287 | 10S                     | 7,798                     | 0,0474×10 <sup>-3</sup>             |
|                                |                     |        | 40ST,40S                | 6,833                     | 0,0372                              |
|                                |                     |        | 80×S,80S                | 5,461                     | 0,0232                              |
| 1/4                            | 0,540               | 12,802 | 10S                     | 10,414                    | 0,0855                              |
|                                |                     |        | 40ST,40S                | 9,246                     | 0,0669                              |
|                                |                     |        | 80×S,80S                | 7,671                     | 0,0465                              |
| 3/8                            | 0,675               | 17,145 | 10S                     | 13,843                    | 0,1505                              |
|                                |                     |        | 40ST,40S                | 12,522                    | 0,1236                              |
|                                |                     |        | 80×S,80S                | 10,744                    | 0,0910                              |
| 1/2                            | 0,840               | 21,336 | 5S                      | 18,034                    | 0,2555                              |
|                                |                     |        | 10S                     | 17,120                    | 0,2304                              |
|                                |                     |        | 40ST,40S                | 15,799                    | 0,1960                              |
|                                |                     |        | 80×S,80S                | 13,868                    | 0,1514                              |
|                                |                     |        | 160                     | 11,786                    | 0,1087                              |
|                                |                     |        | 5S                      | 23,368                    | 0,4283                              |
| 3/4                            | 1,050               | 26,670 | 10S                     | 22,454                    | 0,3958                              |
|                                |                     |        | 40ST,40S                | 20,930                    | 0,3447                              |
|                                |                     |        | 80×S,80S                | 18,847                    | 0,2787                              |
|                                |                     |        | 160                     | 15,545                    | 0,1895                              |
|                                |                     |        | 5S                      | 30,099                    | 0,7135                              |
|                                |                     |        | 10S                     | 27,864                    | 0,6094                              |
| 1                              | 1,315               | 33,401 | 40ST,40S                | 26,645                    | 0,5574                              |
|                                |                     |        | 80×S,80S                | 24,308                    | 0,4636                              |
|                                |                     |        | 160                     | 20,701                    | 0,3363                              |
|                                |                     |        | 5S                      | 38,862                    | 1,1863                              |
|                                |                     |        | 10S                     | 36,627                    | 1,0535                              |
|                                |                     |        | 40ST,40S                | 35,052                    | 0,9662                              |
| 1 1/4                          | 1,660               | 42,164 | 80×S,80S                | 32,461                    | 0,8277                              |
|                                |                     |        | 160                     | 29,464                    | 0,6819                              |

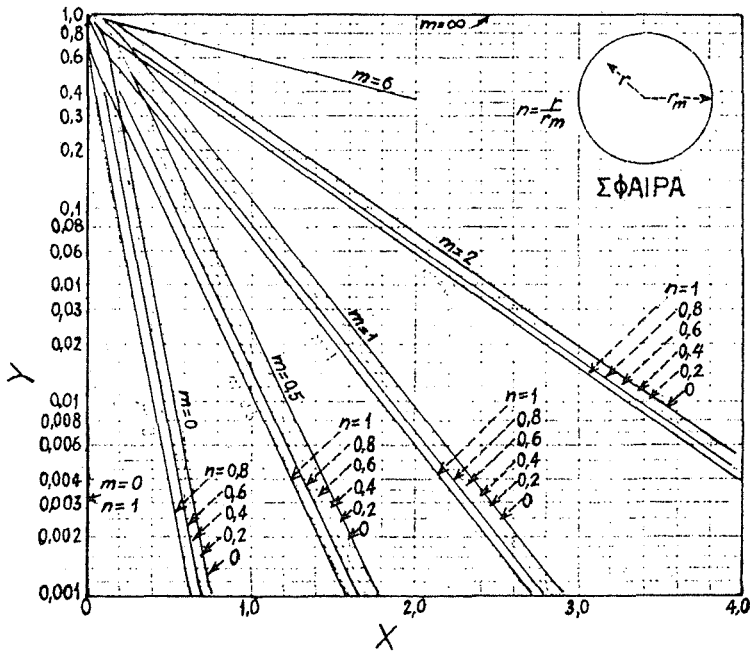
| Όνομαστική Διάμετρος<br>inches | Εξωτερική Διάμετρος |         | Schedule<br>N <sup>o</sup> | Εσωτερική Διάμετρος<br>mm | Εσωτερική Διατομή<br>m <sup>2</sup> × 10 <sup>3</sup> |
|--------------------------------|---------------------|---------|----------------------------|---------------------------|---|
|                                | inches              | mm      |                            |                           |   |
| 1 1/2                          | 1,900               | 48,260  | 5S                         | 44,958                    | 1,5877  |
|                                |                     |         | 10S                        | 42,723                    | 1,4334  |
|                                |                     |         | 40ST,40S                   | 40,894                    | 1,3136  |
|                                |                     |         | 80XS,80S                   | 38,100                    | 1,1380  |
|                                |                     |         | 160                        | 33,985                    | 0,9067  |
| 2                              | 2,375               | 60,325  | 5S                         | 57,023                    | 2,5538  |
|                                |                     |         | 10S                        | 54,788                    | 2,3578  |
|                                |                     |         | 40ST,40S                   | 52,502                    | 2,1646  |
|                                |                     |         | 80ST,80S                   | 49,251                    | 1,9045  |
|                                |                     |         | 160                        | 42,850                    | 1,4418  |
| 2 1/2                          | 2,875               | 73,025  | 40S                        | 62,713                    | 3,0862  |
| 3                              | 3,500               | 88,900  | "                          | 77,927                    | 4,7659  |
| 4                              | 4,500               | 114,300 | "                          | 102,260                   | 8,2126  |
| 5                              | 5,563               | 141,300 | "                          | 128,194                   | 12,9135   |
| 6                              | 6,625               | 168,275 | "                          | 154,051                   | 18,6363   |
| 8                              | 8,625               | 219,075 | "                          | 202,717                   | 32,2745   |
| 10                             | 10,750              | 273,050 | "                          | 254,508                   | 50,8644   |
| 12                             | 12,750              | 323,850 | "                          | 304,800                   | 72,9660   |
| 14                             | 14,000              | 355,600 | 40                         | 333,350                   | 87,3010   |
| 16                             | 16,000              | 406,400 | "                          | 381,000                   | 114,0106  |
| 18                             | 18,000              | 457,200 | "                          | 428,650                   | 144,3063  |
| 20                             | 20,000              | 508,000 | "                          | 477,825                   | 179,3214  |
| 24                             | 24,000              | 609,600 | "                          | 574,650                   | 259,3853  |
| 30                             | 30,000              | 762,000 | 20                         | 736,600                   | 426,1462  |



