

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ
ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΒΡΑΣΜΟΥ**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΤΣΙΟΛΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΔΡΙΤΣΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΒΟΛΟΣ 2014



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 12854/1
Ημερ. Εισ.: 05-09-2014
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2014
ΤΣΙ

© 2014 Τσιολάκης Δημήτριος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) **Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος**
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής **Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου**
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής **Δρ. Δημήτριος Παντελής**
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Νικόλαο Ανδρίτσο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Βασίλειο Μποντόζογλου και Επίκουρο Καθηγητή κ. Δημήτριο Παντελή για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες στον ηλεκτρονικό κ. Δαφερέρα Αναστάσιο του τμήματος μας για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την διαδικασία των πειραμάτων. Ευχαριστώ τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξή τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Αδάμο και Σταυρούλα Τσιολάκη για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου και στον πατέρα μου.

Δημήτριος Τσιολάκης

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΒΡΑΣΜΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΤΣΙΟΛΑΚΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2014

Επιβλέπων Καθηγητής: **Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος, Καθηγητής**

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τον πειραματικό υπολογισμό της καμπύλης βρασμού. Ο πειραματικός υπολογισμός της καμπύλης βρασμού πραγματοποιείται με τη χρήση της εργαστηριακής συσκευής Cussons P5697 Heat Transfer Apparatus, χρησιμοποιώντας σύρματα (Nichrome Type C με 60% Ni – 16% Cr – 24% Fe) Νικελίου – Χρωμίου τύπου C.

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων στρέφουμε την προσοχή μας στους φυσικούς μηχανισμούς που περιλαμβάνει ο βρασμός σε δοχείο, δηλαδή, ο βρασμός των στάσιμων ρευστών. Κατά το βρασμό υγρού σε δοχείο, το ρευστό δεν εξαναγκάζεται να ρέει με κάποια βοήθεια, όπως μια αντλία, ενώ η κάθε κίνηση του ρευστού οφείλεται σε ρεύματα φυσικής συναγωγής και στην κίνηση των φυσαλίδων κάτω από την επίδραση της άνωσης.

Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι ο σχηματισμός φυσαλίδων αυξάνεται καθώς αυξάνεται όλο και περισσότερο η θερμοκρασία του νερού, ενώ παρατηρούνται κύματα φυσαλίδων υδρατμού που ανεβαίνουν στην επάνω επιφάνεια όταν η θερμοκρασία του νερού φτάνει την θερμοκρασία κορεσμού (100°C σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση). Αυτός ο πλήρης βρασμός αποτελεί τον βρασμό σε κατάσταση κορεσμού.

Τέλος, ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει την καμπύλη βρασμού που υπολογίστηκε από την πειραματική διαδικασία και φωτογραφικό υλικό των φάσεων του βρασμού. Επίσης, εκτός από τους υπολογισμούς είναι αναγκαίο να αναφερθούν τα σφάλματα που διέπουν ένα εργαστηριακό πείραμα.

EXPERIMENTAL CALCULATION OF THE BOILING CURVE

DIMITRIOS TSIOLAKIS

University of Thessaly, Department of Mechanical Engineering, 2014

Supervisor: **Dr. NIKOLAOS ANDRITSOS**

ABSTRACT

The aim of the following thesis analyzes the experimental calculation of the boiling curve. The experimental calculation of the boiling curve is performed by the usage of the laboratory Heat Transfer Apparatus Cussons P5697, using wires (Nichrome Type C with 60% Ni – 16% Cr – 24% Fe).

During the experiments turn our attention to the naturally mechanisms involved in the stationary boiling, the boiling of stationary fluids. During the boiling the fluid is not forced to flow an assistance, such as a pump, while every movement of the fluid is occurred due to natural convection flows and to bubbles movement under the effect of buoyancy.

Generally is observed by the experiments that bubble formation increases as more and more the water temperature, also there are waves of steam bubbles which moving on the top when the temperature reaches the saturation temperatures. Definitely this boiling is boiling at saturation.

Finally, the reader can observe the boiling curve calculated from the experimental procedure and photographic resource of phases of the boiling. Also, apart from the calculations is necessary to report the errors appeared in a laboratory experiment.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Μετάδοση θερμότητας με βρασμό.....	1
1.2	Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	7
1.3	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	7
1.4	Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας.....	8
Κεφάλαιο 2	Βρασμός σε δοχείο.....	9
2.1	Εξάρτηση βρασμού από υπερθέρμανση – Πείραμα Nukiyama.....	10
2.2	Καταστάσεις βρασμού και καμπύλη βρασμού.....	12
2.2.1	Φυσική συναγωγή κατά τον βρασμό.....	14
2.2.2	Βρασμός με πυρηνογένεση.....	15
2.2.3	Μεταβατικός βρασμός.....	17
2.2.4	Βρασμός υμένα.....	18
2.3	Σχέσεις μεταφοράς θερμότητας σε βρασμό υγρού σε δοχείο.....	22
2.3.1	Σχέσεις φυσικής συναγωγής.....	22
2.3.2	Σχέσεις βρασμού με πυρηνογένεση.....	24
2.3.3	Μέγιστη ή κρίσιμη θερμοροή κατά τον στάσιμο βρασμό.....	26
2.3.4	Ελάχιστη ροή θερμότητας.....	30
2.3.5	Σχέσεις βρασμού με υμένα.....	31
2.4	Παραμετρικές επιδράσεις βρασμού σε δοχείο.....	33
2.5	Ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας κατά το βρασμό σε δοχείο.....	34
Κεφάλαιο 3	Μηχανισμός πυρηνογένεσης.....	36
3.1	Μηχανισμός της πυρηνογένεσης.....	36
3.2	Ταξινόμηση κατά μέγεθος των ενεργών θέσεων σχηματισμού πυρήνων.....	38
3.3	Δημιουργία πυρήνων από το παγιδευμένο αέριο ή ατμό σε κοιλότητες.....	40
3.4	Ανάπτυξη φυσαλίδων κοντά σε θερμαινόμενες επιφάνειες.....	51
3.5	Περιοχή των απομονωμένων φυσαλίδων.....	54

3.6	Χαρακτηριστικά αναχώρηση μιας φουσαλίδας	57
Κεφάλαιο 4 Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus		60
4.1	Περιγραφή και μέθοδος λειτουργίας	61
4.2	Οδηγίες λειτουργίας	64
4.3	Μέτρηση της θερμοκρασίας του σύρματος.....	65
4.4	Διαδικασία βαθμονόμησης.....	65
4.5	Μέτρηση της επιφανειακής ισχύς του δείγματος.....	66
4.6	Μετάδοση θερμότητας με βρασμό	67
4.7	Λειτουργία μαγνητικού αναδευτήρα.....	67
4.8	Τυπικά αποτελέσματα	68
Κεφάλαιο 5 Μετρήσεις Πειραματικού μέρους		69
5.1	Μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης με τη θερμοκρασία.....	69
5.2	Χρήση δειγμάτων (σύρματα) τις πειραματικής διαδικασίας.....	70
5.3	Πειραματική διαδικασία με σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm.	71
5.4	Πειραματική διαδικασία με σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm.	75
5.5	Πειραματική διαδικασία με σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.	79
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα Πειραματικού μέρους		84
6.1	Συμπεράσματα από της μετρήσεις της πειραματικής διαδικασίας.	84
6.2	Καμπύλες βρασμού της πειραματικής διαδικασίας.	91
6.3	Σφάλματα κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων	93
Βιβλιογραφία.....		96
Ιστοσελίδες - Paper		99
Παράρτημα		100
Παράρτημα Α – Εργαστηριακή άσκηση		101

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Τιμές συντελεστή C_{sf} και του εκθέτη n για διάφορους συνδυασμούς ρευστού – επιφάνειας	6
Πίνακας 2: Τυπικές τιμές συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.....	17
Πίνακας 3: Τιμές επιφανειακής τάσης της διεπιφάνειας υγρού – υδρατμού για το νερό.....	26
Πίνακας 4: Τιμές συντελεστή C_{cr} για χρήση της εξίσωσης για τη μέγιστη ροή θερμότητα...	27
Πίνακας 5: Πίνακας συρμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία...	71
Πίνακας 6: Πίνακας θερμοκρασίας και ισορροπίας της γέφυρας Wheatstone (Balance) του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm.....	71
Πίνακας 7: Πίνακες συνολικών αποτελεσμάτων σύρματος διαμέτρου 0,33 mm.....	73
Πίνακας 8: Πίνακας θερμοκρασίας και ισορροπίας της γέφυρας Wheatstone (Balance) του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm.....	76
Πίνακας 9: Πίνακες συνολικών αποτελεσμάτων σύρματος διαμέτρου 0,44 mm.....	77
Πίνακας 10: Πίνακας θερμοκρασίας και ισορροπίας της γέφυρας Wheatstone (Balance) του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.....	80
Πίνακας 11: Πίνακες συνολικών αποτελεσμάτων σύρματος διαμέτρου 0,52 mm.....	81
Πίνακας 12: Πίνακες συνολικών αποτελεσμάτων των δειγμάτων για ένταση ρεύματος στο κρίσιμο σημείο και το σημείο τήξης.....	92
Πίνακας 13: Πίνακας σφαλμάτων του πειράματος για δείγματα διαμέτρου 0,33mm και 0,44mm.....	94
Πίνακας 14: Πίνακας σφαλμάτων του πειράματος για δείγματα διαμέτρου 0,52mm.....	95

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Ο βρασμός που πραγματοποιείται όταν ένα υγρό φέρεται σε επαφή με μια επιφάνεια σε θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού του υγρού (Πηγή: [3]).....	2
Σχήμα 2: Μεταβολή της θερμοκρασίας σε νερό που βράζει πάνω σε οριζόντια επιφάνεια θερμότητας (Πηγή: [4]).....	3
Σχήμα 3: Κατανομή της θερμοκρασίας κατά τον βρασμό και εμφάνιση των φυσαλίδων μέσα στο υγρό(Πηγή: [2]).....	9
Σχήμα 4: Η διάταξη Nukiyama για την παρατήρηση της καμπύλης βρασμού ενός υγρού με έλεγχο της ροής ισχύος (Πηγή: [2]).....	11
Σχήμα 5: Καμπύλη βρασμού Nukiyama για κορεσμένο νερό σε ατμοσφαιρική πίεση (Πηγή: [2]).....	11
Σχήμα 6a: Οι διαφορετικές καταστάσεις βρασμού σε δοχείο (Πηγή: [2]).....	13
Σχήμα 6b: Οι διαφορετικές καταστάσεις βρασμού σε δοχείο (Πηγή: [39]).....	13
Σχήμα 6c: Οι διαφορετικές καταστάσεις βρασμού σε δοχείο (Πηγή: [9]).....	14
Σχήμα 7: Φυσική συναγωγή κατά ο βρασμό (Πηγή: [3]).....	14
Σχήμα 8a: Βρασμός με πυρηνογέννεση κατά το πρώτο στάδιο A – B (Πηγή: [3]).....	15
Σχήμα 8b: Βρασμός με πυρηνογέννεση κατά το πρώτο στάδιο A – B (Πηγή: [3]).....	15
Σχήμα 9: Βρασμός με πυρηνογέννεση κατά το δεύτερο στάδιο B – C(Πηγή: [3]).....	16
Σχήμα 10a: Μεταβατικός βρασμός (Πηγή: [3]).....	18
Σχήμα 10b: Μεταβατικός βρασμός (Πηγή: [3]).....	18
Σχήμα 11a: Βρασμός υμένα (Πηγή: [2]).....	19
Σχήμα 11b: Βρασμός υμένα (Πηγή: [2]).....	20
Σχήμα 12: Η πραγματική καμπύλη βρασμού που κατασκευάστηκε με τη βοήθεια θερμαινόμενου σύρματος εντός νερού, καθώς η ροή θερμότητας αυξήθηκε και στη συνέχεια ελαττώθηκε (Πηγή: [4]).....	21

Σχήμα 13: Μια προσπάθεια αύξησης της ροής θερμότητας του βρασμού πάνω από το κρίσιμο σημείο, συχνά προκαλεί απότομο άλμα της θερμοκρασίας του θεμαντικού στιχείου σε τιμή μεγαλύτερη από το σημείο τήξης με αποτέλεσμα να καιγεται(Πηγή: [3]).....	21
Σχήμα 14: Ο προσδιορισμός της ροής θερμότητας στους διάφορους τύπους βρασμού στηρίζεται στη χρήση διαφορετικών σχέσεων (Πηγή: [4]).....	22
Σχήμα 15a: Ασταθής υμένας ατμού λόγω της υπερκείμενης στιβάδας υγρού (Πηγή: [1])....	28
Σχήμα 15b: Ιδεατή διάταξη δεσμών ατμού που διαφεύγουν από την επιφάνεια του βρασμού (Πηγή: [1]).....	28
Σχήμα 16: Ασταθής δέσμη ατμού μέσα στηνκυρίως μάζα του υγρού (Πηγή: [1]).....	29
Σχήμα 17: Σχηματισμός των θέσεων πυρήνων (Πηγή: [2]).....	34
Σχήμα 18: Επιφάνεια ενισχυμένη για αύξηση του βρασμού με πυρηνογέννεση (Πηγή: [2]).....	35
Σχήμα 19: Σχηματική παράσταση στερεής επφάνειας με τραχύτητα και ρωγμές, καθώς κα με θύλακες αερίου που χρησιμεύουν ως θέσεις πυρηνογέννεσης (Πηγή: [5]).....	37
Σχήμα 20: Προϋποθέσεις που απαιτούνται για την ταυτόχρονη μηχανική και θερμική ισορροπία της φυσαλίδας ατμού (Πηγή: [5]).....	38
Σχήμα 21: Σχηματισμός θέσεως πυρήνωσης (Πηγή: [9]).....	40
Σχήμα 22a: Μοντέλο Lorenz et al για την παγίδευση ατμών (Πηγή: [9]).....	40
Σχήμα 22β: Μοντέλο Lorenz et al για την παγίδευση ατμών (Πηγή: [9]).....	40
Σχήμα 23(a,b): Σχηματική παράσταση ατμού και υγρού παγιδευμένο σε ένα αυλάκι που οφείλεται στην κίνηση του υγρού πάνω από την εμπρόσθια επιφάνεια (Πηγή: [8]).....	43
Σχήμα 24: Η ανάπτυξη της φυσαλίδας μέσα εμια κοιλότητα που επαναεισέρχεται (Πηγή: [9]).....	45
Σχήμα 25(a,b,c,d): Μεταβολή της ακτίνας της φυσαλίδας σε μια κοιλότητα (Πηγή: [9])....	47

Σχήμα 26(a,b): Ειδανικευμένο μοντέλο της διεργασίας παγίδευσης ατμών που χρησιμοποιείται για την αρχική εκτίμηση της φυσαλίδας ατμού στην κοιλότητα (Πηγή: [9]).	48
Σχήμα 27: Μεταβολή της αρχικής ακτίνας με τη γωνία κώνου κοιλότητας και της γωνίας επαφής, όπως προβλέπεται από το μοντέο Lorenz et al (Πηγή: [9]).	50
Σχήμα 28(a,b,c,d,e): Η περίοδος αναμονής, η ανάπτυξη και η απελευθέρωση μιας φυσαλίδας ατμού σε κοιλότητα (Πηγή: [9]).	53
Σχήμα 29α: Φυσαλίδα που αυξάνεται και αναχωρεί κατά τον βρασμό (Πηγή: [5]).	55
Σχήμα 29β: Αύξηση της φυσαλίδας σε υπόψυκτο υγρό (Πηγή: [5]).	56
Σχήμα 30: Σύγκριση της εξίσωσης Rohsenow με την εξίσωση 36 για βρασμό σε νερό και χρήση σύρματος πλατίνας διαμέτρου 0,61 mm (Πηγή: [5]).	57
Σχήμα 31: Συσκευή Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus.	60
Σχήμα 32α: Καντράν ενδείξεων και ρυθμίσεων συσκευής Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus	61
Σχήμα 32β: Καντράν ενδείξεων και ρυθμίσεων συσκευής Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus	62
Σχήμα 33: Δοχείο που παίρνει μέρος στο βρασμό	63
Σχήμα 34: Δοχείο συνεχούς αντίστασεως	63
Σχήμα 35: Δοχείο που γίνεται ο βρασμός	66
Σχήμα 36: Τυπικά αποτελέσματα πειραμάτων βρασμού	68
Σχήμα 37: Γράφημα θερμοκρασίας με Balance που αναπαριστά τη γραμμικότητα σε σύρμα διαμέτρου 0,33 mm	74
Σχήμα 38: Συνολικό γράφημα των επαναλήψεων του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm	74
Σχήμα 39: Προσεγγιστική καμπύλη βρασμού του πειράματος για σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm	75

Σχήμα 40: Γράφημα θερμοκρασίας με Balance που αναπαριστά τη γραμμικότητα σε σύρμα διαμέτρου 0,44 mm	76
Σχήμα 41: Συνολικό γράφημα των επαναλήψεων του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm	78
Σχήμα 42: Προσεγγιστική καμπύλη βρασμού του πειράματος για σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm	79
Σχήμα 43: Γράφημα θερμοκρασίας με Balance που αναπαριστά τη γραμμικότητα σε σύρμα διαμέτρου 0,52 mm	80
Σχήμα 44: Συνολικό γράφημα των επαναλήψεων του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm	82
Σχήμα 45: Προσεγγιστική καμπύλη βρασμού του πειράματος για σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm	83
Σχήμα 46(a,b,c): Φυσική συναγωγή κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. α)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33mm, β)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44mm, γ)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52mm.....	85
Σχήμα 47(a,b,c): Πυρηνογέννεση περιοχής Α - Β. α)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33mm, β)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44mm, γ)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52mm.....	86
Σχήμα 48(a,b): Πυρηνογέννεση περιοχής Α - Β. α)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33mm, β)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm.....	87
Σχήμα 48(c): Πυρηνογέννεση περιοχής Α – Β σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.....	88
Σχήμα 49(a): Βρασμός μετά το κρίσιμο σημείο σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm.....	88
Σχήμα 49(b,c): Βρασμός μετά το κρίσιμο σημείο. α)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44mm, β)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.....	89
Σχήμα 50(a,b,c): Σημείο τήξης του υλικού. α)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm, β)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm, γ)Σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.....	90

Σχήμα 51: Συνολικές προσεγγιστικές καμπύλες βρασμού των πειραμάτων.....92

Εννοιολογική σημασία των συμβόλων

T_{sat}	Θερμοκρασία κορεσμού
T_w	Θερμοκρασία στερεής επιφάνειας
h_{fg}	Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
h	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
ΔT_{sat}	Περίσσεια θερμοκρασίας
q	Ειδική θερμοροή
q_{max}	Κρίσιμη ροή θερμότητας
q_{min}	Ελάχιστη ροή θερμότητας
P_c	Κρίσιμη πίεση
P_B	Πίεση μέσα στην φυσαλίδα
P	Πίεση στο υγρό
Nu	Αριθμός Nusselt
Pr	Αριθμός Prandtl
Re	Αριθμός Reynolds
k	Θερμική αγωγιμότητα
k_v	Θερμική αγωγιμότητα υδρατμού
L	Χαρακτηριστικό μήκος
μ	Δυναμικό ιξώδες
μ_L	Δυναμικό ιξώδες του υγρού
ν	Κινηματικό ιξώδες
α	Θερμική διαχυτότητα

C_p	Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση
ρ	Πυκνότητα
ρ_L	Πυκνότητα του υγρού
ρ_v	Πυκνότητα του ατμού
u	Ταχύτητα του ρευστού
u_g	Ταχύτητα του ατμού
Ra_L	Αριθμός Rayleigh
Gr_L	Αριθμός Grashof
Ja	Αριθμός Jakob
A_w	Επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας
λ	Ενθαλπία εξάτμισης
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας
σ	Επιφανειακή τάση
C_{sf}	Πειραματική σταθερά
λ_{KH}	Μήκος κύματος
h'_{fg}	Διορθωμένη λανθάνουσα θερμότητα
T_f	Θερμοκρασία του υμένα
\bar{h}_{rad}	Αποτελεσματικός συντελεστής ακτινοβολίας
R_b	Ακτίνα της φυσαλίδας
d_d	Διάμετρος φυσαλίδων κατά την αναχώρηση
f	Συχνότητα

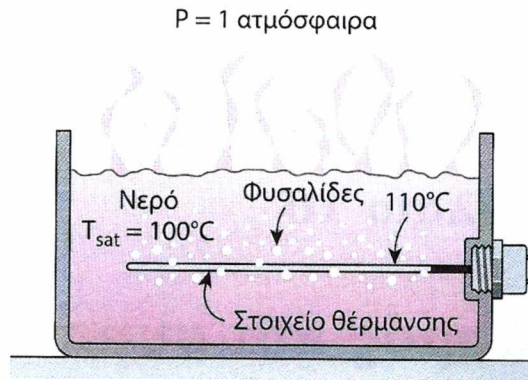
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Από την θερμοδυναμική είναι γνωστό πως όταν η θερμοκρασία ενός ρευστού σε συγκεκριμένη πίεση αυξάνεται μέχρι την θερμοκρασία κορεσμού T_{sat} εκδηλώνεται το φαινόμενο του βρασμού. Αλλιώς θα μπορούσαμε να πούμε, ότι όταν μια στερεή επιφάνεια είναι βυθισμένη ή βρίσκεται σε επαφή με ένα υγρό και η θερμοκρασία της επιφάνειας T_w , υπερβαίνει την συγκέντρωση κορεσμού του υγρού, T_{sat} , στη συγκεκριμένη πίεση, τότε σχηματίζονται φυσαλίδες ατμού στην επιφάνεια που αποκολλώνται από αυτήν. Αυτή η αλλαγή φάσης καλείται βρασμός.

Ο βρασμός διαφέρει από άλλες μορφές συναγωγής στο ότι εκτός από τις ιδιότητες του ρευστού σε κάθε φάση, εξαρτάται επίσης από την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης h_{fg} του ρευστού και από την επιφανειακή τάση σ στην επιφάνεια ρευστού – υδρατμού. Εάν κάτω από συνθήκες ισορροπίας η θερμοκρασία παραμένει σταθερή κατά την διαδικασία μεταβολής φάσης σε σταθερή πίεση, μεγάλες ποσότητες θερμότητας (λόγω της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης που απελευθερώνεται ή απορροφάται) μπορούν να μεταφερθούν κατά τον βρασμό, ουσιαστικά σε σταθερή θερμοκρασία. Ωστόσο στην πραγματικότητα είναι απαραίτητο να διατηρηθεί κάποια διαφορά ανάμεσα στην θερμοκρασία της επιφάνειας T_w και της θερμοκρασία κορεσμού T_{sat} για την αποτελεσματική ή ενεργό μεταφορά θερμότητας. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, h , που σχετίζονται με τον βρασμό είναι συνήθως αρκετές φορές υψηλότεροι από εκείνους που συναντά κανείς σε άλλες μορφές οι οποίες περιλαμβάνουν μόνο μια φάση.

1.1 Μετάδοση θερμότητας με βρασμό

Ο βρασμός εμφανίζεται στην διεπιφάνεια στερεού – υγρού όταν ένα υγρό έρχεται σε επαφή με μια επιφάνεια η οποία διατηρείται σε θερμοκρασία T_w αρκετά πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού του υγρού T_{sat} (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Ο βρασμός που πραγματοποιείται όταν ένα υγρό φέρεται σε επαφή με μια επιφάνεια σε θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού του υγρού (Πηγή [3]).

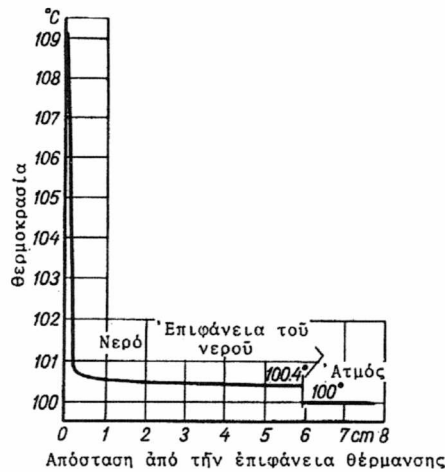
Συνήθως η θερμοκρασία του υγρού που βράζει θεωρείται ίση με την θερμοκρασία κορεσμού. Η πείρα δείχνει όμως, ότι η θερμοκρασία του υγρού είναι ελαφρά υψηλότερη. Πάντοτε μεταξύ ατμού και υγρού υπάρχει μια θερμοκρασιακή διαφορά. Αυτή είναι συναρτήση των φυσικών ιδιοτήτων του υγρού και της έντασης βρασμού. Για το νερό που βράζει υπό ατμοσφαιρική πίεση είναι $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$.

Η πείρα δείχνει ότι η θερμοκρασία του υγρού που βράζει είναι σχεδόν σταθερή (Σχήμα 2), από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού μέχρι την επιφάνεια θέρμανσης. Απότομη αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται μόνο σε ένα στρώμα πάχους 2 – 5 mm πάνω από την επιφάνεια θέρμανσης. Η θερμοκρασία των στοιχείων του ρευστού που είναι σε επαφή με την επιφάνεια θέρμανσης είναι ίδια με την θερμοκρασία αυτής. Επομένως, η θερμοκρασία του υγρού στην επιφάνεια θέρμανσης είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία κορεσμού κατά $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$. Η τιμή του ΔT_{sat} αυξάνει αυξανόμενου του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας q .

Ως μορφή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, η ροή θερμότητας βρασμού (μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα εμβαδού) από μια στερεή επιφάνεια προς το ρευστό εκφράζεται από το νόμο ψύξης του Newton ως εξής:

$$q = h(T_w - T_{sat}) = h\Delta T_{sat} \quad (1)$$

Όπου, $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$ είναι το πλεόνασμα που αναπαριστά την περίσσεια θερμοκρασία πάνω από το όριο της θερμοκρασίας κορεσμού του ρευστού.



Σχήμα 2: Μεταβολή της θερμοκρασίας σε νερό που βράζει πάνω σε οριζόντια επιφάνεια θέρμανσης ($q=19300 \text{ kcal / m}^2\text{h}$, $T_w=109.1 \text{ }^\circ\text{C}$) (Πηγή [4]).

Ο ακριβής υπολογισμός της θερμορροής απαιτεί γνώση της μικροδιαμόρφωσης και των χαρακτηριστικών διαβροχής της επιφάνειας για το συγκεκριμένο υγρό που βράζει. Όπως συμβαίνει συχνά στην πράξη, αν οι πληροφορίες αυτές δεν είναι γνωστές, χρησιμοποιούνται εμπειρικές συσχετίσεις. Μια τυπική εμπειρική συσχέτιση είναι η προσέγγιση Mostinski[1963].

$$h = 0.106 P_c^{0.69} q^{0.7} f(P_R) \tag{2}$$

Όπου h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με μονάδες $\text{w/m}^2\text{K}$, q είναι η ειδική θερμορροή σε w/m^2 , P_c είναι η κρίσιμη πίεση σε bar και $f(P_R)$ είναι η παρακάτω συνάρτηση της ανηγμένης πίεσης P/P_c :

$$f(P_R) = 1.8P_R^{0.17} + 4P_R^{1.2} + 10P_R^{10} \tag{3}$$

Η παραπάνω συσχέτιση δεν είναι αδιάστατη και συνεπώς κατά την εφαρμογή της πρέπει να χρησιμοποιούνται οι σωστές μονάδες. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αυξάνει με την ανηγμένη πίεση και μεγαλώνει δραματικά καθώς η ανηγμένη πίεση τείνει στην μονάδα.

Η γνωστότερη ίσως συσχέτιση οφείλεται στο Rohsenow [1952]. Για την εξαγωγή της θεωρείται ότι ισχύει η διαστατική ανάλυση της μονοφασικής ροής, όπου

$$Nu = f(Re, Pr) \tag{4}$$

με χαρακτηριστικά όμως μεγέθη που σχετίζονται με το πρόβλημα του βρασμού. Στη σχέση (4), όπου Nu είναι ο αριθμός Nusselt και δίνεται από τον τύπο:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (5)$$

όπου h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε w/m^2K , L το χαρακτηριστικό μήκος σε m και k η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού σε w/mK . Επίσης ο αριθμός Nusselt παριστάνει την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου ενός στρώματος ρευστού ως αποτέλεσμα της συναγωγής σε σχέση με την αγωγή στα άκρα του ίδιου στρώματος ρευστού. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός Nusselt, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η συναγωγή.

Ο αριθμός Prandtl (Pr) ορίζεται ως εξής:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (6)$$

όπου μ το δυναμικό ιξώδες σε Kg/ms , ν το κινηματικό ιξώδες σε m^2/s , a η θερμική διαχυτότητα σε m^2/s , k η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού σε w/mK και C_p η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση σε $KJ/Kg K$.

Ο αριθμός Reynolds (Re) ορίζεται ως εξής:

$$Re = \frac{uL}{\nu} = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (7)$$

όπου μ το δυναμικό ιξώδες σε Kg/ms , ν το κινηματικό ιξώδες σε m^2/s , u η ταχύτητα του ρευστού σε m/s , L το χαρακτηριστικό μήκος σε m και ρ η πυκνότητα σε Kg/m^3 .

Θεωρώντας ότι οι φυσικές ιδιότητες στους παραπάνω αριθμούς αναφέρονται στο υγρό, ανακύπτουν δυο ερωτήματα: Πως ορίζεται η ταχύτητα u και πως το χαρακτηριστικό μήκος L . Ως χαρακτηριστική ταχύτητα λαμβάνεται η ταχύτητα του υγρού που αναπληρώνει το ποσό που εξατμίζεται. Δηλαδή:

$$u = \frac{q}{\lambda \rho_L} \quad (8)$$

Ως χαρακτηριστικό μήκος χρησιμοποιείται το μήκος:

$$L = \left[\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Ο Rohsenow [1952] συσχέτισε τους παραπάνω αδιάστατους αριθμούς με την ακόλουθη σχέση:

$$Nu = \frac{1}{C_s} Re^{1-m} Pr^{1-n} \quad (10)$$

όπου n και m σταθερές και η παράμετρος C_s εξαρτάται τόσο από την επιφάνεια όσο και από το υγρό και τυπικά κυμαίνεται όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 1. Από πειραματικές εφαρμογές γνωρίζουμε ότι $q \sim (\Delta T)^3$ συνεπάγεται ότι $m=1/3$. Ο εκθέτης n παίρνει τιμές 1 και 1,7. Αντικατάσταση των χαρακτηριστικών μεγεθών και χρήση του ορισμού του συντελεστή συναγωγής, έχουμε:

$$q = h\Delta T_{sat}$$

Όπου οδηγεί στο αποτέλεσμα:

$$q_{\betaρασμού} = \mu_L \lambda \left[\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_g)} \right]^{1/2} \left[\frac{C_{pL} \Delta T}{C_s \lambda Pr_L^n} \right]^3 \quad (11)$$

Η παραπάνω σχέση εφαρμόζεται σε καθαρές επιφάνειες και ανεξάρτητα του σχήματος και του προσανατολισμού της επιφάνειας, κάτι που προφανώς αποτελεί μια προσέγγιση στο πραγματικό πρόβλημα.

Όπως αναφέραμε, ο βρασμός αποτελεί αρκετά πολύπλοκο φαινόμενο λόγω του μεγάλου πλήθους μεταβλητών οι οποίες περιλαμβάνονται στη διαδικασία καθώς και των πολύπλοκων κινήσεων του ρευστού που οφείλονται στο σχηματισμό και την ανάπτυξη των φυσαλίδων. Η ανάλυση μεταφοράς θερμότητας περιλαμβάνει τις ιδιότητες του υγρού ή υδρατμού καθώς τις ιδιότητες της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης h_{fg} και της επιφανειακής τάσης σ . Η παράμετρος της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης εκφράζει την ενέργεια που απορροφάται καθώς μια μοναδιαία μάζα υγρού εξατμίζεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία ή πίεση και αποτελεί την κύρια ποσότητα ενέργειας η οποία αναφέρεται κατά τη διάρκεια μεταφοράς θερμότητας της εξάτμισης h_{fg} του νερού σε διάφορες θερμοκρασίες που δίνονται από πίνακες.

Οι φυσαλίδες οφείλουν την ύπαρξη τους στην επιφανειακή τάση σ στην διεπιφάνεια υγρού – ατμού λόγω της ελκτικής δύναμης που ασκείται στα μόρια στην διεπιφάνεια προς την υγρή φάση. Η επιφανειακή τάση μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και γίνεται

ίση με μηδέν στην κρίσιμη θερμοκρασία. Αυτό εξηγεί το λόγο τον οποίο δεν σχηματίζονται φυσαλίδες κατά την διάρκεια του βρασμού σε πιέσεις και θερμοκρασίες πάνω από τις κρίσιμες.

Πίνακας 1: Τιμές συντελεστή C_s και του εκθέτη n για διάφορους συνδυασμούς ρευστού - επιφάνειας.

Fluid-Heating Surface Combination	C_{sf}	n
Water-Copper (polished)	0,0130	1,0
Water-Copper (scored)	0,0068	1,0
Water-Stainless Steel (mechanically polished)	0,0130	1,0
Water-Stainless Steel (ground and polished)	0,0060	1,0
Water-Stainless Steel (teflon pitted)	0,0058	1,0
Water-Stainless Steel (chemically etched)	0,0130	1,0
Water-brass	0,0060	1,0
Water-nickel	0,0060	1,0
Water-platinum	0,0130	1,0
n-Pentane-copper (polished)	0,0154	1,7
n-pentane-chromium	0,0150	1,7
Benzene-chromium	0,1010	1,7
Ethyl alcohol-chromium	0,0027	1,7
Carbon tetrachloride-copper	0,0130	1,7
Isopropanol-copper	0,0025	1,7

Στην πράξη, η διεργασία του βρασμού εμφανίζεται κάτω από συνθήκες ισορροπίας και συνήθως οι φυσαλίδες δε βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον υγρό. Δηλαδή, η θερμοκρασία και η πίεση του υδρατμού σε μια φυσαλίδα συνήθως διαφέρουν από εκείνες του υγρού. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του βρασμού σε μια φυσαλίδα και του περιβάλλοντος υγρού, αποτελεί την κινητήριο δύναμη μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δυο φάσεων.

Επικεντρωνόμαστε στην παρούσα εργασία, όταν το ρευστό βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία από εκείνη της φυσαλίδας, η θερμότητα μεταφέρεται από το υγρό στη φυσαλίδα, με αποτέλεσμα αυτή να μεγαλώνει σε μέγεθος και να ανέβει προς τα πάνω, κάτω από την επίδραση της άνωσης.

1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να γίνει ο πειραματικός υπολογισμός ης καμπύλης βρασμού με την βοήθεια της εργαστηριακής συσκευής Cussons P5697 Heat Transfer Apparatus. Η Cussons P5697 λειτουργεί χρησιμοποιώντας σύρμα ηλεκτρικής αντίστασης (για την εν λόγω διπλωματική Νικελίου – Χρωμίου) και κατά την διαδικασία των πειραμάτων υπολογίζεται η θερμοκρασία του σύρματος T_w και η θερμοκρασία υπερθέρμανσης για κάθε περίπτωση. Από τους υπολογισμούς που αναφέρονται στα επόμενα κεφάλαια δημιουργείται η καμπύλη βρασμού (γραφική παράσταση $Q - \Delta T$) που προσεγγίζει την πρότυπη καμπύλη βρασμού.

1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Πρώτος ο Nukiyama το 1934 [5] ερεύνησε το πείραμα του βρασμού. Τοποθέτησε μέσα σε ένα δοχείο που είχε κορεσμένο νερό, ένα οριζόντιο σύρμα που λειτουργούσε με μια ηλεκτρική θερμαντική αντίσταση. Βρήκε ότι καθώς αύξανε την ισχύ εισόδου στο σύρμα η θερμοκρασία του σύρματος αυξανόταν απότομα, άλλα η ροή θερμότητας αυξανόταν πολύ λίγο. Την χρονιά 1935 οι Jakob και Linke [8] βασίστηκαν στην υπόθεση ότι η διαδικασία ανάπτυξης των φυσαλίδων και η απελευθέρωση της κίνησης του περιβάλλοντος υγρού διευκολύνουν την μεταφορά θερμότητας από την παρακείμενη επιφάνεια. Όπου στη συνέχεια της έρευνας των Jakob and Linke έκανε ο Rohsenow το 1962 [21]. Έπειτα το 1937 οι Drew και Mueller [36] κατάφεραν να κάνουν την ΔT_{sat} ανεξάρτητη μεταβλητή με τον βρασμό οργανικών υγρών από ένα σωλήνα. Το 1948 ο Kutaleladze [10] στην τότε Σοβιετική Ένωση προσδιόρισε την κρίσιμη ροή θερμότητας κατά το βρασμό με πυρηνογέννεση. Οι Forster και Zuber το 1955 [38] μίλησαν για την δυναμική των φυσαλίδων ατμού και την μεταφορά θερμότητας με βρασμό. Επίσης ο Zuber το 1958 στην Η.Π.Α συνέχισε το έργο του Kutaleladze χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους. Έπειτα οι Forster και Greif το 1959 [8] ερεύνησαν την μεταφορά θερμότητας με βρασμός και ανέφεραν τον μηχανισμό και συσχετίσεις. Οι Mikic και Rohsenow το 1969 [34] ερεύνησαν το ποσοστό αύξησης της φυσαλίδας σε μη ομοιόμορφο πεδίο ροής, όπως επίσης δημοσίευσαν συσχετίσεις των δεδομένων κατά τον βρασμό σε μια θερμαινόμενη επιφάνεια. Επίσης οι Witte και Lienhard το 1982 [5] ερεύνησαν την ύπαρξη δυο μεταβατικών καμπυλών βρασμού. Εκτός από τους

παραπάνω και άλλοι πολλοί επιστήμονες ασχολήθηκαν και δημοσίευσαν μελέτες γύρω από τις φάσεις του βρασμού.

1.4 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε δυο ενότητες. Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει το θεωρητικό κομμάτι για το στάσιμο βρασμό, που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 – 3. Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει το πειραματικό κομμάτι που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 4 - 5. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στο πείραμα του Nukiyama, όπου ήταν ο πρώτος επιστήμονας που παρατήρησε ότι βρασμός αποδεικνύεται από την παρουσία φυσαλίδων. Στην συνέχεια του Κεφαλαίου γίνεται αναφορά στις καταστάσεις της καμπύλη βρασμού, όπως και αναφέρονται οι σχέσεις μεταφοράς θερμότητας που διέπει κάθε φάση. Τέλος, αναφέρονται τρόποι ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας κατά το βρασμό σε δοχείο.

Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύσσεται περαιτέρω την φάση της πυρηνογένεσης. Αναλύεται ο μηχανισμός της πυρηνογένεσης και πως δημιουργούνται οι φυσαλίδες κοντά σε μια θερμαινόμενη επιφάνεια. Επίσης αναφέρονται τα χαρακτηριστικά κατά την αναχώρηση μιας φυσαλίδας.

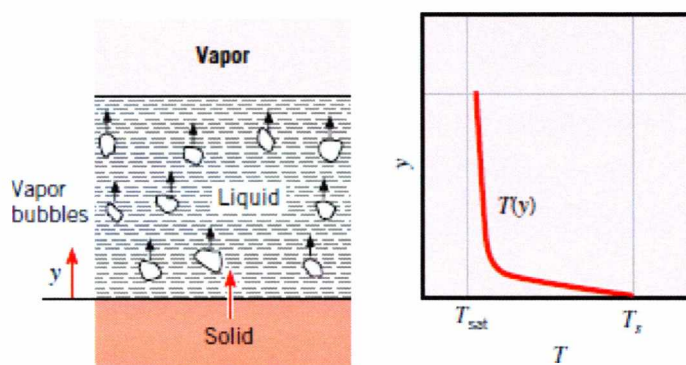
Στο Κεφάλαιο 4, όπου αποτελεί την δεύτερη ενότητα της εργασίας αναπτύσσεται ο τρόπος λειτουργίας της εργαστηριακής συσκευής που χρησιμοποιείται για της μετρήσεις. Αναφέρετε ο τρόπος λειτουργίας της συσκευής και τι πρέπει να αποφεύγει ο χρήστης για την εύρυθμη λειτουργία και την σωστή διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα μας, όπως και οι υπολογισμοί των πειραμάτων βρασμού.

Στο Κεφάλαιο 6 αναφέρονται τα συμπεράσματα των πειραμάτων και παρουσιάζονται σε σχήματα (Φωτογραφίες) οι φάσεις όπως αυτές παρουσιάζονται κατά την διαδικασία των εργαστηριακών πειραμάτων. Επίσης γίνεται αναφορά στα σφάλματα κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Κεφάλαιο 2 Βρασμός σε δοχείο

Ο βρασμός χαρακτηρίζεται ως βρασμός σε δοχείο (Σχήμα 3) όταν δεν υπάρχει κίνηση της κύριας μάζας του ρευστού. Στο βρασμό υγρού σε δοχείο, το υγρό είναι στάσιμο, και οποιαδήποτε κίνηση του οφείλεται στα ρεύματα φυσικής συναγωγής καθώς και στην κίνηση των φυσαλίδων κάτω από την επίδραση της άνωσης. Ο βρασμός υγρού σε δοχείο επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός πηλίου θέρμανσης μέσα στο υγρό, όπως θα περιγράψουμε στις επόμενες υπο ενότητες του κεφαλαίου.



Σχήμα 3: Κατανομή της θερμοκρασίας κατά το βρασμό και εμφάνιση των φυσαλίδων μέσα στο υγρό (Πηγή [2]).

