

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ : ‘ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ
ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ’**

Ρουκάς Λάμπρος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας



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

Αριθ. Εισ.: 6717/1
Ημερ. Εισ.: 10-11-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2008
ΡΟΥ

© 2008 Ρουκάς Λάμπρος

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 **Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου**
(επιβλέπων) Καθηγητής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Δεύτερος Εξεταστής **Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος**
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Τρίτος Εξεταστής **Δρ. Σταπουντζής Ερρίκος**
Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτο μεταξύ όλων επιθυμώ να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου Καθηγητή κ. Β. Μποντόζογλου για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας. Η βοήθειά του ήταν πολύτιμη. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον επίκουρο Καθηγητή κ. Ν. Ανδρίτσο και τον αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ε. Σταπουντζή για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου.

Από την άλλη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Βλάσση για τη βοήθειά του στο στήσιμο της πειραματικής διάταξης.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά την Βαγγελιώ Φ., το Γιάννη Μ., τον Παναγιώτη Μ., το Σταύρο Μ., το Γιώργο Ψ., το Θανάση Τ., το Μανώλη Π., το Δημήτρη Τ., το Χρυσούλη Φ., το Λάζαρο Σ. που όλα αυτά τα χρόνια αποτέλεσαν την παρέα μου στο Βόλο και συνέβαλαν στο να περάσω τα καλύτερα μου χρόνια.

Επιπρόσθετα θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους αδερφικούς μου φίλους Ηλία, Μάριο, Νίκο, γι' αυτούς τα λόγια είναι περιττά. Ένα ευχαριστώ στις πολύ καλές μου φίλες Νάγια και Λώρα που όλα αυτά τα χρόνια ήταν δίπλα μου.

Με ξεχωριστή σημασία θέλω να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη και να πω ένα τεράστιο ευχαριστώ στη Βάσω γιατί τα τελευταία χρόνια είναι δίπλα μου σε ότι και αν έχει συμβεί.

Τέλος η λέξη ευχαριστώ είναι πολύ λίγη για να ανταποδώσω την προσφορά της οικογένειάς μου. Όλα αυτά τα χρόνια μου έδειξαν αμέριστα την υποστηριξή τους και κυρίως την αγάπη τους. **Δικαιωματικά θα ήθελα να αφιερώσω αυτή την προσπάθεια στην Αδερφή μου Μαρία και τους Γονείς μου Νίτσα και Γιώργο. Χωρίς αυτούς δε θα γινόταν ποτέ πραγματικότητα.**

Ρουκάς Λάμπρος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς της θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και του γειτονικού υγρού ή αερίου που βρίσκεται σε κίνηση και περιλαμβάνει τη συνδυασμένη επίδραση της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Η συναγωγή ονομάζεται φυσική (ή ελεύθερη) αν η κίνηση του ρευστού οφείλεται στις ανυψωτικές δυνάμεις που επάγονται από τις διαφορές στην πυκνότητα του ρευστού λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο ρευστό. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη φυσικής συναγωγής σε εναλλάκτη πτερυγίων. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στήθηκε από την αρχή και βασικό της κομμάτι αποτελεί ο εναλλάκτης θερμότητας. Τόσο ως θερμό όσο και ως ψυχρό ρευστό χρησιμοποιήθηκε νερό. Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψε μία συσχέτιση των αδιάστατων αριθμών Nu και Gr . Στα συμπεράσματα γίνεται αναφορά για τη βελτίωση αυτών των αποτελεσμάτων καθώς και για επέκταση της μελέτης με διαφορετικό θερμό ρευστό στη θέση του νερού όπως γλυκερίνη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	6
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	7
1.2 ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ.....	7
1.3 ΠΤΕΡΥΓΙΑ.....	7
1.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ.....	8
1.5 ΑΡΙΘΜΟΣ Nu	8
1.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	8
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	10
2.1 ΠΤΕΡΥΓΙΑ.....	10
2.2 ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ.....	18
3.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	31
3.1 ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	31
3.2 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΝΑΡΞΗ.....	35
3.3 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΚΑΝ.....	37
4.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	41
4.1 ΡΥΘΜΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ-ΙΣΧΥΣ ΑΝΙΣΤΑΣΗΣ.....	41
4.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ.....	44
4.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΔΟΧΕΙΟ.....	45
4.4 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	46
4.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ.....	47
4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ h_o	48
4.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ nf	51
4.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΡΙΘΜΟΥ Nu	53
4.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ Gr	55
4.10 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΩΝ Nu ΚΑΙ Gr	60
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	62
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	62
5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	63
6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	65
Π.1 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....	65
Π.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ-ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟΥ.....	66
Π.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	67

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της φυσικής συναγωγής στο εξωτερικό ψύκτη με πτερύγια.

1.2 ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ

Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς της θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και του γειτονικού υγρού ή αερίου που βρίσκεται σε κίνηση και περιλαμβάνει τη συνδυασμένη επίδραση της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Όσο εντονότερη είναι η κίνηση του ρευστού τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.

Η συναγωγή ονομάζεται φυσική (ή ελεύθερη) αν η κίνηση του ρευστού οφείλεται στις ανυψωτικές δυνάμεις που επάγονται από τις διαφορές στην πυκνότητα του ρευστού λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο ρευστό. Επομένως δε χρησιμοποιούνται διατάξεις που να προκαλούν την κίνηση του ρευστού.

1.3 ΠΤΕΡΥΓΙΑ

Η βασική λύση λοιπόν για την αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας είναι να αυξηθεί το εμβαδόν. Η αύξηση του εμβαδού γίνεται προσαρμόζοντας στην επιφάνεια εκτεταμένες επιφάνειες που ονομάζονται πτερύγια. Τα πτερύγια κατασκευάζονται με εξέλαση, συγκόλληση ή περιέλιξη ενός φύλλου λεπτού μετάλλου σε μία επιφάνεια από έντονα αγωγίμα υλικά όπως το αλουμίνιο.

1.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή h_o μεταβάλλεται στα άκρα αλλά και στην περιφέρεια του πτερυγίου, ενώ η τιμή του σε ένα σημείο αποτελεί έντονη συνάρτηση της κίνησης του ρευστού στο συγκεκριμένο σημείο. Η τιμή του h_o συνήθως είναι πολύ χαμηλότερη στη βάση του πτερυγίου από ότι στο άκρο του αφού το ρευστό περιβάλλεται από στέρεες επιφάνειες κοντά στη βάση και παρεμποδίζει την κίνηση στο σημείο αυτό σε αντίθεση με το άκρο του πτερυγίου που δεν έρχεται σε επαφή με τη στερεή επιφάνεια και επομένως αντιμετωπίζει περιορισμένη αντίσταση στη ροή.