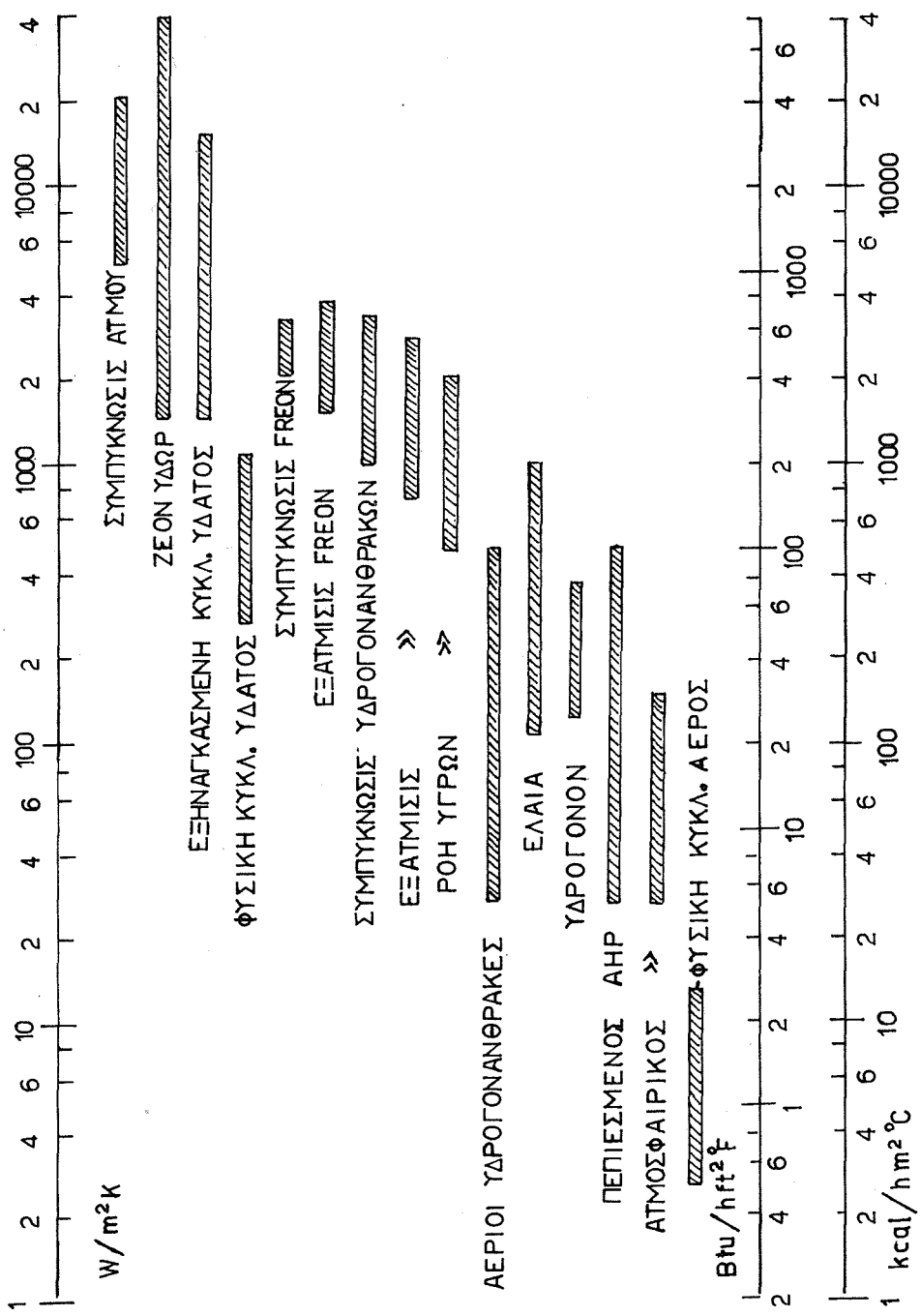
## ΣΧΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ

Σχ. Σ-1. Διάγραμμα Gurney-Lurie διά πλάκας ( $n=x/x_0, m=k/x_0h$ )

