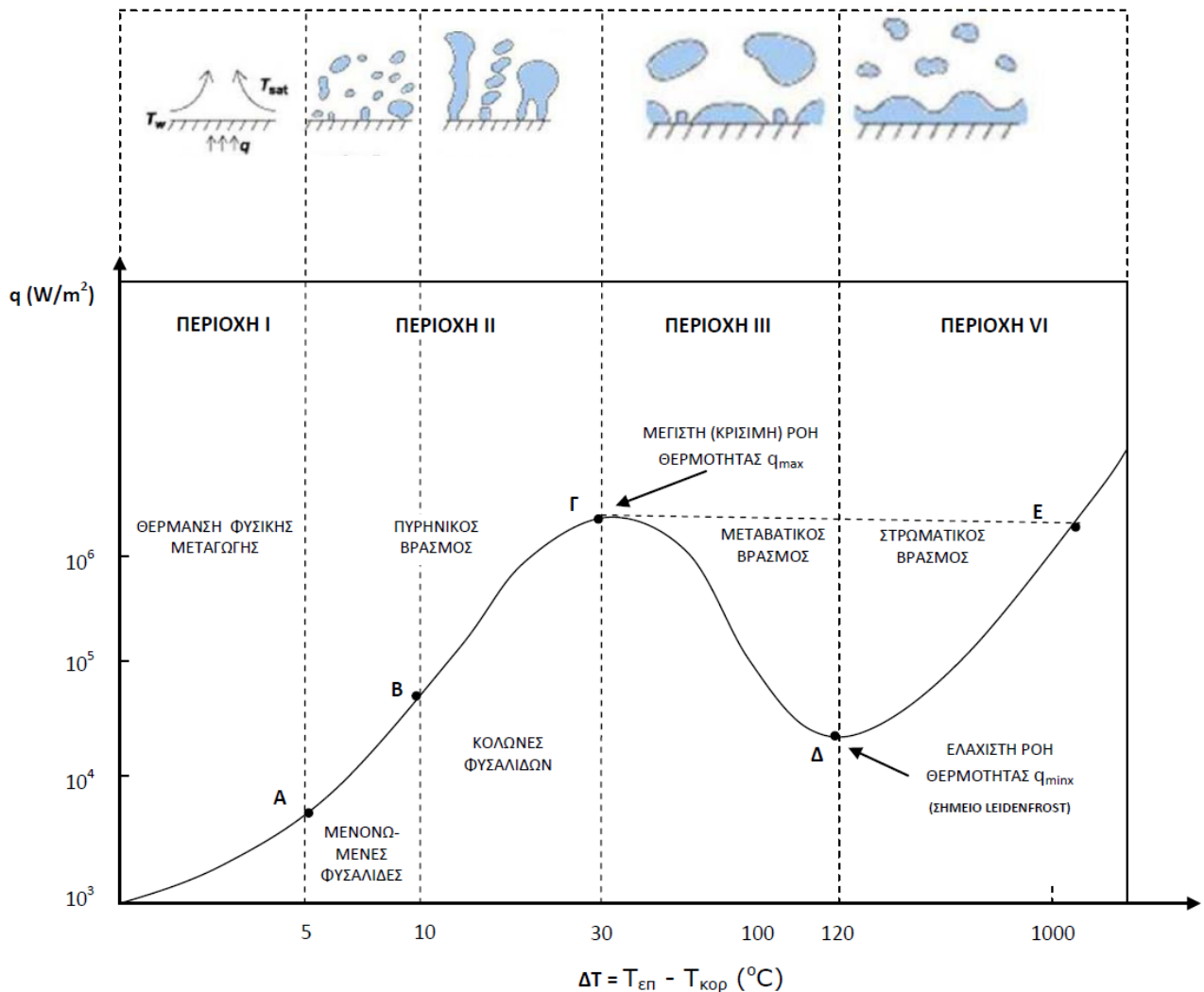


ΦΑΣΕΙΣ ΒΡΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο εναλλάκτης ψύξης ονομάζεται και εξατμιστής. Τούτο διότι στο εσωτερικό του λαμβάνει χώρα μετατροπή του ψυκτικού ρευστού, από υγρό σε αέριο (εξάτμιση) σε μια κατάλληλη πίεση, ώστε η αντίστοιχη θερμοκρασία κορεσμού να είναι τέτοια που να εξασφαλίζει την επιθυμητή θερμοκρασία στην παραγωγή (π.χ. ψυχρή αποθήκευση ή άλλη βιομηχανική διεργασία). Με άλλα λόγια, στο εσωτερικό του εναλλάκτη επικρατεί βρασμός ενός υγρού, που βρίσκεται σε επαφή με μια μεταλλική επιφάνεια, μέσω της οποίας ρέει θερμότητα. Τι σημαίνει όμως "βρασμός"; Πρόκειται για μια απλή - μονοσήμαντη διεργασία ή για μια σύνθετη διεργασία διαφόρων φάσεων, όπου η μεταβολή των φάσεων του βρασμού συνοδεύεται από μεταβολή του ρυθμού ροής θερμότητας από το μεταλλικό τοίχωμα του εναλλάκτη; Η παρούσα αναφορά έχει σκοπό την ανάλυση της διεργασίας του βρασμού και της μεταφοράς θερμότητας.