Παρόλα αυτά, ο σχεδιασμός των πτερυγίων γίνεται με την χρήση μίας μέσης τιμής του συντελεστή συναγωγής, σταθερής για ολόκληρη την επιφάνεια των πτερυγίων. Η σχέση η οποία συσχετίζει το συντελεστή συναγωγής h_o με τη θερμοροή από το θερμό ρευστό προς το νερό ψύξης Q :

$$Q = h_o (A_p + n_f A_f) (T_s - T_w)$$

1.5 ΑΡΙΘΜΟΣ Nu

Ο αριθμός Nu αποτελεί την αδιαστατοποιημένη μορφή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h_o και ορίζεται

$$Nu = \frac{h_o \delta}{k}$$

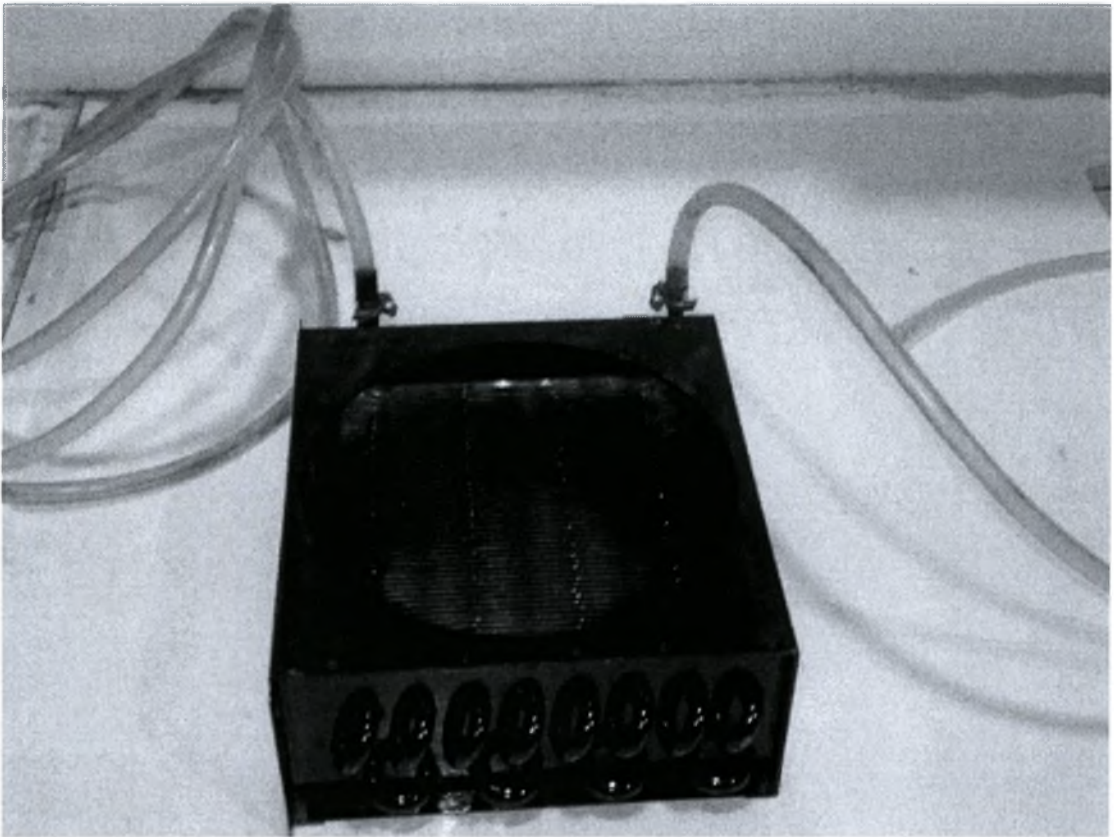
όπου δ : χαρακτηριστικό μήκος του γεωμετρικού σχήματος

k : θερμική αγωγιμότητα του ρευστού που χρησιμοποιείται

1.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας επιλέχθηκε τόσο ως θερμό ρευστό, όσο και ως ψυχρό ρευστό για τη διέλευση από τον ψύκτη το νερό βρύσης. Για τη θέρμανση του θερμού ρευστού χρησιμοποιήθηκε βυθιζόμενη αντίσταση με δυνατότητα ρύθμισης της τάσης της μέσω ρυθμιστή (variatic).

Ο εναλλάκτης θερμότητας που επιλέχθηκε για τη ψύξη του θερμού ρευστού είναι από χαλκό, ορθογωνικού σχήματος, διαστάσεων $0,2 \text{ m} \times 0,24 \text{ m} \times 0,065 \text{ m}$, με 24 αυλούς και 56 πτερύγια.



Η ψύξη του θερμού ρευστού θα γίνει με φυσική συναγωγή λόγω των ανυψωτικών δυνάμεων που επάγονται από τις διαφορές στην πυκνότητα του ρευστού εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο ρευστό. Η ψύξη που πραγματοποιείται από τον εναλλάκτη αποτελεί τη σύνθεση δύο οριακών καταστάσεων ανωστικής ροής. Η μία περίπτωση αποτελεί τη φυσική συναγωγή πάνω από επιφάνεια και η δεύτερη αποτελεί τη φυσική συναγωγή μέσα σε κατακόρυφο κανάλι.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Πτερύγια

Συνήθης απαίτηση είναι η αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Για να επιτευχθεί αυτό, όταν οι θερμοκρασίες T_s και T_∞ είναι σταθερές με βάση το σχεδιασμό, υπάρχουνε δύο τρόποι:

1. Να αυξηθεί ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή h
2. Να αυξηθεί το εμβαδόν της επιφάνειας μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μεταφορά θερμότητας A

Η αύξηση του h για να επιτευχθεί μπορεί να χρειάζεται την εγκατάσταση μιας αντλίας, ενός ανεμιστήρα ή την αντικατάσταση του ήδη υπάρχοντος με ένα μεγαλύτερο. Ωστόσο η μέθοδος αυτή δεν είναι ιδιαίτερα πρακτική και μπορεί μάλιστα να αποβεί ανεπαρκής.

Η βασική λύση λοιπόν για την αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας είναι να αυξηθεί το εμβαδόν. Η αύξηση του εμβαδού γίνεται προσαρμόζοντας στην επιφάνεια εκτεταμένες επιφάνειες που ονομάζονται πτερύγια. Τα πτερύγια κατασκευάζονται με εξέλαση, συγκόλληση ή περιέλιξη ενός φύλλου λεπτού μετάλλου σε μία επιφάνεια από έντονα αγωγίμα υλικά όπως το αλουμίνιο.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή h μεταβάλλεται στα άκρα αλλά και στην περιφέρεια του πτερυγίου, ενώ η τιμή του σε ένα σημείο αποτελεί έντονη συνάρτηση της κίνησης του ρευστού στο συγκεκριμένο σημείο. Η τιμή του h συνήθως είναι πολύ χαμηλότερη στη βάση του πτερυγίου από ότι στο άκρο του αφού το ρευστό περιβάλλεται από στέρεες επιφάνειες κοντά στη βάση και παρεμποδίζει την κίνηση στο σημείο αυτό σε αντίθεση με το άκρο του πτερυγίου που δεν έρχεται σε επαφή με τη στερεή επιφάνεια και επομένως αντιμετωπίζει περιορισμένη αντίσταση στη ροή. Επομένως αν σε μία επιφάνεια προστεθούν πολλά πτερύγια είναι δυνατόν να μειωθεί η ολική μεταφορά θερμότητας όταν η μείωση του h αντισταθμίζει τυχόν κέρδος που προκύπτει από την αύξηση του εμβαδού.