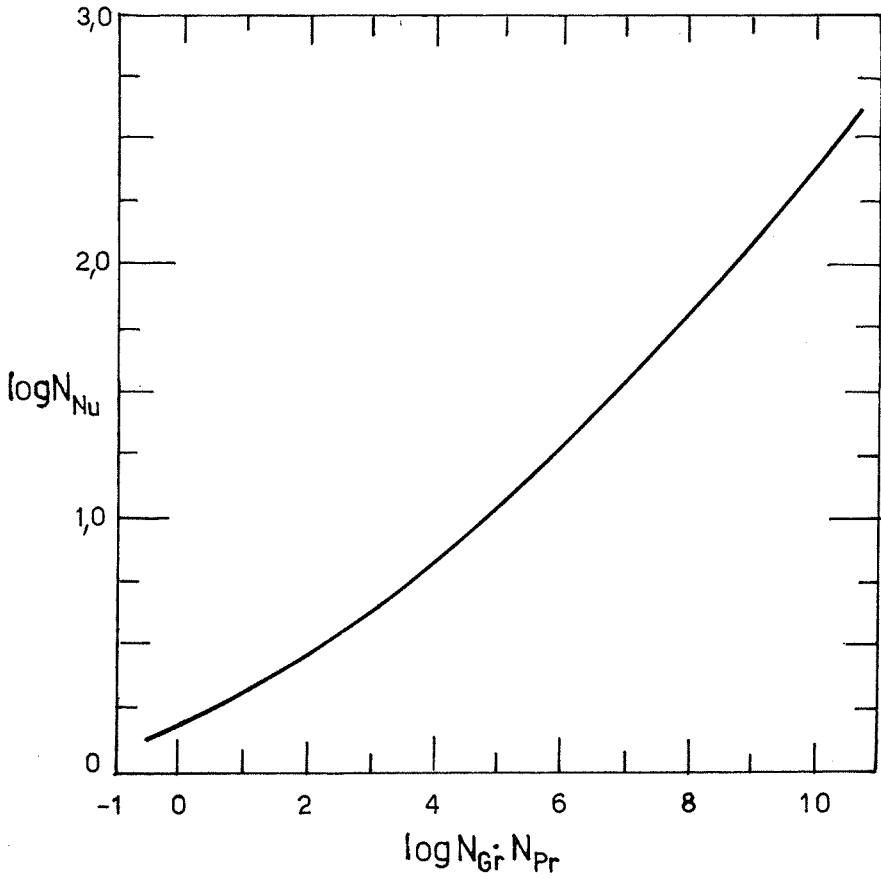
Σχ. Σ-2. Διάγραμμα Gurney-Lurie διά κυλίνδρους



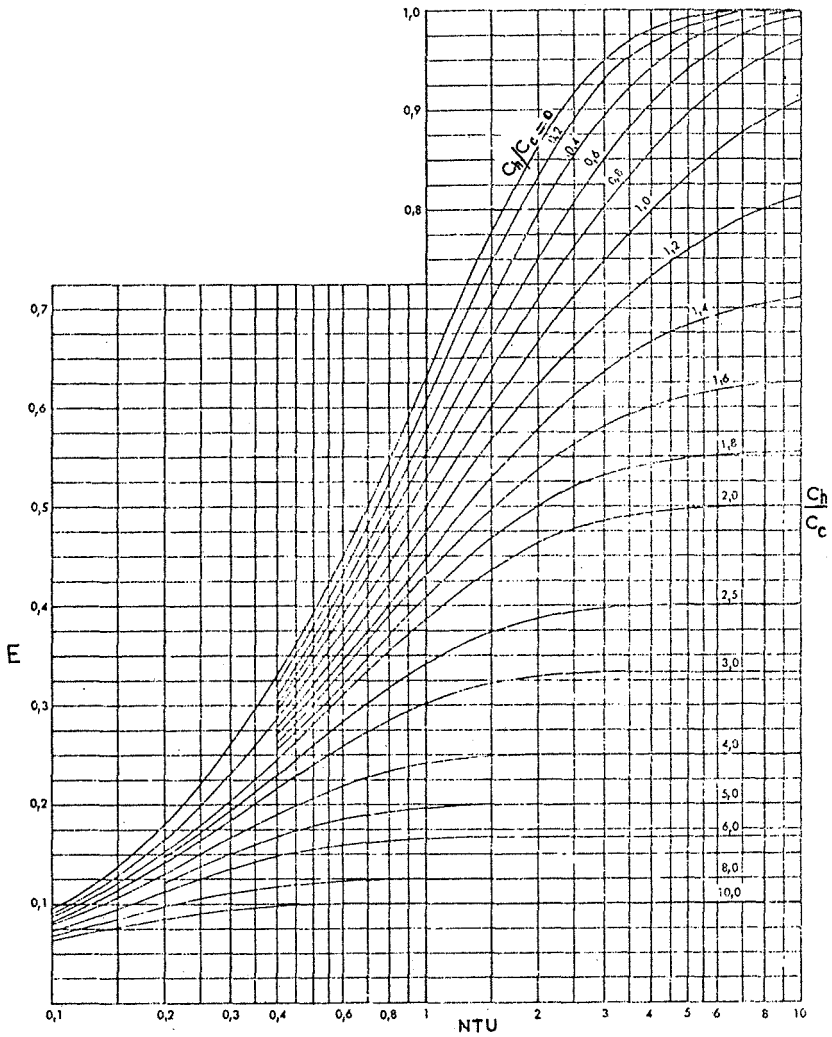
Σχ. Σ-3. Διάγραμμα Gurney-Lurie διά σφαίρας



