

$$h_p = h_a \left( \frac{p}{p_a} \right)^{0.4} \quad (\text{B}\Sigma.14)$$

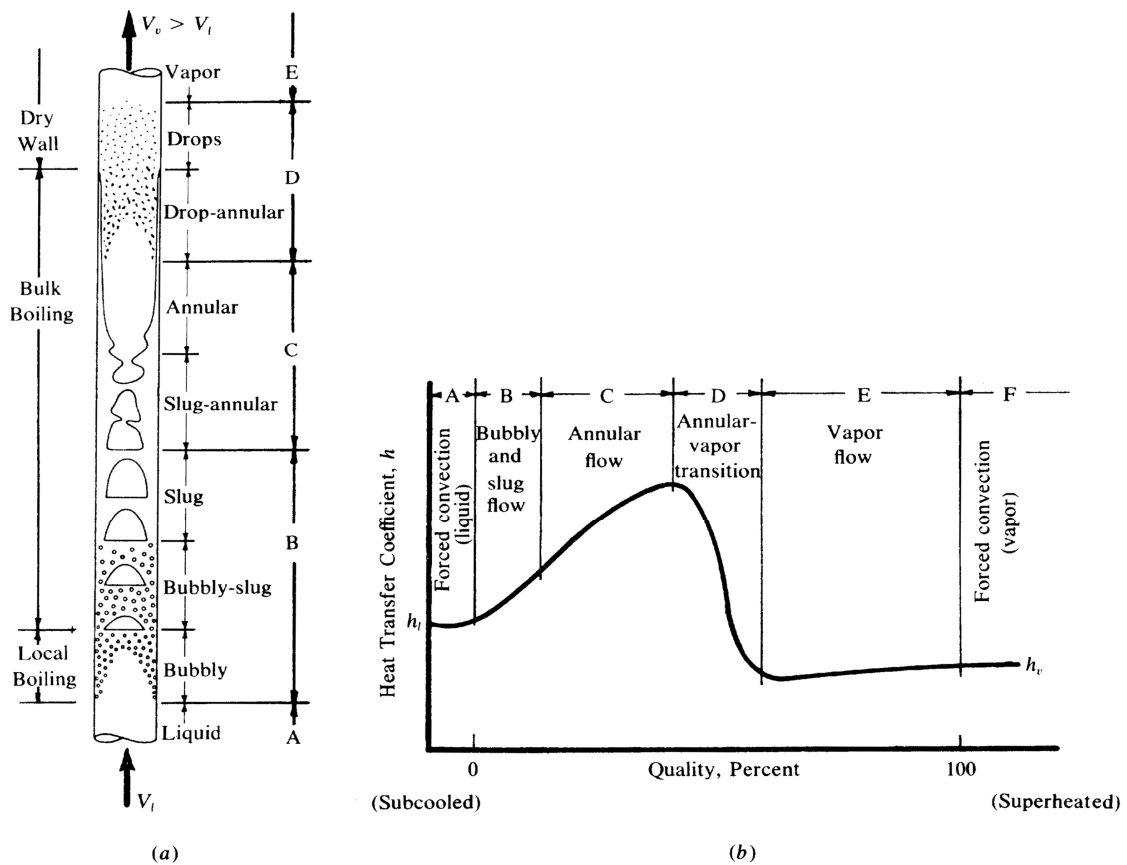
όπου  $p_a$  είναι η κανονική ατμοσφαιρική πίεση και ο συντελεστής  $h_a$  δίνεται από τον πίνακα ΒΣ-2.

## ΒΣ.4 Βρασμός με Ροή

### ΒΣ.4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

*Βρασμό με ροή* (flow boiling) έχουμε όταν ένα υγρό ρέει μέσα από έναν σωλήνα ή πάνω από μια επιφάνεια που διατηρείται σε υψηλότερη θερμοκρασία από την θερμοκρασία κορεσμού του υγρού. Η ροή αποτελείται από μίγμα δυο φάσεων, του υγρού και του ατμού του.

Το σχήμα ΒΣ-2α απεικονίζει έναν κατακόρυφο αυλό εξατμιστή και το σχήμα ΒΣ-2β τις επιμέρους περιοχές βρασμού εντοπισμένες ως προς την ποιότητα του μίγματος υγρού/ ατμού. Υπόψυκτο υγρό εισέρχεται στον εξατμιστή περνώντας πάνω από το ζεστό τοίχωμα, όπου λαμβάνει χώρα *τοπικός βρασμός πυρήνων*. Όταν υπάρχει ποσοστό περιεχόμενου ατμού μικρότερο του 10%, έχουμε *ροή με φυσαλίδες* (bubbly). Με την αύξηση της αναταραχής των φυσαλίδων παρουσιάζεται μια αύξηση στον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Σε μεγαλύτερες τιμές ποιότητας του μίγματος (περισσότερος ατμός), η ροή *αλλάζει* και γίνεται *δακτυλιοειδής* (annular), με ένα λεπτό υμένιο υγρού στο τοίχωμα και πυρήνα από ατμό.