Απόδοση Πτερυγίων

Πριν δοθεί ο ορισμός της απόδοσης των πτερυγίων θα γίνει μία ανάλυση για το πως φτάνουμε σε αυτή. Θεωρούμε την επιφάνεια ενός επίπεδου τοίχου με θερμοκρασία T_b εκτεθειμένο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T_∞ . Η θερμότητα που χάνεται από την επιφάνεια προς το περιβάλλον με συντελεστή συναγωγής h είναι $Q=h A (T_b - T_\infty)$.

Στη συνέχεια θεωρούμε ένα πτερύγιο με σταθερό εμβαδόν και μήκος L το οποίο είναι προσαρμοσμένο στην επιφάνεια με τέλεια επαφή. Η θερμότητα θα ρέει από την επιφάνεια προς το πτερύγιο με αγωγή και από το πτερύγιο προς το περιβάλλον με συναγωγή με συντελεστή συναγωγής h . Η θερμοκρασία του πτερυγίου θα είναι T_b στη βάση του και σταδιακά θα μειώνεται προς το άκρο του πτερυγίου. Η συναγωγή από την επιφάνεια του πτερυγίου προκαλεί πτώση της θερμοκρασίας σε οποιαδήποτε διατομή μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη. Για απλούστευση θεωρούμε ότι το άκρο του πτερυγίου είναι μονωμένο χρησιμοποιώντας το διορθωμένο μήκος του πτερυγίου αντί για το πραγματικό.

Η μεταφορά θερμότητας από το πτερύγιο θα είναι μέγιστη στην περίπτωση μηδενικής θερμικής αντίστασης ή άπειρης θερμικής αγωγιμότητας οπότε η θερμοκρασία του πτερυγίου θα είναι ομοιόμορφη στην τιμή της βάσης T_b και μπορεί να εκφραστεί από την σχέση :

$$\dot{Q}_{fin, max} = h A_{fin} (T_b - T_{\infty})$$

Ωστόσο στην πράξη η θερμοκρασία του πτερυγίου θα πέσει και επομένως η μεταφορά θερμότητας από το πτερύγιο θα είναι μικρότερη λόγω της μείωσης της διαφοράς της θερμοκρασίας $T(x) - T_{\infty}$ προς το άκρο του πτερυγίου.

Για να υπολογίσουμε την επίδραση της μείωσης αυτής στη μεταφορά θερμότητας ορίζουμε την απόδοση του πτερυγίου που είναι το πηλίκο του πραγματικού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας προς τον ιδανικό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από το πτερύγιο όταν ολόκληρο το πτερύγιο έχει τη θερμοκρασία της βάσης του δηλαδή:

$$\eta_{fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{fin, max}} \quad \text{ή} \quad \dot{Q}_{fin} = \eta_{fin} \dot{Q}_{fin, max}$$

$$\eta_{max} = \eta_{fin} h A_{fin} (T_b - T_{\infty})$$

όπου A_{fin} το ολικό εμβαδόν του πτερυγίου. Η σχέση αυτή δίνει τη δυνατότητα να προσδιοριστεί η μεταφορά θερμότητας από ένα πτερύγιο όταν είναι γνωστή η απόδοση.

Στις περιπτώσεις που υπάρχει σταθερή διατομή σε πτερύγια με πολύ μεγάλο μήκος και με μονωμένα άκρα η απόδοση του πτερυγίου δίνεται από τη σχέση :

$$\eta_{long, fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{fin, max}} = \frac{1}{\alpha L}$$

και

$$\eta_{insulated tip} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{fin, max}} = \frac{\tanh \alpha L}{\alpha L}$$

Στα περισσότερα πτερύγια σταθερού πάχους, το πάχος του πτερυγίου t είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με το μήκος του πτερυγίου L άρα το εμβαδόν άκρου του πτερυγίου είναι αμελητέο.

Τα πτερύγια με τριγωνικά ή παραβολικά προφίλ περιέχουν λιγότερο υλικό και είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με τα πτερύγια ορθογωνικού προφίλ και θεωρούνται καταλληλότερα για εφαρμογές που απαιτούν ελάχιστο βάρος όπως οι διαστημικές εφαρμογές.

Σημαντική παράμετρος στο σχεδιασμό των επιφανειών με πτερύγια είναι η επιλογή κατάλληλου μήκους των πτερυγίων L . Όσο πιο μακρύ είναι το πτερύγιο τόσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδόν μεταφοράς θερμότητας άρα τόσο υψηλότερος ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το πτερύγιο. Από την άλλη όσο μεγαλύτερο είναι το πτερύγιο τόσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του επομένως τόσο υψηλότερη η τιμή του και τόσο μεγαλύτερη η τριβή του ρευστού. Επομένως αν αυξηθεί το μήκος του πτερυγίου πέρα από μια συγκεκριμένη τιμή δικαιολογείται εκτός αν τα επιπλέον πλεονεκτήματα υπερκαλύπτουν το επιπλέον κόστος. Επίσης η απόδοση του πτερυγίου μειώνεται καθώς αυξάνεται το μήκος του πτερυγίου λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του πτερυγίου ανάλογα με το μήκος. Τα μήκη του πτερυγίου που προκαλούν μείωση της απόδοσης του κάτω από το 60% συνήθως δε δικαιολογούνται από οικονομική άποψη και θα πρέπει να αποφεύγονται. Η απόδοση των περισσότερων πτερυγίων που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι πάνω από 90%.

Αποτελεσματικότητα του πτερυγίου

Η προσθήκη πτερυγίων σε μία επιφάνεια δε σημαίνει απαραίτητα ότι ενισχύεται και η μεταφορά θερμότητας. Ένας δείκτης της απόδοσης του πτερυγίου αποτελεί η αποτελεσματικότητα του πτερυγίου η οποία εκφράζει την ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς πτερύγια και ορίζεται ως εξής :

$$\varepsilon_{fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{no\,fin}}$$

όπου

\dot{Q}_{fin} : Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το πτερύγιο με επιφάνεια βάσης A_b .

$\dot{Q}_{no\,fin}$: Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από επιφάνεια με εμβαδό A_b .

1. Η αποτελεσματικότητα με τιμή $\varepsilon_{fin}=1$ δηλώνει ότι η προσθήκη πτερυγίων δεν επηρεάζει καθόλου τη μεταφοράς θερμότητας.