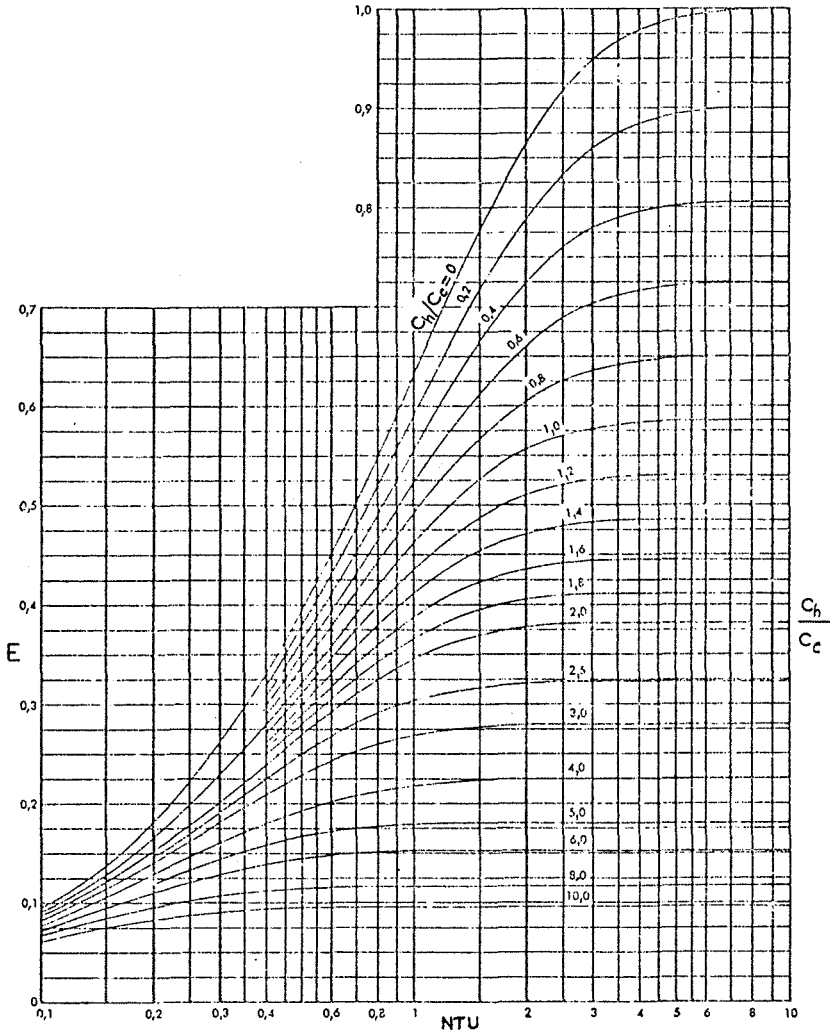
Σχ. Σ-4. Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας (h) διαφόρων διεργασιών



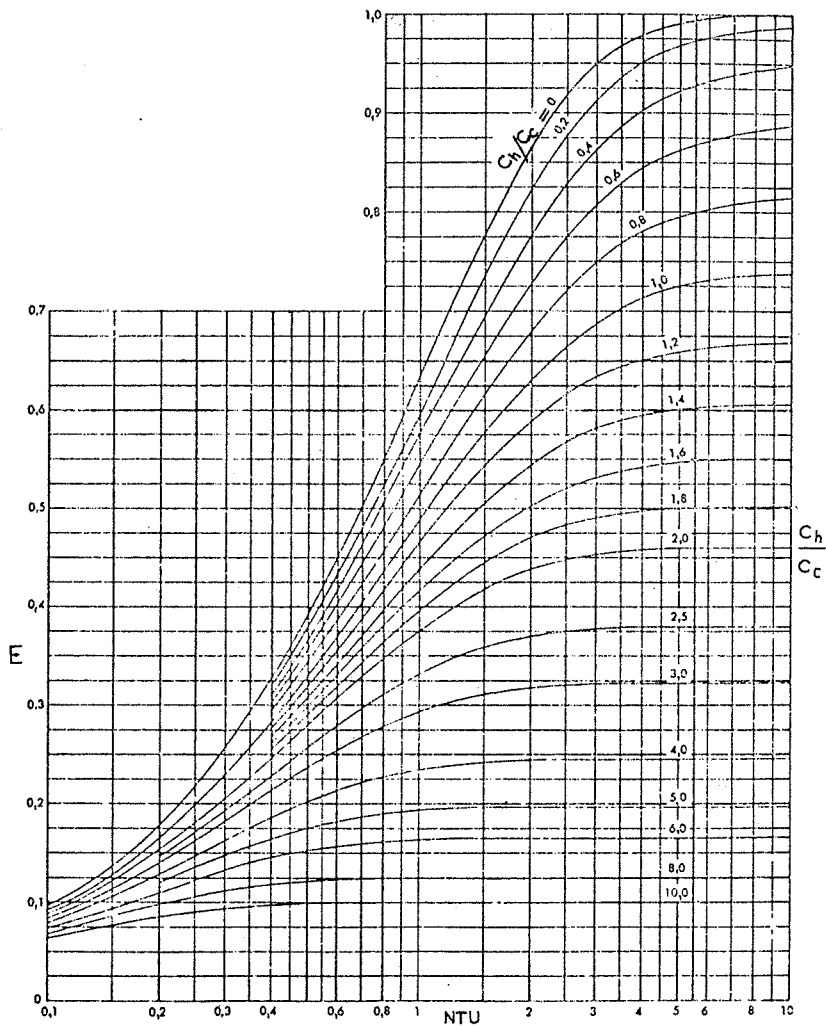
Σχ. Σ-5. Φυσική κυκλοφορία αέρος εις κατακορύφους πλάκας  
 ύψους  $L$ .  $\left(N_{Nu} = \frac{hL}{k}\right)$