Ας παρακολουθήσουμε τη διεργασία βρασμού του νερού σε ένα δοχείο πάνω από μια θερμική πηγή. Πρακτικά, το νερό βρίσκεται συνεχώς υπό καθεστώς ατμοσφαιρικής πίεσης. Μόλις το δοχείο τοποθετηθεί επί της θερμικής πηγής, ο πυθμένας του ζεσταίνεται σε μια θερμοκρασία που είναι σίγουρα μεγαλύτερη της θερμοκρασίας του νερού και μάλιστα η διαφορά αυτή αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Αν η θερμοκρασία της (μεταλλικής) επιφάνειας του πυθμένα είναι $T_{\text{εν}}$ και η θερμοκρασία κορεσμού του νερού (υπό ατμοσφαιρική πίεση) $T_{\text{κορ}}$, συμβολίζουμε την (πάντα θετική) διαφορά $T_{\text{εν}} - T_{\text{κορ}}$ με ΔT . Η διαφορά αυτή ξεκινάει από το 0 (οπότε η μεταφορά θερμότητας προς το νερό είναι μηδενική) και προοδευτικά αυξάνεται, οπότε η μεταφορά θερμότητας προς το νερό μεταβάλλεται, άλλοτε με αυξανόμενο και άλλοτε με μειούμενο ρυθμό, όπως θα δούμε στα επόμενα. Μια καλή μέθοδος να παρακολουθήσουμε αυτό το συσχετισμό είναι η γραφική παράσταση που δείχνει τον συσχετισμό μεταξύ του συντελεστή ροής θερμότητας q (W/m^2) και του ΔT . Στο επόμενο σχήμα φαίνεται αυτός ο συσχετισμός, ο οποίος μας δείχνει και τα διάφορα στάδια του βρασμού. Το σύνολο της διεργασίας είναι γνωστό στη βιβλιογραφία σαν "pool boiling", ενώ οι υποδιεργασίες ονομάζονται "βρασμός φυσικής μεταγωγής" (natural convection boiling), "πυρηνικός βρασμός" (nucleate boiling), "μεταβατικός βρασμός" (transition boiling) και στρωματικός βρασμός (film boiling).



Σχήμα 1 : Καμπύλη βρασμού για νερό σε ατμοσφαιρική πίεση. Ροή θερμότητας q από μεταλλική επιφάνεια σαν συνάρτηση της υπερβάλλουσας θερμοκρασίας

$$\Delta T = T_{\epsilon\pi} - T_{\kappa\omicron\rho}$$

ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΦΥΣΙΚΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ

Στο στάδιο αυτό ουσιαστικά δεν έχουμε βρασμό (σχηματισμό φυσαλίδων), παρά μεταφορά των στρωμάτων που θερμαίνονται κοντά στη θερμαινόμενη επιφάνεια προς τα επάνω και των ψυχρών στρωμάτων προς τα κάτω, σε μια κλασσική μετάδοση θερμότητας δια μεταγωγής (convection). Το στάδιο αυτό διατηρείται εφόσον το νερό δεν φτάνει στη θερμοκρασία κορεσμού υπό ατμοσφαιρική πίεση (100° C) που πρακτικά σημαίνει ότι η διαφορά $\Delta T = T_{\epsilon\pi} - T_{\kappa\omicron\rho}$ παραμένει σε επίπεδα κάτω των 5 K.

ΠΥΡΗΝΙΚΟΣ ΒΡΑΣΜΟΣ - ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΕΣ ΦΥΣΑΛΙΔΕΣ (NUCLEAT BOILING I)

Στο στάδιο αυτό το νερό που ακουμπάει στη μεταλλική επιφάνεια φθάνει τη θερμοκρασία κορεσμού (100°C) και αρχίζει η εξάτμιση με τη μορφή μικρών φυσαλίδων που σχηματίζονται επί της μεταλλικής επιφάνειας. Οι φυσαλίδες προοδευτικά αποκολλώνται και ανεβαίνουν προς τα επάνω, κάποια στιγμή όμως συναντάνε στρώματα ψυχρότερου (των 100°C) νερού, με αποτέλεσμα να επαναυγροποιηθούν. Οι φυσαλίδες στο στάδιο αυτό δεν κατορθώνουν να φθάσουν στην ελεύθερη επιφάνεια. Το στάδιο αυτό διατηρείται όσο η ΔT παραμένει κάτω των 10 K. Εκείνο που αξίζει προσοχής και μας ενδιαφέρει στο μέγεθος του συντελεστή θερμικής μεταφοράς εσωτερική πλευράς $U_{ΕΣ}$ ενός εξατμιστή ψύξης, είναι ότι οι φυσαλίδες δημιουργούν μια μορφή ανάδευσης στο υγρό που γειτονεύει στα εσωτερικά τοιχώματα και έτσι αυξάνεται η τιμή του συντελεστή θερμικής μεταφοράς.