2. Όταν η αποτελεσματικότητα είναι $\epsilon_{fin} < 1$ λειτουργεί ως μόνωση, δηλαδή επιβραδύνει τη μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια. Τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζονται όταν χρησιμοποιούνται πτερύγια κατασκευασμένα από χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας υλικά.
3. Από την άλλη όταν η αποτελεσματικότητα είναι $\epsilon_{fin} > 1$ τότε τα πτερύγια ενισχύουν τη μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια.

Όσο τόσο η χρήση πτερυγίων δε δικαιολογείται παρά μόνο αν η ϵ_{fin} είναι αρκετά μεγαλύτερη από την μονάδα. Οι επιφάνειες με πτερύγια σχεδιάζονται με βάση τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας προς ένα συγκεκριμένο κόστος ή την ελαχιστοποίηση του κόστους προς μία επιθυμητή αποτελεσματικότητα.

Η απόδοση και η αποτελεσματικότητα σχετίζονται ως εξής :

$$\epsilon_{fin} = \frac{A_{fin}}{A_b} \eta_{fin}$$

Για την περίπτωση πτερυγίου μεγάλου μήκους και με ομοιόμορφη διατομή σε μόνιμες συνθήκες η αποτελεσματικότητα δίνεται από

$$\epsilon_{long fin} = \left(\frac{k p}{h A_c} \right)^2$$

τη σχέση

Από την παραπάνω σχέση εξάγονται κάποια πολύ χρήσιμα συμπεράσματα ως το σχεδιασμό και την επιλογή πτερυγίων:

- Η αγωγιμότητα k του υλικού θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο υψηλή. Επομένως τα πτερύγια κατασκευάζονται συνήθως από μέταλλα όπως χαλκό, αλουμίνιο, σίδηρο με προτίμηση κυρίως στο αλουμίνιο λόγω χαμηλού κόστους, χαμηλού βάρους και αντίσταση στη διάβρωση.
- Ο λόγος της περιμέτρου προς το εμβαδό διατομής πρέπει να είναι όσο πιο υψηλός γίνεται. Άρα τα πτερύγια θα πρέπει να είναι από λεπτό έλασμα ή λεπτές ακίδες.
- Η χρήση πτερυγίων είναι πιο αποτελεσματική σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν χαμηλό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. Επομένως η χρήση πτερυγίων δικαιολογείται ευκολότερα όταν το μέσο είναι αέριο αντί για υγρό και η μεταφοράς θερμότητας γίνεται με φυσική συναγωγή αντί για εξαναγκασμένη συναγωγή.

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας σε επιφάνεια με πτερύγια λαμβάνουμε υπόψιν τόσο το τμήμα της επιφάνειας με πτερύγια όσο και το τμήμα της επιφάνειας χωρίς πτερύγια.

Η σχέση αυτή είναι:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{total, fin} &= \\ \dot{Q}_{unfin} + \dot{Q}_{fin} &= h A_{unfin} (T_b - T_{\infty}) + n_{fin} h A_{fin} (T_b - T_{\infty}) = \\ h (A_{unfin} + n_{fin} A_{fin}) &(T_b - T_{\infty}) \end{aligned}$$

Η ολική αποτελεσματικότητα για μία επιφάνεια ορίζεται ως ο λόγος της ολικής μεταφοράς θερμότητας από τη συγκεκριμένη επιφάνεια προς τη μεταφορά θερμότητας από την ίδια επιφάνεια αν δεν υπάρχουν πτερύγια:

$$\varepsilon_{fin} = \frac{\dot{Q}_{total, fin}}{\dot{Q}_{total, no fin}} = \frac{h (A_{unfin} + n_{fin} A_{fin}) (T_b - T_{\infty})}{h A_{no fin} (T_b - T_{\infty})}$$

όπου:

- $A_{no fin}$ είναι το εμβαδόν της επιφάνειας όταν δεν υπάρχουν πτερύγια
- A_{fin} είναι το ολικό εμβαδόν όλων των πτερυγίων
- A_{unfin} είναι το εμβαδόν του τμήματος χωρίς πτερύγια

Η ολική αποτελεσματικότητα των πτερυγίων εξαρτάται από το πλήθος των πτερυγίων ανά μονάδα όγκου και από την αποτελεσματικότητα των επιμέρους πτερυγίων.

Η ολική αποτελεσματικότητα αποτελεί καλύτερο μέτρο της απόδοσης μιας επιφάνειας με πτερύγια σε σχέση με αυτή των επιμέρους πτερυγίων.

Κατάλληλο μήκος πτερυγίου

Πολύ σημαντικό στάδιο στο σχεδιασμό ενός πτερυγίου αποτελεί ο κατάλληλος προσδιορισμός του μήκους του μετά την επιλογή του υλικού και της διατομής του. Μελετώντας τη διακύμανση της θερμοκρασίας σε ένα πτερύγιο μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η θερμοκρασία πέφτει εκθετικά κατά μήκος του και φτάνει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κάποιο σημείο. Το τμήμα του πτερυγίου πέρα από αυτό το σημείο δε συμβάλλει στη μεταφορά θερμότητας. Επομένως ο σχεδιασμός ενός πτερυγίου με πολύ 'μεγάλο' μήκος δεν είναι αποδεκτός αφού αποτελεί σπατάλη του υλικού, επιβαρύνει με περιττό βάρος, αυξημένο μέγεθος και επομένως επιπλέον κόστος που όχι μόνο

δεν προσφέρει ευνοικά αποτελέσματα ως προς τη μεταφορά θερμότητας αλλά μπορεί να βλάψει την απόδοση του πτερυγίου αφού θα συμπιέζει την κίνηση του ρευστού προκαλώντας μείωση του συντελεστή μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Πτερύγια με πολύ μεγάλο μήκος που η θερμοκρασία τους πλησιάζει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος επίσης δε συνίσταται αφού τα κέρδη ως προς την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας είναι μικρά και δε συνάδουν με την μεγάλη αύξηση του βάρους και του κόστους.