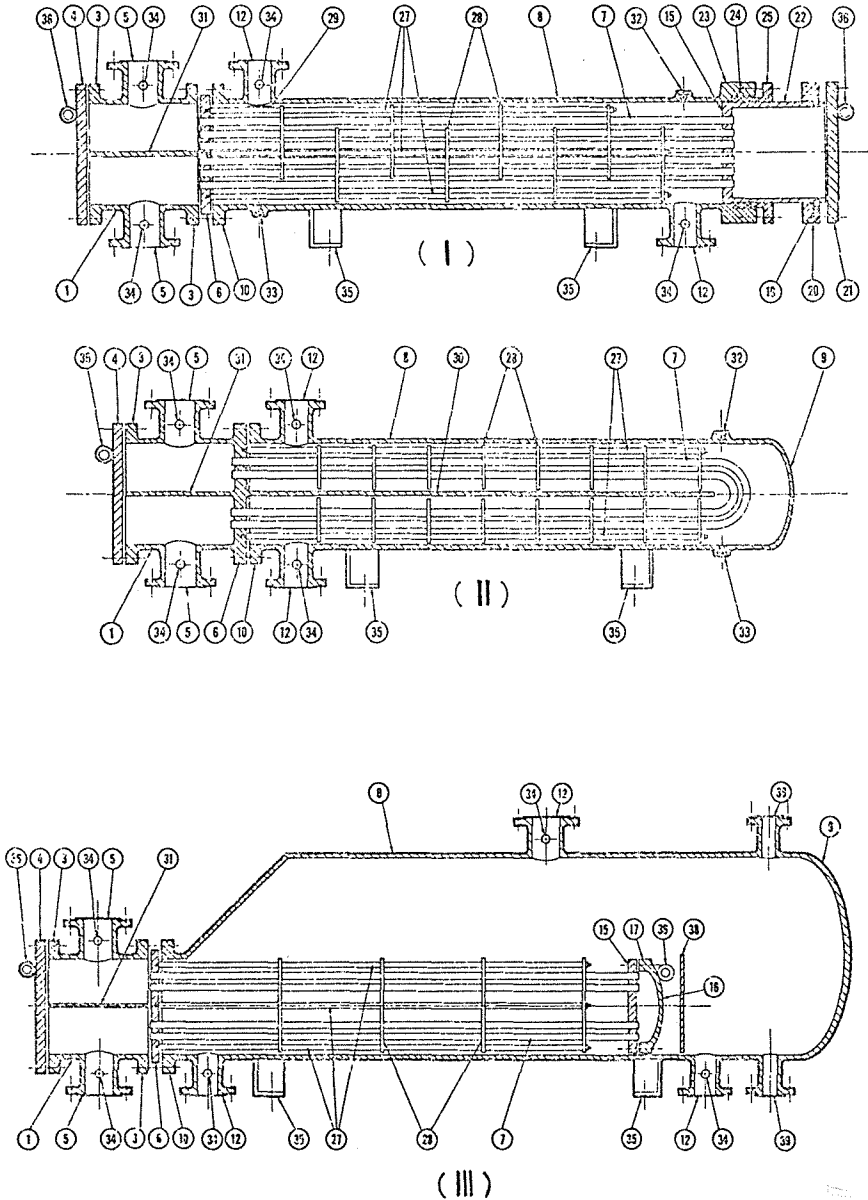
Σχ. Σ-6. Θερμική απόδοτικότητα απλών έναλλακτών θερμότητας άν-  
τιρροής



Σχ. Σ-7. Θερμική απόδοτικότητα έναλλακτών θερμότητας 1-2, 1-4, κ.λ.π.

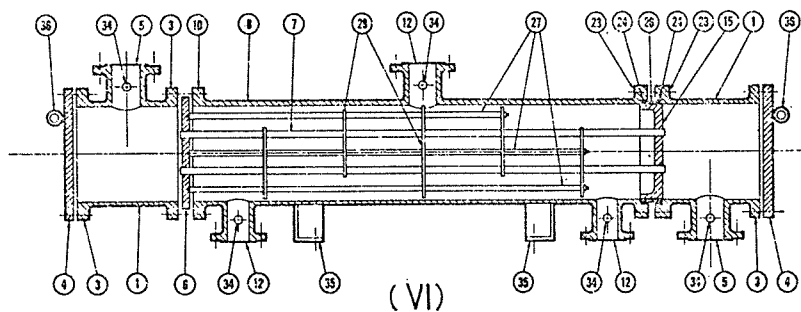
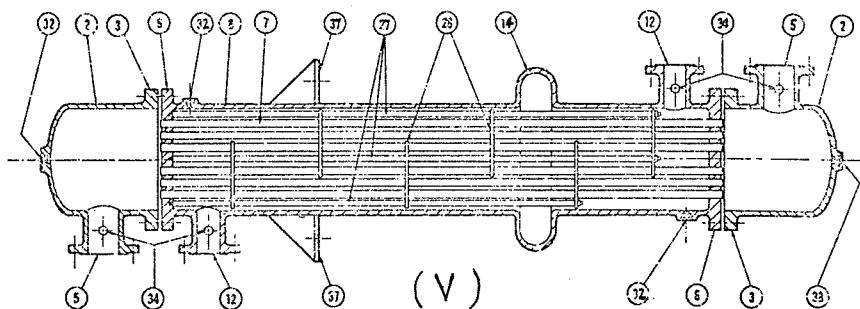
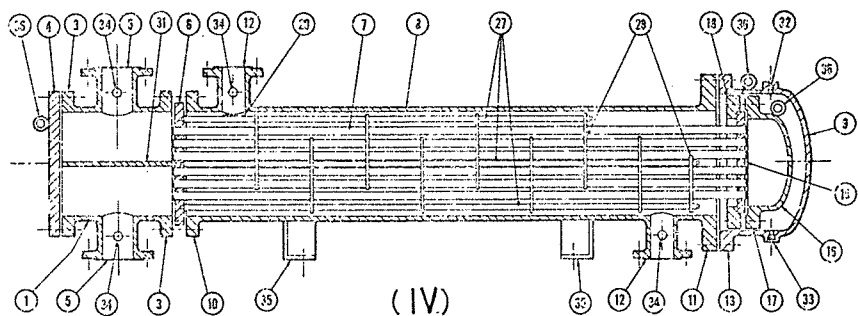