Σχήμα ΒΣ-2. (α) Κατακόρυφος αυλός εξατμιστή (β) Περιοχές βρασμού εντοπισμένες ως προς την ποιότητα του μίγματος υγρού/ ατμού (0%: μόνο υγρό, 100%: μόνο ατμός)

Η ταχύτητα του ατμού είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του υγρού. Η θερμότητα μεταφέρεται διαμέσου του υγρού υμένα και στην διεπιφάνεια υγρού/ ατμού λαμβάνει χώρα εξάτμιση, αν και μερικές φυσαλίδες εξακολουθούν να δημιουργούνται στο στερεό τοίχωμα.

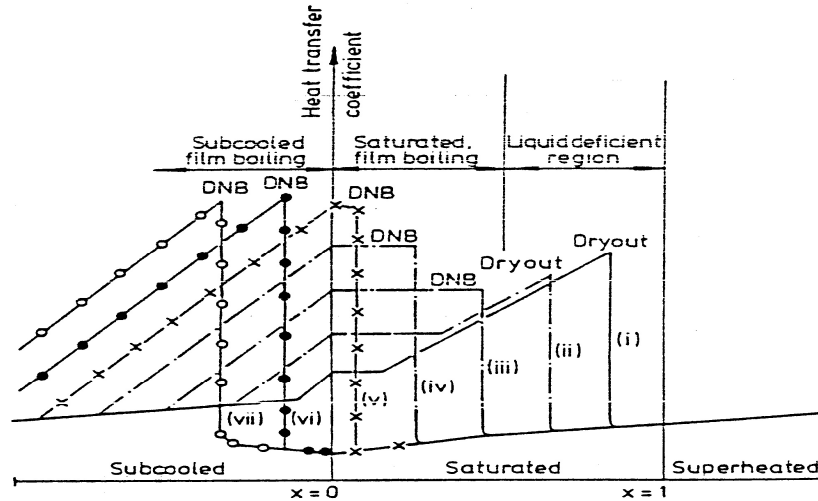
Στο στάδιο μετάβασης από την δακτυλιοειδή ροή στην *ροή ατμού με διεσπαρμένα σταγονίδια* (mist ή drop flow), ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μειώνεται απότομα. Σε μερικές περιπτώσεις εμφανίζεται φαινόμενο burnout, εξαιτίας της αντικατάστασης στο τοίχωμα του υγρού υμένα, που έχει σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα, από ατμό με χαμηλή θερμοαγωγιμότητα. Η ροή του διασπαστικού μίγματος υγρού/ ατμού συνεχίζεται, έως ότου η ποιότητα του μίγματος φτάσει το 100%. Από το σημείο εκείνο και έπειτα ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας δύναται να υπολογιστεί από εξισώσεις που περιγράφουν φαινόμενα εξαναγκασμένης συναγωγής χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του ατμού.

Ο υπόψυκτος βρασμός και η ολική εξάτμιση δεν αντιστοιχούν σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας, καθώς οι δυο φάσεις συνυπάρχουν χωρίς να είναι κορεσμένες. Η θερμοκρασία του τοιχώματος του αυλού είναι μονίμως υψηλότερη της θερμοκρασίας του υγρού. Η διαφορά αυτή μειώνεται αργά με την πρόοδο του βρασμού και οφείλεται στην ανάλογη αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύεται ως εξής: στο μεγαλύτερο τμήμα του αυλού ο βρασμός λαμβάνει χώρα με τον μηχανισμό της εξάτμισης. Με την αύξηση της ποιότητας του μίγματος κατά μήκος του αυλού ελαττώνεται το πάχος του υγρού υμένα λόγω μείωσης της παροχής του υγρού, αλλά και λόγω της εντονότερης διάτμησης από τον ατμό. Επειδή η κύρια αντίσταση προβάλλεται από τον υμένα του υγρού, η ανωτέρω μεταβολή έχει ως συνέπεια την μείωση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας.