Ο λόγος μεταφοράς θερμότητας από ένα πτερύγιο με πεπερασμένο μήκος προς ένα πτερύγιο απείρου μήκους κάτω από τις ίδιες συνθήκες έχει ως εξής :

$$\frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{long\,fin}} = \tanh \alpha L$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-6

αL	$\frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{long\,fin}} = \tanh \alpha L$
0.1	0.100
0.2	0.197
0.5	0.462
1.0	0.762
1.5	0.905
2.0	0.964
2.5	0.987
3.0	0.995
4.0	0.999
5.0	1.000

Από τον πίνακα παρατηρεί κανείς ότι η μεταφορά θερμότητας από ένα πτερύγιο αυξάνεται με την αL αρχικά σχεδόν γραμμικά ώσπου φτάνει η καμπύλη σε ένα επίπεδο απείρου μήκους $\alpha L=5$. Επίσης παρατηρεί κανείς ότι μειώνοντας το μήκος στο μισό στην περίπτωση αυτή (απο $\alpha L=5$ σε $\alpha L=2,5$) προκαλεί μείωση της μεταφοράς θερμότητας της τάξης του 1%. Για ένα τόσο μικρό ποσοστό που μειώνεται η μεταφοράς θερμότητας αξίζει η μείωση κατά 50% του μεγέθους άρα και του κόστους του πτερυγίου. Στην πράξη το μήκος ενός πτερυγίου που αντιστοιχεί περίπου σε $\alpha L=1$ θα μεταφέρει 76,2% της συνολικής θερμότητας η οποία μπορεί να μεταφερθεί από ένα πτερύγιο με άπειρο μήκος και επομένως θα πρέπει να προσφέρει έναν πολύ

καλό συμβιβασμό μεταξύ της απόδοσης και των διαστάσεων του πτερυγίου.

Στην αναλυση των πτερυγίων είναι συνηθισμένη η παραδοχή ότι η θερμοκρασία του πτερυγίου μεταβάλλεται κατά μήκος του πτερυγίου ενώ η μεταβολή κατά μήκος των άλλων διευθύνσεων θεωρείται αμελητέα. Το σφάλμα που περιλαμβάνει, σύμφωνα με μελέτες, η μονοδιάστατη ανάλυση του πτερυγίου είναι αμελητέο (περίπου 1%) όταν $(h\delta/k) < 0,2$

Όπου δ είναι το χαρακτηριστικό πάχος του πτερυγίου (πάχος της πλάκας t για ορθογώνια και η διάμετρος D για τα κυλινδρικά).

Ειδικά σχεδιασμένες επιφάνειες με πτερύγια είναι οι ψύκτρες που συνήθως χρησιμοποιούνται για την ψύξη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας των ψυκτρών συνήθως εκφράζεται ως προς τις θερμικές τους αντιστάσεις R που ορίζεται ως εξής :

$$\dot{Q}_{fin} = \frac{T_b - T_{\infty}}{R} = n_{fin} h A_{fin} (T_b - T_{\infty})$$

Μια μικρή τιμή θερμικής αντίστασης δηλώνει μικρή πτώση της θερμοκρασίας στα άκρα της ψύκτρας και επομένως υψηλή απόδοση του πτερυγίου. Μία σημαντική παράμετρος κατά την επιλογή της ψύκτρας αποτελεί η απόσταση των πτερυγίων μεταξύ τους. Μία ψύκτρα με πτερύγια σε μικρή απόσταση μεταξύ τους έχει μεγαλύτερο εμβαδόν για μεταφορά θερμότητας αλλά μικρότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω της επιπλέον αντίστασης που παρέχουν τα επιπλέον πτερύγια στη ροή του ρευστού διαμέσου των διόδων που υπάρχουν μεταξύ τους. Από την άλλη μία ψύκτρα με πτερύγια σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους θα έχει υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας αλλά μικρότερο εμβαδόν. Επομένως θα πρέπει να υπάρχει μία βέλτιστη απόσταση η οποία να μεγιστοποιεί τη μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή από τη ψύκτρα για δεδομένο εμβαδόν βάσης WL όπου W το πλάτος και L το ύψος της βάσης. Όταν τα πτερύγια είναι ισοθερμοκρασιακά και το πάχος του πτερυγίου t είναι μικρό σε σύγκριση με τη μεταξύ τους απόσταση S , η ιδανική απόσταση μεταξύ πτερυγίων σε μία κατακόρυφη ψύκτρα δίνεται από τη σχέση των Bar-Cohen και Rohsenow :

$$S_{opt} = 2,714 \frac{L}{Ra^{1/4}}$$

όπου το μήκος του πτερυγίου στην κατακόρυφη διεύθυνση θεωρείται το χαρακτηριστικό μήκος κατά τον υπολογισμό του

αριθμού Rayleigh. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην περίπτωση ιδανικής απόστασης είναι :

$$h = 1,31 \frac{k}{S_{opt}}$$

Τότε ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή από τα πτερύγια δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{Q} = h (2nLH) (T_s - T_{\infty})$$

όπου $n = W/(S+t) = W/S$ (με t αμελητέο) είναι το πλήθος των πτερυγίων στην ψύκτρα και T_s η θερμοκρασία επιφάνειας των πτερυγίων.

Η μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή είναι ανάλογη προς την παροχή μάζας του ρευστού που καθορίζεται με τη δυναμική ισορροπία δύο αντίθετων φαινομένων της άνωσης και της τριβής.

Τα πτερύγια μίας ψύκτρας προκαλούν και τα δύο φαινόμενα επάγοντας επιπλέον άνωση ως αποτέλεσμα της αυξημένης θερμοκρασίας στις επιφάνειες τους και επιβραδύνοντας το ρευστό ενεργώντας ως επιπλέον εμπόδιο στη διαδρομή που ακολουθεί η ροή. Επομένως η αύξηση του πλήθους των πτερυγίων σε μία ψύκτρα μπορεί είτε να ενισχύσει είτε να μειώσει τη φυσική συναγωγή ανάλογα με το φαινόμενο που επικρατεί. Ο ρυθμός ροής του αέρα που οφείλεται στην άνωση προσδιορίζεται στο σημείο όπου τα δυο αυτά φαινόμενα εξισορροπούν μεταξύ τους. Η δύναμη της τριβής αυξάνεται με την εισαγωγή όλο και περισσότερων στερεών επιφανειών παρεμποδίζοντας έντονα τη ροή του ρευστού και τη μεταφορά θερμότητας. Κάτω από ορισμένες συνθήκες η αύξηση της τριβής μπορεί να εκτρέψει την αύξηση της άνωσης. Αυτό με τη σειρά του θα μειώσει το ρυθμό ροής και επομένως τη μεταφορά θερμότητας. Γι'αυτό οι ψύκτρες με πτερύγια σε μικρή απόσταση μεταξύ τους δεν είναι κατάλληλες για ψύξη με φυσική συναγωγή.

Όταν η ψύκτρα έχει πυκνά πτερύγια οι στενοί δίοδοι που σχηματίζονται τείνουν να παρεμποδίσουν ή να κάνουν το ρευστό να 'ασφυκτιά' ειδικά όταν η ψύκτρα έχει μεγάλο μήκος. Κατά συνέπεια η παρεμπόδιση που εμφανίζεται υπερνικά την επιπλέον άνωση και υποβαθμίζει τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας της ψύκτρας. Στη συνέχεια σε σταθερά επίπεδα ισχύος η ψύκτρα λειτουργεί σε υψηλότερη θερμοκρασία σε σύγκριση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχει θερμική προστασία.