Σχ. Σ-8. Θερμική απόδοτικότητα έναλλακτών θερμότητας 2-4, 2-6, κ.λ.π.



Σχ. Σ-9. Τύποι έναλλακτών θερμότητας σωλήνων καὶ κελύφους:  
 (I) Ἐναλλάκτης κινητῆς, ἐξωτερικῆς κεφαλῆς (floating head)  
 μὲ στυπιοθλίπτῃν. (II) Ἐναλλάκτης μὲ φουροκέτες (U-tube).  
 (III) Ἀναβραστήρ ἐλευθέρου κεφαλῆς τύπου λέβητος (kettle).





Σχ. Σ-9 (συνέχεια). (IV) Έναλλάκτης κινητής κεφαλής. (V) Έναλλάκτης άκινήτων σωλήνων. (VI) Έναλλάκτης κινητού κα-  
θρέπτου με στυπιοθλίπτνη καί δακτυλιοειδή όδηγόν.

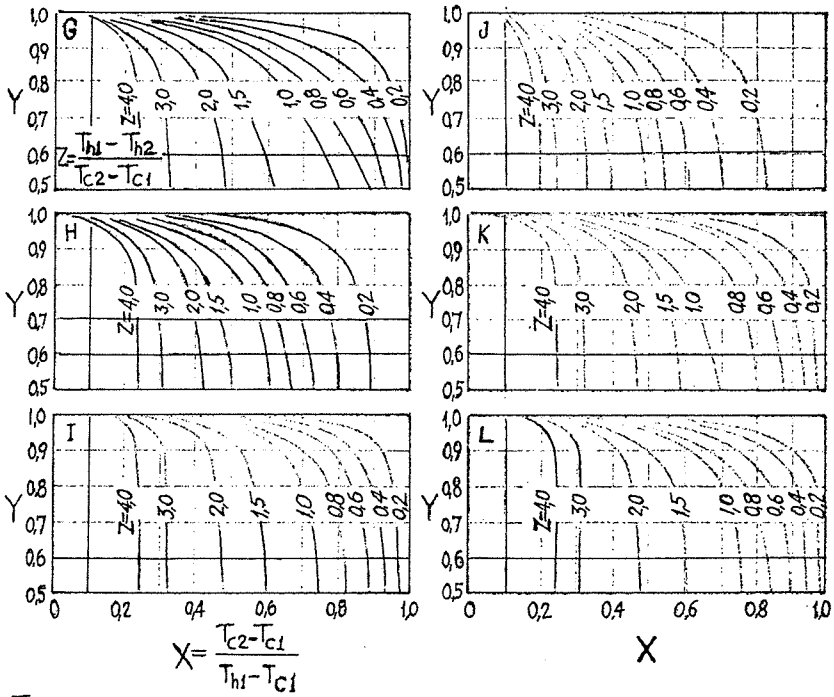
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΚΑΙ ΣΩΛΗΝΩΝ  
(Σχ. Σ-9)

(Shell and Tube Heat Exchangers)