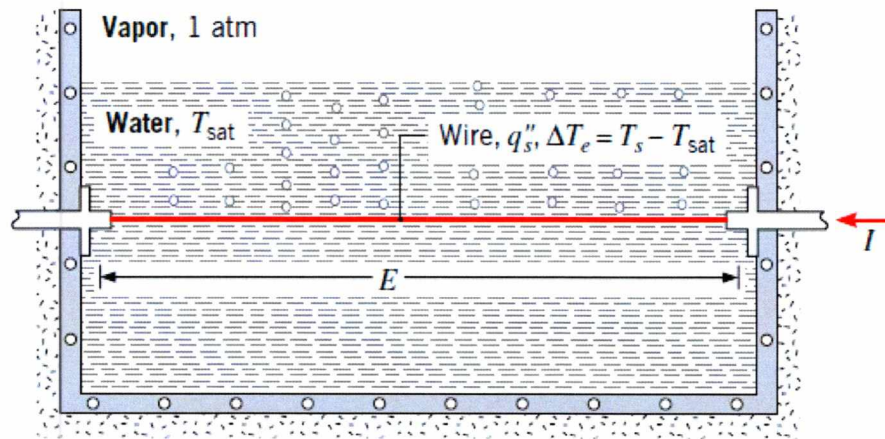
Στα πρώτα στάδια του βρασμού, οι φυσαλίδες περιορίζονται σε μια μικρή περιοχή κοντά στη θερμή επιφάνεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως το υγρό που βρίσκεται δίπλα στη θερμή επιφάνεια εξατμίζεται λόγω της θέρμανσης του πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού. Ωστόσο αυτές οι φυσαλίδες εμφανίζονται αμέσως μόλις απομακρυνθούν από την θερμή επιφάνεια, λόγω της μεταφοράς θερμότητας από τις φυσαλίδες στο ψυχρότερο υγρό που τις περιβάλλει. Αυτό συμβαίνει όταν ο όγκος του υγρού έχει θερμοκρασία χαμηλότερη από την θερμοκρασία κορεσμού. Οι φυσαλίδες λειτουργούν ως «φορείς ενέργειας» από τη θερμή επιφάνεια στην κύρια μάζα του υγρού, απορροφώντας θερμότητα από τη θερμή επιφάνεια και απελευθερώνοντας τη στο εσωτερικό του υγρού καθώς συμπυκνώνονται και

σπάζουν. Στην προκειμένη περίπτωση, ο βρασμός περιορίζεται σε μια περιοχή κοντά στην θερμή επιφάνεια και αποκαλείται τοπικός βρασμός ή βρασμός σε κατάσταση υπόψυξης. Όταν ολόκληρο το σώμα του υγρού προσεγγίζει την θερμοκρασία κορεσμού, οι φυσαλίδες αρχίζουν να ανεβαίνουν προς τα επάνω. Οι φυσαλίδες εμφανίζονται σε ολόκληρο τον όγκο του υγρού και ο βρασμός στην προκειμένη περίπτωση αποκαλείται βρασμός όγκου ή βρασμός σε κατάσταση κορεσμού.

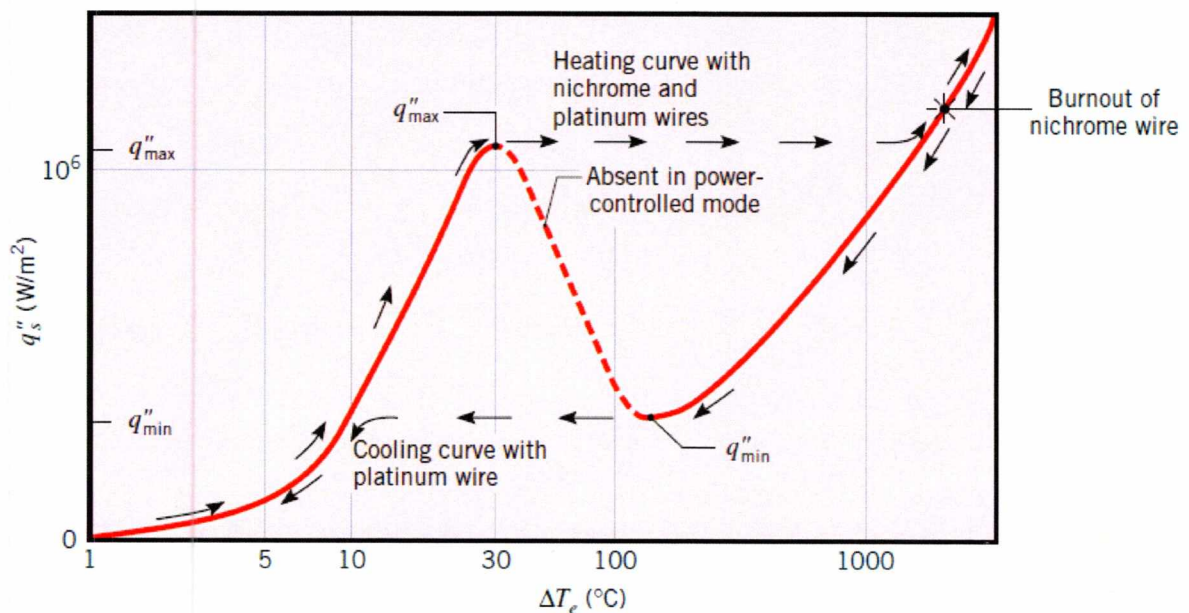
2.1 Εξάρτηση βρασμού από υπερθέρμανση – Πείραμα Nukiyama

Ο βρασμός αποτελεί ίσως την πιο γνωστή μορφή μεταφοράς θερμότητας, ωστόσο, παραμένει και η λιγότερο κατανοητή. Αν και έχουν γραφτεί πλέον εκατοντάδες εργασίες που αναφέρονται σε αυτόν, η παρούσα εργασία αναφέρεται στις πρωτοποριακές μελέτες του φαινομένου του βρασμού που πραγματοποιήθηκαν το 1934 από τον S. Nukiyama. Αυτός χρησιμοποίησε στα πειράματα του (Σχήμα 4), ηλεκτρικά θερμαινόμενα σύρματα πλατίνας και νικελίου-χρωμίου βυθισμένα σε νερό. Παρατήρησε πως ο βρασμός παίρνει διαφορετικές μορφές ανάλογα με την τιμή της περίσσειας θερμοκρασίας, $\Delta T_{\text{sat}} = T_w - T_{\text{sat}}$. Η θερμοκρασία του σύρματος προσδιορίζεται από τον τρόπο με τον οποίο η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται (μετριέται από την γέφυρα Wheatstone) με την θερμοκρασία, δηλαδή η θερμοκρασία του σύρματος είναι μια εξαρτημένη μεταβλητή. Από την ένταση του ρεύματος και από το δυναμικό στα άκρα του σύρματος υπολογίζουμε την ισχύ (Εξ ου και η ροή θερμότητας q) που προσδίδεται κάθε φορά στο σύρμα και είναι μια ανεξάρτητη μεταβλητή.

Ο Nukiyama παρατήρησε ότι ο βρασμός αποδεικνύεται από την παρουσία φυσαλίδων, που θα αρχίζουν να εμφανίζονται μετά τους $\Delta T_{\text{sat}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Με την περαιτέρω αύξηση της ισχύος, η ροή θερμότητας αυξάνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα ξαφνικά, για μια τιμή ελαφρώς μεγαλύτερη από την q_{max} η θερμοκρασία του σύρματος φτάνει στο σημείο τήξης και έχουμε το λεγόμενο «Burnout». Ωστόσο η επανάληψη του πειράματος με σύρμα πλατίνας που έχει υψηλότερο σημείο τήξης (2045 K έναντι 1500 K), ο Nukiyama διαπίστωσε ότι ήταν σε θέση να διατηρεί θερμοροές παραπάνω από το q_{max} χωρίς Burnout. Όταν στην συνέχεια μείωσε την ένταση, η διακύμανση του ΔT_{sat} με το q ακολούθησε την καμπύλη ψύξης του Σχήματος 5. Όταν η ροή θερμότητας φτάσει στο ελάχιστο σημείο q_{min} , μια περαιτέρω μείωση στην ισχύ θα προκαλέσει απότομη μείωση της περίσσειας θερμοκρασίας, και η διαδικασία θα ακολουθήσει την αρχική καμπύλη θέρμανσης πίσω στο σημείο κορεσμού.



Σχήμα 4: Η διάταξη του Nukiyama για την παρατήρηση της καμπύλης βρασμού ενός υγρού με έλεγχο της ροής ισχύος (Πηγή [2]).



Σχήμα 5: Καμπύλη βρασμού του Nukiyama για κορεσμένο νερό σε ατμοσφαιρική πίεση (Πηγή[2]).

Ο Nukiyama πίστευε ότι η επίδραση της υστέρησης στο σχήμα 5 ήταν συνέπεια της μεθόδου με την οποία γίνεται η ελεγχόμενη τροφοδοσία με θέρμανση, εφόσον το ΔT_{sat} είναι μια εξαρτημένη μεταβλητή. Επίσης, πίστευε ότι με την χρήση μιας διαδικασίας θέρμανσης που επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο του ΔT_{sat} , θα μπορούσε να εξαφανίσει το διακεκομμένο τμήμα της καμπύλης.

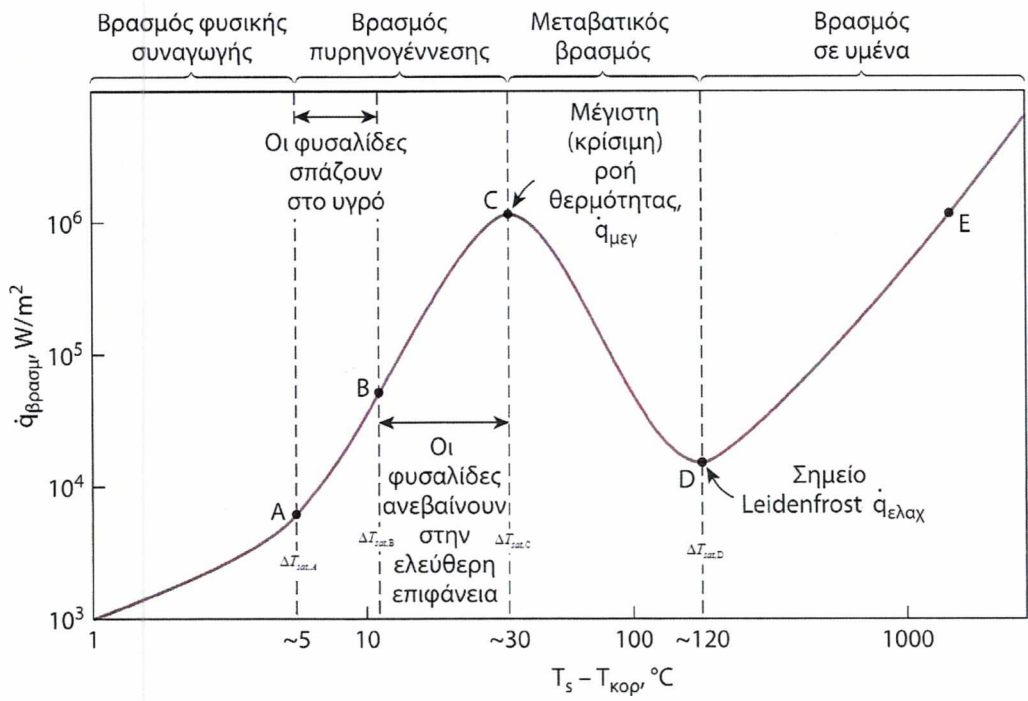
2.2 Καταστάσεις βρασμού και καμπύλη βρασμού

Στο δοχείο καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, παρατηρούνται τμήματα του υγρού νερού που ανεβοκατεβαίνουν, λόγω των ρευμάτων φυσικής συναγωγής, ενώ ακολουθούν οι πρώτες φυσαλίδες υδρατμού οι οποίες σχηματίζονται στην κάτω επιφάνεια του δοχείου. Οι φυσαλίδες αυτές μικραίνουν όλο και περισσότερο καθώς απομακρύνονται από την επιφάνεια και αρχίζουν αν ανεβαίνουν, για να σπάσουν τελικά στο ψυχρότερο νερό που βρίσκεται επάνω. Πρόκειται για βρασμό σε κατάσταση υπόψυξης, αφού ο όγκος του υγρού νερού δεν έχει ακόμη φτάσει την θερμοκρασία κορεσμού. Ο ρυθμός σχηματισμού φυσαλίδων αυξάνεται καθώς αυξάνεται όλο και περισσότερο η θερμοκρασία του νερού ενώ παρατηρούνται κύματα φυσαλίδων υδρατμού που ανεβαίνουν στην επάνω επιφάνεια όταν η θερμοκρασία του νερού φτάνει τη θερμοκρασία κορεσμού (100 °C σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση). Αυτός ο πλήρης βρασμός αποτελεί το βρασμό σε κατάσταση κορεσμού.

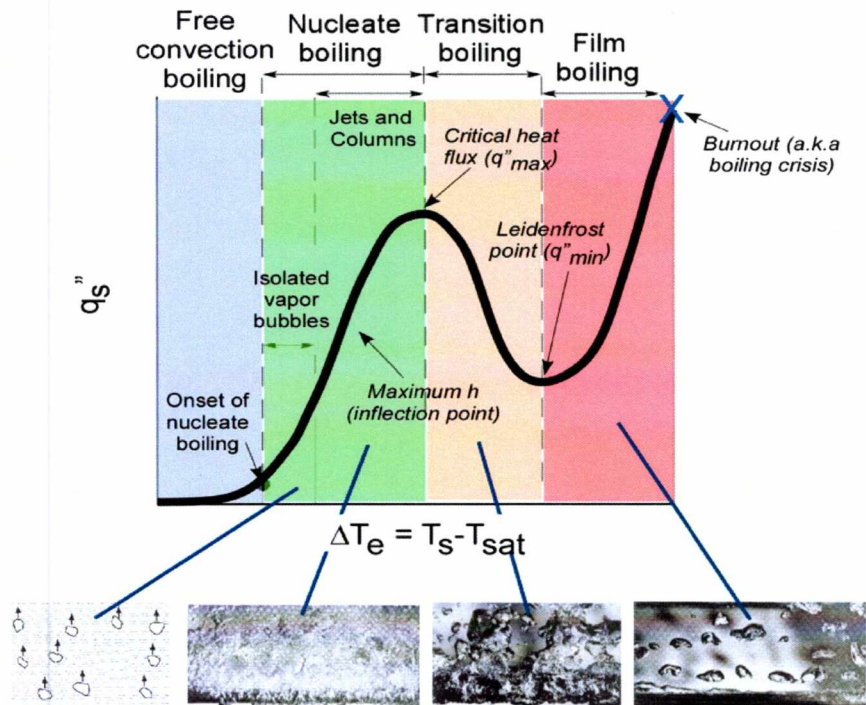
Ο βρασμός παίρνει διαφορετικές μορφές, ανάλογα με την τιμή της περίσσειας θερμοκρασίας ΔT_{sat} . Παρατηρήθηκαν τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις βρασμού (Σχήμα 4):

1. Βρασμός με φυσική συναγωγή
2. Βρασμός με πυρηνογένεση
3. Μεταβατικός βρασμός
4. Βρασμός υμένα

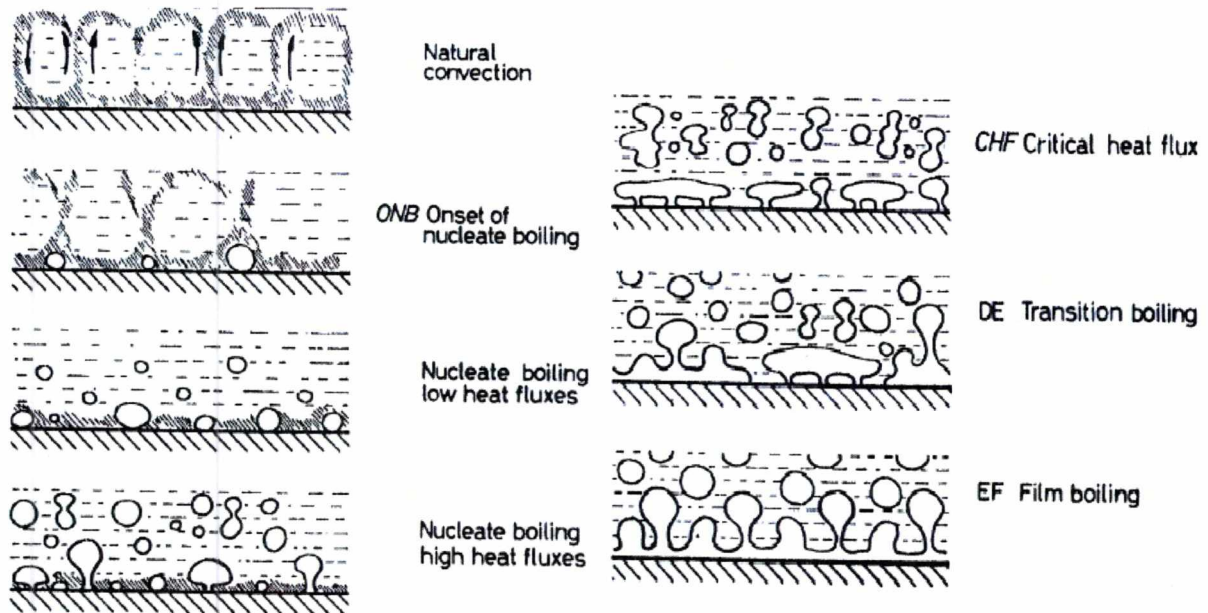
Μια εκτίμηση για τους υποκειμενικούς μηχανισμούς που μπορούν να ληφθούν με την εξέταση σε διαφορετικούς τρόπους, ή φάσεις, του στάσιμου βρασμού είναι η καμπύλη που αναφέρετε παραπάνω (Σχήμα 5 και 6) που αντιστοιχεί σε νερό με πίεση 1 atm, αν και παρόμοιες τάσεις χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των άλλων υγρών. Από την εξίσωση 1 σημειώνετε ότι το q εξαρτάται από το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h και την υπερθέρμανση ΔT_{sat} . Οι διαφορετικές φάσεις βρασμού που προαναφέραμε στην αρχή της υπό ενότητας μπορούν να οροθετηθούν ανάλογα με την τιμή της υπερθέρμανσης ΔT_{sat} .



Σχήμα 6α: Οι διαφορετικές καταστάσεις βρασμού σε δοχείο (Πηγή [2]).



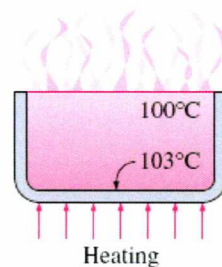
Σχήμα 6β: Οι διαφορετικές καταστάσεις βρασμού σε δοχείο (Πηγή: [39]).



Σχήμα 6c: Οι διαφορετικές καταστάσεις βρασμού σε δοχείο (Πηγή: [9]).

2.2.1 Φυσική συναγωγή κατά τον βρασμό

Φυσική συναγωγή κατά την μεταφορά θερμότητας με βρασμό λέγεται ότι υπάρχει, αν $\Delta T_{\text{sat}} \leq \Delta T_{\text{sat,A}}$, όπου $\Delta T_{\text{sat,A}} \approx 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Σχήμα 7). Η θερμοκρασία της επιφάνειας πρέπει να είναι κάπως μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία κορεσμού προκειμένου να διατηρήσουν το σχηματισμό των φυσαλίδων. Στην πράξη, δεν παρουσιάζεται σχηματισμός φυσαλίδων στην επιφάνεια θέρμανσης μέχρι το υγρό να φτάσει σε μια θερμοκρασία λίγων βαθμών πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού (περίπου $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ως $6 \text{ }^\circ\text{C}$ για το νερό). Το υγρό υπερθερμαίνεται ελαφρώς (μια κατάσταση ασταθής) και εξατμίζεται όταν ανέβει στην ελεύθερη επιφάνεια. Η κίνηση του ρευστού σε αυτήν την φάση βρασμού διέπεται από ρεύματα φυσικής συναγωγής, ενώ η μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια θέρμανσης προς το ρευστό γίνεται με φυσική συναγωγή.

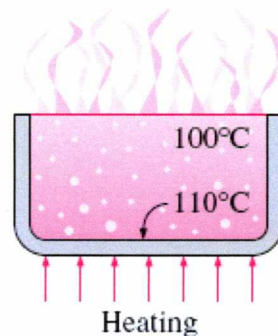


Σχήμα 7: Φυσική συναγωγή κατά το βρασμό (Πηγή [3]).

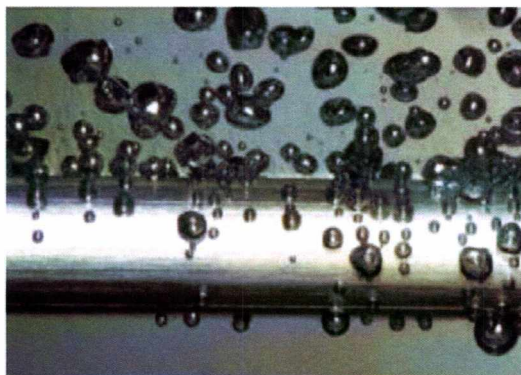
2.2.2 Βρασμός με πυρηνογένεση

Οι πρώτες φυσαλίδες αρχίζουν να σχηματίζονται στο σημείο A της καμπύλης του Σχήματος 8a, σε διάφορα προνομιούχα σημεία της επιφάνειας θέρμανσης. Το σημείο A είναι γνωστό ως το ξεκίνημα του βρασμού με πυρηνογένεση (Onset of Nucleate Boiling, ONB). Οι φυσαλίδες σχηματίζονται με αυξανόμενο πλήθος σημείων πυρηνογένεσης καθώς κινούμαστε κατά μήκος της καμπύλης βρασμού προσεγγίζοντας το κρίσιμο σημείο C.

Η δημιουργία της πυρηνογένεσης υπάρχει στην περιοχή όπου το $\Delta T_{\text{sat,A}} \leq \Delta T_{\text{sat}} \leq \Delta T_{\text{sat,C}}$, όπου το $\Delta T_{\text{sat,C}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Στην περιοχή αυτή, μπορούν να διακριθούν δυο ξεχωριστές περιοχές. Στην περιοχή A - B ($5 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T_{\text{sat}} \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$) Σχήμα 8a,



Σχήμα 8a: Βρασμός με πυρηνογένεση κατά το πρώτο στάδιο A – B (Πηγή [3]).

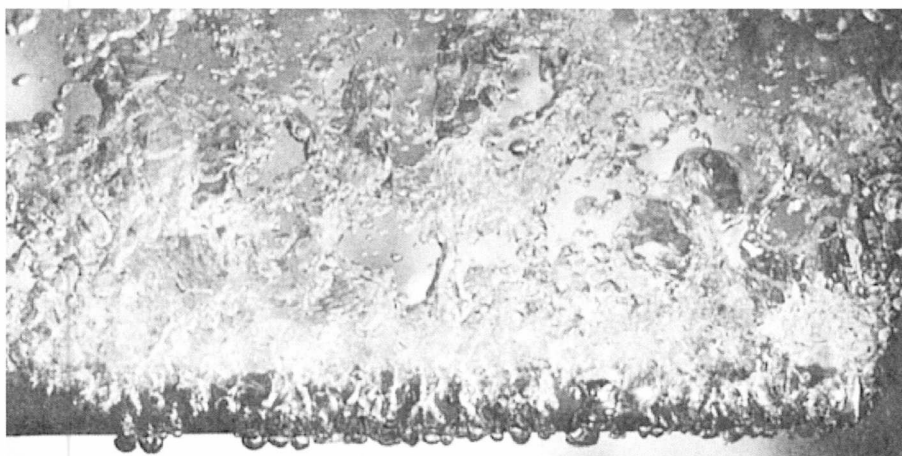


Σχήμα 8b: Βρασμός με πυρηνογένεση κατά το πρώτο στάδιο A – B (Πηγή [3]).

σχηματίζονται μεμονωμένες φυσαλίδες σε διάφορα προνομιούχα σημεία της θερμής επιφάνειας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8(a,b). Αυτές οι φυσαλίδες, ωστόσο, εξαφανίζονται μέσα στο υγρό αμέσως μετά την απομάκρυνση τους από την επιφάνεια. Ο χώρος αυτός που μένει κενός από τις φυσαλίδες, οι οποίες ανεβαίνουν στην επιφάνεια,

γεμίζει με το υγρό που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της συσκευής θέρμανσης, και η διαδικασία αυτήν επαναλαμβάνεται. Η αναταραχή και η ανάδευση που δημιουργείται από την είσοδο του υγρού στην επιφάνεια της συσκευής θέρμανσης, ευθύνεται για τον αυξημένο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας καθώς και για τη ροή θερμότητας σε αυτήν την περιοχή βρασμού με πυρηνογένεση. Η ανταλλαγή θερμότητας σε αυτήν την φάση οφείλεται από την μεταφορά θερμότητας από το υγρό στην επιφάνεια και όχι από τις φυσαλίδες ατμού που αυξάνονται στην επιφάνεια.

Όταν η υπερθέρμανση ΔT_{sat} αυξάνεται πέραν του $\Delta T_{\text{sat,B}}$ περισσότερες θέσεις σχηματισμού πυρήνων γίνονται ενεργές και ο αριθμός σχηματισμού φυσαλίδων αυξάνεται προκαλώντας παρεμβολές στις φυσαλίδες και περίπτωση συνένωσης των. Σε αυτήν την περίπτωση περνάμε στην περιοχή B – C ($10 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T_{\text{sat}} \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$), η θερμοκρασία του θερμαντικού στοιχείου αυξάνεται περισσότερο και σχηματίζονται φυσαλίδες με τόσο μεγάλους ρυθμούς και σε τόσο μεγάλο πλήθος σημείων πυρηνογένεσης ώστε να σχηματίζονται πολυάριθμες συνεχείς στήλες υδρατμού μέσα στο υγρό (Σχήμα 9). Αυτές οι φυσαλίδες κινούνται συνεχώς ανοδικά μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια. Όπου και σπάζουν απελευθερώνοντας τον υδρατμό που περιέχουν. Οι μεγάλες ροές θερμότητας που προκύπτουν στην συγκεκριμένη περιοχή, οφείλονται στην συνδυασμένη επίδραση εισόδου και εξάτμισης του υγρού.



Σχήμα 9: Βρασμός με πυρηνογένεση κατά το δεύτερο στάδιο B – C (Πηγή: [3])

Σε μεγάλες τιμές της περίσσειας θερμοκρασία ΔT_{sat} , η ταχύτητα πλέον της εξάτμισης της επιφάνειας της συσκευής θέρμανσης φτάνει σε τόσο υψηλές τιμές, ώστε ένα τμήμα της επιφάνειας του να καλύπτεται με φυσαλίδες, εμποδίζοντας το υγρό να φτάσει την επιφάνεια

της συσκευής αυτής και να την βρέξει. Κατά συνέπεια, η ροή θερμότητας αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό καθώς αυξάνεται η τιμή της ΔT_{sat} και προσεγγίζει την μέγιστη τιμή της στο σημείο C. Η ροή θερμότητας στο συγκεκριμένο σημείο ονομάζεται κρίσιμη ή μέγιστη ροή θερμότητας (CHF) q_{max} . Για το νερό, η κρίσιμη ροή θερμότητας υπερβαίνει το 1 MW/m^2 . Από το νόμο ψύξης του Newton ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο σημείο C είναι:

$$h = \frac{q_{max}}{\Delta T_{sat}} = \frac{10^6 \frac{W}{m^2}}{30K} = 3.3 \times 10^4 \frac{W}{m^2 K} \quad (12)$$

Για ολόκληρη την περιοχή του βρασμού με πυρηνογένεση του Σχήματος 6α, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλεται από τα $2000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ως τα $3000 \text{ W/m}^2\text{K}$ τιμές που βρίσκονται μέσα στην περιοχή τιμών που περιλαμβάνονται στο παρακάτω πίνακα 2 και αφορούν το βρασμό.

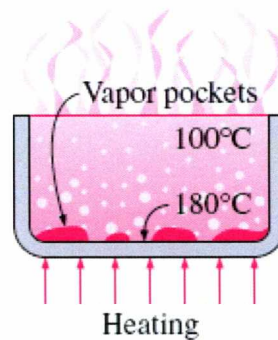
Πίνακας 2: Τυπικές τιμές συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.

Είδος συναγωγής	h (W/m ² K)
Ελεύθερη συναγωγή αερίων	2 - 25
Ελεύθερη συναγωγή υγρών	10 - 10000
Εξαναγκασμένη συναγωγή αερίων	25 - 250
Εξαναγκασμένη συναγωγή υγρών	50 - 20000
Βρασμός και συμπύκνωση	2500 - 100000

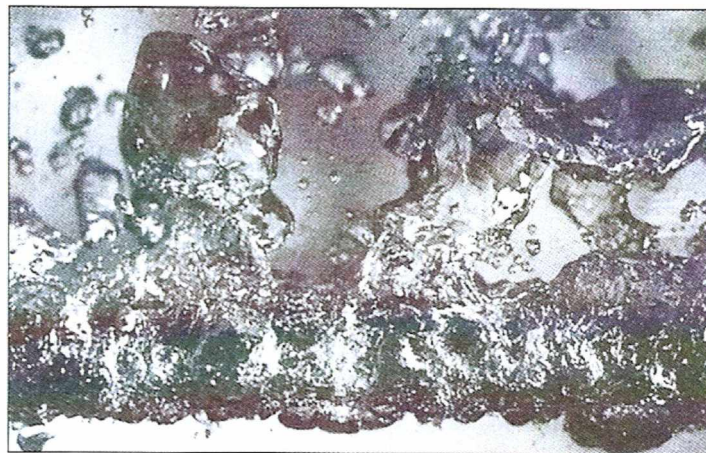
2.2.3 Μεταβατικός βρασμός

Καθώς η θερμοκρασία της συσκευής θέρμανσης και επομένως η διαφορά ΔT_{sat} (περίσσεια θερμοκρασία) αυξάνεται μετά το σημείο C, που αντιστοιχεί στην περιοχή $\Delta T_{sat,C} \leq \Delta T_{sat} \leq \Delta T_{sat,D}$ (όπου $\Delta T_{sat,D} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$), η ροή θερμότητας μειώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 6α. Αυτό οφείλεται στο ότι ένα μεγάλο τμήμα της επιφάνειας της συσκευής θέρμανσης, καλύπτεται από ένα στρώμα υδρατμού σε σύγκριση με εκείνη του υγρού που οφείλεται στο ότι η θερμική αγωγιμότητα των ατμών είναι πολύ μικρότερη από του υγρού. Στην μεταβατική κατάσταση αυτή, εμφανίζονται εν μέρει τόσο ο βρασμός με πυρηνογένεση όσο και ο βρασμός υμένα (Σχήμα 10). Ο βρασμός πυρηνογένεσης στο σημείο C

αντικαθίσταται πλήρως από το βρασμό υμένα στο σημείο D. Στην πράξη η λειτουργία στην περιοχή του μεταβατικού βρασμού, που ονομάζεται επίσης και βρασμός ασταθούς στρώματος, γενικά αποφεύγεται. Για το νερό, εμφανίζεται μεταβατικός βρασμός για τιμές περίσσειας θερμοκρασίας από περίπου 30 °C μέχρι περίπου 120 °C.



Σχήμα 10a: Μεταβατικός βρασμός (Πηγή [3]).



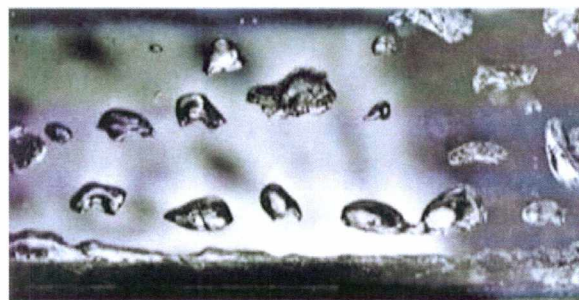
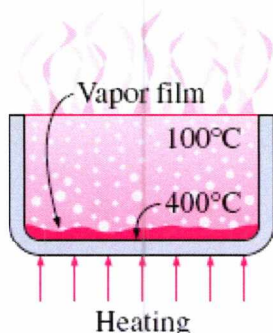
Σχήμα 10b: Μεταβατικός βρασμός (Πηγή [3]).

2.2.4 Βρασμός υμένα

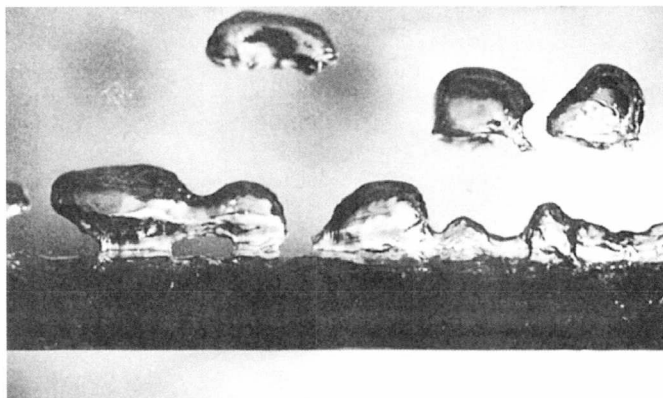
Σε αυτήν την περιοχή, η επιφάνεια της συσκευής καλύπτεται πλήρως από ένα συνεχές σταθερό στρώμα υδρατμού και καλείται βρασμός υμένα. Ο βρασμός υμένα δημιουργείται όταν $\Delta T_{\text{sat}} \geq \Delta T_{\text{sat,D}}$. Το σημείο D, όπου η ροή θερμότητας είναι ελάχιστη (Σχήμα 6a), ονομάζεται σημείο **Leidenfrost**, προς τιμήν του J.C. Leidenfrost, ο οποίος το 1756 παρατήρησε πως τα σταγονίδια του υδρατμού σε πολύ θερμές επιφάνειες κινούνται γρήγορα τριγύρω και σιγά – σιγά εξατμίζονται. Η παρουσία ενός λεπτού στρώματος ατμού ανάμεσα

στην επιφάνεια της συσκευής θέρμανσης και στο υγρό, ευθύνεται για τη χαμηλή ταχύτητα μεταφοράς θερμότητας στην περιοχή βρασμού υμένα. Η ταχύτητα μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται με την αύξηση της περίσσειας θερμοκρασίας, λόγω της μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια της συσκευής θέρμανσης προς το υγρό, διαμέσου του λεπτού στρώματος ατμού, με ακτινοβολία, η οποία γίνεται σημαντική σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Το Σχήμα 11 απεικονίζει τη φύση του σχηματισμού των φυσαλίδων ατμού και την σύνδεση τους με τον βρασμό υμένα.

Όπως παρατήρησε ο Nukiyama στο πείραμα του, μια συνηθισμένη διαδικασία βρασμού, δεν ακολουθεί την καμπύλη βρασμού πέρα από το σημείο C. Αυτός με έκπληξη παρατήρησε, πως όταν η ισχύς που εφαρμοζόταν στο σύρμα νικελίου – χρωμίου το οποίο είναι βυθισμένο σε νερό, υπερέβαινε έστω και ελάχιστα την q_{max} , η θερμοκρασία του σύρματος αυξανόταν ξαφνικά στο σημείο τήξης του (1500 K) με αποτέλεσμα το σύρμα να καίγεται, κάτι που δεν μπορούσε να ελέγξει. Όταν επανέλαβε το πείραμα του με σύρμα πλατίνας το οποίο έχει πολύ υψηλότερο σημείο τήξης (2045 K), κατάφερε να αποφύγει την τήξη και να διατηρήσει τις ροές θερμότητας σε υψηλότερα επίπεδα από την q_{max} . Όταν σταδιακά μείωσε την ισχύ, πήρε την καμπύλη ψύξης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 12 αυτή η καμπύλη χαρακτηρίζεται από μια απότομη μείωση της περίσσειας θερμοκρασίας όταν η ισχύς έφτανε στα επίπεδα της q_{max} . Θα πρέπει να σημειωθεί πως η καμπύλη βρασμού δεν μπορεί να ακολουθήσει το τμήμα της καμπύλης βρασμού που σχετίζεται με τον μεταβατικό βρασμό μετά το σημείο C, εκτός αν μειωθεί ξαφνικά η ισχύς που εφαρμόζεται στο σύρμα.

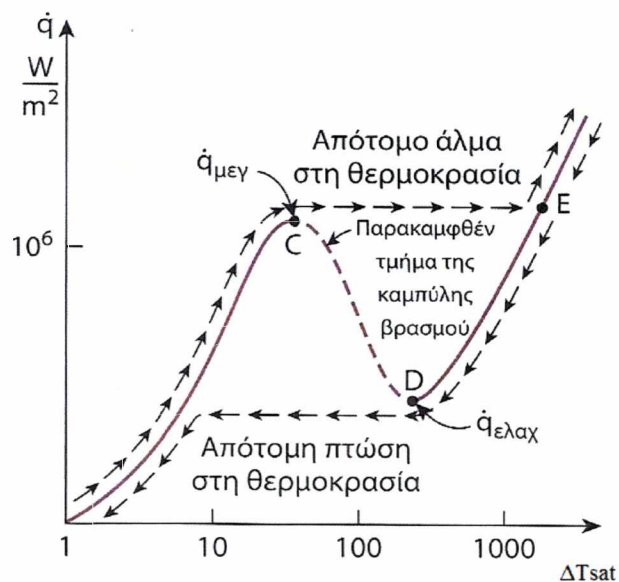


Σχήμα 11a: Βρασμός υμένα (Πηγή [2]).

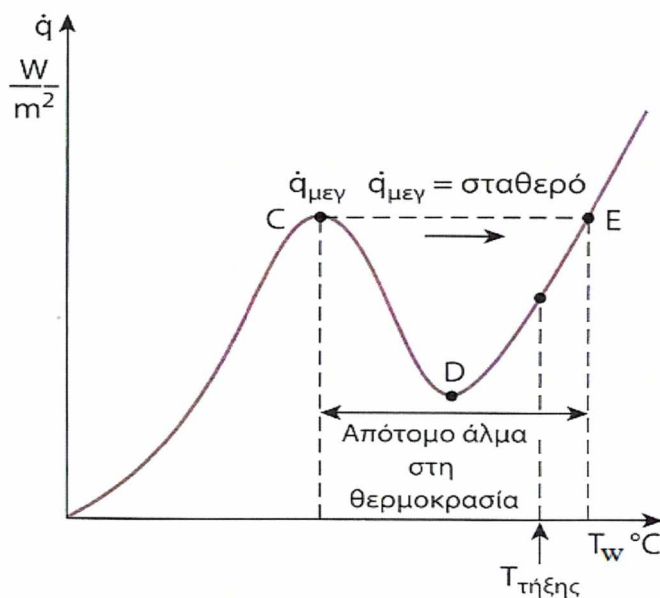


Σχήμα 11b: Βρασμός υμένα (Πηγή [2]).

Η απότομη τήξη του σύρματος κατά τον βρασμό εξηγείται ως εξής: προκειμένου να μεταβούμε σε περιοχές που βρίσκονται πέρα από το σημείο C όπου εμφανίζεται η q_{max} , θα πρέπει να αυξηθεί η θερμοκρασία της επιφάνειας T_w της συσκευής θέρμανσης. Ωστόσο, για να αυξηθεί η T_w , θα πρέπει να αυξηθεί η ροή θερμότητας. Ωστόσο, το ρευστό δεν μπορεί να λάβει αυτήν την αυξημένη θερμική ενέργεια σε περίσσεια θερμοκρασίας αμέσως μόλις μετά το σημείο C. Επομένως, η επιφάνεια της συσκευής θέρμανσης τελικά απορροφά την αυξημένη θερμική ενέργεια, οδηγώντας έτσι σε αύξηση της θερμοκρασίας επιφάνειας T_w . Όμως, σε αυτήν την αυξημένη περίσσεια θερμοκρασία, το ρευστό μπορεί να λάβει ακόμη λιγότερη ενέργεια, αυξάνοντας ακόμη περισσότερο την θερμοκρασία της επιφάνειας της συσκευής θέρμανσης. Αυτό συνεχίζεται μέχρι η θερμοκρασία της επιφάνειας να φτάσει σε ένα σημείο πέρα από το οποίο δεν αυξάνεται άλλο, ενώ η θερμότητα που παρέχεται μπορεί να μεταφέρεται στο ρευστό με σταθερό ρυθμό. Αυτό αντιστοιχεί στο E της καμπύλης βρασμού (Σχήμα 6a), το οποίο σχετίζεται με πολύ υψηλές θερμοκρασίες της επιφάνειας. Επομένως, κάθε προσπάθεια αύξησης της ροής θερμότητας πέρα από το q_{max} θα προκαλέσει απότομη μετατόπιση του σημείου λειτουργίας επί της καμπύλης βρασμού, από το σημείο C στο σημείο E. Ωστόσο, η θερμοκρασία της επιφάνειας που αντιστοιχεί στο σημείο E, βρίσκεται πέρα από το σημείο τήξης των περισσότερων υλικών κατασκευής της συσκευής θέρμανσης, με αποτέλεσμα να σταματά ο βρασμός λόγω τήξης της αντίστασης θέρμανσης. Επομένως, το σημείο C της καμπύλης βρασμού, ονομάζεται και κρίσιμο σημείο, ενώ η ροή θερμότητας στο συγκεκριμένο σημείο ονομάζεται ροή θερμότητας τήξης (Σχήμα 13).



Σχήμα 12: Η πραγματική καμπύλη βρασμού που κατασκευάστηκε με την βοήθεια θερμαινόμενου σύρματος εντός νερού καθώς η ροή θερμότητας αυξήθηκε και στην συνέχεια ελαττώθηκε (Πηγή [4]).