Όταν η ψύκτρα έχει αραιά πτερύγια η θερμική προστασία δεν εισάγει σημαντική αύξηση στην αντίσταση της ροής και

επικρατούν τα φαινόμενα άνωσης. Κατά συνέπεια η μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή μπορεί να βελτιωθεί ενώ σε συγκεκριμένα επίπεδα ισχύος η ψύκτρα μπορεί να λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Στη χρήση πτερυγίων ο ρυθμός ροής του ρευστού κοντά στο στερεό προσαρμόζεται κατά τρόπο που να συμπεριλαμβάνει τις μεταβολές στην άνωση και στην τριβή. Αυτή η τεχνική βελτίωσης είναι ωφέλιμη μόνο όταν η αύξηση της άνωσης είναι μεγαλύτερη από την επιπλέον τριβή που παρουσιάζεται. Κατά τη μελέτη της φυσικής συναγωγής δε χρειάζεται να απασχολεί η πτώση της πίεσης ή η ισχύς άντλησης κατά τη μελέτη της φυσικής συναγωγής εφόσον στην προκειμένη περίπτωση δε χρησιμοποιούνται αντλίες ή ανεμιστήρες.

2.2 Φυσική Συναγωγή

Συναγωγή είναι ο τρόπος μεταφοράς της ενέργειας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και του γειτονικού υγρού ή αερίου που βρίσκεται σε κίνηση και περιλαμβάνει τη συνδυασμένη επίδραση της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Όσο μεγαλύτερη είναι η κίνηση του ρευστού τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.

Η συναγωγή ονομάζεται φυσική (ή ελεύθερη) αν η κίνηση του ρευστού οφείλεται στις ανυψωτικές δυνάμεις που επάγονται από τις διαφορές στην πυκνότητα του ρευστού λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο ρευστό. Επομένως δε χρησιμοποιούνται διατάξεις που να προκαλούν την κίνηση του ρευστού.

Ορισμένα παραδείγματα όπου βρίσκει εφαρμογή η μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή είναι η ψύξη του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, η μεταφορά θερμότητας από τα πηνία ψύξης και τις γραμμές ισχύος και η μεταφορά θερμότητας από τα σώματα ζώων και ανθρώπων.

Ο μηχανισμός της φυσικής συναγωγής έχει ως εξής : έστω ότι έχουμε ένα ζεστό αντικείμενο το οποίο τοποθετούμε σε μία πλάκα εκτεθειμένο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή του αντικειμένου). Λόγω ύπαρξης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ αντικειμένου και περιβάλλοντος θα προκύψει μεταφορά θερμότητας από το αντικείμενο προς το περιβάλλον. Αρχικά η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του αντικειμένου θα παρουσιάσει κάποια πτώση ενώ η θερμοκρασία του αέρα δίπλα από το αντικείμενο θα αυξηθεί λόγω της αγωγής θερμότητας. Η υψηλότερη θερμοκρασία του αέρα συνεπάγεται μικρότερη πυκνότητα επομένως δημιουργείται μία κατάσταση στην οποία ένα αέριο χαμηλής πυκνότητας (ελαφρύ)

περιβάλλεται από αέριο υψηλής πυκνότητας (βαρύ) σε σταθερή πίεση όπου οι φυσικοί νόμοι υπαγορεύουν την άνοδο του ελαφρού αερίου (άνοδος του θερμαινόμενου αέρα). Ο χώρος που αδειάζει από το θερμότερο αέρα κοντά στην επιφάνεια του αντικείμενου αντικαθίσταται από τον ψυχρότερο αέρα που βρίσκεται εκεί κοντά επιταχύνοντας τη διεργασία ψύξης. Η άνοδος του θερμότερου αέρα και η ροή του ψυχρότερου στη θέση του πρώτου συνεχίζεται μέχρι το αντικείμενο να φτάσει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η κίνηση που οφείλεται στη συνεχή αντικατάσταση του θερμαινόμενου αέρα κοντά στο αντικείμενο από τον ψυχρότερο αέρα που βρίσκεται εκεί κοντά ονομάζεται ρεύμα φυσικής συναγωγής και η μεταφορά θερμότητας που ενισχύεται ως αποτέλεσμα αυτού του ρεύματος φυσικής συναγωγής ονομάζεται μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή.

Η φυσική συναγωγή είναι αποτελεσματική τόσο στη θέρμανση ψυχρών επιφανειών σε ένα θερμότερο περιβάλλον όσο και στη ψύξη θερμών επιφανειών σε ένα ψυχρότερο περιβάλλον όπου στην περίπτωση αυτή απλά περιστρέφεται η φορά της κίνησης του ρευστού. Σημειώνεται ότι όταν δεν υπάρχουν ρεύματα φυσικής συναγωγής η μεταφορά θερμότητας από το αντικείμενο προς τον αέρα που το περιβάλλει θα γίνεται μόνο με αγωγή ενώ ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το αντικείμενο προφανώς θα είναι χαμηλότερος.

Η ανοδική δύναμη που ασκεί το ρευστό σε ένα σώμα που είναι βυθισμένο πλήρως ή εν μέρη σε αυτό ονομάζεται δύναμη άνωσης. Το μέγεθος της δύναμης της άνωσης ισούται με το βάρος του ρευστού που εκτοπίζεται από το σώμα και δίνεται από τη σχέση:

$$F_{\text{buoyancy}} = \rho_{\text{fluid}} g V_{\text{body}}$$

Όπου : - ρ_{fluid} είναι μέση πυκνότητα του ρευστού

- g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

- V_{body} είναι ο όγκος εκείνου του τμήματος του σώματος που είναι βυθισμένο μέσα στο ρευστό

Το μέγεθος της μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός ρευστού είναι ανάλογο προς την παροχή μάζας του ρευστού και μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η παροχή μάζας τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο στη φυσική συναγωγή δε χρησιμοποιούνται πρόσθετες διατάξεις (ανεμιστήρες κλπ.) άρα ο ρυθμός ροής δε μπορεί να ελεγχθεί με εξωτερικά μέσα. Ο ρυθμός ροής στην προκειμένη περίπτωση καθιερώνεται με τη δυναμική ισορροπία της άνωσης και της τριβής.

Η δύναμη άνωσης είναι ανάλογη προς τη διαφορά πυκνότητας η οποία είναι ανάλογη προς τη διαφορά θερμοκρασίας σε σταθερή πίεση. Άρα όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού που βρίσκεται δίπλα σε μία θερμή (ή ψυχρή) επιφάνεια και του ρευστού που βρίσκεται μακριά από αυτή, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η άνωση και τόσο

ισχυρότερα τα ρεύματα φυσικής συναγωγής και επομένως τόσο υψηλότερος ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας.