Με την πλήρη εξάτμιση του υγρού υμένα (dryout) παρατηρείται μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του τοιχώματος. Το φαινόμενο αυτό αντιστοιχεί στον κρίσιμο βρασμό που εμφανίζεται κατά την διάρκεια του στάσιμου βρασμού, με μόνη διαφορά το γεγονός ότι τώρα είναι περισσότερο πολύπλοκο. Για μικρές τιμές θερμορροής ο βρασμός εξελίσσεται όπως περιγράφηκε προηγουμένως και η κρίση βρασμού σχετίζεται με την ξήρανση του τοιχώματος στα τελευταία στάδια του βρασμού εξάτμισης. Αντίθετα, για μεγάλη ένταση θερμορροής, ο βρασμός πυρήνων μεταπίπτει σε βρασμό υμένα και συχνά το τοίχωμα καταστρέφεται (burnout). Στην περίπτωση αυτή, η κρίση βρασμού συχνά αναφέρεται ως απόκλιση από τον βρασμό πυρήνων (DNB).

Στο σχήμα ΒΣ-3 βλέπουμε πώς μεταβάλλεται ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας συναρτήσει της ποιότητας του μίγματος για διαφορετικές εντάσεις θερμορροής. Η κρίση βρασμού, που συνοδεύεται από απότομη μείωση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, συμβαίνει για υψηλή θερμορροή σε μικρές τιμές ποιότητας (καμπύλες  $iv$  και  $v$  του σχήματος ΒΣ-3) ή ακόμη και προτού το κυρίως μίγμα φτάσει σε συνθήκες κορεσμού (καμπύλες  $vi$  και  $vii$  του σχήματος ΒΣ-3). Στην μικρότερη ένταση θερμορροής (καμπύλη  $i$  του σχήματος ΒΣ-3) παρουσιάζονται οι εξής διακριτές περιοχές:

1. Η περιοχή της μονοφασικής συναγωγής, όπου ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι σχεδόν σταθερός.
2. Η περιοχή υπόψυκτου βρασμού, στην οποία παρατηρείται αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, καθώς η κύρια μάζα του ρευστού προσεγγίζει την θερμοκρασία κορεσμού.
3. Η περιοχή του κορεσμένου βρασμού πυρήνων, καθ' όλη την διάρκεια της οποίας ο συντελεστής μετάδοσης παραμένει και πάλι σταθερός.
4. Η περιοχή του βρασμού εξάτμισης, η οποία χαρακτηρίζεται από αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας με την σταδιακή μείωση του πάχους του υγρού υμένα.
5. Η περιοχή στην οποία εκτυλίσσεται βρασμός μετά την ξήρανση του υγρού υμένα στο τοίχωμα (post-dryout), με τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας να είναι πολύ χαμηλότερος και να αντιστοιχεί στην τιμή του μονοφασικού συντελεστή για τον ατμό.



Σχήμα ΒΣ-3. Μεταβολή του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας ως προς την ποιότητα του μίγματος για διαφορετικές εντάσεις θερμορροής

Όπως και στην περίπτωση του στάσιμου βρασμού, τα βασικά ερωτήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από τεχνικό ενδιαφέρον σχετίζονται με την πρόβλεψη της υπερθέρμανσης του τοιχώματος που προκαλεί έναρξη του βρασμού πυρήνων, την πρόβλεψη της θερμορροής ως συνάρτηση της υπερθέρμανσης και την πρόβλεψη των συνθηκών που οδηγούν σε κρίση βρασμού.

Μια απλή προσέγγιση για τον προσδιορισμό της μετάδοσης θερμότητας κατά τον βρασμό με ροή προκύπτει αν συνυπολογιστεί η επίδραση του φαινομένου της συναγωγής (φυσικής ή/ και εξαναγκασμένης) χωρίς βρασμό και η επίδραση του στάσιμου βρασμού,

$$\frac{q}{A} = \frac{q}{A}_{conv} + \frac{q}{A}_{bo} \quad (\text{B}\Sigma.15)$$

όπου  $(q/A)_{conv} = \bar{h}(T_s - T_b)$ ,  $T_b$ : η (bulk) θερμοκρασία του και  $\bar{h}$ : ο μέσος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας για πλήρως ανεπτυγμένη ροή. Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω στάσιμου βρασμού παρέχεται από τις εξισώσεις της προηγούμενης παραγράφου.

#### ΒΣ.4.2 ΒΡΑΣΜΟΣ ΠΥΡΗΝΩΝ

Το σχήμα ΒΣ-4α απεικονίζει την καμπύλη στάσιμου βρασμού για αντίσταση βυθισμένη σε περιέκτη, ενώ το σχήμα ΒΣ-4β παρουσιάζει την καμπύλη βρασμού που προήλθε από το σχήμα ΒΣ-4α, συμπεριλαμβανομένης και της επίδρασης των φαινομένων συναγωγής στις περιοχές του βρασμού πυρήνων. Η καμπύλη βρασμού με πλήρως ανεπτυγμένη ροή τείνει να γίνει ασυμπτωτική ως προς την προβολή της καμπύλης στάσιμου βρασμού. Η επίδραση των φαινομένων εξαναγκασμένης συναγωγής προσδιορίζεται από κατάλληλες εξισώσεις για ροή κάθετη σε έναν μονό κύλινδρο, όπως φαίνεται στο σχήμα ΒΣ-4β.