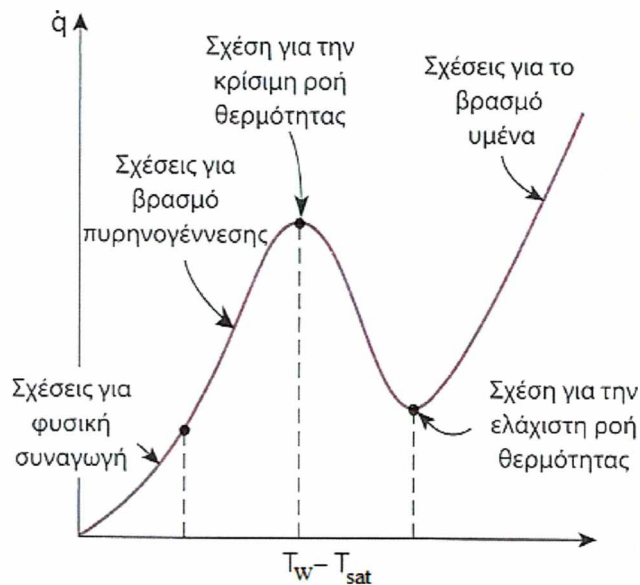


Σχήμα 13: Μια προσπάθεια αύξησης της ροής θερμότητας του βρασμού πάνω από το κρίσιμο σημείο, συχνά προκαλεί απότομο άλμα της θερμοκρασίας του θερμαντικού στοιχείου σε τιμή μεγαλύτερη από το σημείο τήξης με αποτέλεσμα να καίγεται το σύρμα (Πηγή: [3])

Στη πράξη, το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού μεταφοράς θερμότητας βρασμού λειτουργεί ελαφρώς κάτω από την q_{\max} ώστε να αποφευχθεί τυχόν καταστροφικό σταμάτημα του βρασμού.

2.3 Σχέσεις μεταφοράς θερμότητας σε βρασμό υγρού σε δοχείο

Οι καταστάσεις βρασμού που σχολιάζονται παραπάνω διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και έτσι χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές σχέσεις μεταφοράς θερμότητας για τις διάφορες καταστάσεις (Σχήμα 14).



Σχήμα 14: Ο προσδιορισμός της ροής θερμότητας στους διάφορους τύπους βρασμού στηρίζεται στη χρήση διαφορετικών σχέσεων (Πηγή [4]).

2.3.1 Σχέσεις φυσικής συναγωγής

Η μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή σε μια επιφάνεια, εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα της επιφάνειας και από τον προσανατολισμό της. Επίσης, εξαρτάται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ρευστού που χρησιμοποιείται.

Αν και ο μηχανισμός της φυσικής συναγωγής έχει κατανοηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό, η πολύπλοκη κίνηση του ρευστού καθιστά δύσκολη την κατασκευή αναλυτικών εκφράσεων δια της επιλύσεως των εξισώσεων που διέπουν την κίνηση και την ενέργεια. Υπάρχουν βέβαια ορισμένες αναλυτικές σχέσεις για τη φυσική συναγωγή, αλλά αυτές δεν είναι γενικές, αφού ισχύουν για απλά γεωμετρικά σχήματα και κάτω από απλοποιητικές παραδοχές. Επομένως, εκτός από ορισμένες απλές περιπτώσεις, οι σχέσεις μεταφοράς θερμότητας στην

περίπτωση φυσικής συναγωγής βασίζονται σε πειραματικές μελέτες. Από τις πολυάριθμες αυτές σχέσεις διαφορετικής πολυπλοκότητας και ακρίβειας που περιγράφονται για οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα, παρουσιάζονται παρακάτω οι πιο ευρέως χρησιμοποιημένες.

Οι απλές εμπειρικές σχέσεις για το μέσο αριθμό Nusselt, Nu , κατά τη φυσική συναγωγή, έχουν τη μορφή

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C(Gr_L Pr)^n = CRa_L^n \quad (13)$$

όπου Ra_L είναι ο αριθμός Rayleigh, που αποτελεί το γινόμενο του αριθμού Grashof που περιγράφει τη συσχέτιση ανάμεσα στην άνωση και στο ιξώδες μέσα στο ρευστό, και του αριθμού Prandtl που περιγράφει τη συσχέτιση ανάμεσα στην διαχυτότητα της ορμής και τη θερμική διαχυτότητα. Επομένως, ο αριθμός Rayleigh μπορεί να θεωρηθεί από μόνος του ως ο λόγος των δυνάμεων της άνωσης και (του γινομένου) της θερμικής διαχυτότητας και της διαχυτότητας της ορμής. Θα είναι λοιπόν

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L_c^3}{\nu\alpha} \quad (14)$$

Οι τιμές των σταθερών C και n στην παραπάνω σχέση, εξαρτώνται από το γεωμετρικό σχήμα της επιφάνειας και από τον τύπο της ροής, η οποία χαρακτηρίζεται από τις τιμές του Rayleigh. Η τιμή της σταθερά n είναι συνήθως $1/4$ για τη στρωτή ροή και $1/3$ για την τυρβώδη. Η τιμή της σταθερά C συνήθως είναι μικρότερη από μονάδα.

Η σχέση του μέσου αριθμού Nusselt για τον οριζόντιο κύλινδρο δίνεται για περιοχή τιμών $Ra \leq 10^{12}$ ως εξής:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.599}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (15)$$

Όταν δίνεται ο μέσος αριθμός Nusselt και κατά συνέπεια ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, τότε ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή από μια στερεή επιφάνεια που βρίσκεται σε ομοιόμορφη θερμοκρασία T_w προς το περιβάλλον ρευστό, εκφράζεται από το νόμο ψύξης του Newton ως

$$Q = hA_w(T_w - T_\infty)$$

όπου A_w είναι η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και h ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια.

2.3.2 Σχέσεις βρασμού με πυρηνογένεση

Στον τύπο βρασμού με πυρηνογένεση $\Delta T_{\text{sat,A}} \leq \Delta T_{\text{sat}} \leq \Delta T_{\text{sat,C}}$ (Σχήμα 6a) ή αλλιώς σε θερμοκρασίες $5^\circ\text{C} \leq \Delta T_{\text{sat}} \leq 30^\circ\text{C}$, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται κατά πολύ από την φύση της πυρηνογένεσης (δηλαδή από το πλήθος των ενεργών σημείων πυρηνογένεσης στην επιφάνεια, από το ρυθμό σχηματισμού των φυσαλίδων σε κάθε σημείο, κ.λ.π.) που γενικά είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Το είδος και η κατάσταση της θερμικής επιφάνειας, επηρεάζουν επίσης τη μεταφορά θερμότητας. Αυτές οι εμπλοκές δυσχαιρένουν την ανάπτυξη θεωρητικών σχέσεων για τη μεταφορά θερμότητας στον τύπου βρασμού με πυρηνογένεση και θα πρέπει κανείς να βασιστεί σε σχέσεις εμπειρικών δεδομένων. Η σχέση που χρησιμοποιείται περισσότερο για το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα βρασμού με πυρηνογένεση προτάθηκε το 1952 από τον Rohsenow και διατυπώνεται ως εξής

$$q_{\text{πυρηνογέν}} = \mu_L \lambda \left[\frac{g(\rho_L - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{C_{pL}(T_w - T_{\text{sat}})}{C_{sf} h_{fg} \text{Pr}_L^n} \right]^3 \quad (16)$$

Όπου

$Q_{\text{πυρηνογέν}}$ = ροή θερμότητας με πυρηνογένεση, σε w/m^2

μ_L = ιξώδες του υγρού, σε Kg/m s

λ = ενθαλπία εξάτμισης, σε J/Kg

g = επιτάχυνση της βαρύτητας, σε m/s^2

ρ_L = πυκνότητα του υγρού, σε Kg/m^3

ρ_v = πυκνότητα του υδρατμού, σε Kg/m^3

σ = επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια υγρού – υδρατμού, σε N/m

C_{pL} = ειδική θερμότητα του υγρού, σε $\text{J/Kg } ^\circ\text{C}$

T_w = Θερμοκρασία επιφάνειας της συσκευής θέρμανσης, σε $^\circ\text{C}$

T_{sat} = Θερμοκρασία κορεσμού του νερού, σε °C

C_{sf} = Πειραματική σταθερά που εξαρτάται από το συνδυασμό επιφάνειας-ρευστού

Pr_L = Αριθμός Prandtl του ρευστού

n = πειραματική σταθερά που εξαρτάται από το ρευστό.

Αποδεικνύεται εύκολα πως η χρήση των τιμών των φυσικών ποσοτήτων στην εξίσωση Rohsenow εκπεφρασμένων στις παρακάτω μονάδες, οδηγεί στην επιθυμητή μονάδα W/m^2 για τη ροή θερμότητας με βρασμό, απαλλάσσοντας μας έτσι από βαρετές πράξεις όσον αναφορά το χειρισμό των μονάδων μέτρησης.

$$q = \left(\frac{Kg}{ms} \right) \left(\frac{J}{Kg} \right) \left(\frac{\frac{m}{s^2} \frac{Kg}{m^3}}{\frac{N}{m}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\frac{J}{Kg} \text{ } ^\circ C}{\frac{J}{Kg}} \right)^3 = \frac{W}{m} \left(\frac{1}{m^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{W}{m^2}$$

Η επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια υγρού – υδρατμού για το νερό δίνεται από τον Πίνακα 3. Οι τιμές της σταθερά C_{sf} μετριοούνται πειραματικά και δίνονται στον Πίνακα 1 του Κεφαλαίου 1 για διάφορους συνδυασμούς ρευστού – επιφάνειας. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα, αφού έχει βρεθεί πως ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας κατά το βρασμό με πυρηνογέννεση, είναι ουσιαστικά ανεξάρτητες από το γεωμετρικό σχήμα και τον προσανατολισμό της θερμής επιφάνειας. Οι ιδιότητες του ρευστού στην παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να υπολογισθούν στην θερμοκρασία κορεσμού T_{sat} .

Η κατάσταση της επιφάνειας της συσκευής θέρμανσης, επηρεάζει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας, ενώ η εξίσωση Rohsenow που δίνεται παραπάνω, ισχύει για καθαρές επιφάνειες και σχετικά ομαλές επιφάνειες. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν με την εξίσωση Rohsenow παρουσιάζουν σφάλμα της τάξης $\pm 100\%$ για το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη περίπτωση θερμοκρασία κατά $\pm 30\%$ για τη περίπτωση θερμοκρασία που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Επομένως, θα πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα η ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 3: Τιμές επιφανειακής τάσης της διεπιφάνειας υγρού – υδρατμού για το νερό

T (°C)	σ (N/m)	T (°C)	σ (N/m)
0	0,0757	200	0,0377
20	0,0727	220	0,0331
40	0,0696	240	0,0284
60	0,0662	260	0,0237
80	0,0627	280	0,019
100	0,0589	300	0,0144
120	0,055	320	0,0099
140	0,0509	340	0,0056
160	0,0466	360	0,0019
180	0,0422	374	0

2.3.3 Μέγιστη ή κρίσιμη θερμοροή κατά τον στάσιμο βρασμό

Κατά το σχεδιασμό του εξοπλισμού μεταφοράς θερμότητας λόγω βρασμού, είναι εξαιρετικά σημαντικό ο σχεδιαστής να γνωρίζει τη μέγιστη ροή θερμότητας έτσι ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος τήξης και διακοπής του βρασμού. Η μέγιστη (ή κρίσιμη) ροή θερμότητας στο βρασμό όγκου ρευστού με πυρηνογέννεση προσδιορίστηκε θεωρητικά από τον S.S. Kutateladze [10] στη Ρωσία το 1948 και από τον N. Zuber [38] στις Η.Π.Α. το 1958, χρησιμοποιώντας αρκετά διαφορετικές μεθόδους. Αυτό το μέγεθος διατυπώνεται ως

$$q_{\max} = C_{cr} \lambda \left[\sigma g \rho_v^2 (\rho_L - \rho_v) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (17)$$

όπου C_{cr} σταθερά η τιμή της οποίας εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα της συσκευής θέρμανσης. Εξαντλητικές πειραματικές μελέτες του Lienhard [5] και των συνεργατών του, απέδειξαν ότι η τιμή της C_{cr} είναι περίπου ίση με 0,15. Οι ειδικές τιμές της C_{cr} για διάφορα γεωμετρικά σχήματα της συσκευής θέρμανσης, δίνονται στον Πίνακα 4. Θα πρέπει να σημειωθεί, πως οι συσκευές θέρμανσης χωρίζονται σε μεγάλες ή μικρές, με βάση την τιμή του L^* .

Η εξίσωση 17 θα μας δώσει την μέγιστη ροή θερμότητας σε W/m^2 εάν οι ποσότητες χρησιμοποιηθούν με τις μονάδες που προσδιορίστηκαν πιο πριν στις περιγραφές της προηγούμενης ενότητας. Η μέγιστη ροή θερμότητας είναι ανεξάρτητη από το συνδυασμό

ρευστού – επιφάνειας θέρμανσης, καθώς και από το ιξώδες, τη θερμική αγωγιμότητα και την ειδική θερμότητα του ρευστού.

Σημειώστε, πως με την αύξηση της πίεσης, η παράμετρος ρ_v αυξάνεται σε αντίθεση με τις σ και h_{fg} που μειώνονται· επομένως, η μεταβολή της μέγιστης ροής θερμότητας, q_{max} , με την πίεση, εξαρτάται από το πιο φαινόμενο επικρατεί. Οι πειραματικές μελέτες των Cichelli και Bonilla καταδεικνύουν πως η μέγιστη ροή θερμότητας αυξάνεται με την πίεση μέχρι αυτή να προσεγγίσει περίπου το ένα τρίτο της κρίσιμης πίεσης, ενώ στην συνέχεια αρχίζει να μειώνεται και τελικά μηδενίζεται στη θέση της κρίσιμης πίεσης. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η q_{max} είναι ανάλογη προς την h_{fg} , ενώ μεγάλες μέγιστες ροές θερμότητας μπορούν να παρατηρηθούν χρησιμοποιώντας τα ρευστά με μεγάλη ενθαλπία εξάτμισης, όπως είναι το νερό.

Πίνακας 4: Τιμές του συντελεστή C_{cr} για χρήση της εξίσωσης 17 για τη μέγιστη ροή θερμότητας (η αδιάστατη παράμετρος L^* ορίζεται ως $L^*=L[g(\rho_L - \rho_v)/\sigma]^{1/2}$).

Γεωμετρία του στοιχείου θέρμανσης	C_{cr}	Χαρακτηριστική διάσταση του στοιχείου θέρμανσης L	Περιοχή τιμών του L^*
Μεγάλο, οριζόντιο και επίπεδο	0,149	Εύρος ή διάμετρος	$L^* > 27$
Μικρό, οριζόντιο και επίπεδο	18,9	Εύρος ή διάμετρος	$9 < L^* < 20$
Μεγάλος οριζόντιος κύλινδρος	0,12	Ακτίνα	$L^* > 1,2$
Μικρός οριζόντιος κύλινδρος	$0,12 L^{*-0,25}$	Ακτίνα	$0,15 < L^* < 1,2$
Μεγάλη σφαίρα	0,11	Ακτίνα	$L^* > 4,26$
Μικρή σφαίρα	$0,227 L^{*-0,5}$	Ακτίνα	$0,15 < L^* < 4,26$

Η κρίσιμη θερμοροή στο στάσιμο βρασμό είναι η θερμοροή που αντιστοιχεί στην μετάπτωση από το βρασμό με πυρηνογένεση στο βρασμό υμένα. Όταν η υπερθέρμανση της επιφάνειας ξεπεράσει την τιμή που αντιστοιχεί στις κρίσιμες συνθήκες και ιδιαίτερα για μεταφορά με σταθερή θερμοροή, η θερμοκρασία της επιφάνειας μπορεί να αυξηθεί πολύ απότομα και να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού. Ακόμη και για μεταφορά θερμότητας από επιφάνεια σταθερής θερμοκρασίας, υπέρβαση των κρίσιμων συνθηκών οδηγεί σε απότομη επιδείνωση της απόδοσης της συσκευής. Για όλους αυτούς τους λόγους, η πρόβλεψη της κρίσιμης θερμοροής είναι βασική προϋπόθεση σχεδιασμού συσκευών εξάτμισης.

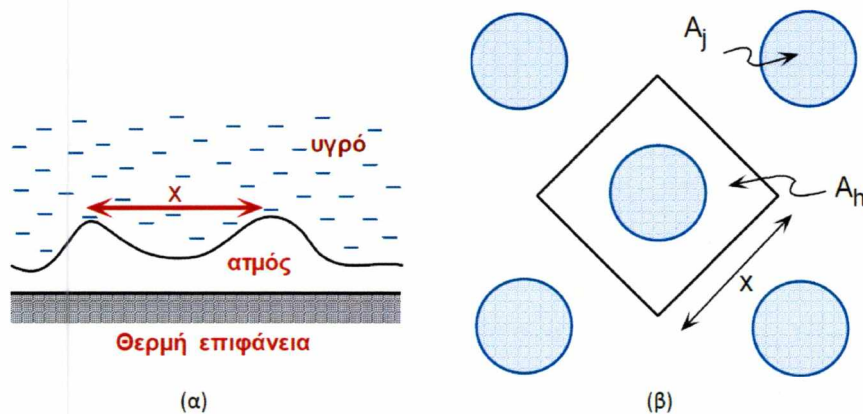
Η θεωρία που ερμηνεύει το φαινόμενο αυτό βασίζεται:

α) σε ανάλυση της ευστάθειας υμένα ατμού πάνω στη θερμαντική επιφάνεια, και

β) σε ανάλυση της ευστάθειας της δέσμης ατμού που απελευθερώνεται από την επιφάνεια προς την μάζα του υγρού.

Και τα δυο παραπάνω φαινόμενα είναι εφαρμογές της βασικής αστάθειας του Kelvin – Helmholtz για δυο ιδανικά ρευστά. Το ενδιαφέρον είναι ότι η σχετικά απλή αυτή θεωρία δίνει μια εποπτική εικόνα του φυσικού μηχανισμού και ταυτόχρονα βρίσκεται σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Υποθέτοντας ο ατμός που παράγεται στη θερμή επιφάνεια σχηματίζει έναν υμένα, τότε το στρώμα αυτού του ατμού βρίσκεται κάτω από τη μάζα του (πυκνότερου) υγρού (Σχήμα 15α). Η κατακόρυφη αυτή διάταξη των δυο ρευστών, με το πυκνότερο στην κορυφή, είναι υδροδυναμικά ασταθής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη κυμάτων στη διεπιφάνεια υγρού – ατμού και την κατάρρευση του υμένα.



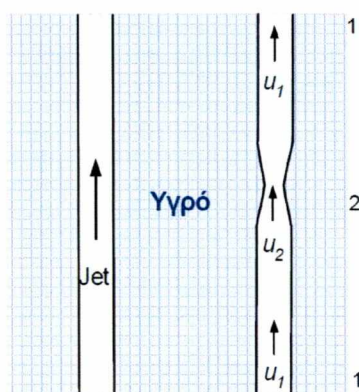
Σχήμα 15: (α) Ασταθής υμένας ατμού λόγω της υπερκείμενης στιβάδας υγρού. (β) Ιδεατή διάταξη δεσμών ατμού που διαφεύγουν από επιφάνεια βρασμού (Πηγή [1]).

Το μήκος του κύματος με τον ταχύτερο ρυθμό ανάπτυξης καθορίζει την απόσταση μεταξύ των διαδοχικών θέσεων διαφυγής του ατμού. Θεωρείται δηλαδή ότι οι κορυφές των κυμάτων καθορίζουν τη θέση των δεσμών ατμού που διαφεύγουν προς την κύρια μάζα του υγρού (Σχήμα 15α). Το χαρακτηριστικό αυτό μήκος κύματος δίνεται από την σχέση

$$L = C \left[\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

όπου η σταθερά C παίρνει την τιμή $C = 2\pi\sqrt{3}$. Ιδεατή διάταξη των δεσμών ατμού πάνω σε επίπεδη επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 15β και αντιστοιχεί σε ένα τετράγωνο πλέγμα.

Επίσης, μια δέσμη ατμού που κινείται μέσα σε υγρό είναι εν δυνάμει ασταθής. Η αστάθεια αυτή γίνεται διαισθητικά κατανοητή αν θεωρηθεί ότι η διατομή της δέσμης στενεύει προς στιγμήν σε κάποιο σημείο της (σημείο 2 στο Σχήμα 16). Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας $u_2 > u_1$ και συνεπώς από την εξίσωση του Bernoulli $p_2 < p_1$. Έτσι, αν η διεπιφάνεια είναι ευσταθής στο σημείο (1), τότε στο (2) η πίεση του περιβάλλοντος υγρού θα υπερτερεί της πίεσης ατμού, με αποτέλεσμα την τάση σύσφιξης της στένωσης, αποκοπής της ροής και μετατροπής της δέσμης σε φυσαλίδες.



Σχήμα 16: Ασταθής δέσμη ατμού μέσα στην κυρίως μάζα του υγρού (Πηγή [1]).

Το φαινόμενο αυτό είναι συνέπεια της αστάθειας Kelvin – Helmholtz. Η αστάθεια είναι τόσο ισχυρότερη όσο ταχύτερα κινείται ο ατμός. Αντίθετα, στην ανάπτυξη της αστάθειας αντιτίθεται η επιφανειακή τάση, η οποία τείνει να διατηρήσει τη διεπιφάνεια με όσον το δυνατόν μικρότερη καμπυλότητα. Ακριβής ανάλυση δείχνει ότι η δέσμη γίνεται ασταθής και διασπάται όταν η ταχύτητα ανόδου του ατμού ξεπεράσει την τιμή

$$u_g \geq \left(\frac{2\pi\sigma}{\rho_g \lambda_{KH}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

όπου λ_{KH} είναι το μήκος κύματος της αναπτυσσόμενης αξονοσυμμετρικής, περιοδικής διαταραχής. Η ταχύτητα, u_g , του ατμού γίνεται ελάχιστη όταν το μήκος του κύματος, λάβει

την εξίσωση 18. Άρα, η διάσπαση της δέσμης αναμένεται να συμβεί σε αυτήν την ταχύτητα, και το μέγεθος των φυσαλίδων ατμού είναι ανάλογο του λ_{KH} .

2.3.4 Ελάχιστη ροή θερμότητας

Το μεταβατικό καθεστώς βρασμού έχει μικρό πρακτικό ενδιαφέρον, καθώς μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τον έλεγχο της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Ενώ δεν υπάρχει κατάλληλη θεωρία έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό, συνθήκες που μπορεί να χαρακτηρίζονται από περιοδικά, ασταθή επαφή μεταξύ του υγρού και της θερμαινόμενης επιφάνειας. Ωστόσο, το ανώτατο όριο του εν λόγω καθεστώτος είναι ενδιαφέρον, διότι αντιστοιχεί στο σχηματισμό ενός σταθερού υμένα ατμών και με ελάχιστη ροή θερμότητας.

Εάν η ροή θερμότητας πέφτει κάτω από αυτό το ελάχιστο, ο υμένας θα καταρρεύσει, προκαλώντας την επιφάνεια να κρυώσει και την επανάληψη του βρασμού πυρήνων.

Η ελάχιστη ροή θερμότητας, η οποία εμφανίζεται στο σημείο Leidenfrost, έχει πρακτικό ενδιαφέρον αφού παριστάνει το κατώτερο όριο ροής της θερμότητας στο σύστημα βρασμού υμένα. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία της ευστάθειας, ο Zuber [38] υπέθεσε ότι καθώς ο ΔT μειώνεται στο βρασμό με υμένα, ο ρυθμός δημιουργίας ατμού γίνεται πολύ μικρός για να συντηρήσει τη δράση κυμάτων Taylor που χαρακτηρίζουν το βρασμό με υμένα. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης για οριζόντιο θερμαντήρα δίνουν

$$q_{\min} = C \rho_v \lambda^4 \sqrt{\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_v)}{(\rho_L + \rho_v)^2}} \quad (20)$$

όπου η σταθερά C προσδιορίστηκε ίση με 0,09 από τον Berenson το 1961. Αυτός αντικατέστησε τη θεωρητικά προσδιορισμένη τιμή $\pi/24$ με την τιμή 0,09 έτσι ώστε να ταιριάζει καλύτερα με τα πειραματικά δεδομένα. Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση μπορεί να παρουσιάσει σφάλμα 50 τοις εκατό ή μεγαλύτερο.

Η λειτουργία στην περιοχή μεταβατικού βρασμού ($30 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T_{\text{sat}} \leq 120 \text{ }^\circ\text{C}$) συνήθως αποφεύγεται στη σχεδίαση του εξοπλισμού μεταφοράς θερμότητας και για το λόγο αυτό δεν έχει καταβληθεί κάποια σοβαρή προσπάθεια για ανάπτυξη γενικών εκφράσεων για την μεταφορά θερμότητας με βρασμό σε αυτή την περιοχή. Ωστόσο, το άνω (μέγιστη μεταφορά

θερμότητας q_{\max}) και το κάτω (ελάχιστη μεταφορά θερμότητας q_{\min}) όριο αυτής της περιοχής παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τους σχεδιαστές του εξοπλισμού μεταφοράς θερμότητας.

2.3.5 Σχέσεις βρασμού με υμένα

Σε περίσσεια θερμοκρασία πέρα από το σημείο Leidenfrost, ένα συνεχές στρώμα ατμού, πλημμυρίζει την επιφάνεια και δεν υπάρχει επαφή μεταξύ της υγρής φάσης και της επιφάνειας. Επειδή οι συνθήκες στο σταθερό στρώμα ατμού φέρει μια ισχυρή ομοιότητα με εκείνα του στρώματος της γραμμικής συμπύκνωσης. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα, το οποίο εφαρμόζεται στον υμένα σε ένα κύλινδρο ή σφαίρα με διάμετρο D , είναι της μορφής

$$\overline{Nu}_D = \frac{\overline{h}_{conv} D}{k_v} = C \left[\frac{g(\rho_L - \rho_v) h'_{fg} D^3}{\nu_v k_v (T_w - T_{sat})} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (21)$$

Η σταθερά συσχέτισης C είναι 0,62 για οριζόντιους κυλίνδρους και 0,67 για τις σφαίρες. Η διορθωμένη λανθάνουσα θερμότητα h'_{fg} για την ενέργεια που απαιτείται για την διατήρηση της θερμοκρασίας μέσα στον υμένα ατμού πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού. Αν και μπορεί να προσεγγιστεί όπως, $h'_{fg} = h_{fg} + 0.80 C_{p,v} (T_w - T_{sat})$ είναι γνωστό ότι εξαρτάται από τον αριθμό Prandtl. Οι ιδιότητες των ατμών αξιολογούνται στην πίεση του συστήματος και τη θερμοκρασία του υμένα, $T_f = (T_w - T_{sat})/2$, ενώ ρ_L και h_{fg} αξιολογούνται στην θερμοκρασία κορεσμού.

Σε υψηλές θερμοκρασίες επιφάνειας ($T_w \geq 300^\circ C$), η μεταφορά θερμότητας στα άκρα του λεπτού στρώματος υδρατμού με ακτινοβολία γίνεται σημαντική και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Επειδή η ακτινοβολία δρα για να αυξήσει το πάχος του υμένα, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι η ακτινοβολία και οι διαδικασίες συναγωγής είναι απλά προσθετικές. Ο Bromley διερεύνησε για τον βρασμό υμένα από την εξωτερική επιφάνεια των οριζόντιων σωληνών και πρότεινε τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από μια υπερβατική εξίσωση της μορφής

$$(\overline{h})^{\frac{4}{3}} = (\overline{h}_{conv})^{\frac{4}{3}} + \overline{h}_{rad} (\overline{h})^{\frac{1}{3}} \quad (22)$$

Αν το $\bar{h}_{rad} < \bar{h}_{conv}$ η εξίσωση απλοποιείται ως εξής

$$\bar{h} = \bar{h}_{conv} + \frac{3}{4} \bar{h}_{rad} \quad (23)$$

όπου ο αποτελεσματικός συντελεστής ακτινοβολίας \bar{h}_{rad} εκφράζεται ως εξής

$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_w^4 - T_{sat}^4)}{T_w - T_{sat}} \quad (24)$$

όπου ε είναι η ικανότητα της ακτινοβολίας του στερεού και σ η σταθερά του Stefan – Boltzmann.

Επομένως, η ροή θερμότητας για το βρασμό υμένα σε έναν οριζόντιο κύλινδρο ή σφαίρα με διάμετρο D δίνεται από την σχέση

$$q_{υμένα} = C_{υμένα} \left[\frac{g k_v \rho_v (\rho_L - \rho_v) [h_{fg} + 0.4 C_{p,v} (T_w - T_{sat})]}{\mu_v D (T_w - T_{sat})} \right]^{\frac{1}{4}} (T_w - T_{sat}) \quad (25)$$

όπου k_v είναι η θερμική αγωγιμότητα του υδρατμού σε W/m K και οι υπόλοιπες ιδιότητες είναι ίδιες με αυτές που προαναφέραμε παραπάνω στην υποενότητα 2.3.2 .

Τέλος από την εξίσωση 23 θα μπορούσαμε να πούμε ότι ισχύει

$$q_{\Sigma \nu \nu} = q_{υμένα} + \frac{3}{4} q_{rad} \quad (26)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί, πως η επιτάχυνση της βαρύτητας g της οποίας η τιμή είναι 9,81 m/s στο επίπεδο της θάλασσας, εμφανίζεται σε όλες τις σχέσεις για τη μεταφορά θερμότητας βρασμού. Οι επιδράσεις της χαμηλής και υψηλής βαρύτητας (όπως συναντώνται στις εφαρμογές διαστημοπλοίων και στις μηχανές με τουρμπίνες) μελετώνται πειραματικά. Οι μελέτες επιβεβαιώνουν πως η κρίσιμη ροή θερμότητας και η ροή θερμότητας βρασμού είναι ανάλογες της ποσότητας $g^{1/4}$. Ωστόσο καταδεικνύουν, πως η ροή θερμότητας στον βρασμό με πυρηνογέννεση είναι πρακτικά ανεξάρτητη από τη βαρύτητα g , αντί να είναι ανάλογη του $g^{1/2}$, όπως υπαγορεύει η εξίσωση 16.

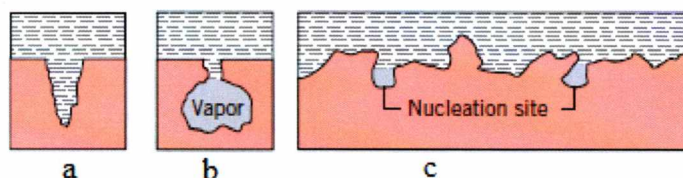
2.4 Παραμετρικές επιδράσεις βρασμού σε δοχείο

Σε αυτήν την ενότητα θα εξετάσουμε άλλες παραμέτρους που μπορούν να επηρεάσουν το βρασμό σε δοχείο, περιορίζοντας την προσοχή μας στο βαρυτικό πεδίο, στο υπόψυκτο υγρό και τις συνθήκες τις στερεής επιφάνειας.

Η επιρροή του βαρυτικού πεδίου σχετικά με τον βρασμό πρέπει να θεωρηθεί σε εφαρμογές που αφορούν διαστημικά ταξίδια και περιστρεφόμενα μηχανήματα. Αυτή η επιρροή είναι εμφανής από την εμφάνιση της επιτάχυνσης της βαρύτητας g στις προηγούμενες εκφράσεις. Ο Siegel, κατά την αναθεώρηση του αποτελέσματος για την χαμηλή βαρύτητα, επιβεβαιώνει ότι η $g^{1/4}$ εξάρτηση στις εξισώσεις (17), (20) και (21) (για τα μέγιστα και ελάχιστα επίπεδα θερμότητας και τον βρασμό υμένα) είναι σωστό η τιμή του g να είναι χαμηλή έως $0,10 \text{ m/s}^2$. Για το βρασμό πυρήνων τα στοιχεία δείχνουν, παρόμοια αποτελέσματα, αν και κοντά στο σημείο που αρχίζει η πυρηνογέννεση (ONB), η βαρύτητα μπορεί να επηρεάσει την φυσαλίδα που προκαλείται από την συναγωγή.

Εάν το υγρό σε ένα σύστημα βρασμού σε δοχείο διατηρείται σε μια θερμοκρασία η οποία είναι μικρότερη από την θερμοκρασία κορεσμού, το υγρό λέγεται ότι υποψύχεται, όπου $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_l$. Στο καθεστώς φυσικής συναγωγής, οι αυξήσεις ροής θερμότητας συνήθως ως το $(T_s - T_l)^n$ ή $(\Delta T_e - \Delta T_{sub})^n$ όπου $\frac{5}{4} \leq n \leq \frac{4}{3}$, ανάλογα με την γεωμετρία της θερμαινόμενης επιφάνειας. Αντίθετα, για το βρασμό πυρήνων, η επίδραση της υπόψυξης θεωρείται αμελητέα, αν και η μέγιστη και η ελάχιστη ροή θερμότητας, q_{max} και q_{min} , είναι γνωστό ότι αυξάνουν γραμμικά με το ΔT_{sub} . Για το βρασμό υμένα, η ροή θερμότητας αυξάνεται έντονα με την αύξηση της ΔT_{sub} . Η επιρροή της τραχύτητας της επιφάνειας (με κατεργασία, με αυλάκωση κ.λ.π.) σχετικά με τις μέγιστες και ελάχιστες ροές θερμότητας και για τον βρασμό υμένα είναι αμελητέα. Ωστόσο, όπως αποδεικνύεται από τον Berenson, η αυξημένη επιφανειακή τραχύτητα μπορεί να προκαλέσει μια μεγάλη αύξηση στη ροή θερμότητας για τον βρασμό πυρήνων. Όπως στο Σχήμα 17 απεικονίζεται, μια τραχεία επιφάνεια που έχει πολλές κοιλότητες που εξυπηρετούν στην παγίδευση των ατμών και την δημιουργία της φυσαλίδας.

Συνεπάγεται ότι η πυκνότητα σχηματισμού πυρήνων για μια τραχιά επιφάνεια μπορεί να είναι ουσιαστικά μεγαλύτερη από ότι για μια λεία επιφάνεια. Ωστόσο, κάτω από παρατεταμένο βρασμό, οι επιδράσεις της επιφανειακής τραχύτητας γενικά μειώνεται, υποδεικνύοντας ότι οι νέοι, μεγάλοι χώροι που δημιουργούνται από την τραχύτητα δεν είναι σταθερές πηγές της παγίδευσης των ατμών.



Σχήμα 17: Σχηματισμός των θέσεων πυρήνων. (a) Διαβρεχόμενη κοιλότητα χωρίς παγιδευμένο ατμό, (b) Επαναισαγωγή υγρού με παγιδευμένο ατμό, (c) Διευρυμένο προφίλ μια τραχιά επιφάνειας (Πηγή [2]).

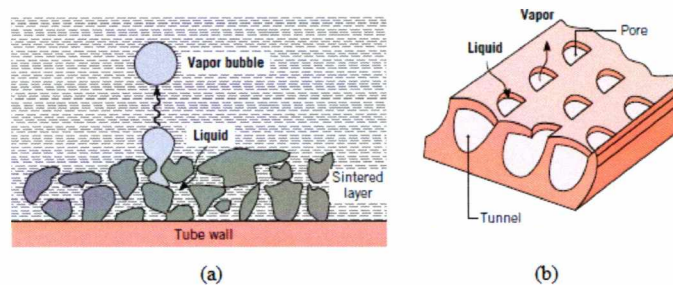
2.5 Ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας κατά το βρασμό σε δοχείο

Οι σχέσεις μεταφοράς θερμότητας βρασμού όγκου ρευστού που δίνονται παραπάνω ισχύουν για τις ομαλές επιφάνειες. Παρακάτω, σχολιάζονται ορισμένες μέθοδοι ενίσχυσης της μεταφοράς θερμότητας στο βρασμό σε δοχείο.

Επισημάνθηκε νωρίτερα, πως ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα βρασμού με πυρηνογέννεση εξαρτάται ισχυρά από το πλήθος των ενεργών σημείων πυρηνογέννεσης στην επιφάνεια και από το ρυθμό σχηματισμού φυσαλίδων σε κάθε σημείο. Επομένως, η οποιαδήποτε τροποποίηση ενισχύει την πυρηνογέννεση στην επιφάνεια θέρμανσης, θα ενισχύσει και την μεταφορά θερμότητας στο βρασμό με πυρηνογέννεση. Παρατηρείται πως οι ανωμαλίες στην επιφάνεια θέρμανσης, συμπεριλαμβανομένης της τραχύτητας των ρύπων, χρησιμεύουν ως επιπλέον σημεία πυρηνογέννεσης κατά την διάρκεια του βρασμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 17. Οι πρώτες φυσαλίδες, το πιθανότερο είναι να σχηματιστούν στα σημεία που έχουν περισσότερες γρατσουνιές. Οι γρατσουνιές αυτές λειτουργούν σαν «Φωλιές» για το σχηματισμό φυσαλίδων και επομένως αυξάνουν τον ρυθμό αυτού του σχηματισμού. Ο Berensen απέδειξε ότι η ροή θερμότητας στο σύστημα του βρασμού με πυρηνογέννεση μπορεί να αυξηθεί κατά ένα παράγοντα ίσο με 10 αν εκτραχυνθεί η επιφάνεια θέρμανσης. Ωστόσο, αυτοί οι υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας, δεν διατηρείται για πολύ, αφού η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας φθίνει με τον χρόνο και η ροή

θερμότητας τελικά πέφτει στις τιμές των ομαλών επιφανειών. Η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας είναι αμελητέα στην κρίσιμη ροή θερμότητας και στη ροή θερμότητας κατά τον βρασμό υμένα (λεπού στρώματος).

Στην αγορά κατασκευάζονται και διατίθενται επιφάνειες που παρέχουν σε μόνιμη βάση ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας στο βρασμό με πυρηνογέννεση. Η ενίσχυση της πυρηνογέννεσης και επομένως η μεταφορά θερμότητας σε τέτοιες ειδικές επιφάνειες, επιτυγχάνεται είτε με επικάλυψη της επιφάνειας από ένα λεπτό στρώμα (πολύ λεπτότερο από 1 χιλιοστό) πολύ πορώδους υλικού ή με σχηματισμό κοιλοτήτων πάνω στην επιφάνεια με μηχανικά μέσα, ώστε να διευκολύνεται ο συνεχής σχηματισμός υδρατμών. Οι επιφάνειες αυτού του είδους, ενισχύουν τη μεταφορά θερμότητας στο σύστημα βρασμού με πυρηνογέννεση κατά ένα παράγοντα μέχρι και 10 και την κρίσιμη ροή θερμότητας κατά ένα παράγοντα ίσο με 3. Η ενίσχυση που παρέχει ένα τέτοιο επεξεργασμένο υλικό με επιφάνεια τραχυνόμενη με μηχανικά μέσα, το thermoexcel-E, παρουσιάζεται στο σχήμα 18. Η χρήση επιφανειών με περύγια είναι επίσης γνωστό ότι ενισχύει τη μεταφορά θερμότητας βρασμού με πυρηνογέννεση καθώς και την κρίσιμη ροή θερμότητας.



Σχήμα 18: Επιφάνεια ενισχυμένη για αύξηση του βρασμού με πυρηνογέννεση (a) Με γυάλινη επίστρωση, (b) Με διπλή είσοδο στην κοιλότητα (Πηγή [2]).

Κεφάλαιο 3 Μηχανισμός πυρηνογέννησης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο κάναμε μια συνοπτική αναφορά στην φάση της πυρηνογέννησης, σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση του μηχανισμού της πυρηνογέννησης, όπως επίσης θα αναφερθεί η ανάπτυξη της φυσαλίδας σε μια στερεή επιφάνεια. Τελειώνοντας θα αναφερθούν τα χαρακτηριστικά αναχώρησης μιας φυσαλίδας από μια στερεή επιφάνεια.

3.1 Μηχανισμός της πυρηνογέννησης

Η επίδραση μιας ιδεατής επιφανειακής μικροκοιλότητας φαίνεται στο Σχήμα 19. Όταν βρέχεται μια επιφάνεια, το υγρό εμποδίζεται τόσο από την επιφανειακή τάση από την είσοδο του στις εν λόγω οπές, όσο και από τους θύλακες ατμού ή αερίου που σχηματίζονται. Αυτές οι μικρές οπές είναι τα σημεία τα οποία εμφανίζονται οι φυσαλίδες. Στον πυθμένα της οπής, η φυσαλίδα αναπτύσσεται προφυλαγμένη και παρουσιάζει μικρή ακτίνα καμπυλότητας λόγω της συνύπαρξης με το παγιδευμένο αέρα.

Για να δούμε πως λειτουργούν οι οπές ως σημεία, δείτε το Σχήμα 19. Υποθέτοντας ότι έχουμε μια σφαιρική φυσαλίδα κορεσμένου ατμού που βρίσκεται σε ισορροπία με ένα υπέρθερμο υγρό. Για να προσδιοριστεί το μέγεθος μια τέτοιας φυσαλίδας, θα επιβάλλουμε τους όρους της μηχανικής και της θερμικής ισορροπίας.

Η φυσαλίδα θα είναι σε μηχανική ισορροπία όταν η διαφορά πίεσης ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό της φυσαλίδας εξισορροπείται από τις δυνάμεις της επιφανειακής τάσης σ , όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 20. Ενώ η θερμική ισορροπία απαιτεί ότι η θερμοκρασία θα πρέπει να είναι ίδια μέσα και έξω από την φυσαλίδα, και δεδομένου του ατμού στο εσωτερικό του θα πρέπει να είναι κορεσμένος σε T_w λόγω ότι είναι σε επαφή με το υγρό, οπότε η ισορροπία των δυνάμεων είναι:

$$p_B = p + \frac{2\sigma}{R_b} \Rightarrow R_b = \frac{2\sigma}{p_B - p} \quad (27)$$

όπου p_B είναι η πίεση μέσα στην φυσαλίδα σε N/m^2 , p η πίεση στο υγρό σε N/m^2 , σ η επιφανειακή τάση N/m και R_b η ακτίνα της φυσαλίδας σε μέτρα.