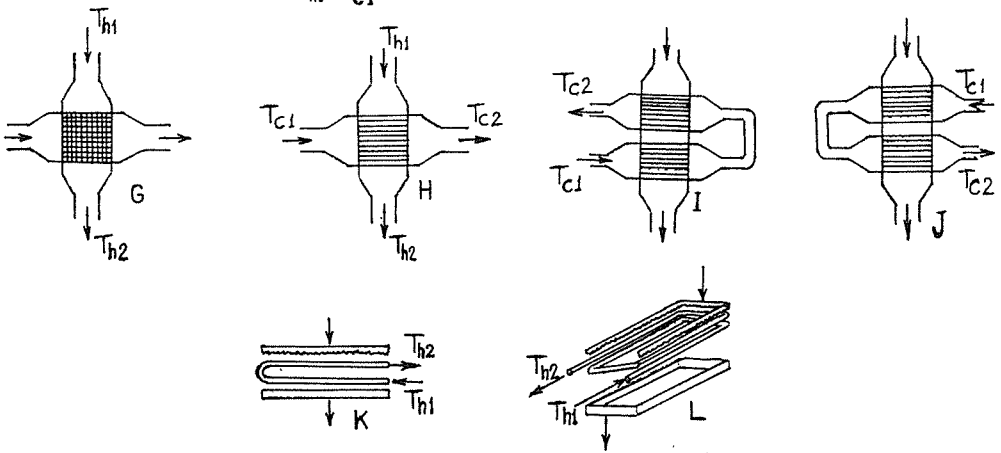
1. Σταθερά κεφαλή τύπου διαύλου (channel)
2. Σταθερά κεφαλή τύπου καμπάνας (bonnet)
3. Φλάντζα σταθεράς κεφαλής
4. Καθρέπτης σταθεράς κεφαλής
5. Στόμιον σταθεράς κεφαλής
6. Σταθερός καθρέπτης σωλήνων (tubesheet)
7. Σωλήνες ή Αύλοι ή Τοῦμπα (tubes)
8. Κέλυφος (shell)
9. Κάλυμμα (καμπάνα) κελύφους
10. Φλάντζα κελύφους - άκρον σταθερής κεφαλής
11. Φλάντζα κελύφους - άκρον όπισθίας κεφαλής
12. Στόμιον κελύφους
13. Φλάντζα καμπάνας κελύφους
14. Δακτύλιος διαστολής
15. Κινητός καθρέπτης σωλήνων
16. Καμπάνα κινητής κεφαλής
17. Φλάντζα καμπάνας κινητής κεφαλής
18. Δακτυλιοειδής φλάντζα κινητής κεφαλής
19. Δακτυλιοειδές έλατήριο
20. "Φορετή" φλάντζα (βοηθητική)
21. Καθρέπτης έξωτερικής κινητής κεφαλής
22. Κέλυφος κινητής κεφαλής
23. Φλάντζα συγκρατήσεως στυπιοθλίπτου
24. Στυπιοθλίπτης ή σαλαμάστρα (packing box)
25. Δακτύλιος στυπιοθλίπτου
26. Δακτυλιοειδής οδηγός (στυπιοθλίπτου)

27. Όδηγοί ράβδοι συγκρατήσεως άνακλαστήρων
28. Έγκάρσιοι άνακλαστήρες ή διαφράγματα (baffles)
29. Άνακλαστήρ προσκρούσεως
30. Διαμήκης άνακλαστήρ
31. Διαχωριστήρ διαδρομών
32. Σύνδεσις έξαεριστικοῦ
33. Σύνδεσις άποστραγγιστικοῦ
34. Σύνδεσις όργάνων
35. 37. Έποστηρίγματα
36. Άγκιστρον άνυψώσεως
38. Έπερχειλιστήρ
39. Σύνδεσις δείκτου στάθμης

(Άπό Πρότυπα TEMA = Tabular Exchanger Manufacturers Association).



$$X = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}}$$



Σχ. Σ-10. Συντελεστές διορθώσεως (Y) έναλλακτών θερμότητας έγκαρσούς ροής



|   |     |
|---|-----|
| Διαχωριστήρες ατμών/ύγρου έξατμιστήρων      | 196 |
| Dittus-Boelter, έξίσωσις                    | 43  |
| Dühring, διάγραμμα                          | 165 |
| Είδική θερμότης διαφόρων ρευστών            | 334 |
| Έκπομπή/άπορρόφησης ακτινοβολίας            | 57  |
| Έναλλάκται θερμότητος, άναδευόμενοι         | 102 |
| "          "          άσυνεχοϋς λειτουργίας | 115 |
| "          "          κελύφους καί σωλήνων  | 91  |
| "          "          μετά πλακών           | 100 |
| "          "          μετά πτερυγίων        | 106 |
| "          "          πολλαπλών διαβάσεων   | 95  |
| "          "          σπειροειδείς          | 102 |
| Έξάτμισις, ίσοζύγια μάζης καί ένθαλπίας     | 178 |
| "          , μεταφορά θερμότητος            | 180 |
| Έξατμιστήρες άναδευομένου στρώματος         | 173 |
| "          άνασυμπιέσεως ατμών              | 183 |
| "          βραχέων σωλήνων                  | 167 |
| "          έξηναγκασμένης κυκλοφορίας       | 169 |
| "          μακρών σωλήνων                   | 172 |
| "          μετά πλακών                      | 173 |
| "          πολλαπλών βαθμίδων               | 185 |
| "          πολτών                           | 192 |
| "          τύπου άντλίας θερμότητος         | 194 |
| "          φυγοκεντρικοί                    | 176 |
| Έξέργεια                                    | 303 |
| Έξηναγκασμένη κυκλοφορία                    | 43  |
| Έξοικονόμησις ένεργείας                     | 302 |
| Eucken, έξίσωσις                            | 28  |
| Ζέοντα ύγρά                                 | 51  |
| Ζέσις ψυκτικών μέσων                        | 127 |
| Ήλιακή άπόσταξις                            | 203 |
| Ήλιακή ξήρανσις                             | 294 |