ΠΥΡΗΝΙΚΟΣ ΒΡΑΣΜΟΣ - ΚΟΛΩΝΕΣ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ (NUCLEAT BOILING II)

Οι φυσαλίδες σχηματίζονται με εντατικότερο ρυθμό και κινούνται ταχύτερα προς τα επάνω. Κάποιες φυσαλίδες μάλιστα ενώνονται, σχηματίζοντας κολώνες. Οι φυσαλίδες φθάνουν μέχρι την επιφάνεια ελευθερώνοντας τον ατμό στην ατμόσφαιρα. Η ανάδευση του υγρού είναι τώρα αρκετά έντονη και προοδευτικά αυξάνεται η ροή θερμότητας (heat flux) μέχρι να φτάσει μια μέγιστη τιμή, όπου και περατώνεται το στάδιο του πυρηνικού βρασμού. Στο σημείο αυτό η τιμή ΔT είναι της τάξης των 30 K. Στο στάδιο αυτό υπάρχει ακόμα μεγάλο ποσοστό μεταλλικής επιφάνειας που βρίσκεται σε επαφή με υγρό, ενώ το τελευταίο υφίσταται έντονη ανάδευση από τις "κινητικές" φυσαλίδες. Όλα αυτά οδηγούν σε πολύ καλή βελτίωση (αύξηση τιμής) του συντελεστή θερμικής μεταφοράς εσωτερικής πλευράς $U_{ΕΣ}$.

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟΣ ΒΡΑΣΜΟΣ (TRANSITION BOILING)

Στο στάδιο αυτό η ταχύτητα σχηματισμού φυσαλίδων επί της μεταλλικής επιφάνειας ξεπερνάει την ταχύτητα αποκόλλησής τους από αυτήν. Το αποτέλεσμα είναι κάποιες φυσαλίδες να συνενώνονται, σχηματίζοντας "μαξιλάρια" αερίου προσκολλημένα στην επιφάνεια. Τα μαξιλάρια αυτά δρουν σαν μονωτικό. Όταν τα "μαξιλάρια" είναι πολλά, η ροή θερμότητας μειώνεται. Τα μαξιλάρια όμως ξεκολλάνε και ελευθερώνουν της επιφάνεια, σε κατευθείαν επαφή με το υγρό. Στις φάσεις αυτές η ροή θερμότητας αυξάνεται. Εν τούτοις, σε αυτό το στάδιο η μέση τιμή της ροής θερμότητας μειώνεται όσο αυξάνεται η ΔT , μέχρι να φτάσει μια κατώτατη τιμή, που είναι γνωστή σαν σημείο Leidenfrost¹. Η ελάχιστη τιμή επιτυγχάνεται όταν

¹ Το φαινόμενο Leidenfrost επέρχεται όταν μια υγρή μάζα (π.χ. σταγόνα νερού) πέσει πάνω σε μια πολύ θερμή επιφάνεια και αμέσως σχηματιστεί στρώμα αερίου μεταξύ υγρού και επιφάνειας. Η υγρή μάζα τότε ολισθαίνει ελεύθερα, ενώ στιγμιαία σχεδόν διακόπτεται η ροή θερμότητας προς την υγρή μάζα, λόγω της μονωτικής

είναι πλέον δυνατόν να παραμένει προσκολλημένο ένα παρατεταμένο "μαξιλάρι" αερίου επί της συνολικής σχεδόν επιφάνειας. Το στάδιο αυτό ονομάζεται μεταβατικό ακριβώς γιατί αποτελείται από ένα μίγμα διεργασιών πυρηνικού βρασμού (προηγούμενο στάδιο) και στρωματικού βρασμού (επόμενο στάδιο).