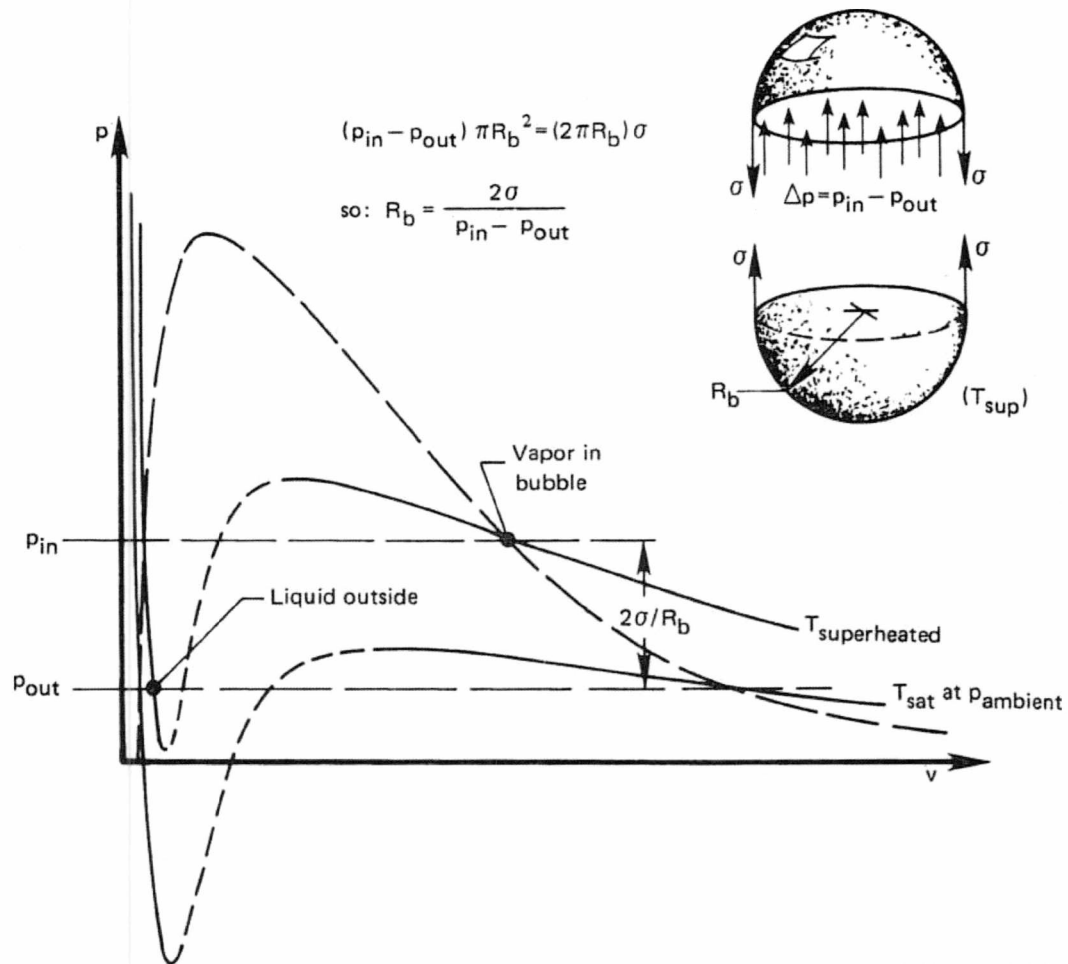


Σχήμα 19: Σχηματική παράσταση στερεής επιφάνειας με τραχύτητα και ρωγμές καθώς και με θύλακες αερίου που χρησιμεύουν ως θέσεις πυρηνογένεση (Πηγή [5]).

Το διάγραμμα $P - V$ στο Σχήμα 20 δείχνει τα σημεία της κατάστασης του εσωτερικού ατμού και εξωτερικού υγρού για μια φυσαλίδα σε ισορροπία. Παρατηρείτε ότι το εξωτερικό υγρό υπερθερμαίνεται με $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$ πάνω από το σημείο βρασμού του με την ατμοσφαιρική πίεση, ενώ του ατμού στο εσωτερικό παρατηρήθηκε αυξημένη πίεση από την επιφανειακή τάση.

Λόγω της επιφανειακής τάσης, η πίεση στο εσωτερικό είναι υψηλότερη της πίεσης του υγρού γύρω από τη φυσαλίδα, και μάλιστα η διαφορά μεγαλώνει όσο μικρότερη είναι η διάμετρος της φυσαλίδας. Έτσι, η θερμοκρασία για τον ευσταθή σχηματισμό φυσαλίδας ορισμένου μεγέθους είναι η θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί στη πίεση, p_B , στο εσωτερικό της φυσαλίδας και όχι στη πίεση, p , του συστήματος.

Έτσι, καθώς η θερμοκρασία της επιφάνειας του θερμαντήρα αυξάνεται, θα πάρουμε όλο και υψηλότερες τιμές $p_B - p$ και η ακτίνα ισορροπίας, R_b , θα μειωθεί σύμφωνα με την εξίσωση 27. Επίσης, προκύπτει ότι και οι μικρότερες οπές ατμού θα ενεργοποιήσουν την ανάπτυξη των φυσαλίδων καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Κατά προσέγγιση μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την εξίσωση 27 για να καθορίσετε την ακτίνα αυτήν των οπών ατμού που χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό πυρήνων. Ακριβείς εκτιμήσεις έγιναν με την θεωρία της φυσαλίδας, το πιο πρόσφατο έργο του Rohsenow και των συνεργατών του.



Σχήμα 20: Προϋποθέσεις που απαιτούνται για την ταυτόχρονη μηχανική και θερμική ισορροπία της φυσαλίδας ατμού (Πηγή [5]).

3.2 Ταξινόμηση κατά μέγεθος των ενεργών θέσεων σχηματισμού πυρήνων

Μόνο ένα πολύ μικρό κλάσμα των ραγμών και κοιλοτήτων σε μια επιφάνεια είναι σε θέση να δράσουν ως θέσεις πυρήνωσης αποτελεσματικά. Για να το εξηγήσουμε αυτό, είναι αναγκαίο να εξετάσουμε τι συμβαίνει όταν μια αρχική στεγνή επιφάνεια είναι πλημμυρισμένη με υγρό [Bankoff 1959] (Σχήμα 21). Το προωθούμενο υγρό θα παγίσει ένα μίγμα αέρα και ατμού στη χαραμάδα (Σχήμα 21α). Ο αέρας θα διαλυθεί γρήγορα και, αν το υγρό διαβρέχει τα τοιχώματα της κοιλότητας ($\theta < 90^\circ$), τότε η εναπομένουσα πίεση ατμών θα είναι ανεπαρκής για την εξισορρόπηση των δυνάμεων επιφανειακής τάσης με αποτέλεσμα την πλήρη διείσδυση του υγρού στη βάση της αυλάκωσης (Σχήμα 21β). Μια κοιλότητα που είναι εντελώς γεμάτη με υγρό δεν μπορεί να λειτουργήσει ως μια τοποθεσία για την δημιουργία θέσεων πυρήνων. Εάν, ωστόσο, τα τοιχώματα της κοιλότητας είναι ανεπαρκώς

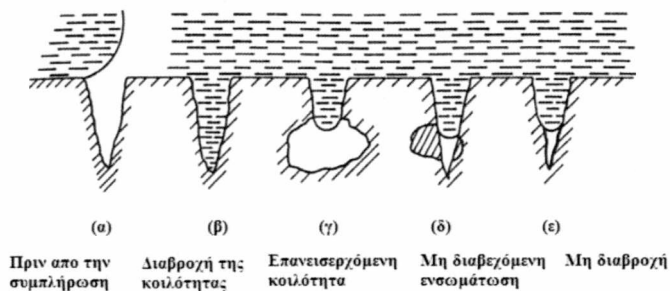
διαβρεχόμενα ή έχουν ακανόνιστο σχήμα, η καμπυλότητα της διασύνδεσης μπορεί να αντιστραφεί έτσι ώστε δυνάμεις της επιφανειακής τάσης να αντιστέκονται στην περαιτέρω διεύθυνση ακόμη και όταν η πίεση του ατμού στην κοιλότητα είναι αμελητέα. Κατά την διάρκεια της μετέπειτα θέρμανσης η πίεση ατμών αυξάνεται απότομα, με βάση τη διεπιφάνεια πίσω μέχρι το στόμιο της κοιλότητας. Σταθεροποίηση της διεπιφάνειας σε μια ρωγμή μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα μιας αρχικής διερεύνησης (Σχήμα 21γ), ως αποτέλεσμα μιας μη βρεχόμενης ενσωμάτωσης, ας πούμε, μιας μεταλλικής επιφάνειας (Σχήμα 21δ), είτε ως αποτέλεσμα ενός φιλμ επιφάνειας μη διαβρεχόμενης (Σχήμα 21ε). Σε αυτήν την τελευταία περίπτωση όλη η επιφάνεια μπορεί να καλύπτεται από ένα τέτοιο φιλμ. Όταν είναι πλημμυρισμένη η επιφάνεια του υγρού ωθείται μέσα στην κοιλότητα από την εφαρμοζόμενη πίεση του υγρού. Εάν εφαρμόζεται θερμότητα στην επιφάνεια διαβροχής μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα της διάλυσης του φιλμ σε ένα υγρό διαλύτη, ή, στην περίπτωση των υγρών μετάλλων, μιας χημικής αντίδρασης μεταξύ της διαβρεχόμενης επιφάνειας και του υγρού μετάλλου. Η πυρήνωση στην συνέχεια θα κινηθεί από το μέγεθος των ατμών σε ένα αρχικό στάδιο που δίνεται από την ελάχιστη ακτίνα στην οποία το υγρό έχει διεισδύει μέσα στην κοιλότητα. Έτσι

$$R = \frac{2\sigma}{p_B - p} \quad (28)$$

Η σχέση αυτή δίνει επίσης την ελάχιστη ακτίνα του στομίου μιας επαναεισερχόμενης κοιλότητας για την περίπτωση όπου το $\theta < 90^\circ$. Μια σειρά πειραματικών επιβεβαιώσεων της μεθόδου του χαρακτηριστικού μεγέθους των ενεργών θέσεων έχουν επιχειρηθεί με διαφόρους βαθμούς επιτυχίας από τους Holtz το 1966, Fabric το 1964, Griffith και Snyder το 1964 και Dwyer 1969.

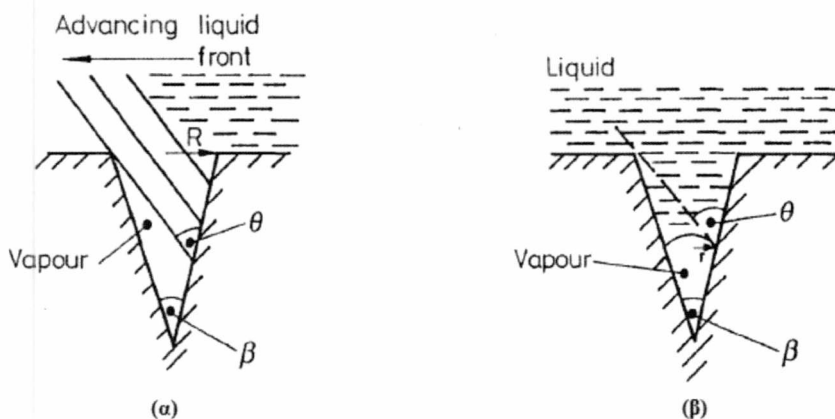
Ο Lorenz et al ανέπτυξε ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψη τη διαβροχή της επιφάνειας, τη γωνία επαφής θ , το γεωμετρικό σχήμα της κοιλότητας και την γωνία β . Το μοντέλο υποθέτει μια κωνική κοιλότητα που κατακλύζεται από μια προώθηση στο εμπρός μέρος του υγρού (Σχήμα 22α). Μόλις ο ατμός παγιδευτεί από το υγρό, η διεπιφάνεια αναπροσαρμόζεται και σχηματίζεται το πρώτο στάδιο ατμού και η ακτίνα R (Σχήμα 22β). Διατήρηση του όγκου ατμών προϋποθέτει ότι το R είναι μια λειτουργία του θ και του β , όπως αναφέρεται στην επόμενη ενότητα. Αυτό το μοντέλο είναι χρήσιμο εάν το μέγεθος στις

ενεργές κοιλότητες είναι σε μια επιφάνεια που είναι γνωστή για ένα υγρό, τότε η αντίστοιχη τιμή του R για υγρά με διαφορετικές γωνίες επαφής μπορεί να προέρχεται από αυτό.



Σχήμα 21: Σχηματισμός θέσεων πυρήνωσης (Πηγή [9]).

Η γωνία επαφής θ δεν είναι γενικά γνωστή για τα περισσότερα υγρά και συνδυασμούς επιφάνειας. Το νερό έχει μια μεγάλη γωνία επαφής, ενώ οργανικά ρευστά έχουν κλίμακα που κυμαίνεται από 8° έως 25° .



Σχήμα 22(α,β): Μοντέλο του Lorenz et al για την παγίδευση ατμών (Πηγή [9]).

3.3 Δημιουργία πυρήνων από το παγιδευμένο αέριο ή ατμό σε κοιλότητες

Για τα πραγματικά συστήματα η τιμή του θ είναι σημαντικά μικρότερη από 180° , από αναλύσεις που έγιναν για την ετερογενή πυρήνωση των φυσαλίδων σε επίπεδες ή προεξέχουσες στερεές επίπεδες επιφάνειες που απαιτούν υπερθέρμανση που είναι ελαφρώς διαφορετική από εκείνες που απαιτούνται για τον ομοιογενή σχηματισμό πυρήνωσης. Για θερμοκρασίες τοιχώματος πάνω από τους 300°C θα μπορούσε να αρχίσει ο βρασμός στο νερό σε ατμοσφαιρική πίεση αν αυτές οι αναλύσεις ήταν σωστές.

Όταν περιέχονται ξένα σώματα και επιφάνειες στο δοχείο, συνήθως παρέχονται μεγάλου μεγέθους πυρήνες και λειτουργούν ως κέντρα σχηματισμού ατμών. Αυτή η μέθοδος παραγωγής ατμού από προ υπάρχον πυρήνες ονομάζεται «Ετερογενής πυρηνογέννεση». Ενώ αν το μέγεθος του πυρήνα ατμού ισορροπίας γίνεται μικρότερο καθώς η υπερθέρμανση αυξάνεται, ΔT_{sat} , δηλαδή ως αποτέλεσμα της μείωσης της πίεσης του συστήματος. Θερμικές διακυμάνσεις συμβαίνουν στο μετασταθές υγρό και υπάρχει μια μικρή άλλα πεπερασμένη πιθανότητα ενός συμπλέγματος μορίων με ατμούς, όπως ενέργειες που προέρχονται μαζί για να σχηματίσουν ένα αρχικό στάδιο ατμών. Αυτή η διαδικασία σχηματισμού ατμών σε ένα μετασταθί υγρό αναφέρεται ως «Ομοιογενής πυρηνογέννεση»

Η υψηλή υπερθέρμανση στο τοίχωμα που προβλέπεται από αυτές τις αναλύσεις της ετερογενής πυρήνωσης δεν έχει παρατηρηθεί πειραματικά. Για το βρασμό του νερού σε ένα μεταλλικό σκεύος, το τοίχωμα θα υπερθερμανθεί όχι περισσότερο από 10 – 15 °C, είναι τυπικώς αναγκαίο να αρχίσει να βράζει μόλις το νερό έχει φθάσει στις συνθήκες κορεσμού. Ο βρασμός σε αυτά τα πολύ χαμηλότερα επίπεδα υπερθέρμανσης αποδίδεται στην παρουσία παγιδευμένου αέρα σε στενές σχισμές στην στερεή επιφάνεια.

Σε αντίθεση με τις λείες επιφάνειες, οι κοιλότητες αυτές στις στερεές επιφάνειες σχηματίζονται από γρατσουνιές ή άλλες ανωμαλίες. Το μέγεθος αυτών των ατελειών μπορεί να κυμαίνεται σε μικροσκοπικό έως μακροσκοπικό εύρος. Αν η επιφάνεια δεν διαβρέχεται εντελώς από το υγρό, αναμένεται ότι πολλές από τις κοιλότητες θα περιέχουν παγιδευμένο αέρα. Η ατμοποίηση μπορεί να παρουσιαστεί στη διεπιφάνεια υγρού – στερεού στη κοιλότητα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

Ο μηχανισμός που προκαλεί την παγίδευση των ατμών στις κοιλότητες στην επιφάνεια απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 23α. Για ένα υγρό στρώμα που διέρχεται πάνω από μια αυλάκωση ή κοιλότητα γεμάτη με αέριο, η γωνία επαφής με το κατερχόμενο τμήμα τείνει να διατηρηθεί ως το υγρό να αρχίσει να γεμίζει την αυλάκωση. Επειδή το υγρό μέτωπο είναι κυρτό, είναι σαφές ότι η «μύτη» το υγρού μετώπου θα χτυπήσει το απέναντι τοίχωμα πριν από τη γραμμή επαφής η οποία φθάνει στον πυθμένα της αυλάκωσης, αν η γωνία επαφής είναι μεγαλύτερη από την γωνία του αυλακιού 2γ . Η προϋπόθεση για την παγίδευση του αέρα από το προωθούμενο υγρό μπορεί να διατυπωθεί ως εξής

$$\theta_{\alpha} > 2\gamma \quad (28)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή το θ_α αντιπροσωπεύει την προωθητική γωνία επαφής, η οποία μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την στατική ή τη γωνία επαφής. Η γωνία υστέρησης μπορεί να χρησιμεύει για να αυξήσει την παγίδευση των ατμών στις κοιλότητες της επιφάνειας.

Εξετάζοντας το επόμενο στρώμα υγρού που διέρχεται πάνω από την αυλάκωση, όπως δείχνεται στο Σχήμα 23β, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι κάποια ποσότητα υγρού θα πρέπει να μείνει στο πίσω στρώμα, αν $\theta_r < 180^\circ - 2\gamma$. Εξ ου και η προϋπόθεση για την παγίδευση του υγρού στην αυλάκωση που μπορεί να αναφέρεται ως

$$\theta_r < 180^\circ - 2\gamma \quad (29)$$

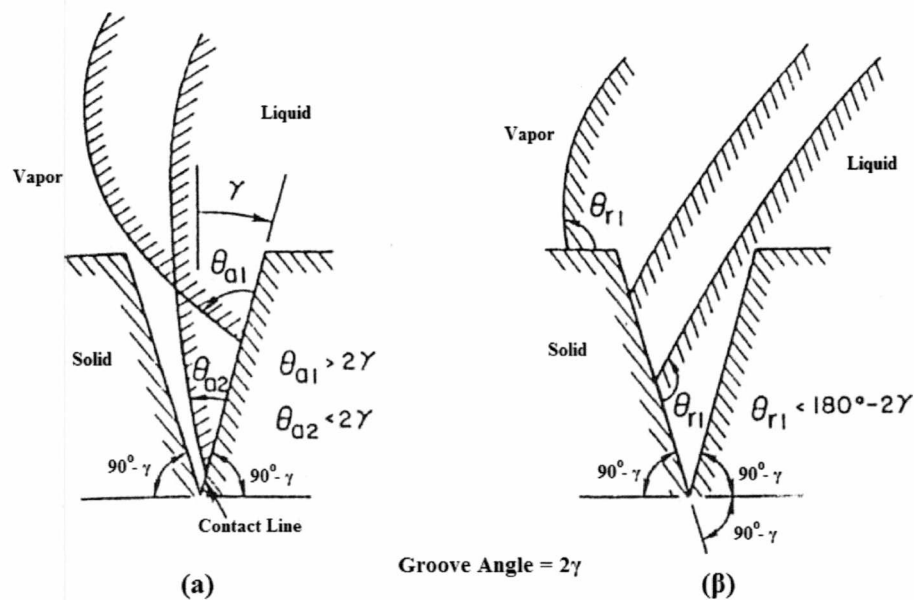
Η γωνία υστέρησης μπορεί να οδηγήσει σε θ_r γωνία, που είναι πολύ χαμηλότερη από την στατική ή την γωνία επαφής. Έτσι η γωνία υστέρησης μπορεί επίσης να δρα για να ενισχύσει την παγίδευση του υγρού σε κοιλότητες της επιφάνειας.

Σε μια πρόωμη μελέτη των παγιδευμένων ατμών και υγρού, ο Bankoff παρατήρησε ότι οι κοιλότητες μπορούν να ταξινομηθούν σε μια από τις τέσσερις κατηγορίες:

- (1) Κοιλότητες που παγιδεύουν μόνο αέριο,
- (2) Κοιλότητες όπου παγιδεύουν μόνο υγρό,
- (3) Κοιλότητες που παγιδεύουν τόσο υγρό όσο και αέρια μαζί και
- (4) Κοιλότητες που δεν παγιδεύουν ούτε υγρά ούτε ατμούς

Η κατηγορία στην οποία ανήκει μια κοιλότητα εξαρτάται από το αν οι εξισώσεις 28 και 29 ικανοποιούνται. Η γωνία υστέρησης ενισχύει την πιθανότητα ότι οι κοιλότητες θα παγιδεύουν αέρια και ειδικότερα θα παρατηρούνται οι κατηγορίες 1 ή 3 επί της στερεής επιφάνειας.

Η παραπάνω παρατηρήσεις υποδεικνύουν ότι όταν η επιφάνεια γεμίζεται με υγρό, υπάρχει μια μεγάλη πιθανότητα το αέριο να παγιδευτεί σε μερικές από τις κοιλότητες στην επιφάνεια του τοιχώματος συγκράτησης. Εάν η επιφάνεια θερμαίνεται και η θερμοκρασία του υγρού αυξάνεται, η εξάτμιση του υγρού μπορεί να συμβεί πρώτα στην διεπιφάνεια υγρού – αερίου σε κοιλότητες που περιέχουν παγιδευμένο ατμό.



Σχήμα 23α & 23β: Σχηματική αναπαράσταση ατμού και υγρού παγιδευμένο σε ένα αυλάκι που οφείλεται στην κίνηση του υγρού πάνω από την εμπρόσθια επιφάνεια (Πηγή [8]).

Ο βαθμός στον οποίο είναι παγιδευμένο το αέριο σε κοιλότητες της επιφάνειας μπορεί να δράσει για να κινήσει την εξάτμιση που μπορεί να επηρεάζεται από τον ρυθμό με τον οποίο το αέριο στην κοιλότητα διαλύεται εντός του υγρού και διαχέεται μακριά από την διεπιφάνεια αερίου – υγρού. Η πυκνότητα των κοιλοτήτων που μπορούν να δράσουν ως εκκινητές ατμοποίησης, μπορεί να εξαρτώνται από την αρχική συγκέντρωση του αερίου στο υγρό και το χρόνο που παρήλθε μεταξύ της πληρώσεως του συστήματος και της εφαρμογής της θερμότητας. Μολονότι διάλυση του παγιδευμένου αερίου μπορεί να απενεργοποιήσει μια κοιλότητα, όπως επίσης και το αντίθετο μπορεί να εμφανιστεί. Αέριο σε ένα κορεσμένο υγρό με αδιάλυτο αέριο σε θερμοκρασία δωματίου μπορεί να βγει από το διάλυμα και να σχηματίσει φυσαλίδες αερίου σε πρόσθετες κοιλότητες καθώς το υγρό θερμαίνεται στο σημείο βρασμού που οφείλεται σε μείωση της διαλυτότητας του με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Μια εκτεταμένη παρατήρηση υποστηρίζει το σχηματισμό ότι το παγιδευμένο αέριο σε κοιλότητες χρησιμεύει για να παρέχει πυρήνες για τον σχηματισμό των φυσαλίδων ατμού κατά την έναρξη της εξατίσεως. Η ισχύς αυτού του συμπεράσματος θέλει να μας κατευθύνει σε έναν από τους δυο τρόπους. Μια προσέγγιση είναι να χρησιμοποιήσετε φωτογράφιση υψηλής ταχύτητας για να καθορίσει τον αριθμό και τη θέση των πυρήνων και σαφώς να

τεκμηριώνει την εξάτμιση και τη διαδικασία ανάπτυξης φυσαλίδας μέσα στις κοιλότητες της επιφάνειας.

Το γεγονός ότι το παγιδευμένο αέριο σε κοιλότητες της επιφάνειας διευκολύνει την αρχική διαδικασία πυρήνων έχει επίσης επιβεβαιωθεί από πειράματα στα οποία ελήφθησαν μέτρα για την εξάλειψη του εγκλωβισμένου αερίου στις κοιλότητες. Σε αυτά τα πειράματα, το σύστημα τέθηκε υπο πίεση πριν την θέρμανση για να αυξηθεί η διαλυτότητα των αερίων στο υγρό και να οδηγεί το υγρό σε ρωγμές στην επιφάνεια, εξαλείφοντας έτσι τις κοιλότητες ως θέσεις σχηματισμού πυρήνων. Όταν έγινε αυτό, η υπερθέρμανση που απαιτείται για την κίνηση των πυρήνων βρέθηκε να είναι της ίδιας τάξης με εκείνες που απαιτούνται για την ομογενή πυρήνωση.

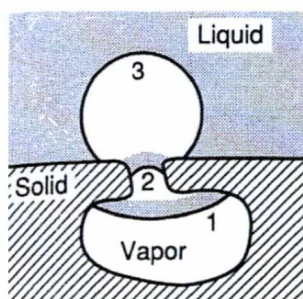
Μόλις ξεκινήσει η πυρήνωση, η υπερθέρμανση που απαιτείται για να διατηρηθεί ο σχηματισμός φυσαλίδων τυπικά πέφτει σε μια πολύ χαμηλότερη τιμή. Αυτή η πτώση συνέβη προφανώς επειδή οι κοιλότητες στην επιφάνεια ξαναγεμίζουν με ατμό, και συνεχίζει η δημιουργία πυρήνων. Σχηματισμός φυσαλίδων θα μπορούσε στη συνέχεια να διατηρηθεί σε χαμηλότερα επίπεδα υπερθέρμανσης λόγω εξάτμισης όπου μπορεί να συμβούν στην διεπιφάνεια υγρού – ατμού μέσα σε αυτές τις κοιλότητες.

Μόλις μια κοιλότητα καθίσταται ενεργή, καθώς εκπέμπει ατμούς, ένα τμήμα του παγιδευμένου αερίου παρασύρεται με κάθε φυσαλίδα. Για κοιλότητες με κωνική ή αυλακωτή γεωμετρία, με την πάροδο λίγων λεπτών ή ωρών, μπορεί να αφαιρέσει τα μη συμπυκνούμενα αέρια από την κοιλότητα, αφήνοντας πίσω μόνο ατμό. Μόλις συμβεί αυτό, εάν η επιφάνεια και το περιβάλλον υγρό κρυώσει, ο ατμός μπορεί να συμπυκνωθεί εντελώς, έτσι απενεργοποιείται η δημιουργία πυρήνων στην κοιλότητα.

Η απενεργοποίηση του σχηματισμού πυρήνων κατά τον τρόπο που περιγράφεται παραπάνω μπορεί να προκύψει στον εξοπλισμό μεταφοράς θερμότητας, επειδή ο κύκλος λειτουργίας απαιτεί εκκίνηση και τον τερματισμό της εισόδου θερμότητας ή ως αποτέλεσμα των διακυμάνσεων που επιβάλλονται από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να σταματήσει η δημιουργία πυρήνων στις κοιλότητες εξαιτίας της διεύδυσης του ψυχρότερου υγρού εντός της κοιλότητας που απελευθερώνεται σαν φυσαλίδα. Η σταθερότητα των ενεργών κοιλοτήτων που υποβάλλεται σε αυτό το είδος ψύξης μετά από κάθε φυσαλίδα έχει κυκλοφορήσει και εξεταστεί λεπτομερώς από το

Bankoff. Η ψύξη, ως αποτέλεσμα της εξάτμισης υγρών μέσα στην κοιλότητα, και την επίδραση τους στη σταθερότητα έχουν επίσης εξεταστεί από τους Marto και Rohsenow.

Η τάση για μη συμπυκνούμενα αέρια θα αντικατασταθεί από ατμό σαν φυσαλίδα που ποικίλει ανάλογα με την γεωμετρία της κοιλότητας. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο σε σχέση με αυτό είναι οι κοιλότητες με επανείσοδο, όπως αναπαρίσταται σχηματικά στο Σχήμα 24. Κοιλότητες αυτού του τύπου είναι συνήθως πολύ σταθερές και μπορεί οι φυσαλίδες για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα πριν παγιδευτεί το αέριο να εξαλειφθεί.



Σχήμα 24: Η ανάπτυξη της φυσαλίδας μέσα σε μια κοιλότητα που επανεισέρχεται (Πηγή [9]).

Η ενισχυμένη σταθερότητα των κοιλοτήτων επανεισόδου συνδέεται με τα γεγονότα ότι η εν λόγω καμπυλότητα αντιστρέφεται όταν το υγρό διαπερνά το στόμιο της κοιλότητας. Για τέτοιες περιπτώσεις, θερμοδυναμικές θεωρήσεις υπαγορεύουν ότι η πίεση στον ατμό θα είναι υψηλότερη από την τιμή της επίπεδης επιφάνειας στην ίδια θερμοκρασία. Κατά συνέπεια, σημαντική υπόψυξη απαιτείται κατά την συμπύκνωση των ατμών στην κοιλότητα επανεισόδου, καθιστώντας πιο δύσκολη την απενεργοποίησή του. Δυστυχώς, οι περισσότεροι που απαντούν στην φύση των δραστηριοτήτων δεν είναι με επανεισερχόμενες κοιλότητες.

Είναι χρήσιμο στο σημείο αυτό να εξεταστεί η ανάπτυξη των ατμών εντός μιας κοιλότητας σε μια επιφάνεια. Αν και η γεωμετρία των πραγματικών κοιλοτήτων είναι πολύ ακανόνιστη, θα εξιδανικεύσουμε την κοιλότητα, και θα πούμε ότι είναι κωνική με ένα στόμιο ακτίνας R και γωνίας κώνου 2γ . Σε γενικές γραμμές, η ακτίνα καμπυλότητας μπορεί να μεταβάλλεται, όπως υπαγορεύεται από την εξίσωση Young – Laplace, την κλίση της υδροστατικής πίεσης και της γωνίας επαφής. Ωστόσο, εδώ θα εξιδανικεύσουμε το προφίλ διασύνδεσης ως ένα τμήμα μιας σφαίρας, η οποία χαρακτηρίζεται από μια ενιαία ακτίνα καμπυλότητας, r . Ο τρόπος με τον οποίο το προφίλ διεπαφής κάνει αλλαγές, όπως αρχικά αναπτύσσεται ο ατμός που απεικονίζεται στο Σχήμα 24 για τρεις διαφορετικές περιοχές της

γωνίας επαφής. Η ποιοτική μεταβολή της R/r , όπως κατά την δημιουργία ατμού αναπτύσσεται και αναδύεται από την κοιλότητα στο Σχήμα 25d.

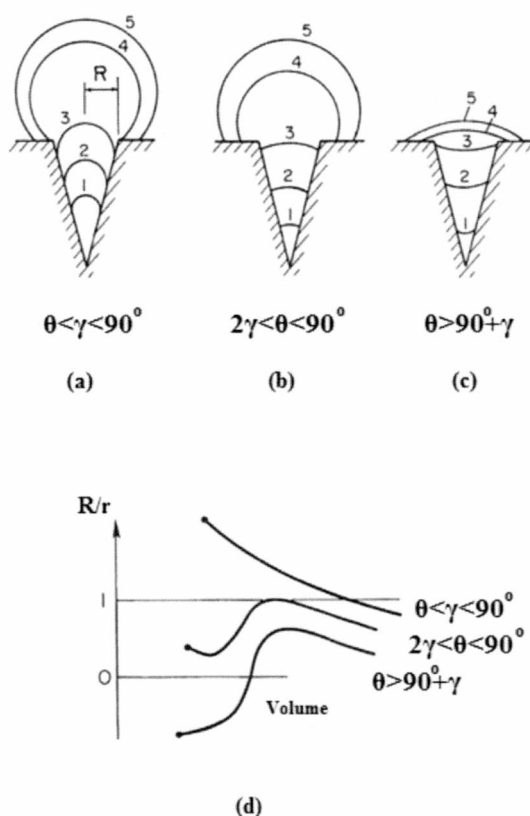
Στην περίπτωση όπου έχουμε $\theta < \gamma < 90^\circ$, η ακτίνα καμπυλότητας της διεπαφής ξεκινά σε κάποια αρχική μικρή τιμή και αυξάνεται μονοτονικά καθώς ο ατμός αναπτύσσεται μέχρι και έξω από το στόμιο της κοιλότητας (Σχήμα 25a). Κατά συνέπεια, ο λόγος R/r ξεκινά σε κάποια πεπερασμένη τιμή και μειώνεται μονότονα προς το μηδέν. Κατά την εξέταση της κίνησης διασύνδεσης, είναι χρήσιμο ένα εξεταστεί η φαινομενική θ_{ap} γωνία επαφής της διεπαφής που μετρείται σε σχέση με μια οριζόντια γραμμή διαμέσου του υγρού. Για $\theta < \gamma < 90^\circ$, η φαινόμενη γωνία επαφής είναι μικρότερη από 90° , τόσο πριν όσο και μετά την γραμμή επαφής που αναδύεται από την κοιλότητα, η οποία διευκολύνει την μονοτονική αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας r .

Είναι απίθανο η ανάπτυξη φυσαλίδων που φαίνεται στο Σχήμα 25a ότι θα συμβεί πραγματικά σε μια εξιδανικευμένη κωνική κοιλότητα, όπως περιγράφεται παραπάνω, η παγίδευση του αερίου σε ένα «V» σχήματος κοιλότητα θα συμβεί μόνο αν $\theta > 2\gamma$. Ωστόσο, εάν μια ονομαστική κωνική κοιλότητα είχε μια μικρή επανείσοδο τότε μπορεί ακόμη να επιτευχθεί αυτό το πρότυπο ανάπτυξης.

Για γωνίες επαφής με εύρος $2\gamma < \theta < 90^\circ$, η καμπυλότητα r αυξάνεται, όπως η διεπαφή κινείται μέχρι το στόμιο της κοιλότητας (Σχήμα 25b). Ωστόσο, καθώς η γραμμή επαφής γυρίζει τη γωνία στο στόμιο της κοιλότητας, η καμπυλότητα r μειώνεται και στη συνέχεια αρχίζει να αυξάνεται και πάλι. Αυτή η περίπλοκη παραλλαγή της καμπυλότητας r συνδέεται με το γεγονός ότι, όπως η διεπαφή αναδύεται από την κοιλότητα, οι εμφανείς αλλαγές γωνίας επαφής γίνονται από μια τιμή μεγαλύτερη από 90° . Ως αποτέλεσμα, η αναλογία R/r μειώνεται αρχικά, στη συνέχεια, αυξάνει εν συντομία, οξύνοντας όπως η διεπαφή αναδύεται από την κοιλότητα, και στη συνέχεια μειώνεται και πάλι προς το μηδέν.

Η διεπαφή μπορεί αρχικά να είναι κοίλη σε ακόμη μεγαλύτερες γωνίες επαφής, όπου $\theta > 90^\circ + \gamma$. Μια τέτοια περίπτωση παρατηρείται στο Σχήμα 25c. Η ακτίνα καμπυλότητας λαμβάνεται στην συνέχεια να είναι αρνητική. Καθώς ο ατμός μεγαλώνει και η διεπαφή κινείται προς το στόμιο της κοιλότητας, η διεπαφή γίνεται πιο επιπεδη και το $1/r$ γίνεται λιγότερο αρνητικό. Δεδομένου ότι η γραμμή επαφής αλλάζει με γωνία στο στόμιο της κοιλότητας, τότε η καμπυλότητα στη διεπαφή του αντιστρέφεται και η αναλογία αλλάζει R/r . Καθώς ο ατμός αναπτύσσεται περαιτέρω, το R/r φθάνει σε ένα θετικό μέγιστο σημείο και

στην συνέχεια αρχίζει να πλησιάζει το μηδέν. Η ποιοτική μεταβολή της R/r στην αρχή της δημιουργίας της φυσαλίδας για κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις που αναφέρονται παραπάνω παρουσιάζονται στο Σχήμα 25d.



Σχήμα 25: (a,b,c,d) Μεταβολή της ακτίνας της φυσαλίδας σε μια κοιλότητα (Πηγή [9]).

Αν υποθέσουμε ότι η υπερθέρμανση πρέπει να υπερβαίνει την τιμή τη ισορροπίας για την ανάπτυξη του ατμού, τότε θα αυξηθεί πέρα από το στόμιο της κοιλότητας, η υπερθέρμανση του συστήματος πρέπει να υπερβαίνει την τιμή ισορροπίας για την ελάχιστη ακτίνα διεπαφής. Συνδυάζοντας τις σχέσεις Clausius – Clapeyron και Young – Laplace, διατυπώθηκε ότι είναι της μορφής

$$T_w \geq T_{sat} + \frac{2\sigma T_{sat}}{h_{fg} R_{min}} \quad (30)$$

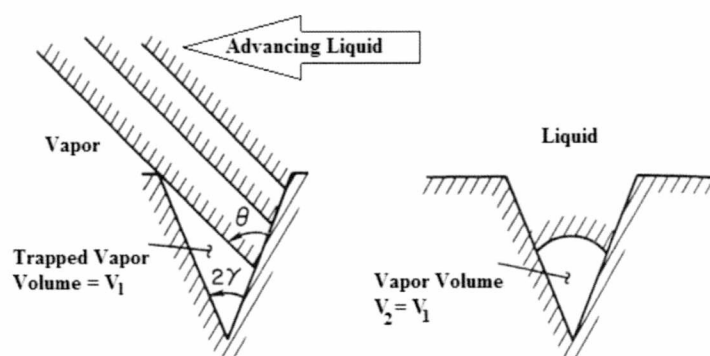
Η ελάχιστη τιμή της r αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του R/r στο Σχήμα 25d καθώς η φυσαλίδα μεγαλώνει έξω από την κοιλότητα. Η μέγιστη τιμή της R/r εμφανίζεται κοντά στο $R/r = 1$, εάν η γωνία επαφής είναι μεγάλη και η φυσαλίδα γίνεται αρκετά μεγάλη ώστε

$R/r \leq 1$. Για τέτοιες περιπτώσεις, R_{\min} μπορεί να προσεγγιστεί από το R . Η απαιτούμενη υπερθέρμανση για την περιοχή που είναι ενεργή δίνεται από τη σχέση

$$T_w > T_{sat} + \frac{2\sigma T_{sat}}{h_{fg} R} \quad \text{για } \frac{R}{r} \leq 1 \quad (31)$$

Για μικρές ή μέτριες γωνίες επαφής σε κοιλότητες με μια μεγάλη ακτίνα, η μέγιστη τιμή του R/r είναι μεγαλύτερη από 2 και αντιστοιχεί στην αρχική ακτίνα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μια πρόβλεψη της αρχικής ακτίνας της φυσαλίδας είναι απαραίτητη πριν από την εξίσωση 30 για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να καθορίσει τις απαραίτητες συνθήκες για την περιοχή. Επειδή συνδυασμός υγρών – στερεών στο εξοπλισμό μεταφοράς θερμότητας συχνά οδηγεί σε χαμηλή ως μέτρια γωνία επαφής.

Ένα μοντέλο που προβλέπει την αρχική ακτίνα του ατμού έχει αναπτυχθεί από τον Lorenz et al. Σε αυτό το μοντέλο, η κοιλότητα είναι εξιδανικευμένη ως κωνική, και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πλήρωσης, το υγρό μέτωπο υποτίθεται ότι είναι επίπεδο καθώς περνά πάνω από την κοιλότητα, διατηρώντας την γωνία επαφής με το τοίχωμα, όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 24a. Ελήφθη ο όγκος του ατμού στο αρχικό στάδιο του αερίου να είναι ίσος με τον όγκο του ατμού που σφραγίζεται μέσα στην κοιλότητα, όταν έχουμε επίπεδο μέτωπο επαφής με το στόμιο της κοιλότητας (Σχήμα 26a). Η ακτίνα καμπυλότητας προσδιορίζεται γεωμετρικά για ένα τμήμα της κωνικής κοιλότητας που οροθετείται από ένα σφαιρικό κάλυμμα που διατηρεί τη γωνία επαφής στο τοίχωμα της κοιλότητας και έχει όγκο ίσο με εκείνο που καθορίζεται από το μοντέλο παγίδευσης του ατμού. Αυτή η αρχική διαμόρφωση κατά το αρχικό στάδιο των ατμών παρατηρούνται στο Σχήμα 26b.



Σχήμα 26: (a,b) Εξιδανικευμένο μοντέλο της διεργασίας παγίδευσης ατμών που χρησιμοποιείται για την αρχική εκτίμηση της φυσαλίδας ατμού στην κοιλότητα (Πηγή [9]).

Η ακτίνα καμπυλότητας για την αρχική φυσαλίδα προσδιορίζεται από το μοντέλο που περιγράφεται παραπάνω που είναι μια συνάρτηση της γωνίας επαφής και της 2γ γωνίας κώνου της κοιλότητας. Η μεταβολή $r/R = \Omega$ με θ και 2γ να υπολογίζονται από το Lorenz et al χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο συνοψίζεται στο σχήμα 27. Για δεδομένες τιμές των θ και 2γ , μπορεί να προσδιορισθεί η τιμή της $\Omega = r/R$, ώστε μετά να γίνει ο υπολογισμός χρησιμοποιώντας την εξίσωση 30

$$T_w > T_{sat} + \frac{2\sigma T_{sat}}{h_{fg} R \Omega(\theta, 2\gamma)} \quad \text{για } \frac{R}{r} > 1 \quad (32)$$

Για $\theta \leq 2\gamma$, οι καμπύλες υπολογίζονται στο Σχήμα 27 και υποδεικνύουν ότι το r/R είναι μηδέν και δεν υπάρχει ατμός που παγιδεύεται, η οποία είναι συνεπής με το πιο γενικό μοντέλο παγίδευσης ατμών. Για μια δεδομένη γωνία κώνου 2γ , υπάρχει μια μέγιστη γωνία επαφής στην οποία $\Omega = r/R = 1$. Πάνω από αυτό η μέγιστη τιμή της θ , $\Omega(\theta, 2\gamma)$ θεωρείται ότι είναι τέτοια ώστε η εξίσωση 32 να γίνεται ισοδύναμη με την εξίσωση 31.