Από την άλλη όταν δύο σώματα τα οποία βρίσκονται σε επαφή και κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο, ανάπτυσσεται τριβή στην επιφάνεια επαφής προς την αντίθετη διεύθυνση από εκείνη της κίνησης. Η αντίθετη δύναμη επιβραδύνει το ρευστό και επομένως μειώνει το ρυθμό ροής του ρευστού. Κάτω από μόνιμες συνθήκες ο ρυθμός ροής του αέρα που επηρεάζεται από την άνωση καθιερώνεται στο σημείο όπου τα δύο αυτά φαινόμενα εξισορροπούν το ένα το άλλο. Η τριβή αυξάνεται με την εισαγωγή περισσότερων στερεών επιφανειών οι οποίες παρεμποδίζουν σημαντικά τη ροή του ρευστού και τη μεταφορά θερμότητας.

Η περιοχή ροής στη φυσική συναγωγή διέπεται από τον αδιάστατο αριθμό που ονομάζεται αριθμός Grashof ο οποίος παριστάνει το λόγο της άνωσης προς την ιξώδη δύναμη που ενεργεί στο ρευστό.

$$\text{Gr} = \frac{(\text{Δυνάμεις άνωσης})}{(\text{Ιξώδεις δυνάμεις})} = \frac{\rho \Delta\rho V}{\mu v^2} = (g\beta \Delta T V)$$

Δηλαδή

που καταλήγει στην τελική σχέση (αφού $\Delta\rho = \rho\beta\Delta T$):

$$\text{Gr} = \frac{g\beta (T_s - T_\infty) \delta^3}{\nu^2}$$

Όπου : - g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

- β είναι ο συντελεστής ογκοδιαστολής

- T_s είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας

- T_∞ είναι η θερμοκρασία του ρευστού που βρίσκεται μακριά από την επιφάνεια

- δ είναι το χαρακτηριστικό μήκος του γεωμετρικού σχήματος

- ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού

Ο αριθμός Grashof αποτελεί το βασικό κριτήριο για τον προσδιορισμό του κατά πόσο η ροή του ρευστού είναι στρωτή ή τυρβώδης κατά τη φυσική συναγωγή. Για παράδειγμα σε κάθετες πλάκες ο κρίσιμος αριθμός Grashof είναι περίπου 10^9 . Επομένως η περιοχή ροής σε μία κάθετη πλάκα γίνεται τυρβώδης για αριθμούς Grashof μεγαλύτερους από 10^9 .

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή είναι ανάλογος προς τη διαφορά θερμοκρασίας και εκφράζεται ικανοποιητικά από το νόμο της ψύξης του Newton :

$$\dot{Q}_{\text{convection}} = hA (T_s - T_\infty)$$

όπου

- h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή
- A είναι το εμβαδόν της επιφάνειας μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μεταφορά θερμότητας
- T_s είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας
- T_∞ είναι η θερμοκρασία του ρευστού που βρίσκεται μακριά από την επιφάνεια

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή h δεν αποτελεί ιδιότητα του ρευστού αλλά είναι μια παράμετρος που προσδιορίζεται πειραματικά και της οποίας η τιμή εξαρτάται από τις μεταβλητές που επηρεάζουν τη συναγωγή όπως η γεωμετρία της επιφάνειας, η φύση της κίνησης του ρευστού, οι ιδιότητες του ρευστού και τέλος σε μεγάλο βαθμό η ταχύτητα της κύριας μάζας.

Επομένως όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Οι ταχύτητες του ρευστού στη φυσική συναγωγή κυμαίνονται κάτω από το 1m/s άρα οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας είναι πολύ χαμηλότεροι σε σχέση με την εξαναγκασμένη συναγωγή.

Φυσική συναγωγή γύρω από μεμονωμένες επιφάνειες

Η μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή σε μία επιφάνεια εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα της επιφάνειας, από τον προσανατολισμό της, από τη μεταβολή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ρευστού που χρησιμοποιείται. Στη φυσική συναγωγή το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνεται προς τη διεύθυνση της ροής.

Από την άλλη η ταχύτητα του ρευστού είναι μηδενική κοντά στην επιφάνεια της πλάκας, αυξάνει με την απόσταση από την επιφάνεια, φτάνει σε ένα μέγιστο σημείο και σταδιακά μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί μακριά από την επιφάνεια στο εξωτερικό άκρο του οριακού στρώματος.

Τέλος η θερμοκρασία του ρευστού θα ισούται με τη θερμοκρασία της πλάκας στην επιφάνεια και σταδιακά μειώνεται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ρευστού σε απόσταση αρκετά μακριά από την επιφάνεια.

Στην περίπτωση ψυχρών επιφανειών η μορφή της κατανομής ταχύτητας και θερμοκρασίας παραμένει η ίδια αλλά η διεύθυνση είναι αντίθετη σε σχέση με το προφίλ των κατανομών των θερμών επιφανειών.

Σχέσεις στη φυσική συναγωγή

- Μέσος αριθμός Nusselt (Nu) κατά τη φυσική συναγωγή :

$$Nu = \frac{h \delta}{k} = C (Gr Pr)^n = C Ra^n$$

Όπου

Ra είναι ο αριθμός Rayleigh

C είναι σταθερός συντελεστής

n είναι σταθερός εκθέτης

- Ο αριθμός Rayleigh αποτελεί το γινόμενο των αριθμών Grashof και Prandtl :

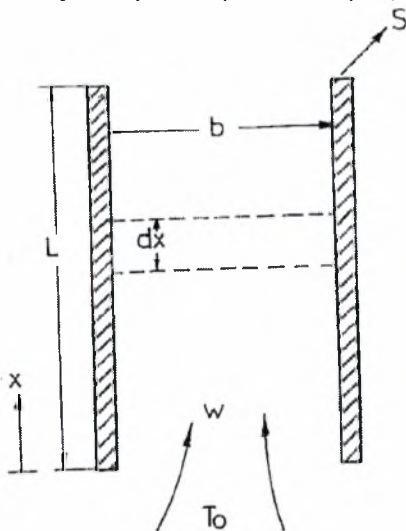
$$Ra = Gr Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) \delta^3}{\nu^2} Pr$$

Οι τιμές των σταθερών C και n εξαρτώνται από το γεωμετρικό σχήμα της επιφάνειας και από την περιοχή ροής η οποία χαρακτηρίζεται από τις τιμές του αριθμού Rayleigh. Η τιμή της σταθεράς n είναι συνήθως 1/4 για τη στρωτή ροή και 1/3 για τη τυρβώδη ροή ενώ η τιμή της σταθεράς C είναι συνήθως μικρότερη από 1.