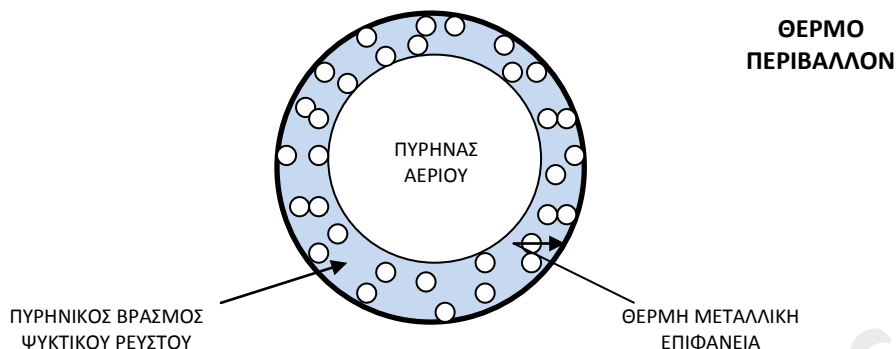
ΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΣ ΒΡΑΣΜΟΣ (FILM BOILING)

Στο στάδιο αυτό υπάρχει πλέον μόνιμα, μεταξύ υγρού και μεταλλικής επιφάνειας, ένα στρώμα αέρα (film), που όπως αναφέραμε δρα σαν μονωτικό. Υπάρχει όμως μια σημαντική διαφορά: Λόγω πολύ ψηλής θερμοκρασίας της επιφάνειας ($\Delta T > 120 \text{ K}$), υπάρχει πλέον κατευθείαν ακτινοβολία θερμότητας από την επιφάνεια στο υγρό. Ο ροή θερμότητας αρχίζει πάλι να αυξάνεται. Αν η επιφάνεια αντέξει (και δεν λιώσει), η ροή θερμότητας μπορεί να ανέβει και παραπάνω από τη μέγιστη τιμή του πυρηνικού βρασμού.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η παραπάνω ανάλυση αφορά το νερό σε ατμοσφαιρική πίεση. Όσον αφορά τους εξατμιστές ψύξης, ο προβληματισμός είναι ανάλογος και η ανάλυση ρίχνει φως στη κατεύθυνση που πρέπει να έχουν οι προσπάθειες μεγιστοποίησης της απόδοσης του εναλλάκτη: Να αποκαθίσταται μια τέτοια μορφολογία ροής, όπου υπάρχει το στάδιο του πυρηνικού βρασμού όσο γίνεται πιο κοντά στο σημείο της μέγιστης ροής θερμότητας (σημείο Γ στο σχήμα). Το ζητούμενο δηλαδή είναι, να είναι καλυμμένη η εσωτερική επιφάνεια με υγρό, όπου λαμβάνει χώρα πυρηνικός βρασμός μεταγενέστερου σταδίου (ΒΓ στο σχήμα). Τούτο επιτυγχάνεται με την δακτυλιοειδή ροή (annular flow), όπου ένας δακτύλιος υγρού (με πυρηνικό βρασμό) καλύπτει όλη την εσωτερική επιφάνεια του εναλλάκτη, ενώ στον πυρήνα υπάρχει αέριο, το οποίο εξομοιώνει την ελεύθερη επιφάνεια του νερού στο σχήμα 1. Με πιο απλά λόγια, στο καθεστώς του πυρηνικού βρασμού επιτυγχάνουμε σχεδόν καθολική κάλυψη του εσωτερικού τοιχώματος με υγρό (ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς του υγρού είναι πολύ μεγαλύτερος από του αερίου), ενώ οι κινούμενες μικροφουσαλίδες αναδεύουν αυτό το υγρό, βελτιώνοντας έτσι τη θερμική μεταφορά δια μεταγωγής (convection). Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η δακτυλιοειδής ροή.

παρεμβολής του αερίου στρώματος. Εφαρμογή του φαινομένου είναι διάφορα "μαγικά" τρικ, όπως ο εμβαπτισμός (βρεγμένων) χεριών σε υγρό μολύβι και οι φλόγες από το στόμα με υγρό άζωτο.



Σχήμα 2 : Δακτυλιοειδής ροή σε εξατμιστικό εναλλάκτη με πυρηνικό βρασμό του ψυκτικού ρευστού και μεγιστοποίηση του εσωτερικού συντελεστή θερμικής μεταφοράς U_{ES} .

Φυσικά, οι συνθήκες που επιτυγχάνεται η δακτυλιοειδής ροή εξαρτώνται από τη γεωμετρία του εναλλάκτη, τις εξωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας και το είδος του ψυκτικού ρευστού. Έτσι π.χ. το ρευστό πρέπει να έχει μια ικανή ταχύτητα (παροχή) και αρκούντως χαμηλή πίεση (επίτευξη μεταγενέστερου πυρηνικού βρασμού), ώστε να επιτυγχάνεται η συνθήκη αυτή.

Να σημειωθεί ότι στους εξατμιστές ψύξης δεν μας ενδιαφέρει ο στρωματικός βρασμός, ακόμα και αν οδηγούσε σε μεγαλύτερη ροή θερμότητας. Ο λόγος είναι ότι η πολύ μεγάλη διαφορά θερμοκρασιών ΔT θα ήταν άκρως αντισυμβατική (πολύ χαμηλή πίεση αναρρόφησης).