Στα περισσότερα πραγματικά συστήματα, οι κοιλότητες έχουν συνήθως πολύ μικρή γωνία γ που είναι το μισό της γωνίας του κώνου, και η γωνία επαφής θ είναι πάντοτε μικρότερη από 90° . Ως αποτέλεσμα, συχνά έχει βρεθεί ότι $\gamma < \theta < 90^\circ$ για κοιλότητες σε πραγματικά συστήματα. Η μεταβολή του R/r στη συνέχεια θα παρουσιάσει ένα μέγιστο όγκο στο $R/r = 1$, που είναι παρόμοια με την μεσαία καμπύλη στο Σχήμα 25d. Επιπλέον, τα αποτελέσματα του μοντέλου απεικονίζονται στο Σχήμα 27 όπου δείχνει ότι εάν η γωνία έχει μικρή κοιλότητα, η αρχική ακτίνα καμπυλότητας της διεπαφής είναι σχεδόν το ίδιο ή μεγαλύτερη από την ακτίνα στο στόμιο, άλλα με μικρότερη γωνία επαφής.

Αυτές οι παρατηρήσεις υποδηλώνουν ότι σε πολλά πραγματικά συστήματα η ελάχιστη ακτίνα επαφής είναι ίση με, ή σχεδόν το ίδιο όπως, η ακτίνα στην κοιλότητα. Αυτό συνεπάγεται ότι η ακτίνα στην κοιλότητα και μόνο είναι αρκετή για να χαρακτηρίσει τη συμπεριφορά σχηματισμού πυρήνων της μια συγκεκριμένης περιοχής. Αν αυτό ήταν αλήθεια, τα χαρακτηριστικά σχηματισμού πυρήνων της επιφάνειας θα υπαγορεύονται κυρίως από την κατανομή μεγέθους των δυνητικά ενεργών κοιλοτήτων στην επιφάνεια.

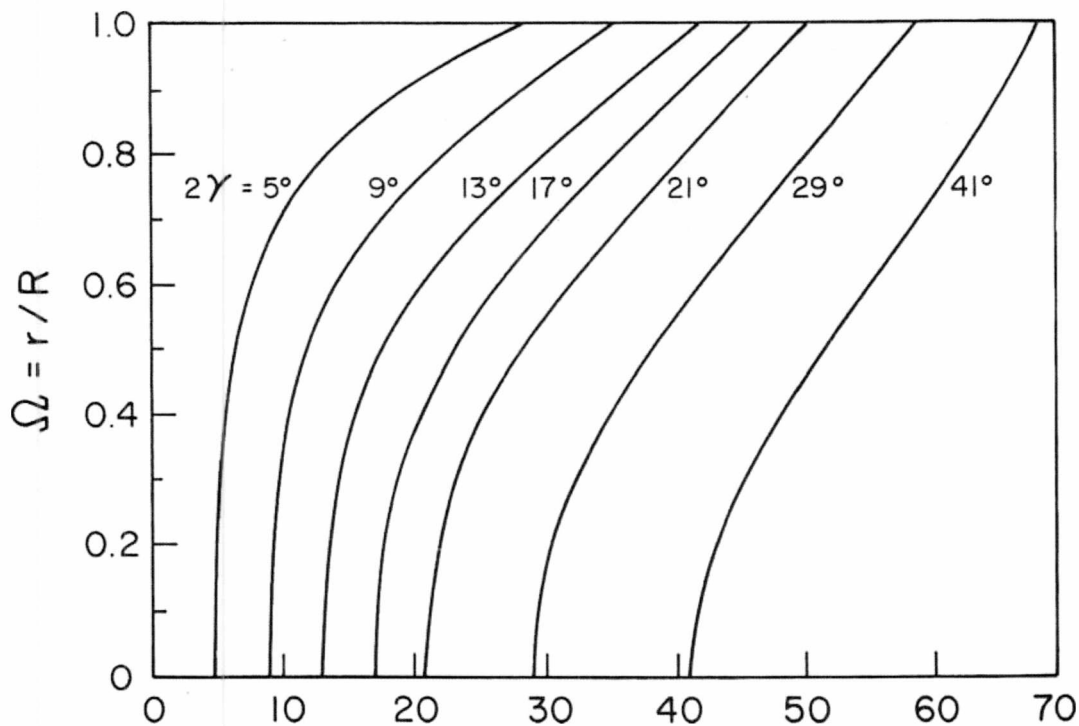
Η παραπάνω συζήτηση συνεπάγεται σαφώς ότι η ελάχιστη ακτίνα κατά την διάρκεια της ανάπτυξης της φυσαλίδας δεν είναι πάντοτε ίση με την ακτίνα της κοιλότητας, άλλα μπορεί να ποικίλει με την γωνία επαφής και μια δεύτερη κοιλότητα γωνίας γ :

$$\frac{R_{\min}}{R} = \Omega(\theta, \gamma) \quad (33)$$

Ω εκ τούτου, για μια δεδομένη επιφάνεια που έχει οι κοιλότητα με καθορισμένη τιμή γ , οι αντίστοιχη τιμή του R_{\min} μπορεί να εξαρτάται από την γωνία επαφής θ .

Η εξίσωση 30 συνεπάγεται ότι για ένα δεδομένο επίπεδο επιβαλλόμενων υπερθερμάνσεων, μια κοιλότητα θα είναι ενεργή, εάν R_{\min} είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή R_c όπου δίνεται από την σχέση

$$R_c = \frac{2\sigma T_{sat}}{h_{fg} [T_w - T_{sat}]} \quad (34)$$



Σχήμα 27: Μεταβολή της αρχικής ακτίνας με την γωνία κώνου κοιλότητας και γωνία επαφής, όπως προβλέπεται από το μοντέλο του Lorenz et al (Πηγή [9]).

3.4 Ανάπτυξη φυσαλίδων κοντά σε θερμαινόμενες επιφάνειες

Η ανάπτυξη των φυσαλίδων ατμού στη θερμή περιοχή του οριακού στρώματος κοντά σε μια υπέρθερμη επιφάνεια είναι πιο περίπλοκη λόγω της σφαιρικής συμμετρίας και της ανομοιομορφίας του πεδίου θερμοκρασίας του περιβάλλοντος υγρού. Παρά τις σημαντικές αυτές διαφορές, η αύξηση της φυσαλίδας κοντά σε μια υπέρθερμη επιφάνεια παρουσιάζει καθεστώς αδράνειας που ελέγχονται από ελεγχόμενη ανάπτυξη της μεταφοράς θερμότητας παρόμοια με εκείνα για τη σφαιρική ανάπτυξη της φυσαλίδας σε ένα απέραντο, ομοιόμορφο υπέρθερμο περιβάλλον.

Η διαδικασία ανάπτυξης των φυσαλίδων κοντά σε μια θερμαινόμενη επιφάνεια μπορεί να εξιδανικευτεί αποτελούμενη από στάδια όπως φαίνονται στο Σχήμα 28. Μετά την αναχώρηση της φυσαλίδας, το υγρό στην θερμοκρασία T_{sat} φέρεται σε επαφή με την επιφάνεια σε θερμοκρασία $T_w > T_{sat}$. Τότε για ένα μικρό χρονικό διάστημα παρέρχεται μια παροδική αγωγή στο υγρό, χωρίς να λαμβάνει χώρα ανάπτυξη της φυσαλίδας. Αυτό το χρονικό διάστημα αναφέρεται σαν περίοδος αναμονής, που ορίζεται εδώ ως, t_w .

Μόλις αναπτυχθούν οι φυσαλίδες ξεκινά η θερμική ενέργεια που απαιτείται για να εξατμισθεί το υγρό στη διεπαφή, τουλάχιστον εν μέρει, από την υγρή περιοχή πλησίον της φυσαλίδας που ήταν υπέρθερμη κατά την διάρκεια της περιόδου αναμονής. Κατά το αρχικό στάδιο της ανάπτυξης φυσαλίδων, το υγρό είναι εξαιρετικά υπέρθερμο και η μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον, δεν είναι περιοριστικός παράγοντας. Καθώς η αρχική φυσαλίδα αναδύεται από την κοιλότητα δημιουργίας πυρήνων, η ταχεία επέκταση ενεργοποιείται ως αποτέλεσμα της απότομης αύξησης της ακτίνας καμπυλότητας της φυσαλίδας. Η προκύπτουσα ταχεία ανάπτυξη της φυσαλίδας μεγαλώνει σε ένα σχεδόν ημισφαιρικό σχήμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 28c. Σε αυτό το καθεστώς, η φυσαλίδα μεγαλώνει ακτινικά, μια λεπτή μικροστιβάδα υγρού αφήνεται ανάμεσα στο κατώτερο τμήμα της διεπαφής φυσαλίδων και το θερμαινόμενο τοίχωμα. Αυτό το φιλμ το οποίο μερικές φορές αναφέρεται ως μικροστιβάδα εξάτμισης, όπου το πάχος του κυμαίνεται από σχεδόν μηδέν κοντά στην κοιλότητα πυρήνων σε μια πεπερασμένη τιμή στην άκρη της ημισφαιρικής φυσαλίδας. Η θερμότητα μεταφέρεται σε όλο το φιλμ από την επιφάνεια προς το περιβάλλον, και γίνεται εξάτμιση του υγρού στο περιβάλλον. Αυτό το φιλμ μπορεί να εξατμιστεί εντελώς κοντά στην κοιλότητα όπου δημιουργείται η πυρήνωση με σημαντική αύξηση της

θερμοκρασίας της επιφάνειας. Όταν συμβεί αυτό, η θερμοκρασία της επιφάνειας μπορεί να διακυμαίνεται έντονα κατά την διάρκεια της επαναλαμβανόμενης ανάπτυξης και της απελευθέρωσης των φυσαλίδων καθώς η επιφάνεια στεγνώνει κυκλικά έξω και στην συνέχεια επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

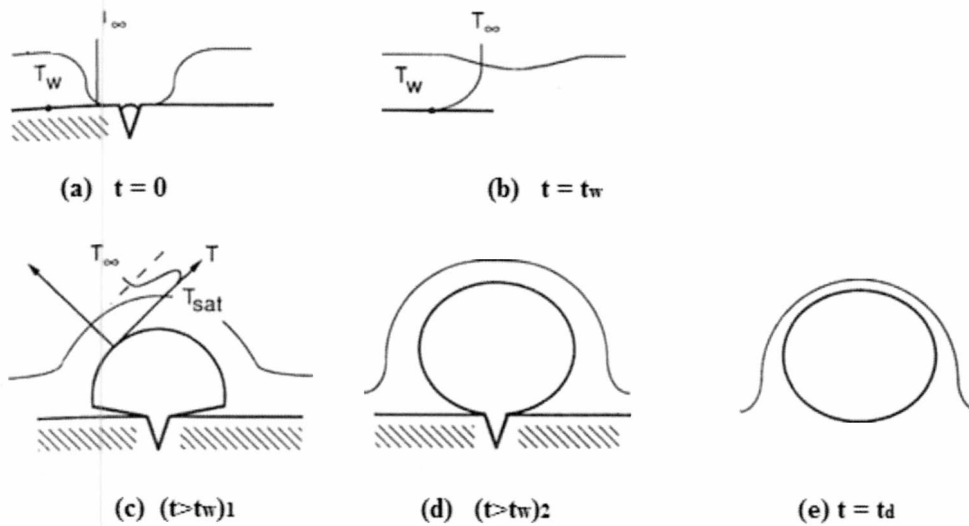
Η υγρή περιοχή με τη διεπαφή υπερθερμαίνεται σταδιακά ώσπου η φυσαλίδα μεγαλώνει. Αυτή η περιοχή μερικές φορές αναφέρεται ως χαλάρωση του μικρού στρώματος. Η φύση του προφίλ θερμοκρασίας σε αυτή την περιοχή σε ένα ενδιάμεσο στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης των φυσαλίδων υποδεικνύεται στο Σχήμα 28c. Η διεπαφή είναι στη θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση του περιβάλλοντος υγρού. Η θερμοκρασία του υγρού αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης από τη διεπαφή, φτάνει σε ένα μέγιστο σημείο και στη συνέχεια μειώνεται προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Καθώς η ανάπτυξη συνεχίζεται, η μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον μπορεί να γίνει μέχρι ενός σημείου, οπότε η ανάπτυξη των φυσαλίδων γίνεται με ελεγχόμενη μεταφορά θερμότητας.

Εάν η διαδικασία ανάπτυξης της φυσαλίδας γίνει με ελεγχόμενη μεταφορά θερμότητας, τότε η πίεση και οι δυνάμεις αδράνειας του υγρού είναι σχετικά μικρότερες και η επιφανειακή τάση, στη συνέχεια, τείνει να τραβήξει τη φυσαλίδα σε ένα πιο σφαιρικό σχήμα. Έτσι κατά τη μετάβαση το σχήμα της φυσαλίδας μετασχηματίζεται από ένα ημισφαιρικό σχήμα σε ένα πιο σφαιρικό, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 28d.

Καθ' όλη την διαδικασία ανάπτυξης της φυσαλίδας, η διεπιφανειακή τάση που ενεργεί κατά μήκος της γραμμής επαφής (όπου η διεπαφή συναντά τη στερεή επιφάνεια) τείνει να κρατήσει τη φυσαλίδα στη θέση του επί της επιφάνειας. Δυνάμεις άνωσης, drag, ανύψωσης και αδράνειας που σχετίζονται με την κίνηση του περιβάλλοντος ρευστού μπορεί να ενεργήσουν για να τραβήξουν την φυσαλίδα μακριά. Αυτές οι δυνάμεις γίνονται μεγάλες, όταν η φυσαλίδα γίνει μεγαλύτερη. Η φυσαλίδα απελευθερώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 28e, ενώ το καθαρό αποτέλεσμα γίνεται αρκετά μεγάλο για να υπερνικήσει την επίδραση της συγκράτησης των δυνάμεων της επιφανειακής τάσης στη γραμμή επαφής.

Αν και η παραπάνω περιγραφή παραδέχεται τη δυνατότητα και των δυο καθεστώτων ανάπτυξης αδράνειας και μεταφοράς θερμότητας, η ύπαρξη ή απουσία ενός εξαρτάται από συνθήκες υπό τις οποίες επέρχεται αύξηση στη φυσαλίδα. Συγκεκριμένα, πολύ γρήγορη, ελεγχόμενη ανάπτυξη είναι πιο πιθανό να παρατηρηθεί εάν ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:

- Υψηλή υπερθέρμανση στην επιφάνεια
- Υψηλή επιβολή της ροής θερμότητας
- Γυαλισμένη επιφάνεια και με πολύ μικρές κοιλότητες
- Πολύ χαμηλή γωνία επαφής (ιδιαίτερα διαβροχής υγρού)
- Χαμηλή λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
- Χαμηλή πίεση του συστήματος (με αποτέλεσμα χαμηλή πυκνότητα ατμών)



Σχήμα 28: (a,b,c,d,e) Η περίοδος αναμονής και η ανάπτυξη και απελευθέρωση μιας φυσαλίδας ατμού σε μια κοιλότητα (Πηγή [9]).

Τα τέσσερα πρώτα στοιχεία στις παραπάνω συνθήκες είναι αποτέλεσμα της συσσώρευσης των υψηλών επιπέδων υπερθέρμανσης κατά την διάρκεια της περιόδου αναμονής. Τα δυο τελευταία στοιχεία θα οδηγήσουν σε ταχύτερη ανάπτυξη του όγκου της φυσαλίδας, αφού αρχίσει η διαδικασία της ανάπτυξης. Το πρώτο στοιχείο και τα δυο τελευταία συνεπάγονται ότι η ελεγχόμενη ανάπτυξη της αδράνειας είναι πιθανό για μεγάλες τιμές του αριθμού Jakob, που ορίζεται στην σχέση

$$Ja = \frac{[T_{\infty} - T_{sat}] C_{pL} \rho_L}{\rho_v h_{fg}} \quad (35)$$

Όπου το σχήμα της φυσαλίδας είναι συνήθως ημισφαιρικό όταν υπάρχουν αυτές οι προϋποθέσεις.

Αντίθετα, μεταφορά θερμότητας ελεγχόμενης ανάπτυξης μιας φυσαλίδας είναι πιθανό να έχουμε αν ισχύουν οι συνθήκες:

- Χαμηλή υπερθέρμανση στην επιφάνεια
- Χαμηλή επιβολή της ροής θερμότητας
- Πιο τραχιά επιφάνεια με μεγάλες και μέτριου μεγέθους κοιλότητες
- Μέτρια γωνία επαφής
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης
- Μέτρια ως υψηλή πίεση του συστήματος

Όλες οι προϋποθέσεις που αναφέρονται παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα τη βραδύτερη ανάπτυξη των φυσαλίδων, γεγονός που καθιστά τις επιπτώσεις αδράνειας μικρότερες, ή ως αποτέλεσμα μιας ισχυρότερης εξάρτησης του ρυθμού ανάπτυξης της φυσαλίδας για τη μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον. Οι περισσότερες από αυτές τις συνθήκες που συναντώνται, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ότι η ελεγχόμενη θερμότητα μεταφοράς θα έχει αποτέλεσμα.

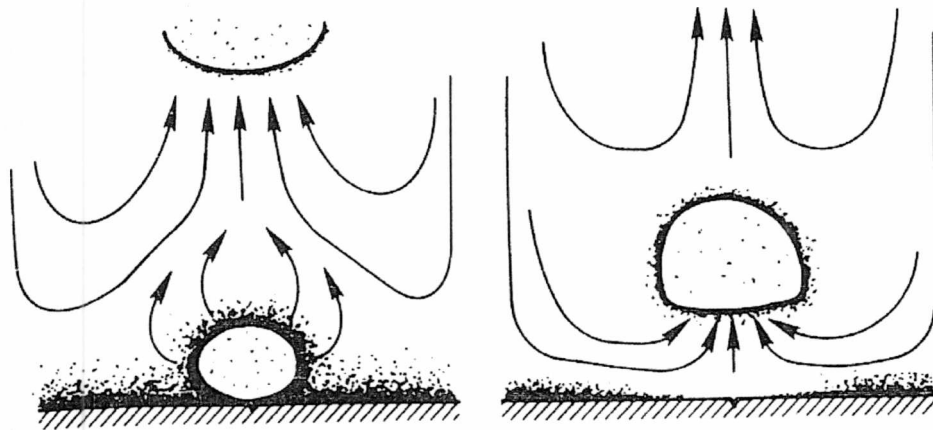
3.5 Περιοχή των απομονωμένων φυσαλίδων

Ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας στην φάση των απομονωμένων φυσαλίδων (Περιοχή Α – Β στο Σχήμα 6 του Κεφαλαίου 2) υποστηρίχθηκε στα χρόνια μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι οι φυσαλίδες στην πράξη λειτουργούν κατά κάποιο τρόπο σαν μικρές αντλίες που διατηρούν την αντικατάσταση υγρού που θερμαίνεται στην επιφάνεια με ψυχρό υγρό. Το ερώτημα είναι αν καθορίζεται ο σωστός μηχανισμός. Το Σχήμα 29a και 29b δείχνει τον τρόπο που οι φυσαλίδες πιθανώς δρουν προς απομάκρυνση του θερμού υγρού από την επιφάνεια και εισάγεται ψυχρό υγρό που πρόκειται να θερμανθεί.

Είναι προφανές ότι ο αριθμός των ενεργών θέσεων σχηματισμού πυρήνων παράγει φυσαλίδες που θα επηρεάσουν έντονα το q . Ο Yamagata με πειράματα το 1955 έδειξε ότι:

$$q \sim \Delta T^a n^b \quad (36)$$

Όπου $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$ και n η πυκνότητα του χώρου ή ο αριθμός των ενεργών θέσεων ανά τετραγωνικό μέτρο. Επίσης, έκανε κάποιες υποθέσεις για να μπορέσει να καθορίσει την σταθερά της αναλογικότητας και τους εκθέτες a και b . Από μελέτες οι εκθέτες αποδεικνύονται ότι είναι περίπου $a=1,2$ και $b=1/3$.



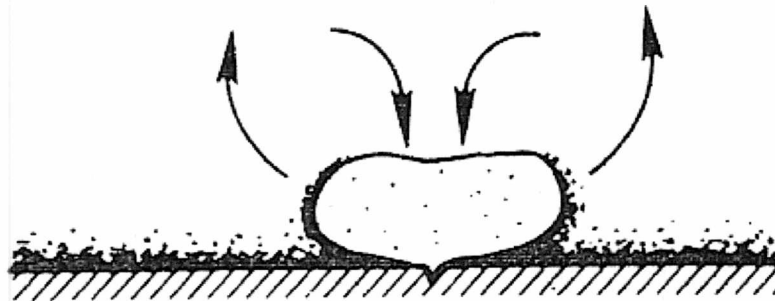
Σχήμα 29α: Φυσαλίδα αυξάνεται και αναχωρεί κατά τον βρασμό. (Η φυσαλίδα μεγαλώνει, απορροφώντας θερμότητα από το υπέρθερμο υγρό στην περιφέρειά της. Έπειτα συμπαρασύρει κρύο υγρό πάνω στην πλάκα η οποία στην συνέχεια ζεσταίνεται μέχρι να συμβεί πυρήνωση και ο κύκλος επαναλαμβάνεται) (Πηγή [5]).

Το πρόβλημα της εξίσωσης 36 είναι ότι εισάγεται αυτό που ονομάζουν οι επιστήμονες «ενοχλητική» μεταβλητή. Μια τέτοια μεταβλητή ποικίλει από σύστημα σε σύστημα και δεν μπορεί εύκολα να αξιολογηθεί ο αριθμός των ενεργών θέσεων ανά τετραγωνικό μέτρο, n . Κανονικά το n αυξάνεται με το ΔT_{sat} κατά κάποιο τρόπο, άλλα πως; Εάν όλες οι θέσεις είχαν ίδιο μέγεθος, όλες οι θέσεις θα πρέπει να ενεργοποιούνται ταυτόχρονα, και το q θα μπορούσε να είναι μια ασυνεχής λειτουργία του ΔT . Όταν οι περιοχές έχουν μια τυπική κατανομή μεγεθών, το n (και ως εκ τούτου και το q) μπορεί να αυξήσει πολύ έντονα το ΔT .

Είναι γεγονός ότι για μια μεγάλη κατηγορία των εργοστασιακών τελικών υλικών, το n κυμαίνεται περίπου στο $\Delta T^{5/6}$, έτσι ώστε το q να κυμαίνεται περίπου στο ΔT^3 . Αυτό έχει καταστήσει διάφορους συγγραφείς να μπορούν να συσχετίζουν το q περίπου για μια ποικιλία υλικών. Μια από τις πρώτες και πιο χρήσιμες συσχετίσεις για την πυρηνογένεση ήταν εκείνη του Rohsenow το 1951.

$$\frac{C_p (T_w - T_{sat})}{h_{fg} \text{Pr}^s} = C_{sf} \left[\frac{q}{\mu h_{fg}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}} \right]^{0.33} \quad (37)$$

όπου όλες οι ιδιότητες, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά, να είναι για τα υγρά σε θερμοκρασία κορεσμού T_{sat} . Η σταθερά C_{sf} είναι μια εμπειρική διόρθωση για τυπικές συνθήκες της επιφάνειας. Ο πίνακας 1 του Κεφαλαίου 2 περιλαμβάνει ένα σύνολο τιμών του C_{sf} για τις κοινές επιφάνειες, καθώς και τον αριθμό Prandtl με εκθέτη s .

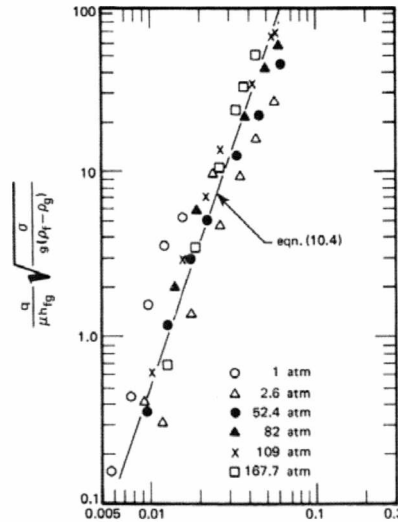


Σχήμα 29b: Αύξηση φυσαλίδας σε υπόψυκτο υγρό (Όταν η φυσαλίδα προεξέχει σε κρύο υγρό, ο ατμός μπορεί να συμπυκνωθεί στην κορυφή, ενώ η εξάτμιση συνεχίζεται στο κάτω μέρος) (Πηγή [5]).

Μπορείτε να σημειώσετε, αρχικά, ότι υπάρχουν δυο καθεστάτα για την πυρηνογέννεση και η εξίσωση 37 του Yamagata ισχύει μόνο για την πρώτη περιοχή A – B που αναφέρεται στο Σχήμα 6 του Κεφαλαίου 2. Η σχέση του Rohsenow είναι εμπειρική και δεν εξαρτάται από την ορθολογική ανάλυση της διαδικασίας της πυρηνογέννεσης. Αποδεικνύεται ότι αντιπροσωπεύει το $q(\Delta T)$ και στα δύο καθεστάτα, άλλα δεν είναι τρομερά ακριβής σε κάθε ένα. Το Σχήμα 30 δείχνει την σύγκριση της εξίσωσης 37 (Σχέσης Rohsenow) με την εξίσωση 36 σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών. Δείχνει τυπικά σφάλματα σε θερμική ροή 100% και τυπικά σφάλματα στο ΔT περίπου 25%.

Έτσι η ικανότητα μας να προβλέψουμε την πυρηνογέννεση στο βρασμό είναι κακή. Η ικανότητα να μας να προβλέψουμε το ΔT είναι καλύτερη, επειδή, το $q \sim \Delta T^3$, ένα μεγάλο λάθος στην q δίνει ένα πολύ μεγαλύτερο σφάλμα στο ΔT . Φαίνεται ότι κάθε ουσιαστική βελτίωση αυτής της κατάστασης θα πρέπει να περιμένουμε μέχρι κάποιος να έχει καταφέρει να αντιμετωπίσει ρεαλιστικά την ενοχλητική μεταβλητή, n . Τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες απασχολούνται με αυτό το θέμα, και εμείς απλά ελπίζουμε ότι αυτό το έργο θα παράγει τελικά μια μέθοδο για την επίτευξη αξιόπιστων σχέσεων σχεδιασμού μεταφοράς θερμότητας για την πυρηνογέννεσης.

Είναι πράγματι τυχερό που συχνά δεν χρειάζεται να υπολογιστεί το q , αφού δίνεται από το ΔT , κατά τον βρασμό με πυρηνογένεση. Τις περισσότερες φορές το μείζον πρόβλημα είναι να αποφευχθεί η υπέρβαση του q_{\max} .



Σχήμα 30: Σύγκριση σχέσης Rohsenow με την σχέση 36 για βρασμό σε νερό και σύρματος πλατίνας 0.61mm (Πηγή [5]).

3.6 Χαρακτηριστικά αναχώρηση μιας φυσαλίδας

Η πλήρης διαδικασία της υγρής θέρμανσης, πυρήνωσης, ανάπτυξης φυσαλίδων και της απελευθέρωσης συλλογικά αναφέρεται ως κύκλος βρασμού, είναι ο κεντρικός μηχανισμός μεταφοράς της θερμότητας από ένα υπέρθερμο τοίχωμα κατά τον στάσιμο βρασμό. Δυο χαρακτηριστικά αυτής της διαδικασίας που επηρεάζουν τον ρυθμό της μεταφοράς θερμότητας κατά την διάρκεια του κύκλου βρασμού είναι η διάμετρος φυσαλίδων κατά την αναχώρηση, d_d , και η συχνότητα, f , όπου οι φυσαλίδες δημιουργούνται και απελευθερώνονται.

Οι αναλύσεις για το ρυθμό ανάπτυξης της φυσαλίδας δείχνουν ότι η διάμετρος αναχώρησης και η συχνότητα της απελευθέρωσης σχετίζονται. Το αντίστροφο της συχνότητας, $\nu = \frac{1}{f}$, το οποίο είναι το χρονικό διάστημα που συνδέονται με την ανάπτυξη της κάθε φυσαλίδας, που πρέπει να ισούται με το άθροισμα του χρόνου αναμονής και του χρόνου που απαιτείται για τη φυσαλίδα να αυξηθεί σε διάμετρο από την αναχώρησή του:

$$\frac{1}{f} = \nu = t_w + t_d \quad (38)$$

Η συχνότητα της απελευθέρωσης των φυσαλίδων εξαρτάται άμεσα από το πόσο μεγάλη πρέπει να γίνει η φυσαλίδα για να συμβεί η απελευθέρωση, και, κατά συνέπεια, για την ταχύτητα με την οποία η φυσαλίδα μπορεί να αναπτυχθεί σε αυτό το μέγεθος.

Η διάμετρος της φυσαλίδας κατά την απελευθέρωση καθορίζεται κυρίως από την καθαρή επίδραση των δυνάμεων που δρουν στις φυσαλίδες, όπως αναπτύσσεται την επιφάνεια. Η διεπιφανειακή τάση που ενεργεί κατά μήκος της γραμμής επαφής ενεργεί πάντα για να κρατήσει την φυσαλίδα στη θέση του στην επιφάνεια. Η άνωση είναι συχνά ένας σημαντικός παίκτης στην ισορροπία των δυνάμεων, αν και η επίδραση τους εξαρτάται από τον προσανατολισμό της επιφάνειας σε σχέση με την επιτάχυνση, ή την βαρυτική δύναμη του σώματος. Για μια οριζόντια επιφάνεια προς τα πάνω, η άνωση δρα άμεσα για να αποσπάσει τη φυσαλίδα, ενώ για παρόμοια επιφάνεια προς τα κάτω, η άνωση ενεργεί για να κρατήσει τη φυσαλίδα που πιέζεται στην επιφάνεια. Η επίδραση της άνωσης θα ποικίλει γύρω από την περίμετρο ενός υπέρθερμου οριζόντιου κυλίνδρου.

Εάν η φυσαλίδα μεγαλώσει πολύ γρήγορα, η αδράνεια που συνδέεται με το επαγόμενο πεδίο ροής του υγρού γύρω από την φυσαλίδα μπορεί, επίσης, να έχει την τάση να τραβήξει την φυσαλίδα προς την επιφάνεια. Όταν το υγρό πλησίον της επιφάνειας έχει μια κίνηση που σχετίζεται με αυτό, δυνάμεις έλξης και ανύψωσης ενεργούν ώστε να αποσυνδεθεί η φυσαλίδα από την επιφάνεια. Επιπλέον, ο ρυθμός αύξησης των φυσαλίδων και του σχήματος (ημισφαιρικό ή σφαιρικό) μπορούν να επηρεάσουν τις συνθήκες της απελευθέρωσης. Όπως, επίσης η διάμετρος αναχώρησης μπορεί να επηρεαστεί από την υπερθέρμανση της επιφάνειας ή τη ροή θερμότητας, την γωνία επαφής και τις θερμοφυσικές ιδιότητες των φάσεων του υγρού και του ατμού.

Η συχνότητα της απελευθέρωσης φυσαλίδων εξαρτάται άμεσα από το πόσο μεγάλη είναι η φυσαλίδα που πρέπει να γίνει για να συμβεί απελευθέρωση και για το ρυθμό με τον οποίο η φυσαλίδα μπορεί να αυξηθεί με τη διάμετρο απελευθέρωσης. Ως εκ τούτου, η συχνότητα απελευθέρωσης θα είναι μια συνάρτηση της διαμέτρου αναχώρησης της φυσαλίδας και όλων των συνθηκών και ιδιοτήτων του ρευστού που επηρεάζουν το χρόνο αναμονής και του ρυθμού ανάπτυξης της φυσαλίδας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το μέγεθος και η φύση της κάθε κοιλότητας επηρεάζει την πυρήνωση και τη συμπεριφορά του

χρόνου αναμονής. Αυτό φαίνεται να εξηγεί, τουλάχιστον εν μέρει, γιατί οπτικές παρατηρήσεις της πυρηνογένεσης γενικώς υποδηλώνουν ότι οι μεμονωμένες θέσεις εκπέμπουν φυσαλίδες με ονομαστική σταθερή συχνότητα, άλλα η παρατεταμένη συχνότητα ποικίλει από θέση σε θέση. Αν και διαφορετικές κοιλότητες σε διαφορετικές συχνότητες θα δημιουργούν φυσαλίδες που είναι χρήσιμο να εξεταστεί η μέση συχνότητα διοχέτευσης f με τη διαδικασία βρασμού για ένα δεδομένο συνδυασμό στερεού – υγρού με κατάλληλες συνθήκες.

Κεφάλαιο 4 Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus

Η μετατροπή των υγρών σε ατμό είναι μια από τις πιο κοινές διεργασίες στη βιομηχανία σήμερα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση των διεργασιών του βρασμού έχουν σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια. Μια σχεδόν εξίσου συνηθισμένη διαδικασία είναι η χρήση των υγρών για να ψύξουμε θερμές επιφάνειες, όπως στις μηχανές εσωτερικής καύσης, αλλά και πάλι είναι μόνο όταν οι βασικές αρχές της εν λόγω μεταφοράς θερμότητας γίνουν κατανοητές.

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η λειτουργία της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων. Η συσκευή Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus (Σχήμα 31) έχει κατασκευαστεί για να παρέχει ένα μέσο για την διερεύνηση της ροής θερμότητας στο πλαίσιο των διαφόρων φάσεων βρασμού.



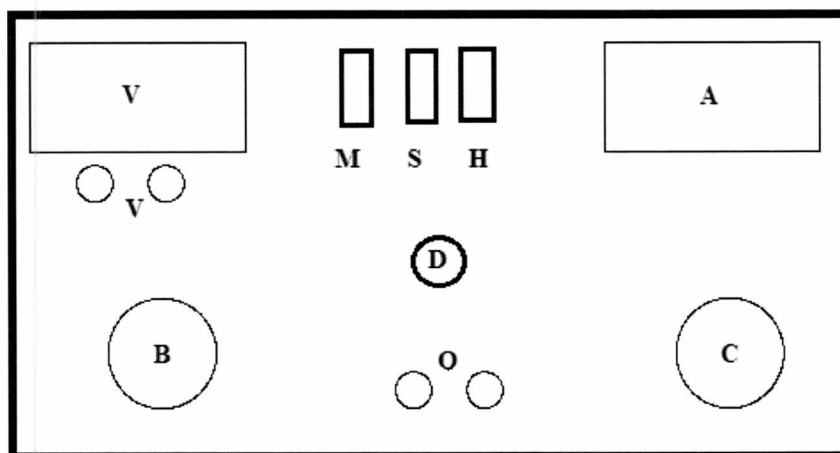
Σχήμα 31: Συσκευή Cussons P5697 Boiling Heat transfer Apparatus

Κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων η συσκευή στηρίζεται σε όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια (Θεωρητικό μέρος – Α' Μέρος). Μέσο της συσκευής ο επιστήμονας προσπαθεί να προσεγγίσει την καμπύλη βρασμού που ορίστηκε από το Nukiyama και άλλους ερευνητές, όπως επίσης να διερευνήσει περαιτέρω προβλήματα στις φάσεις του βρασμού.

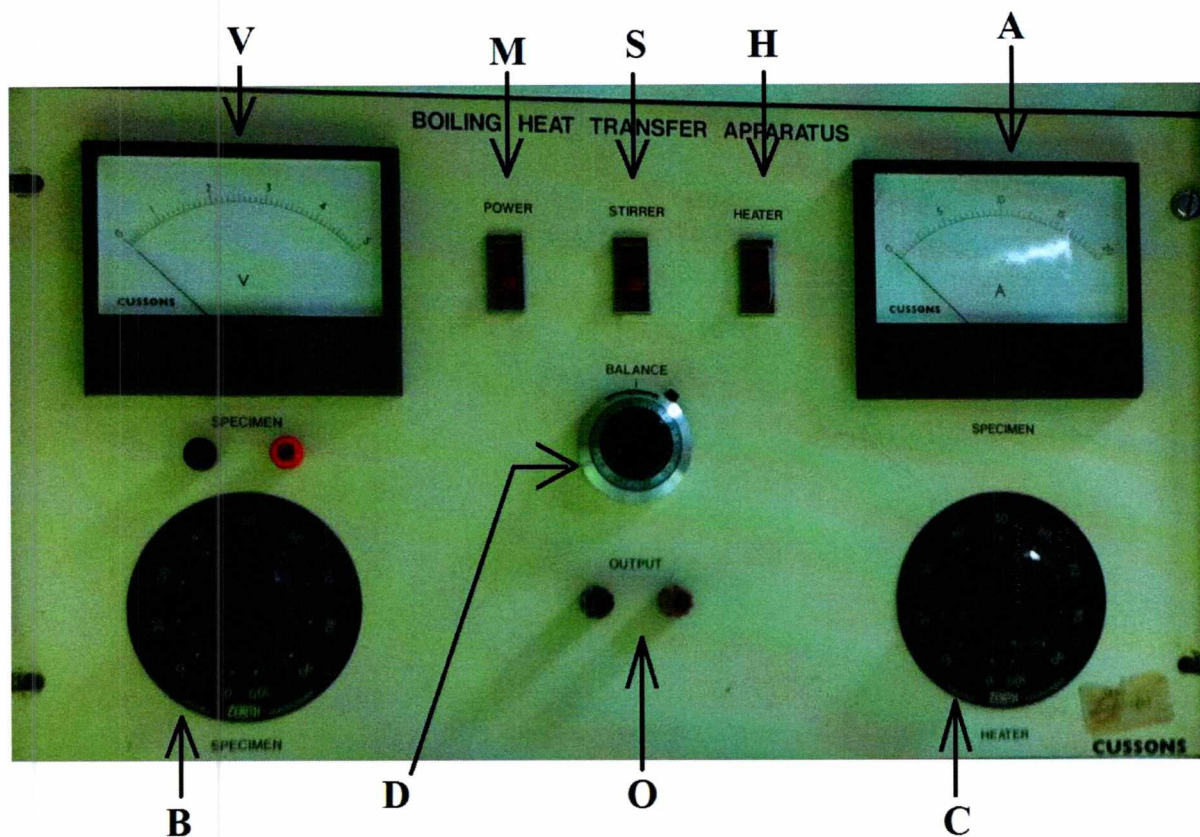
4.1 Περιγραφή και μέθοδος λειτουργίας

Η συσκευή Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus για την επίτευξη της μεταφοράς θερμότητας κατά την διάρκεια του βρασμού, χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικά θερμαινόμενο σύρμα από καθαρή πλατίνα ή Νικελίου – Χρωμίου ως στοιχείο. Επίσης, χρησιμοποιείται μια γέφυρα εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου για την συγκεκριμένη συσκευή γίνεται χρήση μιας γέφυρας Wheatstone για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του σύρματος.

Μια υδρόψυκτη «Αμετάβλητη αντίσταση» χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς, και η ισορροπία της γέφυρας επηρεάζεται από την χρήση ενός υψηλής ποιότητας ποτενσιόμετρο. Η ισορροπία της γέφυρας Wheatstone μπορεί να ανιχνευτεί αν στην έξοδο της συσκευής (σημείο Ο Σχήμα 32) χρησιμοποιηθεί ένας παλμογράφος ή ένα βολτόμετρο ακριβείας.



Σχήμα 32α: Καντράν ενδείξεων και ρυθμίσεων της συσκευής Cussons P5697



Σχήμα 32b: Καντράν ενδείξεων και ρυθμίσεων της συσκευής Cussons P5697

A = Ένδειξη του ρεύματος (Ampere)

V = Ένδειξη της τάσης (Volt)

B = Ρυθμιστής ελέγχου ρεύματος

C = Ρυθμιστής ελέγχου θερμοκρασίας

D = Ρυθμιστής γέφυρας (Balance)

M = Κύρια τροφοδοσία

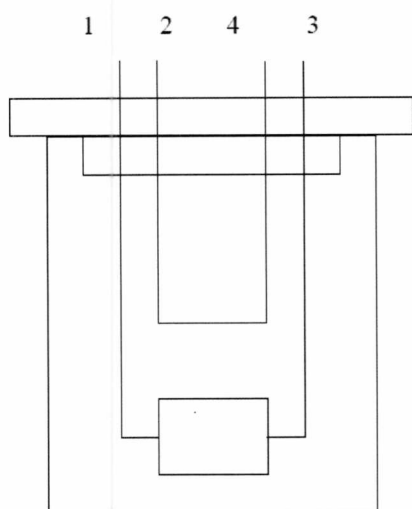
S = Άνοιγμα ή κλείσιμο της περιστροφής του μαγνήτη ανάδευσης

H = Άνοιγμα ή κλείσιμο της θερμαντικής αντίστασης

O = Έξοδος της συσκευής, προς βολτόμετρο ή παλμογράφο

Επίσης, στην παρακάτω εικόνα αναπαρίσταται η συνδεσμολογία των δοχείων που παίρνουν μέρος στο πείραμα του βρασμού. Παρατηρούμε ότι το ένα δοχείο είναι δοχείο

συνεχούς αντίστασεως και το άλλο δοχείο είναι το δοχείο όπου θα γίνει το πείραμα του βρασμού. Στα παρακάτω σχήματα 33 και 34 αναφέρονται οι συνδεσμολογίες των δοχείων.