|  |              |
|--|--------------|
| Θερμαντικά ρευστά                              | 109          |
| Θερμική άγωγή μονίμου καταστάσεως              | 16           |
| "        "        μή μονίμου καταστάσεως       | 21           |
| Θερμική άγωγιμότης τών υλικών                  | 27           |
| Θερμική αντίστασις                             | 17           |
| Θερμική άποδοτικότης έναλλακτών θερμότητος     | 87           |
| Θερμοδυναμικός βαθμός άποδόσεως                | 304          |
| Θερμοδυναμικαί ιδιότητες κεκορεσμένων υδρατμών | 328          |
| "                    "        πάγου/υδρατμών   | 290          |
| Θερμοφυσικαί ιδιότητες του άερος               | 332          |
| "                    "        διαφόρων ρευστών | 333          |
| "                    "        του ύδατος       | 331          |
| Ίσόθερμοι καμπύλαι στερεών                     | 244          |
| Κενού, συστήματα                               |              |
| Κινητική θερμικής καταστροφής μικροοργανισμών  | 132          |
| Κλίβανοι, θερμικοί                             | 111          |
| Kirchhoff, νόμος                               | 58           |
| Κρίσιμος περιεκτικότης ύγρασίας                | 248          |
| Krischer, έξίωσις                              | 256          |
| Κρυογενή ύγρά                                  | 127          |
| Λογαριθμική μέση διαφορά θερμοκρασίας          | 79           |
| Maxwell, έξίωσις                               | 28           |
| Μέλαν στρώμα                                   | 58           |
| Merkel, έξίωσις                                | 231          |
| Μήκος μονάδος μεταφοράς (LTU)                  | 86, 231, 261 |
| MSF, έξατμιστήρες                              | 201          |
| Ξηράνσεως, καμπύλαι                            | 247          |
| Ξηράνσεως στερεών, μηχανισμός                  | 254          |
| Ξηράνσεως, περίοδοι                            | 248          |
| Ξήρανσις δι'άφρισμού                           | 287          |
| "        διά καταψύξεως                        | 288          |

|  |     |
|--|-----|
| Εήρανσις, ήλιακή                                 | 294 |
| " κρυσταλλικών ένώσεων                           | 257 |
| " υπέρυθρος/διηλεκτρική                          | 293 |
| Εηραντήρες, άδιαβατικοί                          | 259 |
| Εηραντήρες άναδευομένου στρώματος                | 286 |
| " διασκορπισμοϋ (spray dryers)                   | 281 |
| " μετά κυλίνδρων                                 | 282 |
| " μετά μεταφορικής ταινίας                       | 264 |
| Εηραντήρες μετά περιστρεφομένων ραφιών           | 268 |
| Εηραντήρες μετά ραφιών                           | 262 |
| " μετά τυμπάνων (drum dryers)                    | 279 |
| " περιστροφικοί                                  | 265 |
| " ρευστοποιημένης κλίνης                         | 277 |
| " στιγμιαίας δράσεως (flash dryers)              | 270 |
| " τύπου διπλοϋ κώνου                             | 285 |
| " τύπου σήραγγος (tunnel dryers)                 | 263 |
| Όγκομετρικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας    | 261 |
| Οίκονομία άτμοϋ                                  | 183 |
| Wilson, μέθοδος                                  | 82  |
| Παράγοντες μορφής άκτινοβολίας                   | 60  |
| Πίπτοντα λεπτά στρώματα                          | 46  |
| Πρόγραμμα ύπολογισμοϋ έναλλακτών θερμότητας      | 117 |
| " " έξατμιστήρων                                 | 191 |
| Πυρίμαχα (refractory) τοιχώματα                  | 61  |
| Ρυθμός έναλλαγής θερμότητας                      | 75  |
| Sieder-Tate έξίσωσις                             | 44  |
| Stefan-Boltzmann, έξίσωσις                       | 60  |
| Συμπίεσις άτμών ψυκτικοϋ μέσου                   | 120 |
| Συμπύκνωσις άτμών                                | 47  |
| Συμπυκνωτήρες άτμών έξατμιστήρων                 | 197 |
| Συνδυασμός μεταφοράς καί άκτινοβολίας θερμότητας | 65  |
| Συντελεσταί διορθώσεως έναλλακτών θερμότητας     | 98  |



## Σελίς

|   |           |
|---|-----------|
| Ευντελεστής ικανότητας έκπομπής                   | 58        |
| Ευντελεστής λειτουργίας (cop) ψυκτικού συστήματος | 123       |
| Ευντελεσταί έκπομπής αερίων                       | 65        |
| Ευντελεσταί αποθέσεων                             | 83        |
| Ευντελεσταί μεταφοράς θερμότητας                  | 33,80,339 |
| "          "          "          έξατμιστήρων     | 183       |
| Ευντελεστής μεταφοράς μάζης                       | 230,249   |
| Σωλήνων (tubes), διαστάσεις                       | 96        |
| Σωλήνων (pipes), διαστάσεις                       | 335       |
| Σωλήνες θερμότητας                                | 114       |
| Τεφρόν σώμα                                       | 59        |
| Τριπλοϋν σημείον ύδατος                           | 288       |
| Charman-Eskog, εξίσωσις                           | 28        |
| *Υγράνσεως καί άφυγράνσεως, διεργασίαι            | 225       |
| *Υγρασία στερεών                                  | 243       |
| *Υγρασίας τοϋ άέρος, μέτρησις                     | 224       |
| *Υγρομετρία                                       | 216       |
| *Υλικά κατασκευής έναλλακτών θερμότητας           | 149       |
| Fanning, εξίσωσις                                 | 56        |
| Fick, εξίσωσις                                    | 254       |
| Fourier, εξίσωσις                                 | 16,22     |
| Φυσική κυκλοφορία                                 | 39        |
| Χρόνος παραμονής είς έξατμιστήρας                 | 176       |
| "          "          "          ξηραντήρας       | 267       |
| Ψύξεως, δεξαμεναί                                 | 237       |
| Ψύξις διά κενού                                   | 129       |
| Ψύξις καί κατάψυξις προϊόντων                     | 118       |
| Ψυκτικά μέσα, δευτερογενή                         | 126       |
| Ψυκτικοί πύργοι                                   | 230       |
| Ψυχομετρικός χάρτης                               | 222       |
| Ψυχρόμετρον                                       | 224       |