Στην περιοχή του πλήρως ανεπτυγμένου βρασμού μόνο ένα μικρό ποσό θερμότητας μεταδίδεται με εξαναγκασμένη μεταφορά. Σε αυτήν την περιοχή η πυκνότητα θερμορροής για υπόψυκτο νερό μέσα σε σωλήνες δίνεται από την εξίσωση (ΒΣ.16), στην οποία τα διάφορα μεγέθη εκφράζονται βάσει του βρετανικού συστήματος μονάδων,

$$\frac{q}{A} = (0.074)(\Delta T)^{3.86} \quad (30 < p < 90 \text{ psia}) \quad (\text{B}\Sigma.16)$$

ή για υψηλότερες πιέσεις από την τροποποιημένη εξίσωση:

$$\frac{q}{A} = \frac{p^{4/3}}{495} (\Delta T)^3 \quad (100 < p < 2000 \text{ psia}) \quad (\text{B}\Sigma.17)$$

#### BΣ.4.2.1 Σημείο burnout

Οι Lowdermilk, Lanzo & Siegel ανέπτυξαν μια απλουστευμένη συσχέτιση για το σημείο της μέγιστης θερμορροής στην περίπτωση νερού που ρέει μέσα σε σωλήνα διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$ . Τα αποτελέσματά τους, που ισχύουν για το πλήρες εύρος ποιοτήτων μίγματος και για θερμοκρασίες υπόψυξης εισόδου από  $0^0$  ως  $140^0\text{F}$ , έχουν ως εξής:

$$\text{Χαμηλή ταχύτητα- Υψηλή ποιότητα: } \left. \frac{q}{A} \right|_{\max} = \frac{270(\rho V)^{0.85}}{D^{0.2}(L/D)^{0.85}} \quad \text{όταν} \quad \left( 1 < \frac{\rho V}{(L/D)^2} < 150 \right)$$

& (BΣ.18)

$$\text{Υψηλή ταχύτητα- Χαμηλή ποιότητα: } \left. \frac{q}{A} \right|_{\max} = \frac{1400(\rho V)^{0.50}}{D^{0.2}(L/D)^{0.15}} \quad \text{όταν} \quad \left( 150 < \frac{\rho V}{(L/D)^2} < 10000 \right)$$

όπου η ποσότητα  $q/A$  είναι εκφρασμένη σε  $\text{Btu/hr}\cdot\text{ft}^2$ , το  $\rho$  σε  $\text{lbm/ft}^3$ , ο όγκος  $V$  σε  $\text{fps}$ , το μήκος  $L$  του σωλήνα σε  $\text{in}$  και η διάμετρος αυτού  $D$  επίσης σε  $\text{in}$ . Οι παράμετροι στην σχέση (BΣ.18) περιορίζονται στα εύρη που παρατίθενται στην συνέχεια:

$$\begin{aligned} 14.7 < p < 100 \text{ psia} & \quad 25 < L/D < 250 \\ 0.1 < V < 98 \text{ fps} & \quad 0.051 < D < 0.188 \text{ in} \end{aligned}$$

#### BΣ.4.3 ΒΡΑΣΜΟΣ ΥΜΕΝΑ

Για εξαναγκασμένη συναγωγή σε υγρό που ρέει κάθετα ως προς οριζόντιους σωλήνες, οι εξισώσεις (BΣ.5), (BΣ.6) και (BΣ.7) μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν ικανοποιείται η συνθήκη που εκφράζεται μαθηματικά με την παρακείμενη ανισότητα:  $V_\infty < \sqrt{gD}$ . Αν ισχύει  $V_\infty > 2\sqrt{gD}$ , τότε η εξίσωση (BΣ.6) αντικαθίσταται από την επόμενη σχέση:

$$h_c = (2.7) \left[ \frac{V_\infty k_{vf} \rho_{vf} (h_{fg} + 0.4c_{pf} \Delta T)}{D \Delta T} \right]^{1/2} \quad (\text{B}\Sigma.19)$$

Η αξιόπιστη εφαρμογή, καθώς και η ισχύς των σχέσεων αυτών έχουν επιβεβαιωθεί στην περίπτωση της στρωτής ροής για το βενζόλιο, τον τετραχλωράνθρακα, την αιθανόλη και το κανονικό επτάνιο, για διαμέτρους σωλήνων από  $0.387$  ως  $0.637 \text{ in}$  και ταχύτητες ροής από  $0$  ως  $14 \text{ fps}$ .