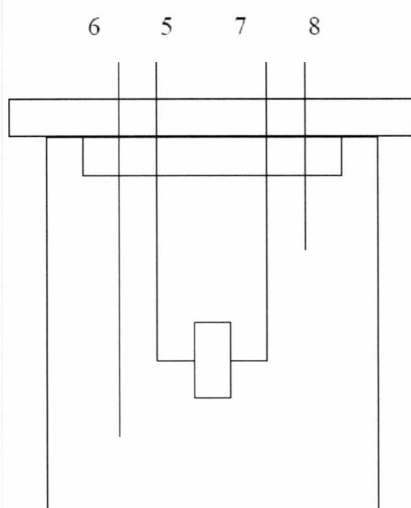


Ακρα:

1 - 3 Αντίσταση Θέρμανσης ή Θερμαντής

2 - 4 Τοποθέτηση του στοιχείου ή σύρματος

Σχήμα 33: Δοχείο που παίρνει μέρος ο βρασμός



Ακρα:

5 - 7 Συνεχής αντίσταση

6 Είσοδος νερού

8 Έξοδος νερού

Σχήμα 34: Δοχείο συνεχούς αντίστασης

4.2 Οδηγίες λειτουργίας

Για να ξεκινήσετε την πειραματική διαδικασία, συνδέστε το δείγμα σύρματος Νικελίου – Χρωμίου ή Πλατίνας στα άκρα των τερματικών πυλώνων 2 – 4 εξασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχουν αιχμηρές συστροφές στο σύρμα. Επίσης, θα πρέπει το σύρμα να μην είναι πολύ σφιχτό μεταξύ των πυλώνων και οι βίδες συνδέσεις θα πρέπει να είναι καλά βιδωμένες. (**ΠΡΟΣΟΧΗ** μην σφίγγετε το σύρμα στο βαθμό ώστε να είναι πεπλατυσμένο).

Μετά το πρώτο βήμα της τοποθέτησης του σύρματος, το επόμενο βήμα είναι να γεμίσουμε το δοχείο που γίνεται ο βρασμός στα 2/3 του συνόλου του με απιονισμένο νερό. Έπειτα το τοποθετείτε στην θέση του πάνω στην συσκευή.

Επόμενο βήμα είναι η τοποθέτηση των σωλήνων νερού στην είσοδο (σημείο 6 - Σχήμα 32) και στην έξοδο (σημείο 8 - Σχήμα 32) του δοχείου συνεχούς αντιστάσεως. Μετά πρέπει να ελεγχθούν οι καλωδιώσεις στα δυο δοχεία και να διαπιστωθούν ότι όλα είναι εντάξει.

Στο δοχείο συνεχούς αντιστάσεως θέλουμε το νερό να έχει ρυθμό 1 λίτρο ανά λεπτό, γιατί αν έχουμε υπερβολική ροή θα σηκωθεί το καπάκι το δοχείου και θα προκληθεί διαρροή.

Μετά το τέλος των συνδέσεων και τοποθετήσεων όλων των δοχείων στις θέσεις τους, θα πρέπει να γυρίσετε όλους τους ρυθμιστές στην τιμή μηδέν.

Έπειτα συνδέστε την συσκευή στο ρεύμα και ενεργοποιήστε την κύρια τροφοδοσία (σημείο M Σχήμα 30).

Με ένδειξη μηδέν σε όλους τους ρυθμιστές πάρτε την ένδειξη της τιμής της θερμοκρασίας στο δοχείο του πειράματος. Έπειτα αυξάνεται ο ρυθμιστής ελέγχου της έντασης στο 1 A, ισορροπείτε τη γέφυρα μέσω του Balance και παίρνετε τη μέτρηση της εξόδου στο βολτόμετρο από το Output της συσκευής (σημείο V - Σχήμα 32). Αυτήν την τιμή καταγράψτε την ώστε να ξέρετε την τιμή του βολτομέτρου όπου είναι ισορροπημένη η γέφυρα Wheatstone. Επίσης καταγράψτε την τιμή του Balance όπου η γέφυρα Wheatstone είναι ισορροπημένη. Η ισορρόπηση της γέφυρας παρατηρείται αν στο βολτόμετρο (σημείο O - Σχήμα 32) είναι περίπου μηδέν. Περίπου μηδέν, επειδή το βολτόμετρο ενδέχεται να δείξει μια τιμή της τάξεως των mV πολύ κοντά στο μηδέν. Αυτό θεωρείται ως μηδέν, αλλά οφείλεται στις απώλειες που υπάρχουν μέσα στις συνδέσεις της συσκευής. Το σφάλμα αυτό

θεωρείται πάρα πολύ μικρό σχεδόν αμελητέο, οπότε θεωρούμε ότι η γέφυρα είναι ισορροπημένη.

Αφού γίνουν τα παραπάνω στάδια και ισορροπήσει η γέφυρα, τότε μπορείτε να πάρετε την αρχική μέτρηση (V_o) στο βολτόμετρο της συσκευής (σημείο V - Σχήμα 32).

Το τελευταίο στάδιο πριν την διεξαγωγή των μετρήσεων είναι να ανοίξουμε την θέρμανση (σημείο H - Σχήμα 32) και την περιστροφή του μαγνήτη ανάδευσης (σημείο S - Σχήμα 32). Η μόνη διαφορά είναι ότι κατά την καταγραφή των μετρήσεων θα πρέπει το κουμπί της θέρμανσης και της ανάδευσης να είναι στο OFF.

4.3 Μέτρηση της θερμοκρασίας του σύρματος

Η θερμοκρασία του σύρματος δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα και ως εκ τούτου μετριέται με την βοήθεια μιας γέφυρας εναλλασσόμενου ρεύματος με συνεχής αντίσταση στον ένα βραχίονα και το δείγμα στον άλλο βραχίονα.

Με την γέφυρα σε ισορροπία, ρυθμίζεται η ισορροπία στο ποτενσιόμετρο, η θέση του ποτενσιόμετρου χρησιμοποιείται ως ένδειξη της θερμοκρασίας του δείγματος. Για να γίνει αυτό θα πρέπει η θέση του ποτενσιόμετρου να προ – βαθμονομηθεί έναντι της θερμοκρασίας πριν από την διεξαγωγή των πειραμάτων βρασμού. Η διαδικασία βαθμονόμησης θα αναφερθεί παρακάτω. Τα γραφήματα βαθμονόμησης θα πρέπει να είναι σχεδόν γραμμικά και μπορούν να παρασταθούν με μια εξίσωση της μορφής

$$t = a + b * p \quad (39)$$

όπου t είναι η θερμοκρασία του δείγματος ή σύρματος και p η θέση του ποτενσιόμετρου.

4.4 Διαδικασία βαθμονόμησης

Το ποτενσιόμετρο θα πρέπει να βαθμονομηθεί σε τμήματα βαθμών κελσίου.

Ρυθμίστε το ρεύμα στο 1 A, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εξισορροπήστε τη γέφυρα και σημειώστε την ένδειξη με το ποτενσιόμετρο και τη θερμοκρασία του νερού (σε 1 A το δείγμα έχει σχεδόν την ίδια θερμοκρασία με το νερό).

Ενεργοποιήστε το βοηθητικό σύστημα θέρμανσης (πατώντας το κουμπί H - Σχήμα 32) και αυξήστε την θερμοκρασία του νερού κατά 10 °C. Απενεργοποιήστε το σύστημα θέρμανσης, ελέγξτε ότι το τρέχον ρεύμα στο δείγμα εξακολουθεί να είναι 1 A, και εκ νέου εξισορροπήστε την γέφυρα Wheatstone σημειώνοντας την τιμή του ποτενσιόμετρου και την ακριβή θερμοκρασία του νερού.

Η παραπάνω διαδικασία πρέπει να γίνει μέχρι τους 100 °C. Έπειτα από την διαδικασία αυτή θα πάρουμε ένα γράφημα της θερμοκρασίας του νερού με την ένδειξη του ποτενσιόμετρου, όπου θα βαθμονομηθεί σε °C / διαιρέσεις.

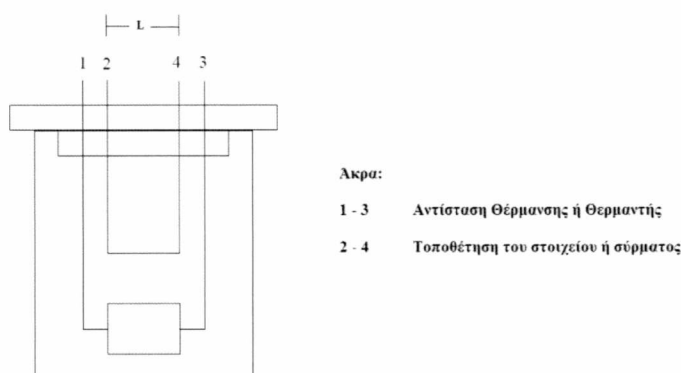
Ανάλογα με το υγρό που τοποθετείτε στο δοχείο που γίνεται το πείραμα του βρασμού, το γράφημα μπορεί να επεκταθεί ως τους 130 °C με αμελητέο σφάλμα.

4.5 Μέτρηση της επιφανειακής ισχύς του δείγματος

Η ακριβής θερμοκρασία μπορεί να υπολογιστεί από την μετρούμενη τάση και το ρεύμα του, όταν η γέφυρα είναι ισορροπημένη. Το ρεύμα μέσω του σταθεροποιημένου ποτενσιόμετρου του κυκλώματος είναι περίπου 73 mA, η οποία είναι μικρότερη από την ανάλυση για το αμπερόμετρο και είναι αμελητέο σε σύγκριση με το ρεύμα που περνά μέσα από το σύρμα και τα στοιχεία αναφοράς. Η επιφανειακή ισχύς του δείγματος δίνεται από την σχέση

$$P = \frac{VI}{A} = \frac{VI}{\pi DL} \quad (40)$$

όπου V η μετρούμενη τάση σε Volt, I το ρεύμα το οποίο μεταβάλλουμε εμείς κάθε φορά σε Ampere και A το εμβαδόν της επιφάνειας του σύρματος ($A=\pi DL$, Σχήμα 35).



Σχήμα 35: Δοχείο που γίνεται ο βρασμός (μήκος σύρματος L)

4.6 Μετάδοση θερμότητας με βρασμό

Για να αποδειχθεί η επίδραση της θερμοκρασίας του νερού θα πρέπει να αυξηθεί το σημείο βρασμού. Αυτό θα επιτευχθεί δίνοντας ρεύμα στα άκρα του σύρματος.

Αφού γίνουν όλα τα στάδια που αναφέραμε παραπάνω, το επόμενο βήμα είναι η διεξαγωγή των μετρήσεων.

Τώρα αυξήστε το ρυθμιστή ελέγχου ρεύματος σε 0,5 A την φορά και καταγράψτε τη τάση από την ένδειξη του βολτομέτρου της συσκευής. Αυτό μπορεί να γίνει μέχρι το σημείο τήξεως του σύρματος. Κατά την καταγραφή πρέπει να προσέχεται να υπάρχει ισορροπία στην γέφυρα και η θερμοκρασία του νερού να είναι γύρω στους 100 °C.

Μετά την καταγραφή των αποτελεσμάτων μπορεί να βρεθεί η θερμοκρασία του σύρματος, όπως επίσης να σχεδιαστεί η γραφική παράσταση $Q - \Delta T$.

4.7 Λειτουργία μαγνητικού αναδευτήρα

Η συσκευή Cussons P5696 Boiling Heat Transfer Apparatus χρησιμοποιεί ένα μαγνητικό αναδευτήρα με ταχύτητα λειτουργίας μεταξύ του 100 ως 1000 στροφές ανά λεπτό. Αυτή η μονάδα απαιτεί παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.

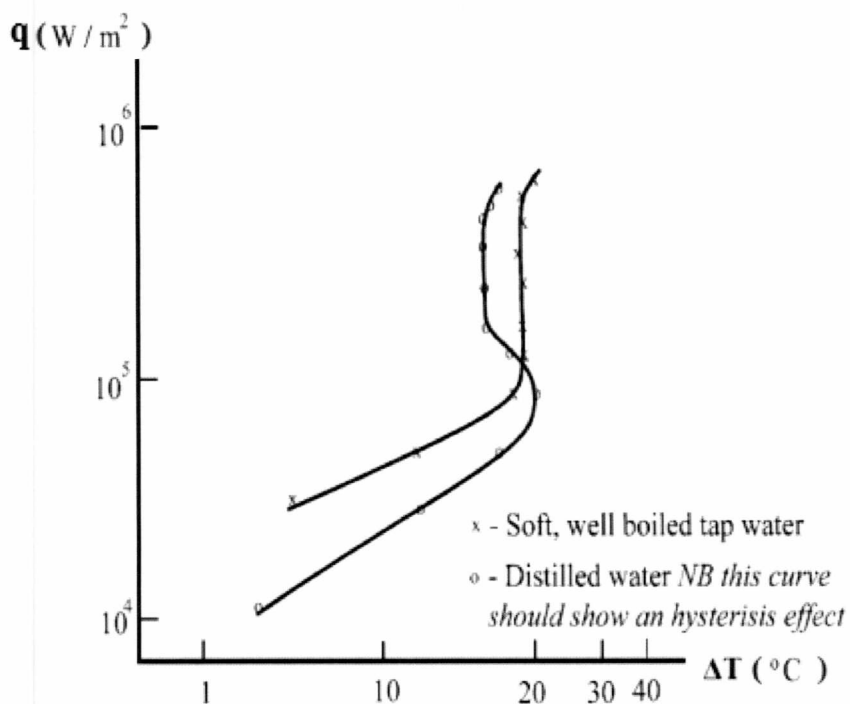
Για την λειτουργία του μαγνητικού αναδευτήρα θα πρέπει:

- i) Βεβαιωθείτε ότι το κουμπί της λειτουργίας είναι στο OFF.
- ii) Τοποθετήστε το μαγνητικό αναδευτήρα στο κέντρο του δοχείο όπου θα γίνει ο βρασμός.
- iii) Ενεργοποιήστε το κουμπί περιστροφής του αναδευτήρα.
- iv) Μετά την ολοκλήρωση της ανάδευσης γυρίστε το κουμπί στη θέση OFF.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Συνιστάται στα δοχεία 1 λίτρου, να χρησιμοποιείται μαγνητικό αναδευτήρα διάστασης των 25 mm.

4.8 Τυπικά αποτελέσματα

Τα τυπικά αποτελέσματα που περιμένετε να πάρετε και θα αναπαραστήσετε σε γραφική παράσταση $q - \Delta T$ είναι της μορφής του Σχήματος 37. Αυτά τα αποτελέσματα προσπαθούν να προσεγγίσουν την καμπύλη βρασμού που αναφέρεται στο Α' μέρος – Θεωρητικό μέρος της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 36: Τυπικά αποτελέσματα πειραμάτων βρασμού.

Κεφάλαιο 5 Μετρήσεις Πειραματικού μέρους

Σε αυτό το Κεφάλαιο στόχος μας είναι να καταγράψουμε τη διαδικασία και τις μετρήσεις του εργαστηριακού πειράματος. Θα αναφερθούμε στον υπολογισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας του σύρματος και το πώς υπολογίζεται η ροή θερμότητας, Q . Μετά από αρκετές επαναλήψεις των πειραμάτων θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων, όπως και θα φτιάξουμε τις γραφικές παραστάσεις που περιγράφουν την καμπύλη βρασμού.

5.1 Μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης με τη θερμοκρασία

Η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από τα γεωμετρικά του στοιχεία που δίνεται από τη σχέση

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (40)$$

όπου L το μήκος του αγωγού σε m , A ($A = \frac{\pi D^2}{4}$) η επιφάνεια της πρισματικής διατομής του σε m^2 και ρ η ειδική αντίσταση που εξαρτάται από την φύση του υλικού και τη θερμοκρασία.

Καθώς, όπως είναι γνωστό, η ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγίμου υλικού εξαρτάται από τις συνεχείς συγκρούσεις των ηλεκτρονίων, η αντίσταση αναμένεται να αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθότι θα αυξάνονται και οι συγκρούσεις. Πράγματι πειραματικές διαδικασίες έδειξαν ότι η αντίσταση ενός υλικού συνδέεται με την εξωτερική θερμοκρασία λειτουργίας σύμφωνα με την σχέση

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta T \Rightarrow R = R_0 [1 + a(T_w - T_0)] \quad (41)$$

όπου α είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής, χαρακτηριστικό του εκάστοτε υλικού, R_0 η τιμή της αντίστασης στους 0°C ή 20°C , T_0 η θερμοκρασία που είναι η αντίσταση R_0 , R η τιμή της αντίστασης η οποία μεταβάλλεται σύμφωνα με τον τύπο $R = V / I$ και T_w η θερμοκρασία στην οποία είναι η αντίσταση R ή αλλιώς στην εργασία αυτή η θερμοκρασία του σύρματος.

Μπορούμε να πούμε, ότι η αντίσταση του αγωγού μπορεί να προσδιοριστεί πολύ εύκολα από το Νόμο του Ohm, $V = IR$, που βρίσκει εφαρμογή στις γραμμικές αντιστάσεις, με μέτρηση της τάσης στα άκρα του και του ρεύματος που το διαρρέει. Όταν ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα η θερμοκρασία του αγωγού διαφοροποιείται από αυτήν του περιβάλλοντος και μεταβάλλεται με την τάση. Επειδή, η αντίσταση μεταβάλλεται με την θερμοκρασία η καμπύλη V ως προς I δεν είναι ευθεία άλλα καμπύλη με τα κοίλα προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Στην πραγματικότητα η σχέση που συνδέει την αντίσταση με τη θερμοκρασία στη περιοχή υψηλών θερμοκρασιών δεν είναι γραμμική αλλά αποκτά τη μορφή

$$R = R_0 \left[1 + \alpha(T_w - T_0) + \beta(T_w - T_0)^2 + \gamma(T_w - T_0)^3 + \dots \right] \quad (42)$$

Σε πολλές εφαρμογές και στην περίπτωση αυτής της διπλωματική εργασίας, εφαρμόζεται προσεγγιστικά η σχέση 41 με την παραδοχή ότι οι συντελεστές β, γ, \dots κ.λπ. είναι αρκετά μικροί ή ότι ο συντελεστής α δεν είναι σταθερός, ως εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία, άλλα ενδιαφέρει η μέση τιμή του σε μια περιοχή θερμοκρασιών.

5.2 Χρήση δειγμάτων (σύρματα) τις πειραματικής διαδικασίας

Τα πειράματα διεξάχθηκαν με σύρματα Νικελίου – Χρωμίου και Πλατίνας. Οι διαστάσεις των συρμάτων και ο αριθμός των επαναλήψεων συνοψίζεται στον Πίνακα 5, όπως επίσης, γνωρίζουμε ότι το μήκος του σύρματος είναι $L = 52 \text{ mm}$.

Χρειάζεται να πραγματοποιηθούν αρκετές επαναλήψεις και επιλογή κατάλληλων τιμών από το πεδίο των μετρήσεων, ώστε να γίνει βέλτιστη προσέγγιση της καμπύλης βρασμού.

Πίνακας 5: Πίνακας συρμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία.

Μέταλλο	Διάμετρος D (mm)	Μήκος σύρματος L (mm)	Αριθμός επαναλήψεων
Νικελίου - Χρωμίου	0,33	52	10
Νικελίου - Χρωμίου	0,44	52	10
Νικελίου - Χρωμίου	0,52	52	10

5.3 Πειραματική διαδικασία με σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm.

Στο σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm για να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε μέτρηση θα πρέπει πρώτα να γίνει βαθμονόμηση της γέφυρας Wheatstone. Η βαθμονόμηση θα πρέπει να είναι σχετικά γραμμική και να είναι της μορφής που αναφέραμε στο κεφάλαιο 4, δηλαδή:

$$t = a + b p \quad (43)$$

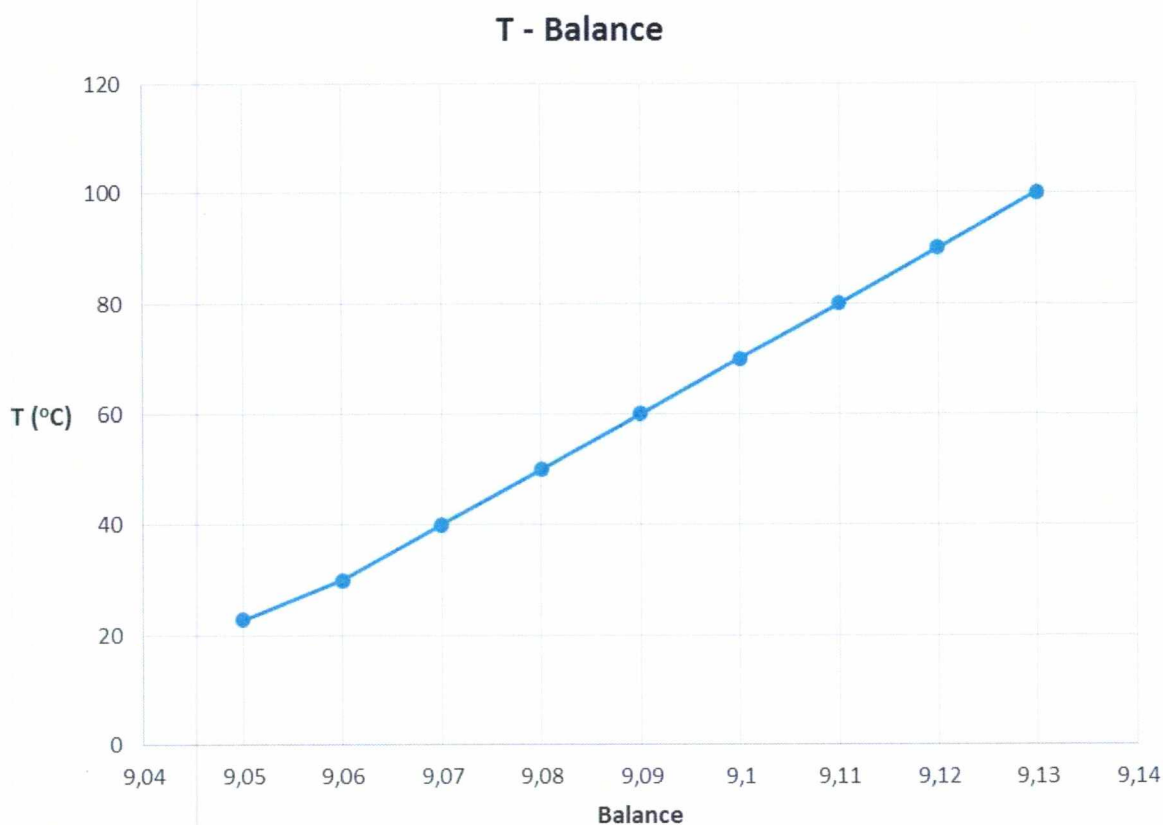
όπου t η θερμοκρασία που παίρνουμε από το θερμοστοιχείο και p η τιμή του Balance.

Για το εν λόγω πείραμα του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm το balance κυμαίνεται όπως αναφέρεται στον παρακάτω πίνακα 6.

Πίνακας 6: Πίνακας θερμοκρασίας και ισορροπία της γέφυρας Wheatstone (Balance) του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm.

T (°C)	Balance
22,75	9,05
30	9,06
40	9,07
50	9,08
60	9,09
70	9,10
80	9,11
90	9,12
100	9,13

Οπότε η γραμμικότητα αναπαρίσταται στο παρακάτω γράφημα της θερμοκρασίας με το Balance.



Σχήμα 37: Γράφημα θερμοκρασίας με Balance που αναπαριστά την γραμμικότητα.

Μετά το καλιμπράρισμα παίρνει μέρος το πείραμα, όπου αυξάνεται η ένταση του ρεύματος και καταγράφεται η τιμή της τάσης κάθε φορά. Μετά από αρκετές επαναλήψεις και με μεγάλη προσοχή για την καταγραφή των αποτελεσμάτων θα σχεδιαστεί το παρακάτω γράφημα , όπου σχεδιάζονται όλες οι καμπύλες των επαναλήψεων (Σχήμα 39).

Στον παρακάτω πίνακα 7 αναφέρονται οι επικρατούσες τιμές (συνολικός πίνακας) των μετρήσεων μετά από ορισμένες επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν, μεταβάλλοντας το ρεύμα στη συσκευή. Επίσης, υπολογίζεται η ροή θερμότητας από τη σχέση

$$q = \frac{VI}{A} = \frac{VI}{\pi DL} \quad (44)$$

όπου V η τάση που αναγράφεται στη συσκευή σε Volt, I το ρεύμα που αναγράφεται στη συσκευή αφού αυξήσουμε εμείς το ρυθμιστή ρεύματος σε Ampere, D η διάμετρος του σύρματος σε m και L το μήκος του σύρματος σε m.

Από τα παραπάνω που αναφέραμε μπορούμε να μετρήσουμε την θερμοκρασία του σύρματος, χρησιμοποιώντας την σχέση 41. Έπειτα, μπορούμε να βρούμε το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από τη σχέση

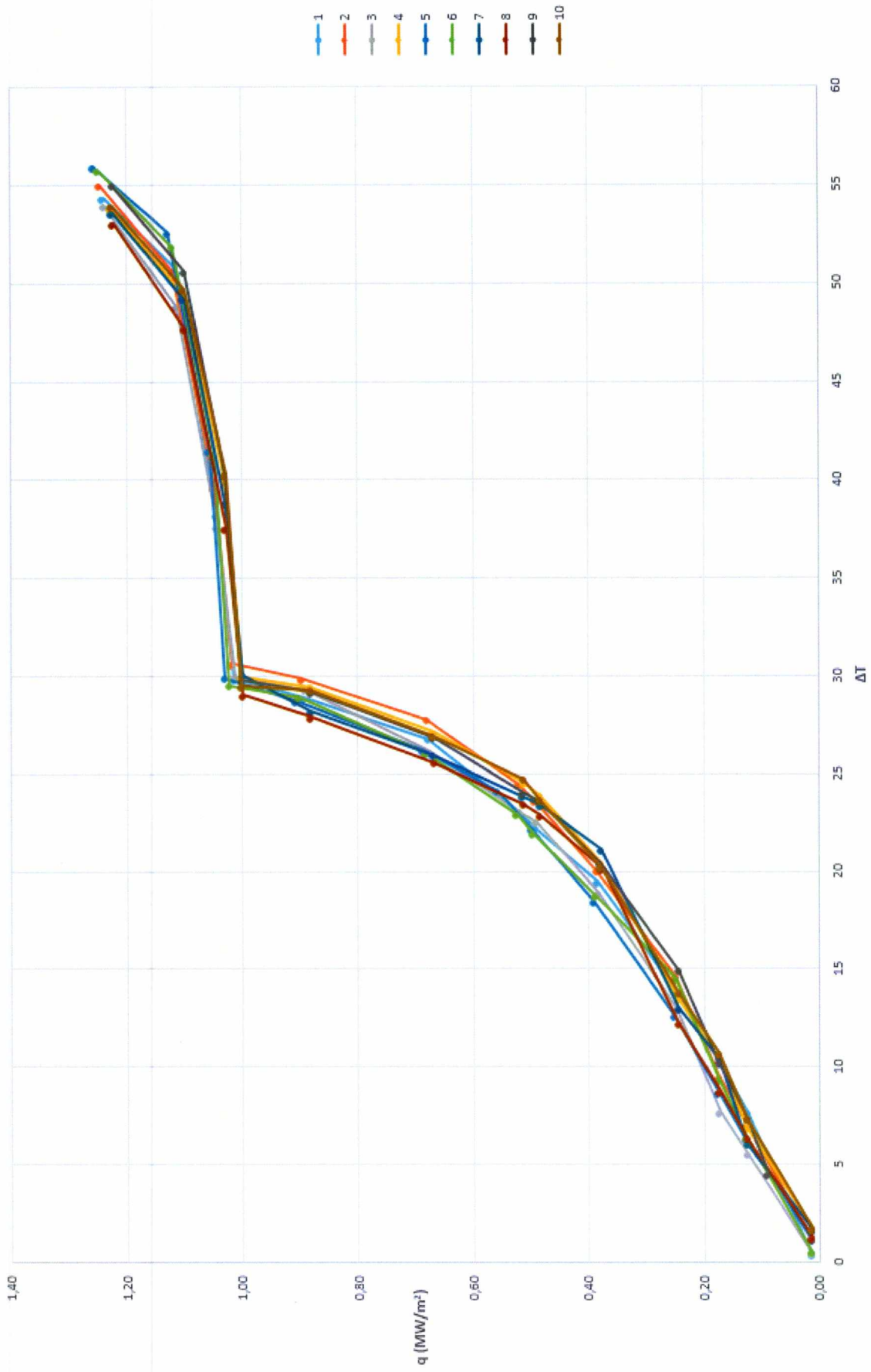
$$q = h\Delta T_{sat} \Rightarrow h = \frac{q}{\Delta T_{sat}} \quad (45)$$

όπου q η ροή θερμότητας και ΔT_{sat} η υπερθέρμανση, $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$.

Στον πίνακα 7 οι τελευταίες μετρήσεις είναι στο σημείο που καίγεται το σύρμα, άλλα και οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στον πίνακα 7 με έντονη γραφή.

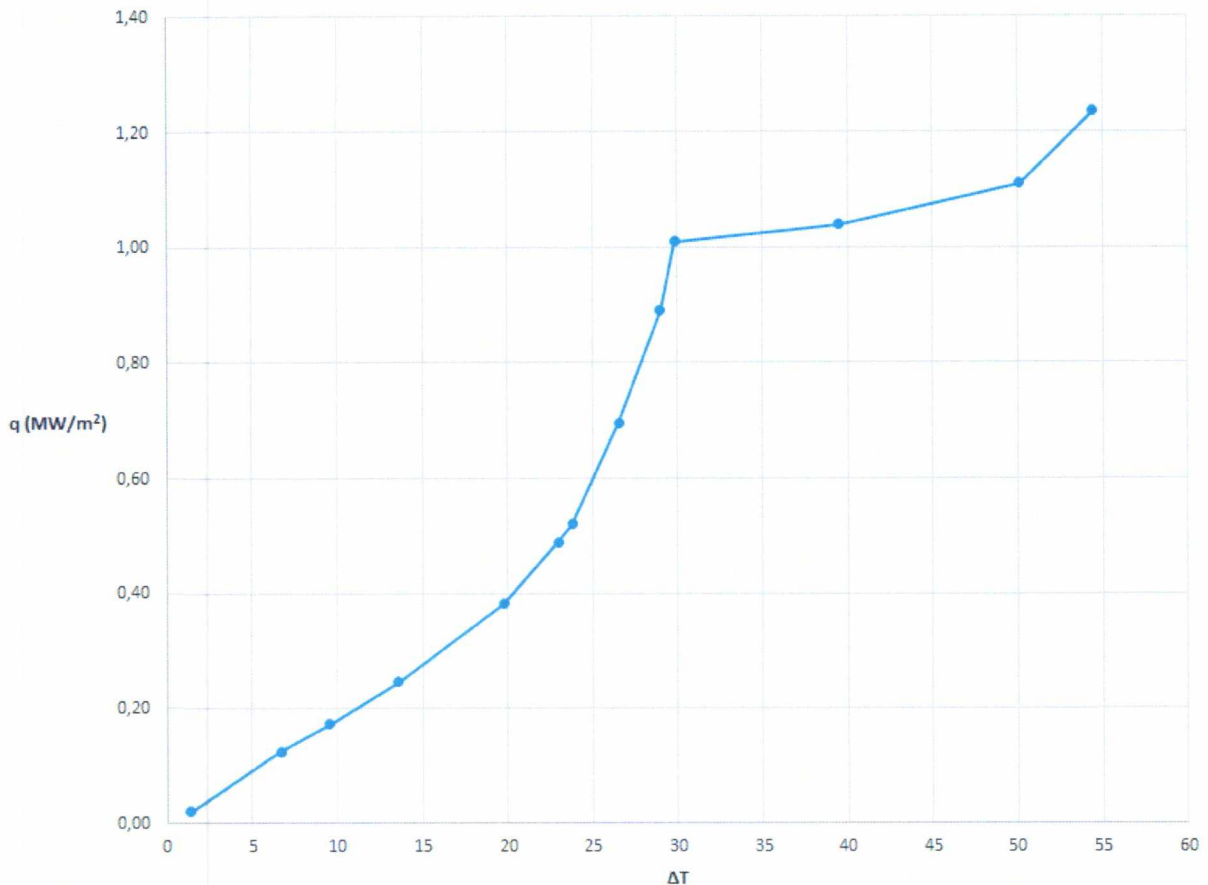
Πίνακας 7: Πίνακας μέσων αποτελεσμάτων σύρματος διαμέτρου 0,33 mm.

I (A)	V (v)	W (W)	q (w/m ²)	ΔT (K)	h (w/m ² K)
1	0,719	0,719	13340,16	1,43	9348,94
3,4	1,989	6,764	125525,59	6,68	18792,48
4	2,342	9,370	173889,80	9,58	18142,74
4,8	2,767	13,280	246456,73	13,59	18135,74
6	3,434	20,604	382388,31	19,79	19320,20
6,8	3,878	26,373	489459,56	23,00	21285,17
7	4,012	28,081	521157,19	23,82	21877,08
8	4,545	36,357	674743,52	26,55	25412,25
9,2	5,213	47,956	890010,84	28,97	30718,52
9,8	5,548	54,366	1008965,82	29,83	33828,62
10	5,597	55,965	1038650,84	39,50	26292,42
10,4	5,747	59,769	1109245,32	50,12	22131,86
11	6,047	66,517	1234484,73	54,43	22681,25



Σχήμα 38: Συνολικό γράφημα των επαναλήψεων του σύρματος Νικελίου - Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm.

Από τους παραπάνω υπολογισμούς μπορούμε να αναπαραστήσουμε την προσεγγιστική καμπύλη βρασμού (Σχήμα 40) όπως πραγματοποιήθηκε από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο. Δηλαδή, έχουμε:



Σχήμα 39: Προσεγγιστική καμπύλη βρασμού του πειράματος για σύρμα Νικελίου - Χρωμίου 0,33 mm.

5.4 Πειραματική διαδικασία με σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm.

Επαναλαμβάνουμε το πείραμα για σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm. Στο σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm για να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε μέτρηση θα πρέπει πρώτα να γίνει βαθμονόμηση της γέφυρας Wheatstone, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο πείραμα. Η βαθμονόμηση θα πρέπει να είναι σχετικά γραμμική και να είναι της μορφής που αναφέραμε στο κεφάλαιο 4, δηλαδή:

$$t = a + b p \quad (43)$$

όπου t η θερμοκρασία που παίρνουμε από το θερμοστοιχείο και p η τιμή του Balance.

Για το εν λόγω πείραμα του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33mm το balance κυμαίνεται όπως αναφέρεται στον παρακάτω πίνακα 8.

Πίνακας 8: Πίνακας θερμοκρασίας και ισορροπία της γέφυρας Wheatstone (Balance) του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm.

T (°C)	Balance
22.71	5,62
30	5,63
40	5,64
50	5,65
60	5,66
70	5,67
80	5,68
90	5,69
100	5,70

Οπότε η γραμμικότητα αναπαρίσταται στο παρακάτω γράφημα της θερμοκρασίας με το Balance



Σχήμα 40: Γράφημα θερμοκρασίας με Balance που αναπαριστά την γραμμικότητα σε σύρμα διαμέτρου 0,44mm.

Μετά το καλιμπράρισμα παίρνει μέρος το πείραμα, όπου αυξάνεται η ένταση του ρεύματος και καταγράφεται η τιμή της τάσης κάθε φορά. Μετά από αρκετές επαναλήψεις και με μεγάλη προσοχή για την καταγραφή των αποτελεσμάτων θα σχεδιαστεί το παρακάτω γράφημα , όπου σχεδιάζονται όλες οι καμπύλες των επαναλήψεων (Σχήμα 42).

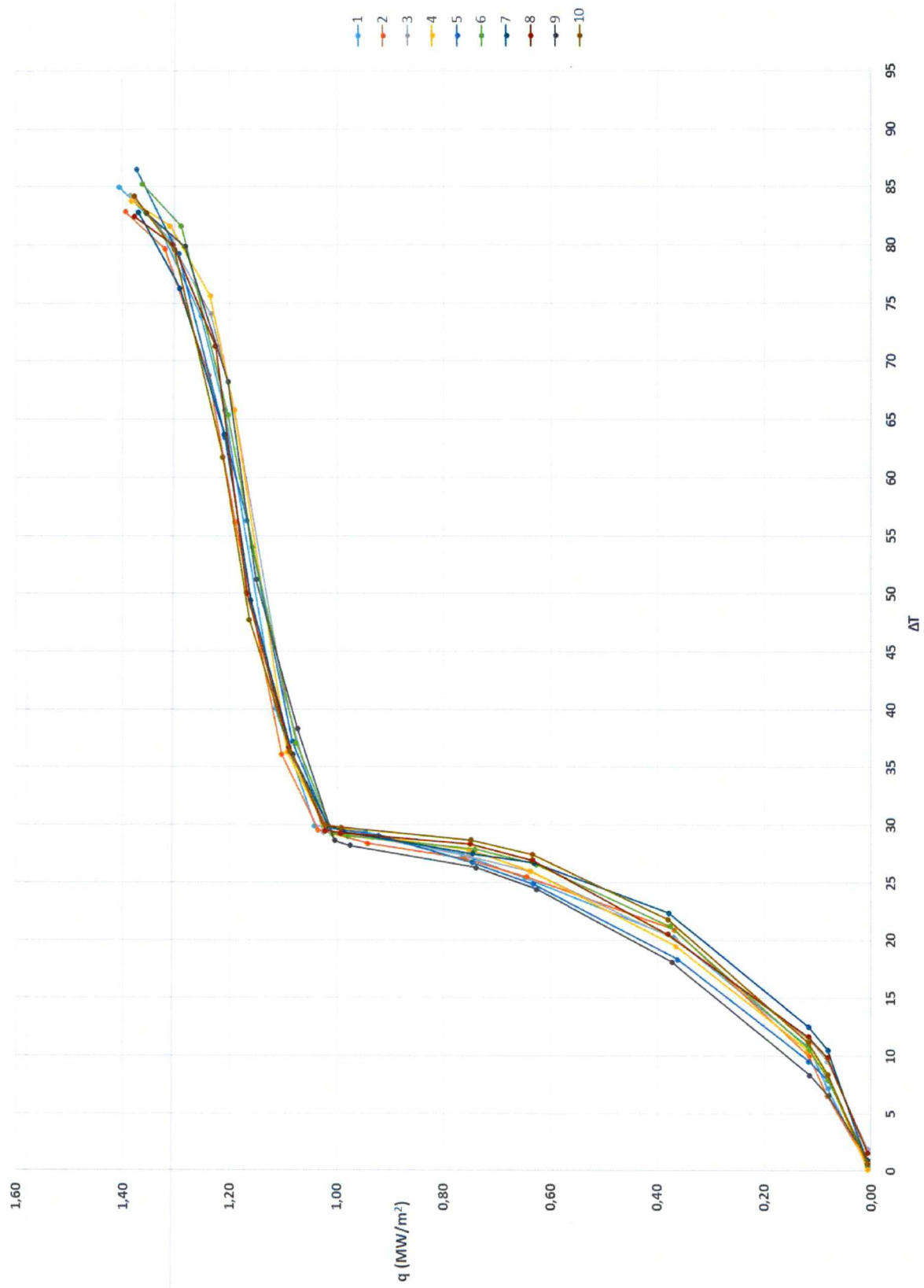
Στον παρακάτω πίνακα 9 αναφέρονται οι επικρατούσες τιμές (συνολικός πίνακας) των μετρήσεων μετά από ορισμένες επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν, μεταβάλλοντας το ρεύμα στη συσκευή. Ο υπολογισμός του πίνακα 9 γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτό που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο κατά τον υπολογισμό σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm.

Από τα παραπάνω που αναφέραμε μπορούμε να μετρήσουμε την θερμοκρασία του σύρματος, χρησιμοποιώντας την σχέση 41. Έπειτα, μπορούμε να βρούμε το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Στον πίνακα 9 οι τελευταίες μετρήσεις είναι στο σημείο που καίγεται το σύρμα, άλλα και οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στον πίνακα 9 με έντονη γραφή.

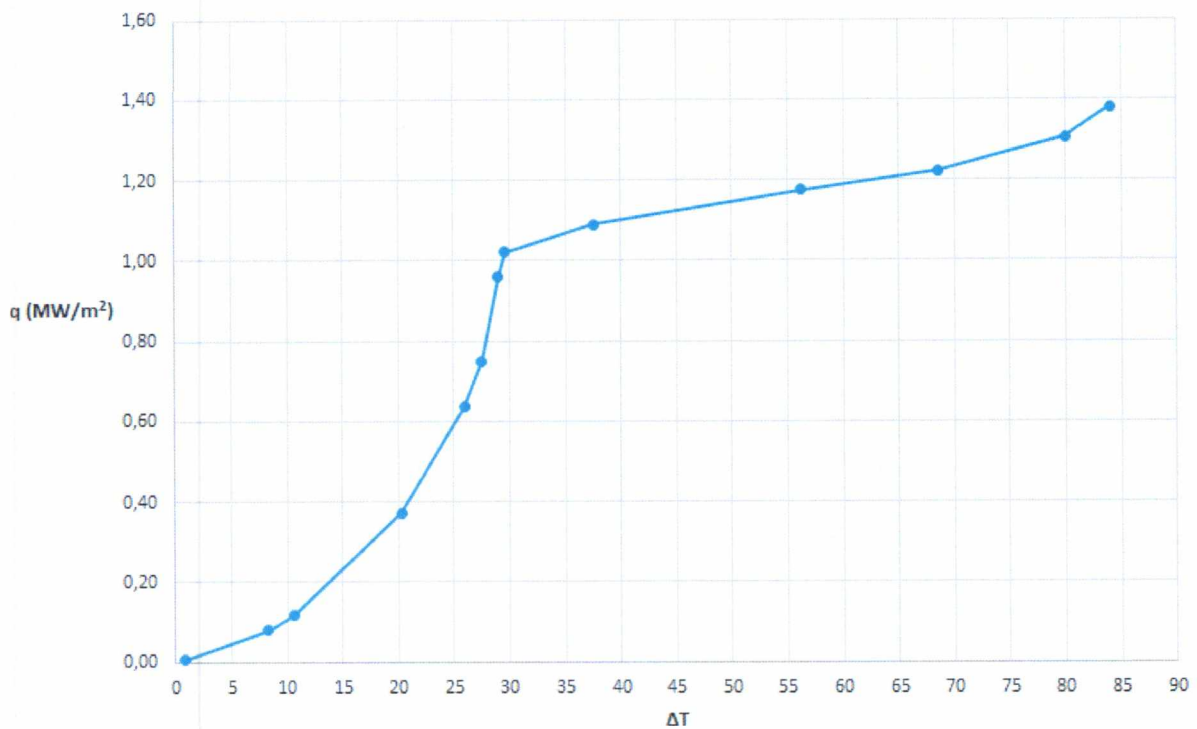
Πίνακας 9: Πίνακας μέσων αποτελεσμάτων σύρματος διαμέτρου 0,44mm.

I (A)	V (V)	W (W)	q (W/m²)	ΔT (K)	h (W/m² K)
1	0,443	0,443	6171,77	0,81	7596,71
4	1,456	5,826	81087,70	8,27	9806,08
4,8	1,743	8,368	116480,33	10,63	10954,20
8,6	3,112	26,767	372570,26	20,29	18359,10
11,4	4,005	45,657	635509,00	25,95	24486,62
12,4	4,349	53,921	750542,85	27,48	27308,35
13,8	4,999	68,986	960232,84	29,02	33093,67
14	5,242	73,394	1021580,33	29,57	34552,11
14,4	5,440	78,330	1090294,42	37,57	29023,80
14,8	5,705	84,428	1175171,48	56,23	20899,08
15	5,858	87,870	1223080,26	68,60	17828,38
15,4	6,086	93,726	1304590,27	79,96	16314,59
15,8	6,270	99,069	1378963,63	83,97	16422,23



Σχήμα 41: Συνολικό γράφημα των επαναλήψεων του σφάλματος Νικεζίου - Χρομίου διαμέτρου 0,44 mm.

Από τους παραπάνω υπολογισμούς μπορούμε να αναπαραστήσουμε την προσεγγιστική καμπύλη βρασμού (Σχήμα 40) όπως πραγματοποιήθηκε από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο. Δηλαδή, έχουμε:



Σχήμα 42: Προσεγγιστική καμπύλη βρασμού του πειράματος για σύρμα Νικελίου - Χρωμίου 0,33 mm.

5.5 Πειραματική διαδικασία με σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.

Επαναλαμβάνουμε το πείραμα για σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm. Στο σύρμα Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm για να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε μέτρηση θα πρέπει πρώτα να γίνει βαθμονόμηση της γέφυρας Wheatstone, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο πείραμα. Η βαθμονόμηση θα πρέπει να είναι σχετικά γραμμική και να είναι της μορφής που αναφέραμε στο κεφάλαιο 4, δηλαδή:

$$t = a + b p \quad (43)$$

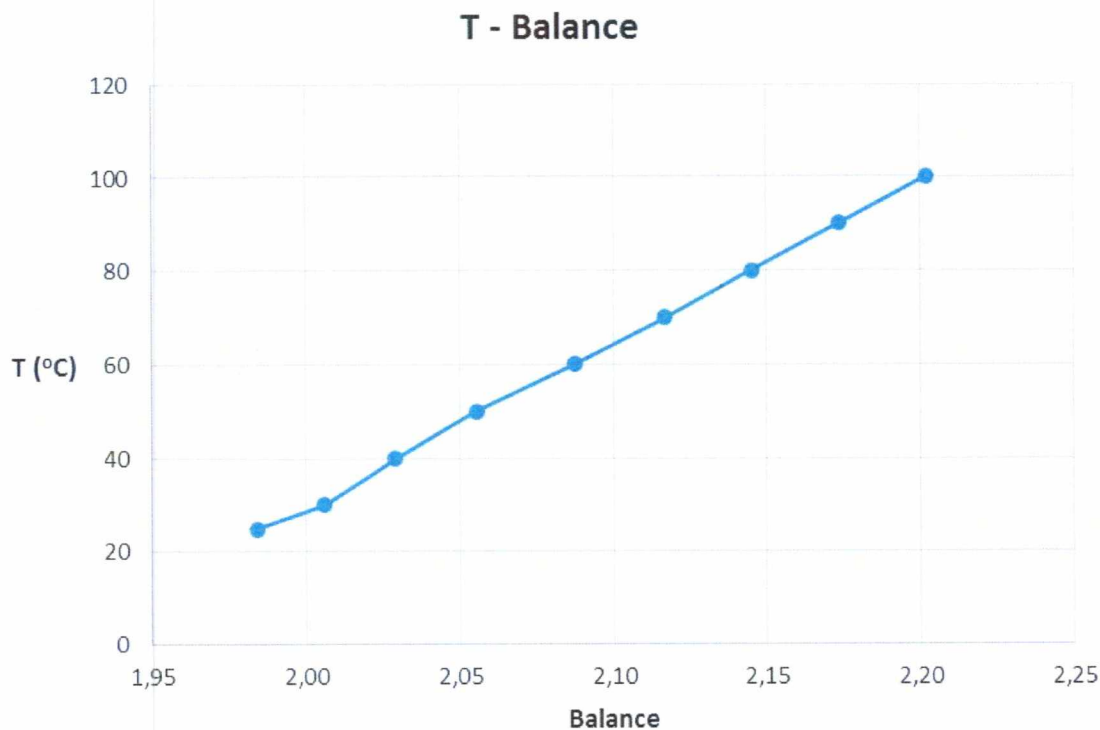
όπου t η θερμοκρασία που παίρνουμε από το θερμοστοιχείο και p η τιμή του Balance.

Για το εν λόγω πείραμα του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm το balance κυμαίνεται όπως αναφέρεται στον παρακάτω πίνακα 10.

Πίνακας 10: Πίνακας θερμοκρασίας και ισορροπία της γέφυρας (Balance) του σύρματος Νικελίου – Χρωμίου 0,52 mm

T	Balance
24,93	1,98
30	2,01
40	2,03
50	2,06
60	2,09
70	2,12
80	2,15
90	2,17
100	2,20

Οπότε η γραμμικότητα αναπαρίσταται στο παρακάτω γράφημα της θερμοκρασίας με το Balance



Σχήμα 43: Γράφημα θερμοκρασίας με Balance που αναπαριστά την γραμμικότητα σε σύρμα διαμέτρου 0,52mm.

Μετά το καλιμπράρισμα παίρνει μέρος το πείραμα, όπου αυξάνεται η ένταση του ρεύματος και καταγράφεται η τιμή της τάσης κάθε φορά. Μετά από αρκετές επαναλήψεις και με μεγάλη προσοχή για την καταγραφή των αποτελεσμάτων θα σχεδιαστεί το παρακάτω γράφημα, όπου σχεδιάζονται όλες οι καμπύλες των επαναλήψεων (Σχήμα 45).

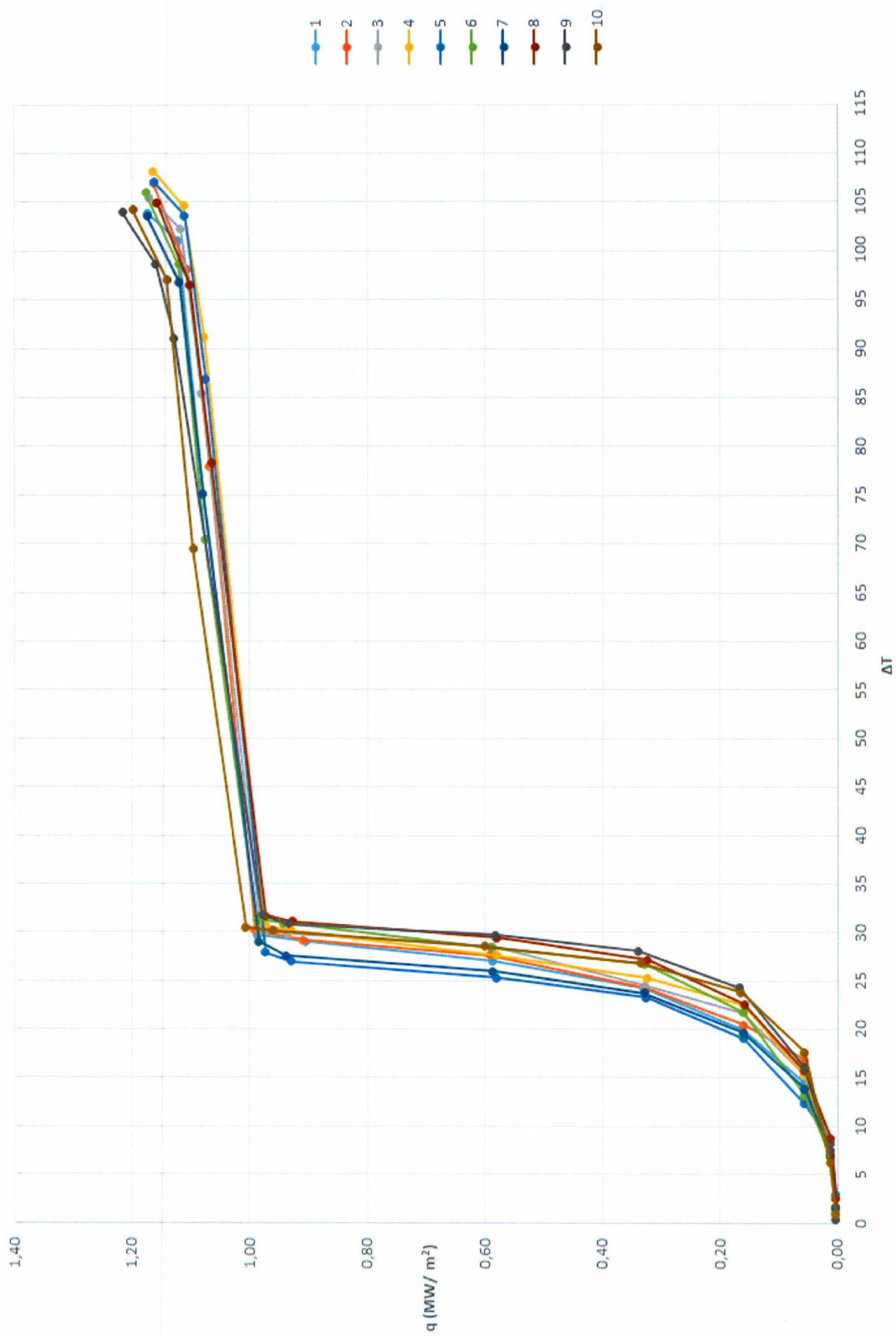
Στον παρακάτω πίνακα 11 αναφέρονται οι επικρατούσες τιμές (συνολικός πίνακας) των μετρήσεων μετά από ορισμένες επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν, μεταβάλλοντας το ρεύμα στη συσκευή. Ο υπολογισμός του πίνακα 11 γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτό που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο κατά τον υπολογισμό σύρματος Νικελίου – Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm.

Από τα παραπάνω που αναφέραμε μπορούμε να μετρήσουμε την θερμοκρασία του σύρματος, χρησιμοποιώντας την σχέση 41. Έπειτα, μπορούμε να βρούμε το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Στον πίνακα 11 οι τελευταίες μετρήσεις είναι στο σημείο που καίγεται το σύρμα, άλλα και οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στον πίνακα 11 με έντονη γραφή.

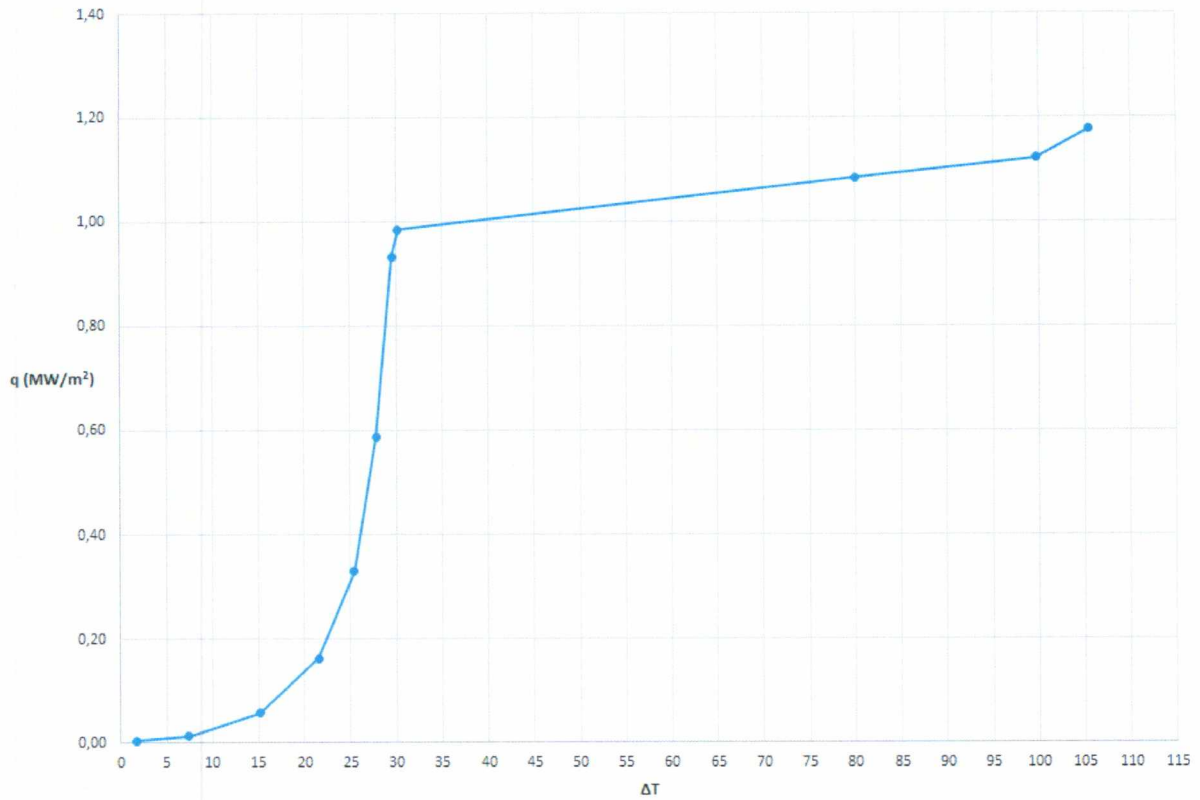
Πίνακας 11: Πίνακας μέσων αποτελεσμάτων σύρματος διαμέτρου 0,52mm.

I (A)	V (V)	W (W)	q (W/m²)	ΔT (K)	h (W/m² K)
1	0,272	0,272	3198,85	1,68	1908,69
2	0,541	1,082	12741,21	7,45	1709,12
4,5	1,067	4,800	56535,14	15,10	3744,73
7,7	1,785	13,744	161870,71	21,57	7505,48
11	2,543	27,972	329447,06	25,38	12980,98
14,4	3,458	49,794	586460,26	27,79	21103,92
17	4,654	79,125	931914,97	29,55	31533,97
17,4	4,802	83,553	984070,07	30,26	32515,85
17,8	5,165	91,932	1082751,43	80,08	13520,86
18	5,287	95,170	1120887,20	99,69	11243,47
18,4	5,424	99,796	1175376,89	105,41	11150,32



Σχήμα 44: Συνολικό γράφημα των επαναλήψεων του σφάλματος Νικελίου - Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.

Από τους παραπάνω υπολογισμούς μπορούμε να αναπαραστήσουμε την προσεγγιστική καμπύλη βρασμού (Σχήμα 40) όπως πραγματοποιήθηκε από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο. Δηλαδή, έχουμε:



Σχήμα 45: Προσεγγιστική καμπύλη βρασμού του πειράματος για σύρμα Νικελίου - Χρωμίου 0,52 mm.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα Πειραματικού μέρους

6.1 Συμπεράσματα από τις μετρήσεις της πειραματικής διαδικασίας.

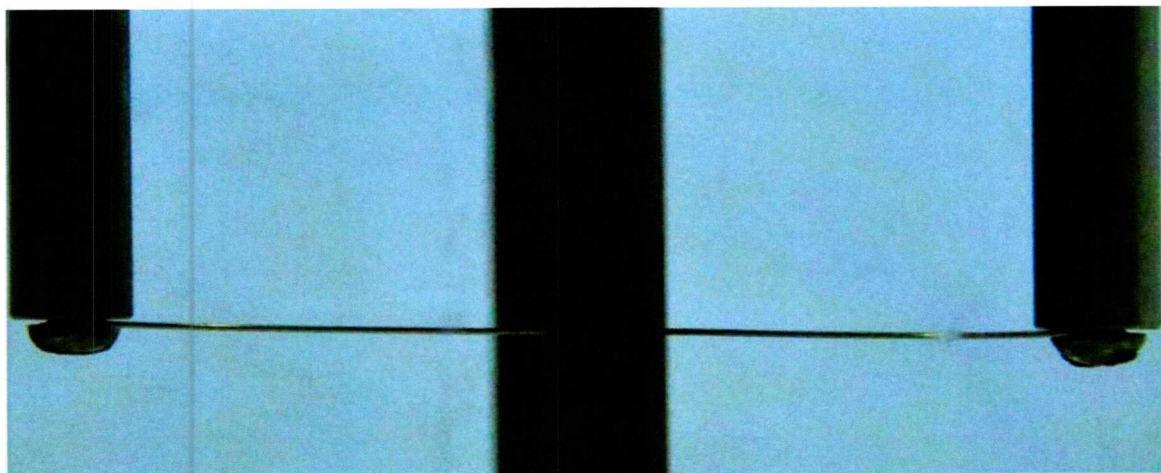
Κατά την διάρκεια του πειράματος παρατηρούμε τις φάσεις της καμπύλης βρασμού. Όταν η καμπύλη βρασμού φτάσει στο κρίσιμο σημείο C οδηγείται απευθείας στο σημείο E (Σχήμα 6α Κεφαλαίου 2). Αυτό συμβαίνει γιατί η σταθερή θερμορροή οδηγεί σε απότομη αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του σύρματος. Η καμπύλη του πειράματος δεν περιέχει την καμπύλη C – D – E (Σχήμα 6 Κεφάλαιο 2), ο λόγος είναι ότι θα πρέπει να γίνεται έλεγχος της θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοιχώματος (με ροή ατμού σε συγκεκριμένη πίεση) και όχι με τον έλεγχο της ειδικής θερμορροής στο τοίχωμα.

Στο παρακάτω Σχήμα 46 (a,b,c) παρατηρείται η πρώτη φάση του βρασμού της φυσικής συναγωγής. Η θερμότητα απομακρύνεται από την ελεύθερη επιφάνεια με εξάτμιση, ενώ η κίνηση του υγρού επιτελείται με φυσική συναγωγή. Το τμήμα αυτό της καμπύλης παρατηρείται για $\Delta T \leq 5^{\circ}C$ σε ατμοσφαιρική πίεση.

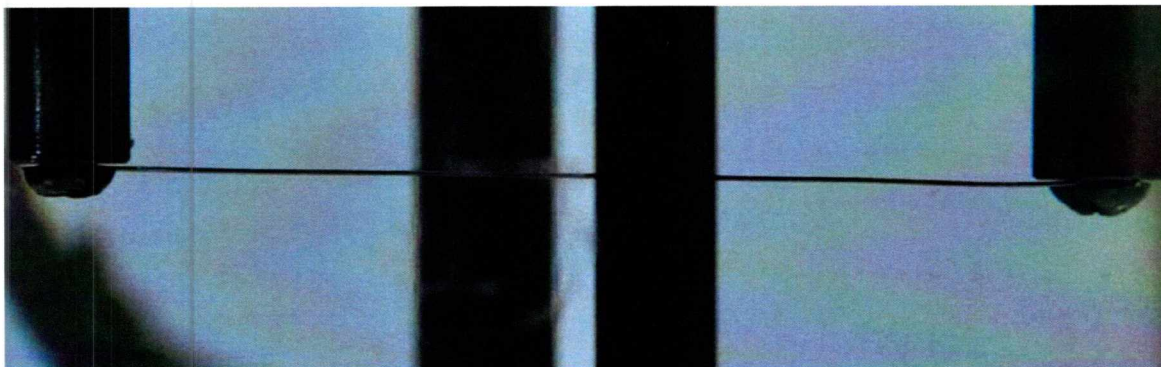
Έπειτα παρατηρείται η έναρξη του βρασμού πυρηνογένεσης με τη δημιουργία φυσαλίδων σε μεμονωμένες θέσεις (Σχήμα 47 a,b,c) που «σπάζουν» στο υγρό. Για το νερό η έναρξη του βρασμού παρατηρείται για $\Delta T \approx 5^{\circ}C$. Ο υπερκορεσμός στην επιφάνεια είναι επαρκής για το σχηματισμό πυρήνων ατμού που οδηγούν στη δημιουργία μικρών φυσαλίδων ατμού. Αυτές οι μικρές φυσαλίδες αποκολλούνται και κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 47 (a,b,c). Αυτό το στάδιο του βρασμού με πυρηνογένεση αποτελεί τη περιοχή A – B στη καμπύλη βρασμού του Σχήματος 6α του Κεφαλαίου 2.



(a)

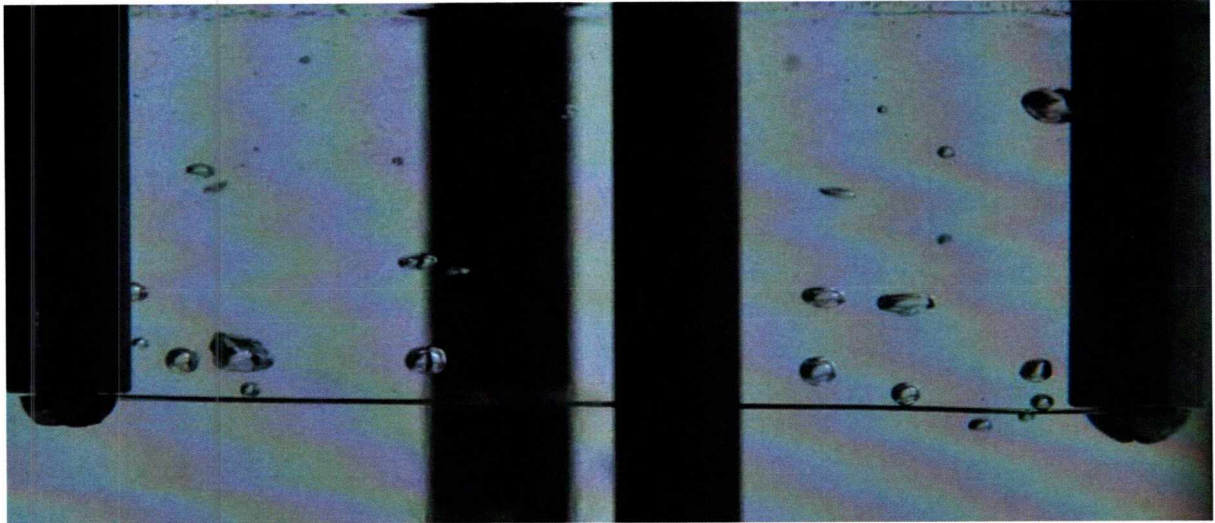


(b)

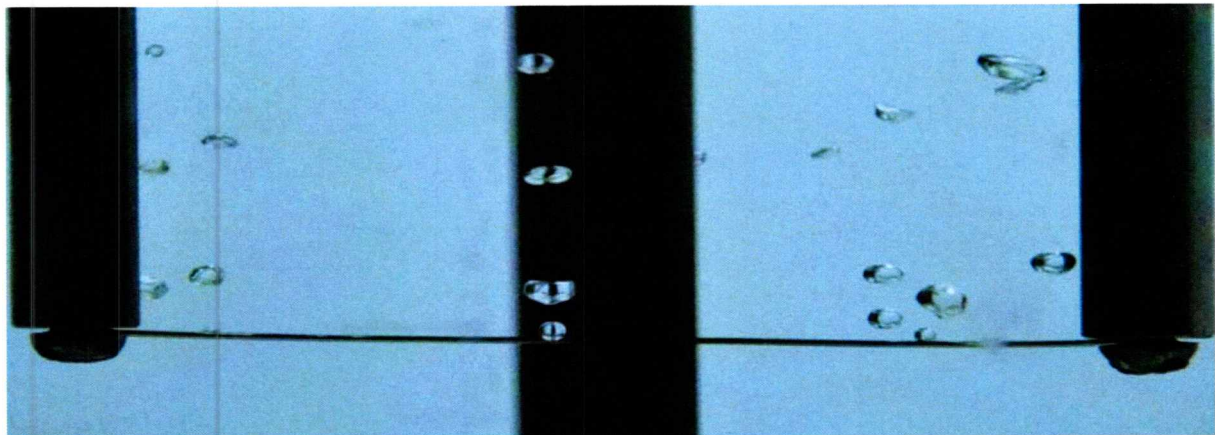


(c)

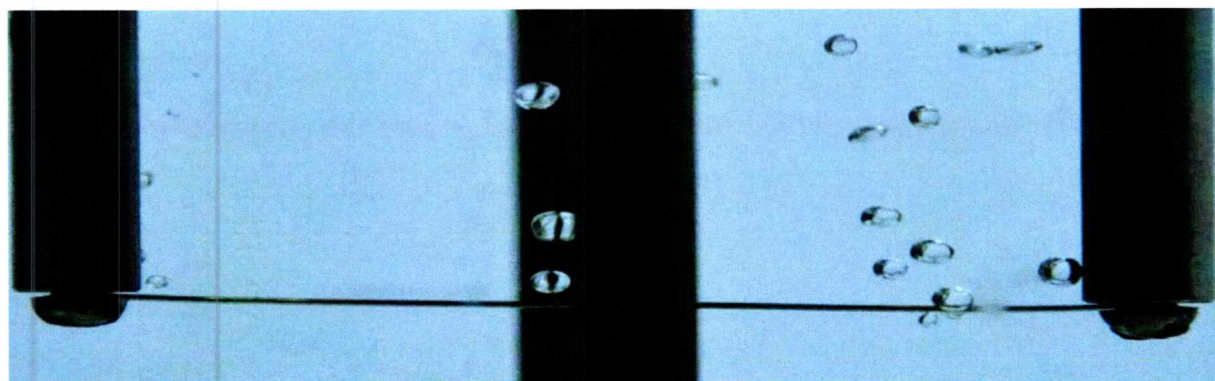
Σχήμα 46(a,b,c): Φυσική συναγωγή κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων a) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm, b) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm, c) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.



(a)



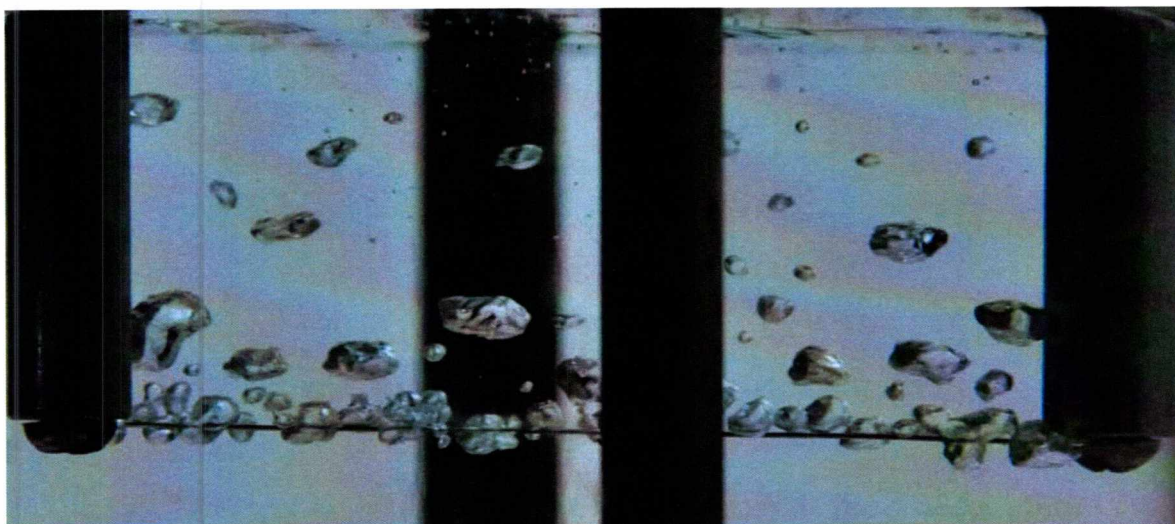
(b)



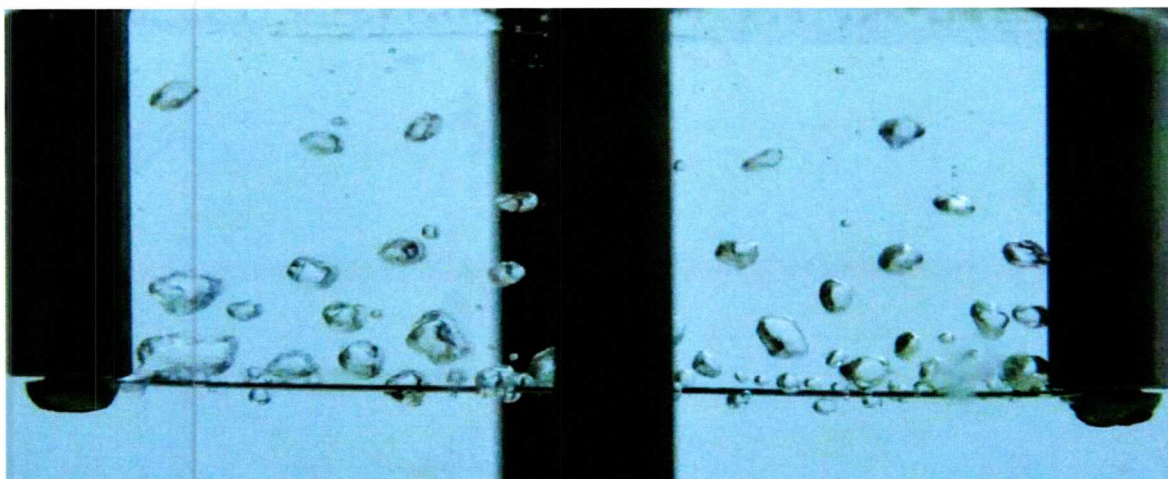
(c)

Σχήμα 47(a,b,c): Πυρηνογένεση της περιοχής A – B. a) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm, b) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm, c) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.

Σε υψηλότερες θερμοκρασίες προσεγγίζεται η περιοχή B – C του Σχήματος 6α του Κεφαλαίου 2. Στη περιοχή αυτή παράγονται περισσότερες φυσαλίδες που σε μερικές περιπτώσεις επειδή αυξάνονται οι θέσεις πυρήνωσης έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και συγχωνεύονται, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλων φυσαλίδων (Σχήμα 48 a,b,c). Έτσι ο ατμός εγκαταλείπει την επιφάνεια υπό τη μορφή φλεβών (Jets) ή στηλών ατμού που στη συνέχεια διασπώνται σε μεγάλες φυσαλίδες (Slugs).

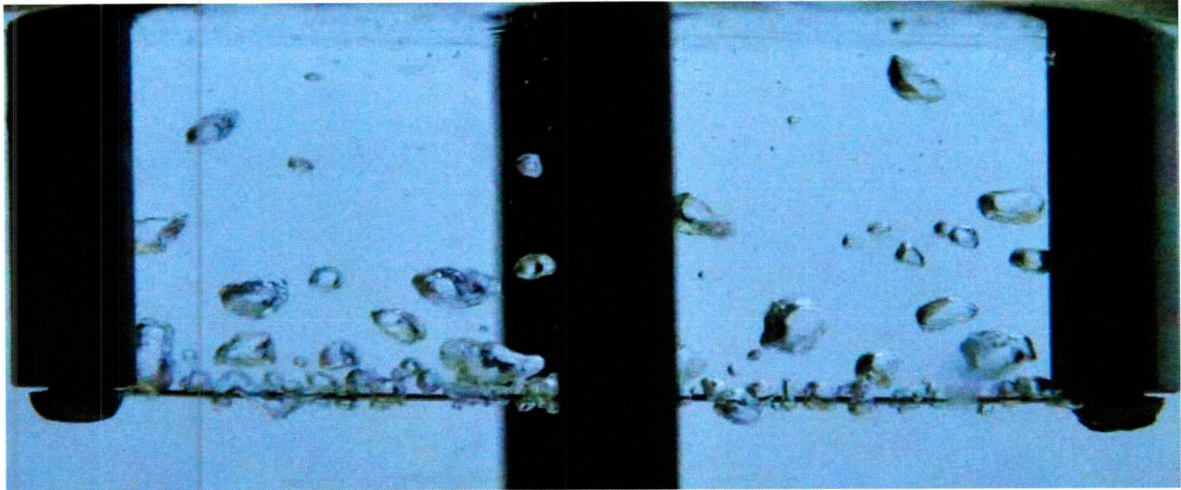


(a)



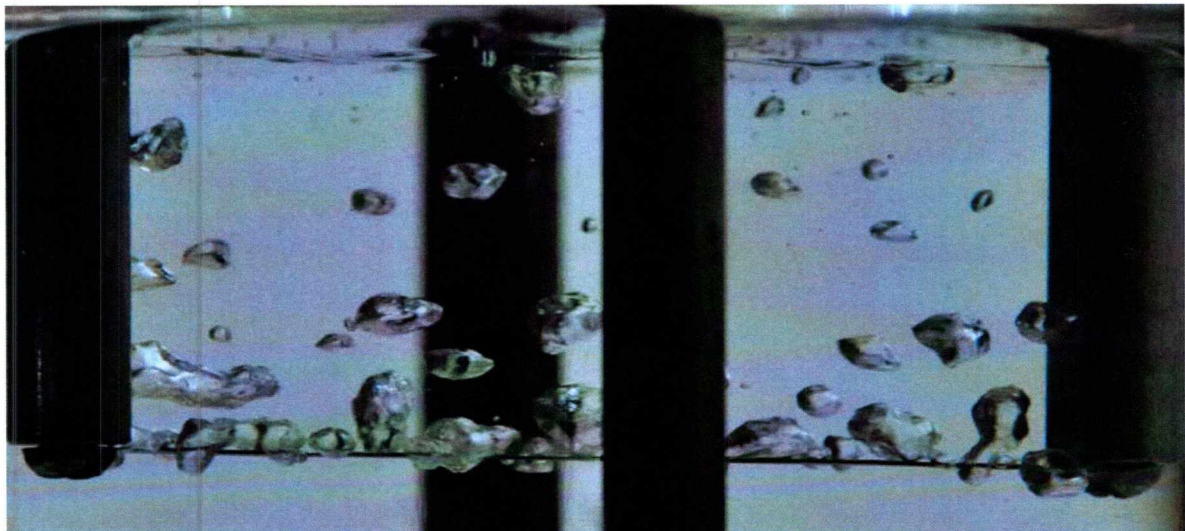
(b)

Σχήμα 48 (a,b): Πυρηνογένεση της περιοχής B – C. a) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm, b) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm.



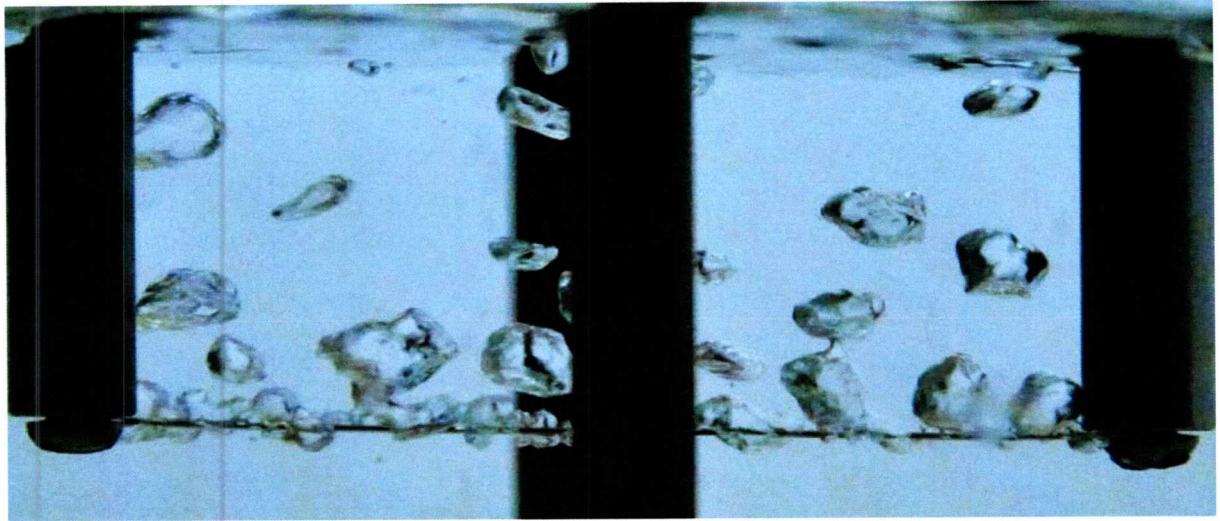
Σχήμα 48(c): Πυρηνογένεση της περιοχής B – C σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,52mm.

Όταν φτάσουμε στο κρίσιμο σημείο C (Σχήμα 6a Κεφάλαιο 2) σηματοδοτείται το ανώτερο όριο του βρασμού πυρηνογένεσης, όπου η αλληλεπίδραση του υγρού με τον ατμό περιορίζει τη μετάβαση του υγρού στη θερμαινόμενη επιφάνεια με αποτέλεσμα τη δραματική αύξηση της θερμοκρασίας του τοιχώματος. Παρατηρούμε ότι με ελάχιστη αύξηση του q πάνω από το q_{\max} προκαλείται μια «συσκότιση» της επιφάνειας με ατμό (Σχήμα 49 a,b,c) και η επιφανειακή θερμοκρασία μπορεί αυθόρμητα να αυξηθεί πολύ, πάνω από το σημείο τήξης του υλικού (Σχήμα 50 a,b,c).

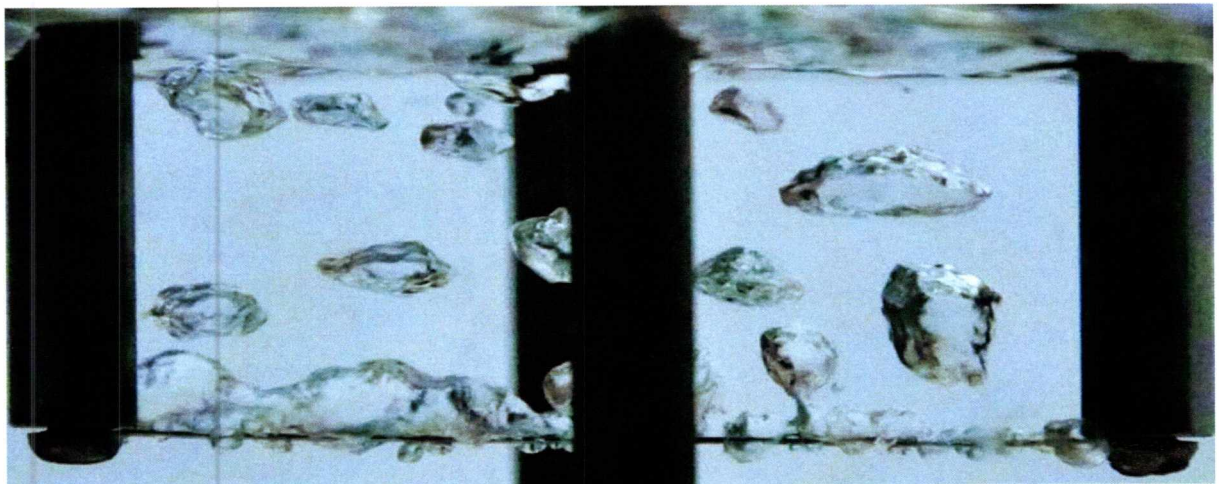


(a)

Σχήμα 49(a): Βρασμός μετά το κρίσιμο σημείο σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm

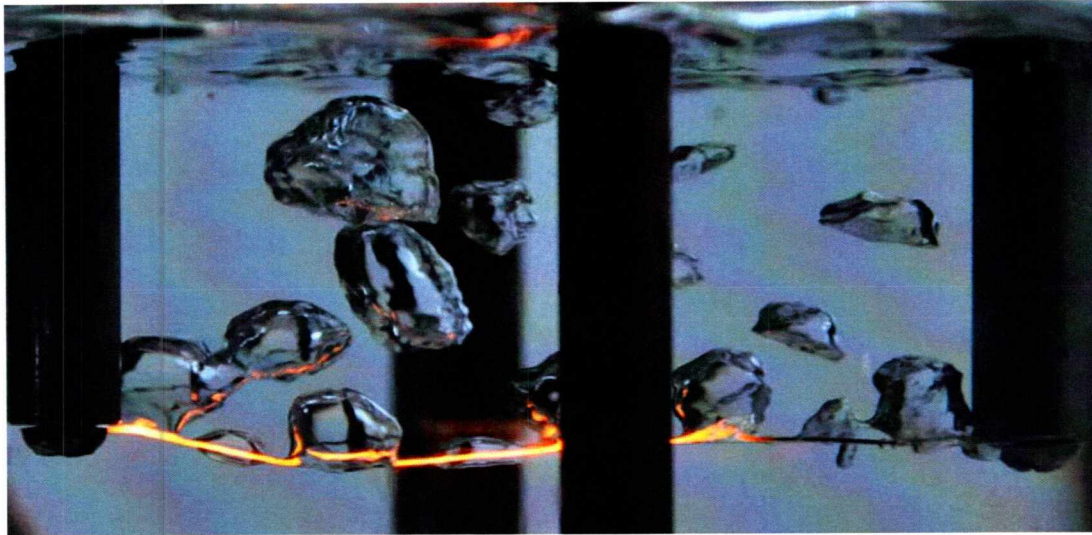


(b)

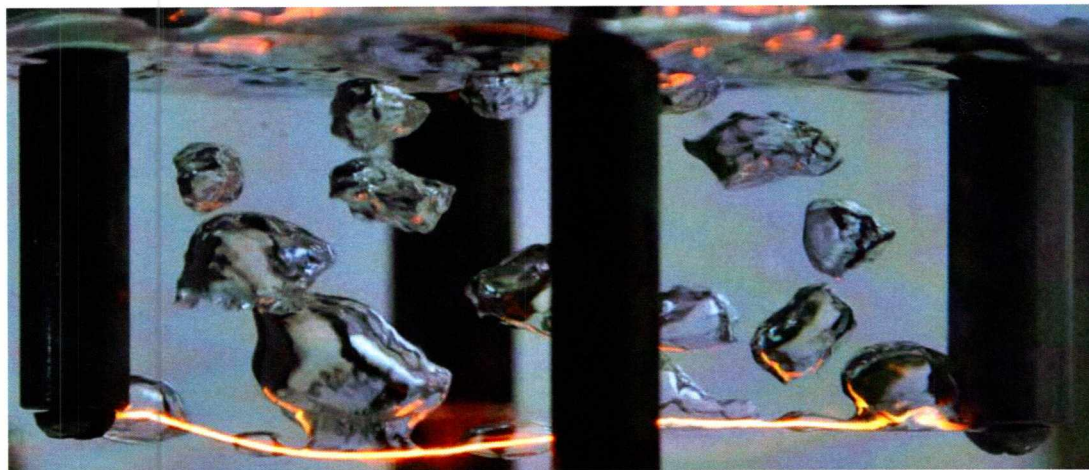


(c)

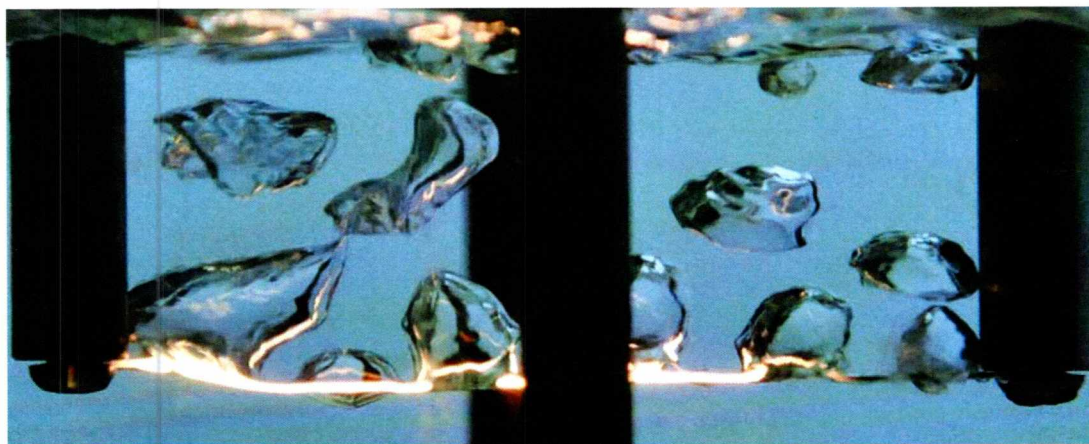
Σχήμα 49(b,c): Βρασμός μετά το κρίσιμο σημείο. b) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm, c) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.



(a)



(b)

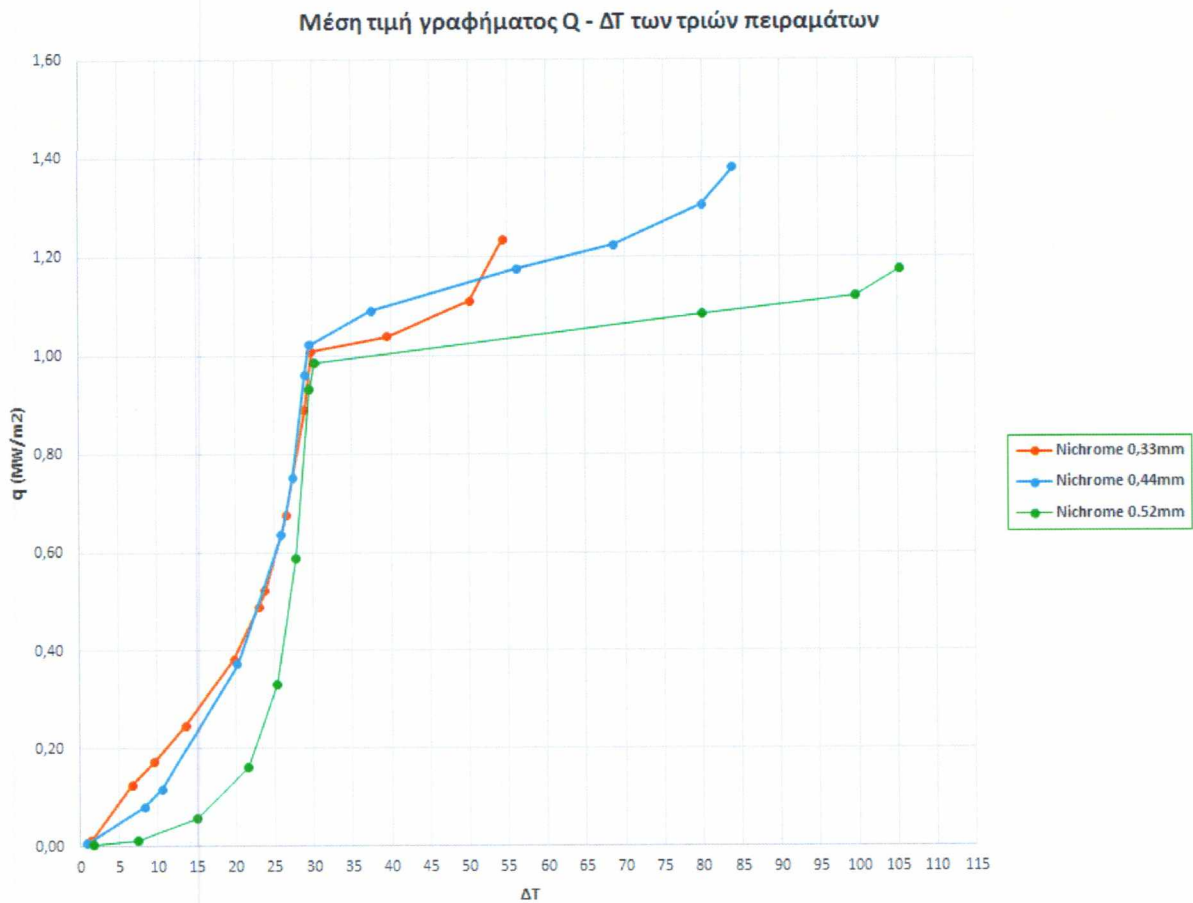


(c)

Σχήμα 50(a,b,c): Σημείο τήξης του υλικού. a) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm, b) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm. c) Σύρματος Νικελίου-Χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm.

6.2 Καμπύλες βρασμού της πειραματικής διαδικασίας.

Σε αυτήν την ενότητα θα αναπαρασταθούν τα συνολικά γραφήματα και των τριών δειγμάτων (συρμάτων). Η γραφική παράσταση είναι της μορφής $q - \Delta T$, όπως υπολογίστηκε και παρουσιάστηκε παραπάνω για κάθε πειραματική διαδικασία.



Σχήμα 51: Συνολικές προσεγγιστικές καμπύλες βρασμού των πειραμάτων.

Στο παραπάνω γράφημα μπορεί να παρατηρηθεί ένας προσεγγιστικός υπολογισμός της καμπύλης βρασμού από της μετρήσεις των εργαστηριακών πειραμάτων. Ο βρασμός παίρνει διάφορες μορφές, ανάλογα με την τιμή της περίσσειας θερμοκρασίας ΔT_{sat} .

Από της μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και από τους υπολογισμούς που έγιναν δημιουργούνται οι γραφικές παραστάσεις του q με τη διαφορά θερμοκρασίας ΔT . Στη γραφική παράσταση αυτή παρουσιάζονται όλες οι επαναλήψεις που κάναμε και παρατηρούμε τη μορφή της καμπύλης που προσεγγίζει την ιδανική καμπύλη βρασμού που έχει οριστεί από τον Nukiyama. Η μορφή της καμπύλης των σχημάτων 40 για σύρμα διαμέτρου 0,33 mm, 43

για σύρμα διαμέτρου 0,44 mm και 46 για σύρμα διαμέτρου 0,52 mm που υπολογίζεται μέσω των πειραμάτων θα μπορούσε να ειπωθεί για κάθε περίπτωση ότι είναι μια προσέγγιση της καμπύλης βρασμού που διατύπωσε ο Nukiyama.

Το κρίσιμο σημείο και το σημείο τήξης για κάθε πείραμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12: Πίνακας συνολικών αποτελεσμάτων των δειγμάτων για ένταση ρεύματος στο κρίσιμο σημείο και το σημείο τήξης.

Διάμετρος (mm)	I_{κρίσιμο} (A)	I_{σημείο τήξης} (A)
0,33	9,8	11
0,44	14	15,8
0,52	17,4	18,4

6.3 Σφάλματα κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων

Κάθε μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους χαρακτηρίζεται από μια αβεβαιότητα που ονομάζουμε σφάλμα, το οποίο αναγράφεται με τη μορφή

Τιμή ± αβεβαιότητα

Με τον όρο σφάλμα δεν εννοούμε την απόκλιση της μέτρησης από τη θεωρητικά αποδεκτή τιμή ούτε το πειραματικό λάθος. Η έννοια του σφάλματος αναφέρεται στην ακρίβεια της μέτρησης δηλαδή στην αβεβαιότητα των μετρήσεων την οποία εισάγουν

- Τα όργανα μέτρησης
- Η πειραματική διαδικασία και οι συνθήκες του πειράματος

Επειδή κατά την πειραματική διαδικασία υπάρχουν παράγοντες που υπεισέρχονται που δεν τους γνωρίζουμε ή δεν μπορούμε να τους λάβουμε υπόψιν, δεν μπορούμε πάντα να διορθώνουμε όλα τα σφάλματα. Ακόμα κι αν επαναλάβουμε τις μετρήσεις ενός μεγέθους, τα σφάλματα δεν μπορούν αν εξαλειφθούν, μπορούμε όμως να οδηγηθούμε σε μια κατανομή των μετρούμενων τιμών που αναλύεται συστηματικά με τη στατιστική.

Τα σφάλματα που υπάρχουν στην εν λόγω πειραματική διαδικασία είναι:

- 1) Συστηματικά, σφάλματα που σχετίζονται με τη βαθμονόμηση των οργάνων και το σφάλμα που περιέχεται σε κάθε όργανο.
- 2) Τυχαία, σφάλματα που έχουν να κάνουν με την ακρίβεια των μετρήσεων και δείχνουν τις διακυμάνσεις που έχουν οι μετρήσεις ενός επαναλαμβανόμενου πειράματος.

Επομένως όσο αναφορά τα συστηματικά σφάλματα, παρατηρήσαμε τα εξής:

- Θερμόμετρο σφάλμα 0,05 %
- Βολτόμετρα (2 τεμάχια) σφάλμα $2 \times 0,05 \% = 0.10 \%$
- Αμπερόμετρο ψηφιακό της συσκευής σφάλμα 3%
- Βολτόμετρο αναλογικό της συσκευής σφάλμα 3%
- Σφάλμα των συνδέσεων γενικότερα της συσκευής 0,05 %

Για τα τυχαία σφάλματα μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Από της διακυμάνσεις των μετρήσεων της έντασης σφάλμα 4,03 %
- Από το κόψιμο του σύρματος για τη δημιουργία δείγματος σφάλμα 2,88 %
- Έχουμε μείωση της θερμοκρασίας κάποια χρονική στιγμή κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, σφάλμα:

Σύρμα Νικελίου – χρωμίου διαμέτρου 0,33 mm σφάλμα 1,15 %

Σύρμα Νικελίου – χρωμίου διαμέτρου 0,44 mm σφάλμα 1,65 %

Σύρμα Νικελίου – χρωμίου διαμέτρου 0,52 mm σφάλμα 1,36 %

Από τα παραπάνω δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας των σφαλμάτων:

Πίνακας 13: Πίνακας σφαλμάτων του πειράματος για δείγματα διαμέτρου 0,33mm και 0,44mm.

	Είδος Σφάλματος	Ποσοστό	Σύνολο	
A	Νικελίου - Χρωμίου 0,33 mm			
Συστηματικά	Θερμόμετρο	0,05	14,26	
	Βολτόμετρο	0,05		
	Βολτόμετρο	0,05		
	Βολτόμετρο αναλογικό	3		
	Αμπερόμετρο ψηφιακό	3		
	Διακύμανση της έντασης	4,03		
	Συνδέσεις	0,05		
Τυχαία	Κόψιμο σύρματος	2,88		
	Μείωση θερμοκρασίας	1,15		
B	Νικελίου - Χρωμίου 0,44 mm			
Συστηματικά	Θερμόμετρο	0,05		14,76
	Βολτόμετρο	0,05		
	Βολτόμετρο	0,05		
	Βολτόμετρο αναλογικό	3		
	Αμπερόμετρο ψηφιακό	3		
	Διακύμανση της έντασης	4,03		
	Συνδέσεις	0,05		
Τυχαία	Κόψιμο σύρματος	2,88		
	Μείωση θερμοκρασίας	1,65		

Πίνακας 14: Πίνακας σφαλμάτων του πειράματος για δείγμα διαμέτρου 0,60mm.

Γ	Νικελίου - Χρωμίου 0,52 mm		
Συστηματικά	Θερμόμετρο	0,05	14,47
	Βολτόμετρο	0,05	
	Βολτόμετρο	0,05	
	Βολτόμετρο αναλογικό	3	
	Αμπερόμετρο ψηφιακό	3	
	Διακύμανση της έντασης	4,03	
	Συνδέσεις	0,05	
Τυχαία	Κόψιμο σύρματος	2,88	
	Μείωση θερμοκρασίας	1,36	

Βιβλιογραφία

- [1] Ν. Ανδρίτσος και Β. Μποντόζογλου, (2012) “Πρόχειρες σημειώσεις διφασικής ροής και αλλαγής φάσης,” Εμβάθυνση στα φαινόμενα μεταφοράς.
- [2] F. Incropera and D. Dewitt (2012) “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 7th Edition Incropera.
- [3] Y. Cengel & A. Ghajar “Μεταφορά μάζας και θερμότητας”, 4^η έκδοση 2012.
- [4] ΜΙΚΗΕΕV, “Μετάδοση θερμότητας”, 1990.
- [5] J. Lienhard “A heat transfer textbook”, 1987
- [6] Bergles, A.E., J.G. Collier, J.M. Delhaye, G.F. Hewitt and F. Mayinger (1981) “Two-Phase Flow in the Power and Process Industries”, Hemisphere Publ. Corp., New York.
- [7] Brennen, C.E. Fundamentals of Multiphase Flow, Cambridge University Press, 2005.
- [8] Carey, V.P., “Liquid-Vapor Phase Change phenomena”, 1992
- [9] Collier, J.G. and J.R. Thome, “Convective Boiling and Condensation”, 3rd. Ed., Oxford University Press, New York 1996.
- [10] Kutateladze, S. S., Kotloturbostroenie, 3, 10, 1948.
- [11] Dobson, M.K. 1994, “Heat Transfer and Flow Regimes during Condensation in Horizontal Tubes”, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
- [12] Faghri, A. and Zhang, Y., “Transport Phenomena in Multiphase Systems”. Elsevier, Amsterdam, 2006.
- [13] Holman J.P, “Heat transfer”, 7th edition

- [14] Turnbull, D., "Kinetics of heterogeneous nucleation", J. Chem. Phys., vol.18, pp. 198-203, 1950.
- [15] Cole, R., "Boiling nucleation", Adv. Heat Transfer, vol. 10, pp. 85-167, 1974
- [16] Govier, G.W. and K. Aziz (1972), "The Flow of Complex Mixtures in Pipes", Van Nostrand Reinhold Co.
- [17] Hestroni, G. (ed.), "Handbook of Multiphase Flow Systems" (1982) Hemisphere Publ. Corp., New York.
- [18] Hewitt, G.F. (1978) "Measurement of Two-Phase Flow Parameters". Academic Press.
- [19] Hewitt, G.F., J.M. Delhaye and N. Zuber, (1982), "Multiphase Science and Technology", Hemisphere Publ. Co, New York.
- [20] Levy S. (1999), "Two-Phase Flow in Complex Systems", Wiley, John & Sons.
- [21] Rohsenow, W. M., 1952, "A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling Liquids", Trans. ASME, Vol.74, pp.
- [22] Wallis, G.B. (1969) "One Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill.
- [23] Whalley P.B., "Two-Phase Flow and Heat Transfer", Oxford University Press (1996).
- [24] Volmer, M. , LTber Keimbildung und als Keimwirkung Spezial fälle der heterogenen Katalyse, Z. Electrochem., Vol. 35, σελ. 555 - 561, 1929.
- [25] Fisher, J. C., "The fracture of liquid", J. Phys., Vol 19, σελ. 1062-1067, 1948.
- [26] Bankoff, S.G., "Ebullition from solid surface in the absence of a pre-existing gaseous phase", Trans. ASME, Vol. 79, pp. 735-740, 1957.
- [27] Jarvis, TJ, Donahue, MD, και Katz, JL, J. Colloid Interface Sci., No. 50, σελ. 359, 1975.

- [28] Clark, H. B., Strenge, P. S., και Westwater, Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., σελ.. 103, 1959.
- [29] Cornwell, K., Lett. Μεταφορά Μάζας και θερμότητας, σελ. 63, 1977.
- [30] Wei and Preckshot, G. W., Chemical Engine 19, σελ.. 838, 1964.
- [31] Kosky, P. G., Int. J. “Heat mass transfer”, vol. 11, σελ.. 929, 1968.
- [32] Knapp, R. T., Trans. ASME, vol. 80, σελ.. 1315, 1958.
- [33] Marto, PJ και Rohsenow, WM, J. “Μετάδοσης Θερμότητας”, σ.. 315, 1966.
- [34] Lorenz, JJ, Mikic, BB, και Rohsenow, WM, Proc. Fifth Int. “Μεταφορά Θερμότητας” Conf., Τόμος IV, σ.. 35, 1974.
- [35] Yamagata, K., F. Kirano, K. Nishiwaka, and H. Matsuoka, Mem. Fac. Eng. Kyushu, 15, 98, 1955.
- [36] Nukiyama, S., J. Japan Soc. Mech Eng., 37, 367, 1934 (Translation: Int. J. Heat Mass Transfer, 9, 1419, 1966).
- [37] Drew, T. B., and C. Mueller, Trans. AIChE, 33, 449, 1937.
- [38] Zuber, N., Trans. ASME, 80, 711, 1958.
- [39] Δ. Βαλουγεώργης, (2012) “Πρόχειρες σημειώσεις Συμπύκνωση και Βρασμός”.

Ιστοσελίδες - Paper

- [1] http://www.cussons.co.uk/education/products/thermodynamics_and_heat_transfer/heat_transfer_equipment/p5697_boiling_heat_transfer_apparatus.asp
- [2] http://www.pmmh.espci.fr/~vnikol/boiling_crisis.html
- [3] <http://www.me.umn.edu/courses/me4331/FILES/Nukiyama.pdf>
- [4] <http://www.me.umn.edu/courses/me4331/resources.shtml>
- [5] <http://www.thermopedia.com/content/990/>
- [6] <http://www.thermopedia.com/content/589/>
- [7] http://www.memoireonline.com/04/12/5674/m_Etude-detaillee-du-transfert-de-chaleur-lors-de-lebullition-sous-saturee-en-utilisant-le-mod6.html
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Nucleate_boiling
- [9] <http://www.radio-electronics.com/info/formulae/resistance/resistance-temperature-coefficient.php>
- [10] http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_12/6.html
- [11] <http://conceptalloys.com/electrical-resistance-alloys-chromel-c113-alloy/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

« Πειραματικός υπολογισμός της καμπύλης βρασμού »

Α. ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας εργαστηριακής άσκησης είναι:

- 1) Να αποκτήσει ο φοιτητής εμπειρία στη χρήση των οργάνων του εργαστηρίου.
- 2) Να γίνει εφαρμογή της θεωρίας και υπολογισμός της καμπύλης από τα πειραματικά δεδομένα.
- 3) Να αναφερθούν τα σφάλματα και τα είδη που μπορούν να παρατηρηθούν κατά την διεξαγωγή του πειράματος.

Β. ΘΕΩΡΙΑ

Η σχετική θεωρία για την υποστήριξη της παρούσας εργαστηριακής άσκησης αναφέρεται στις σημειώσεις του διδάσκοντα.

Γ. ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

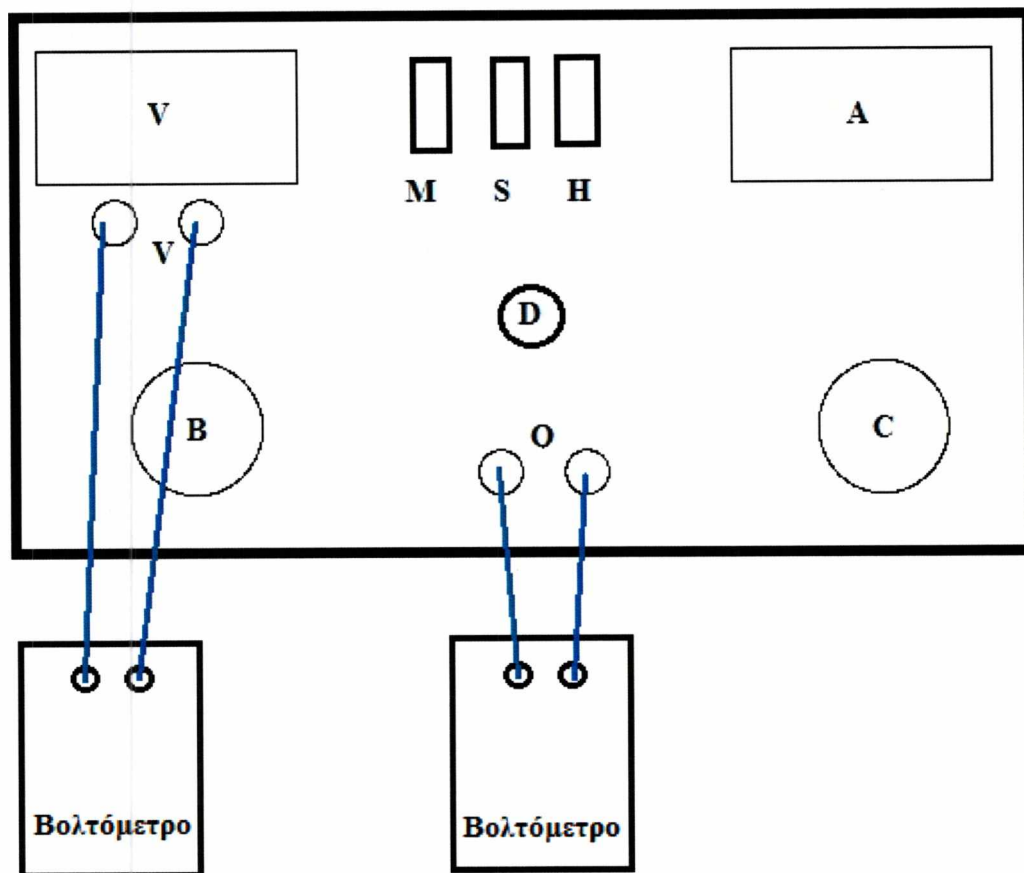
Για τη διεξαγωγή του πειράματος θα χρησιμοποιηθούν τα εξής όργανα και συσκευές:

- 1) Ένα θερμόμετρο με θερμοστοιχείο
- 2) Δυο πολύμετρα
- 3) Συσκευή του πειράματος, Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus
- 4) Καλώδια για της συνδέσεις των οργάνων
- 5) Πλαστικού αγωγός ύδρευσης για την παροχή του νερού και την εξαγωγή από το δοχείο

Δ. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Δ.1 Αναγνώριση των οργάνων και συνδέσεις

Σε πρώτη φάση αναφέρονται και αναγνωρίζονται οι συσκευές και οι λειτουργίες τους. Τοποθετούνται οι καλωδιώσεις και γίνονται όλες οι συνδέσεις στη συσκευή Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus. Οι συνδέσεις στην συσκευή θα γίνει σύμφωνα με το Σχήμα 1:



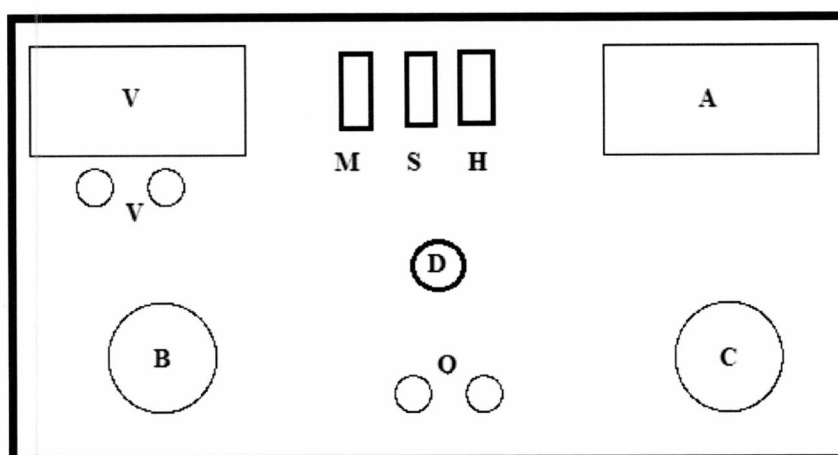
Σχήμα 1: Καντράν Συσκευής Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus.

Επίσης για την ολοκλήρωση της συνδεσμολογίας βάζετε το θερμοστοιχείο στο δοχείο του πειράματος και συνδέετε το θερμοστοιχείο με το θερμόμετρο.

Δ.2 Συσκευή Πειράματος – Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus

Η συσκευή Cussons P5697 Boiling Heat Transfer Apparatus για την επίτευξη της μεταφοράς θερμότητας κατά την διάρκεια του βρασμού, χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικά θερμαινόμενο σύρμα από καθαρή πλατίνα ή Νικελίου – Χρωμίου ως στοιχείο. Επίσης, χρησιμοποιείται μια γέφυρα εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου για την συγκεκριμένη συσκευή γίνεται χρήση μιας γέφυρας Wheatstone για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του στοιχείου.

Μια υδρόψυκτη «Αμετάβλητη αντίσταση» χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς, και η ισορροπία της γέφυρας επηρεάζεται από την χρήση ενός υψηλής ποιότητας ποτενσιόμετρο. Η ισορροπία της γέφυρας Wheatstone μπορεί να ανιχνευτεί αν στην έξοδο της συσκευής (σημείο O Σχήμα 1) χρησιμοποιηθεί ένας παλμογράφος ή ένα βολτόμετρο ακριβείας.



Σχήμα 2: Καντράν ενδείξεων και ρυθμίσεων της συσκευής Cussons P5697

A = Ένδειξη των Ampere

V = Ένδειξη των Volt

B = Ρυθμιστής ελέγχου ρεύματος

C = Ρυθμιστής ελέγχου θερμοκρασίας

D = Ρυθμιστής γέφυρας (Balance)

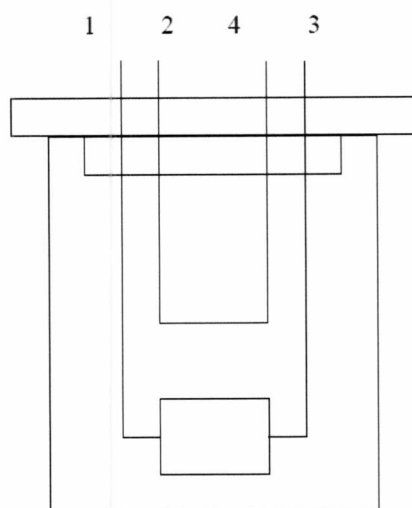
M = Κύρια τροφοδοσία

S = Άνοιγμα ή κλείσιμο της περιστροφής του μαγνήτη ανάδευσης

H = Άνοιγμα ή κλείσιμο της θερμαντικής αντίστασης

O = Έξοδος της συσκευής, προς βολτόμετρο ή παλμογράφο

Επίσης, στην παρακάτω εικόνα αναπαρίσταται η συνδεσμολογία των δοχείων που παίρνουν μέρος στο πείραμα του βρασμού. Παρατηρούμε ότι το ένα δοχείο είναι δοχείο συνεχούς αντίστασεως και το άλλο δοχείο είναι το δοχείο όπου θα γίνει το πείραμα του βρασμού. Στα παρακάτω σχήματα 2 και 3 αναφέρονται οι συνδεσμολογίες των δοχείων.

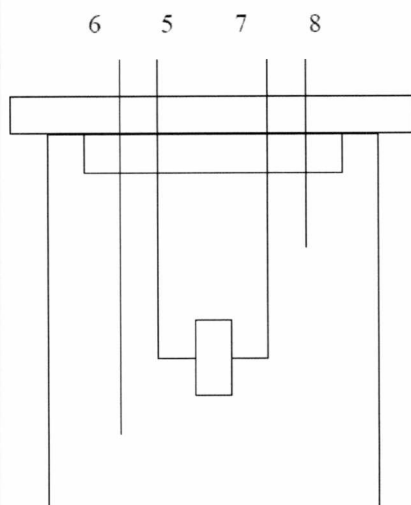


Ακρα:

1 - 3 Αντίσταση Θέρμανσης ή Θερμαντής

2 - 4 Τοποθέτηση του στοιχείου ή σύρματος

Σχήμα 3: Δοχείο που παίρνει μέρος ο βρασμός



Ακρα:

5 - 7 Συνεχής αντίσταση

6 Είσοδος νερού

8 Έξοδος νερού

Σχήμα 4: Δοχείο συνεχούς αντίστασης

Δ.3 Οδηγίες λειτουργίας

Για να ξεκινήσετε την πειραματική διαδικασία, συνδέστε το δείγμα σύρματος Νικελίου – Χρωμίου ή Πλατίνας στα άκρα των τερματικών πυλώνων 2 – 4 εξασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχουν αιχμηρές συστροφές στο σύρμα. Επίσης, θα πρέπει το σύρμα να μην είναι πολύ σφιχτό μεταξύ των πυλώνων και οι βίδες συνδέσεις θα πρέπει να είναι καλά βιδωμένες. (**ΠΡΟΣΟΧΗ** μην σφίγγετε το σύρμα στο βαθμό ώστε να είναι πεπλατυσμένο).

Μετά το πρώτο βήμα της τοποθέτησης του σύρματος, το επόμενο βήμα είναι να γεμίσουμε το δοχείο που γίνεται ο βρασμός στα 2/3 του συνόλου του με απιονισμένο νερό. Έπειτα το τοποθετείτε στην θέση του πάνω στην συσκευή.

Επόμενο βήμα είναι η τοποθέτηση των σωλήνων νερού στην είσοδο (σημείο 6 - Σχήμα 4) και στην έξοδο (σημείο 8 - Σχήμα 4) του δοχείου συνεχούς αντιστάσεως. Έπειτα ελέγξτε τις καλωδιώσεις στα δυο δοχεία ώστε να είναι όλα εντάξει.

Στο δοχείο συνεχούς αντιστάσεως θέλουμε το νερό να έχει ρυθμό 1 λίτρο ανά λεπτό, γιατί αν έχουμε υπερβολική ροή θα σηκωθεί το καπάκι το δοχείου και θα προκληθεί διαρροή.

Μετά το τέλος των συνδέσεων και τοποθετήσεων όλων των δοχείων στις θέσεις τους και πριν το άνοιγμα της παροχής ρεύματος θα πρέπει να παρατηρήσετε αν όλοι οι ρυθμιστές είναι στην τιμή μηδέν.

Έπειτα συνδέστε την συσκευή στο ρεύμα και ενεργοποιήστε την κύρια τροφοδοσία (σημείο M Σχήμα 1).

Με ένδειξη μηδέν σε όλους τους ρυθμιστές πάρτε την ένδειξη της τιμής της θερμοκρασίας στο δοχείο του πειράματος. Έπειτα αυξάνεται ο ρυθμιστής ελέγχου της έντασης στο 1 A, ισορροπείτε τη γέφυρα μέσω του Balance και παίρνετε τη μέτρηση της εξόδου στο βολτόμετρο από το Output της συσκευής (σημείο V - Σχήμα 1). Αυτήν την τιμή καταγράψτε την ώστε να ξέρετε την τιμή του βολτομέτρου όπου είναι ισορροπημένη η γέφυρα Wheatstone. Επίσης καταγράψτε την τιμή του Balance όπου η γέφυρα Wheatstone είναι ισορροπημένη. Η ισορρόπηση της γέφυρας παρατηρείται αν στο βολτόμετρο (σημείο O - Σχήμα 1) είναι περίπου μηδέν. Περίπου μηδέν, επειδή το βολτόμετρο ενδέχεται να δείξει μια τιμή της τάξεως των mV πολύ κοντά στο μηδέν. Αυτό θεωρείται ως μηδέν, άλλα οφείλεται στις απώλειες που υπάρχουν μέσα στις συνδέσεις τις συσκευής. Το σφάλμα αυτό

θεωρείται πάρα πολύ μικρό σχεδόν αμελητέο, οπότε θεωρούμε ότι η γέφυρα είναι ισορροπημένη.

Αφού γίνουν τα παραπάνω στάδια και ισορροπήσει η γέφυρα, τότε μπορείτε να πάρετε την αρχική μέτρηση (V_o) στο βολτόμετρο της συσκευής (σημείο V - Σχήμα 1).

Το τελευταίο στάδιο πριν την διεξαγωγή των μετρήσεων είναι να ανοίξουμε την θέρμανση (σημείο H - Σχήμα 1) και την περιστροφή του μαγνήτη ανάδευσης (σημείο S - Σχήμα 1). Η μόνη διαφορά είναι ότι κατά την καταγραφή των μετρήσεων θα πρέπει το κουμπί της θέρμανσης και της ανάδευσης να είναι στο OFF.

Δ.4 Μέτρηση της θερμοκρασίας του σύρματος

Η θερμοκρασία του σύρματος δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα και ως εκ τούτου μετριέται με την βοήθεια μιας γέφυρας εναλλασσόμενου ρεύματος με συνεχής αντίσταση στον ένα βραχίονα και το δείγμα στον άλλο βραχίονα.

Με την γέφυρα σε ισορροπία, ρυθμίζεται η ισορροπία στο ποτενσιόμετρο, η θέση του ποτενσιόμετρου χρησιμοποιείται ως ένδειξη της θερμοκρασίας του δείγματος. Για να γίνει αυτό θα πρέπει η θέση του ποτενσιόμετρου να προ – βαθμονομηθεί έναντι της θερμοκρασίας πριν από την διεξαγωγή των πειραμάτων βρασμού. Η διαδικασία βαθμονόμησης θα αναφερθεί παρακάτω. Τα γραφήματα βαθμονόμησης θα πρέπει να είναι σχεδόν γραμμικά και μπορούν να παρασταθούν με μια εξίσωση της μορφής

$$t = a + b * p \quad (1)$$

όπου t είναι η θερμοκρασία του δείγματος ή σύρματος και p η θέση του ποτενσιόμετρου.

Δ.5 Διαδικασία βαθμονόμησης

Το ποτενσιόμετρο θα πρέπει να βαθμονομηθεί σε τμήματα βαθμών κελσίου.

Ρυθμίστε το ρεύμα στο 1 A, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εξισορροπήστε τη γέφυρα και σημειώστε την ένδειξη με το ποτενσιόμετρο και τη θερμοκρασία του νερού (σε 1 A το δείγμα έχει σχεδόν την ίδια θερμοκρασία με το νερό).

Ενεργοποιήστε το βοηθητικό σύστημα θέρμανσης (πατώντας το κουμπί H - Σχήμα 1) και αυξήστε την θερμοκρασία του νερού κατά 10 °C. Απενεργοποιήστε το σύστημα θέρμανσης, ελέγξτε ότι το τρέχον ρεύμα στο δείγμα εξακολουθεί να είναι 1 A, και εκ νέου εξισορροπήστε την γέφυρα Wheatstone σημειώνοντας την τιμή του ποτενσιόμετρου και την ακριβή θερμοκρασία του νερού.

Η παραπάνω διαδικασία πρέπει να γίνει μέχρι τους 100 °C. Έπειτα από την διαδικασία αυτή θα πάρουμε ένα γράφημα της θερμοκρασίας του νερού με την ένδειξη του ποτενσιόμετρου, όπου θα βαθμονομηθεί σε °C / διαιρέσεις.

Ανάλογα με το υγρό που τοποθετείτε στο δοχείο που γίνεται το πείραμα του βρασμού, το γράφημα μπορεί να επεκταθεί ως τους 130 °C με αμελητέο σφάλμα.

Δ.6 Μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης με τη θερμοκρασία

Η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από τα γεωμετρικά του στοιχεία που δίνεται από τη σχέση

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

όπου L το μήκος του αγωγού σε m, A ($A = \frac{\pi * D^2}{4}$) η επιφάνεια της πρισματικής διατομής του σε m^2 και ρ η ειδική αντίσταση που εξαρτάται από την φύση του υλικού και τη θερμοκρασία.

Καθώς, όπως είναι γνωστό, η ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγίμου υλικού εξαρτάται από τις συνεχείς συγκρούσεις των ηλεκτρονίων, η αντίσταση αναμένεται να αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθότι θα αυξάνονται και οι συγκρούσεις. Πράγματι πειραματικές διαδικασίες έδειξαν ότι η αντίσταση ενός υλικού συνδέεται με την εξωτερική θερμοκρασία λειτουργίας σύμφωνα με την σχέση

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha * \Delta T \Rightarrow R = R_0 [1 + \alpha * (T_w - T_0)] \quad (3)$$

όπου α είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής, χαρακτηριστικό του εκάστοτε υλικού, R_0 η τιμή της αντίστασης στους 0°C ή 20 °C, T_0 η θερμοκρασία που είναι η αντίσταση R_0 , R η

τιμή της αντίστασης η οποία μεταβάλλεται σύμφωνα με τον τύπο $R = V / I$ και T_w η θερμοκρασία στην οποία είναι η αντίσταση R ή αλλιώς στην εργασία αυτή η θερμοκρασία του σύρματος.

Μπορούμε να πούμε, ότι η αντίσταση του αγωγού μπορεί να προσδιοριστεί πολύ εύκολα από το Νόμο του Ohm, $V = I * R$, που βρίσκει εφαρμογή στις γραμμικές αντιστάσεις, με μέτρηση της τάσης στα άκρα του και του ρεύματος που το διαρρέει. Όταν ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα η θερμοκρασία του αγωγού διαφοροποιείται από αυτήν του περιβάλλοντος και μεταβάλλεται με την τάση. Επειδή, η αντίσταση μεταβάλλεται με την θερμοκρασία η καμπύλη V ως προς I δεν είναι ευθεία άλλα καμπύλη με τα κοίλα προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Στην πραγματικότητα η σχέση που συνδέει την αντίσταση με τη θερμοκρασία στη περιοχή υψηλών θερμοκρασιών δεν είναι γραμμική αλλά αποκτά τη μορφή

$$R = R_0 [1 + a * (T_w - T_0) + \beta * (T_w - T_0)^2 + \gamma * (T_w - T_0)^3 + \dots] \quad (4)$$

Σε πολλές εφαρμογές και στην περίπτωση αυτής της διπλωματική εργασίας, εφαρμόζεται προσεγγιστικά η σχέση 41 με την παραδοχή ότι οι συντελεστές β, γ, \dots κ.λπ. είναι αρκετά μικροί ή ότι ο συντελεστής a δεν είναι σταθερός, ως εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία, άλλα ενδιαφέρει η μέση τιμή του σε μια περιοχή θερμοκρασιών.

Δ.7 Μέτρηση της επιφανειακής ισχύς του δείγματος

Η ακριβής θερμοκρασία μπορεί να υπολογιστεί από την μετρούμενη τάση και το ρεύμα του, όταν η γέφυρα είναι ισορροπημένη. Το ρεύμα μέσω του σταθεροποιημένου ποτενσιόμετρου του κυκλώματος είναι περίπου 73 mA, η οποία είναι μικρότερη από την ανάλυση για το αμπερόμετρο και είναι αμελητέο σε σύγκριση με το ρεύμα που περνά μέσα από το σύρμα και τα στοιχεία αναφοράς. Η επιφανειακή ισχύς του δείγματος δίνεται από την σχέση

$$P = \frac{V * I}{A} = \frac{V * I}{\pi * D * L} \quad (5)$$

όπου V η μετρούμενη τάση σε Volt, I το ρεύμα το οποίο μεταβάλλουμε εμείς κάθε φορά σε Ampere και A το εμβαδόν της επιφάνειας του σύρματος ($A = \pi * D * L$, Σχήμα 2).

E. ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

- 1) Να γίνει η γραφική παράσταση θερμοκρασίας με Balance κατά την διαδικασία του βαθμονόμησης (Calibration). Τι είδους γραφική παράσταση είναι;
- 2) Υπολογίστε τις τιμές των αντιστάσεων R και R_0 . (Φτιάξτε το πίνακα όλων των τιμών που μετρήσατε στο εργαστήριο).
- 3) Υπολογίστε την θερμοκρασία του σύρματος για κάθε αύξηση της έντασης του ρεύματος κατά την διαδικασία του πειράματος.
- 4) Υπολογίστε τη θερμοροή, την υπερθέρμανση και βρείτε το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. (Φτιάξτε το πίνακα των τιμών που μετρήσατε στο εργαστήριο).
- 5) Να κάνετε τη γραφική παράσταση θερμοροής με την υπερθέρμανση. Δείξτε τη προσεγγιστική καμπύλη βρασμού επιλέγοντας τα κατάλληλα σημεία.
- 6) Κατά τη διεξαγωγή του εργαστηριακού πειράματος, να αναφέρετε τα σφάλματα τα οποία μπορεί να προκύπτουν (Τα σφάλματα είναι δυο ειδών: τυχαία και συστηματικά).

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000121273