Φυσική συναγωγή σε κατακόρυφο κανάλι

Πλήρως Ανεπτυγμένο Όριο

Εκτιμήσεις Ροής: Στην στρωτή, πλήρως ανεπτυγμένη, δισδιάστατη ροή μεταξύ παράλληλων πτερυγίων - όπως προβάλλεται στην Εικόνα 1



Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα ροής σε κατακόρυφο κανάλι

η πτώση της πίεσης παρέχεται από

$$\left. \frac{dP}{dx} \right|_{\text{loss}} = -12 \mu w / \rho b^3 \quad (1)$$

- όπου :
- μ είναι το δυναμικό ιξώδες
 - w είναι ο ρυθμός ροής μάζας ανά μονάδα πλάτους
 - ρ είναι η πυκνότητα
 - b το πλάτος του κατακόρυφου καναλιού

Για τη ροή ελεύθερης συναγωγής, αυτή η αντίσταση ροής εξισορροπείται από το ανωστικό δυναμικό το οποίο εκφράζεται ως

$$\left. \frac{dP}{dx} \right|_{\text{buoy}} = (\bar{\rho}_f - \rho_o) g = -\bar{\rho} \beta g (\bar{T}_f - T_o) \quad (2)$$

- όπου :
- β είναι ο συντελεστής ογκοδιαστολής
 - g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας
 - \bar{T}_f είναι η μέση θερμοκρασία ρευστού
 - T_o είναι η θερμοκρασία εισόδου
 - $\bar{\rho}$ είναι η μέση πυκνότητα

Εξισώνοντας τις εξισώσεις (1) και (2), ο ρυθμός ροής ανά μονάδα πλάτους, w , στο κανάλι, βρίσκεται ότι ισούται με

$$w = \bar{\rho}^2 g \beta b^3 (\bar{T}_f - T_o) / 12 \mu \quad (3)$$

Αριθμός Nusselt: Μια ισορροπία ενέργειας στο διαφορικό όγκο, όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 1, το οποίο ισοδυναμεί με τη θερμότητα που μεταφέρεται από δυο ισοθερμικά τοιχώματα με αυτήν που απορροφάται στη ροή, επιφέρει:

$$w c_p dT = 2h (T_w - T_f) dx \quad (4)$$

- όπου :
- h είναι ο συντελεστής συναγωγής
 - c_p είναι η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση

Από τις εκτιμήσεις συνέχειας ο ρυθμός ροής w , είναι σταθερός και σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή, με ιδιότητες που είναι ανεξάρτητες της θερμοκρασίας, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h , όπως και η

ειδική θερμότητα c_p , είναι σταθερά. Συνεπώς, το $wc_p/2h$ μπορεί να θεωρηθεί σταθερό κατά μήκος του καναλιού, και η εξίσωση (4) μπορεί απλά να ενσωματωθεί ώστε να παράσχει τη συνολική θερμοκρασία του υγρού ή την εσωτερική θερμοκρασία (bulk temperature).

$$\Gamma_f = T_w^* - (T_w - T_o) e^{-\Gamma x} \quad (5)$$

όπου : Γ είναι η θερμική παράμετρος

Το T αντικαταστάθηκε από το $2h/wc_p$.

Για να προκύψει ένας αριθμός Nusselt με βάση τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του τοιχώματος και του περιβάλλοντος υγρού, ο Nu μπορεί να οριστεί ως

$$Nu_o \equiv \left[\frac{q/A}{T_w - T_o} \right] \frac{b}{k} \quad (6)$$

όπου : - q είναι ρυθμός ροής θερμότητας
 - k είναι η θερμική αγωγιμότητα
 - A είναι το εμβαδόν

Ο ρυθμός μεταφοράς q , μπορεί να καθοριστεί από τον ρυθμό ροής και την αύξηση της θερμοκρασίας στο κανάλι μέσω της εφαρμογής των εξισώσεων (3) και (5), όπου η τελευταία επιλύεται με $x = L$ ώστε να βρεθεί η θερμοκρασία εξόδου. Η μέση θερμοκρασία των υγρών στο κανάλι μπορεί να βρεθεί ενσωματώνοντας την εξίσωση (5) από το $x = 0$ ως το $x = L$ και διαιρώντας με το μήκος του καναλιού, L . Ακολουθώντας αυτές τις πράξεις, προκύπτει η εξίσωση:

$$q = \left[\frac{c_p \bar{\rho}^3 g \beta b^3 S}{12 \mu} (T_w - T_o) \left(1 - \frac{1 - e^{-\Gamma L}}{\Gamma L} \right) \right] \left[(T_w - T_o) (1 - e^{-\Gamma L}) \right] \quad (7)$$

όπου : - S είναι το πλάτος του πτερυγίου

Εισάγοντας την εξίσωση (7) στην (6) με την επιφανειακή περιοχή, A , ίση με $2LS$, βρίσκεται ο επιθυμητός αριθμός Nusselt, ως:

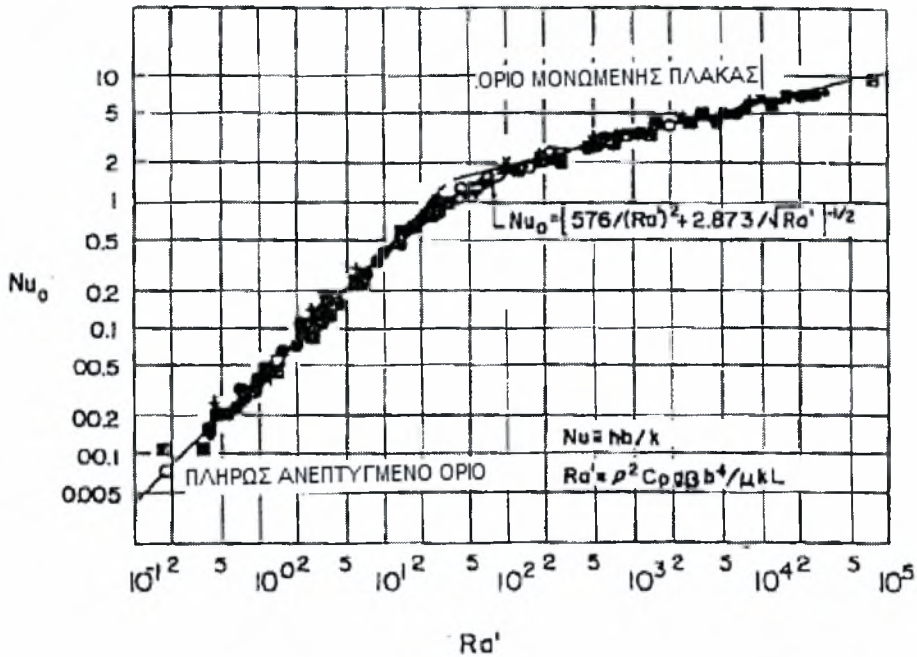
$$\text{Nu}_o = \frac{1}{24} \left[\frac{c_p \bar{\rho}^2 g \beta b^4 (T_w - T_o)}{\mu k L} \right] \left[\left(1 - \frac{1 - e^{-\Gamma L}}{\Gamma L} \right) (1 - e^{-\Gamma L}) \right] \quad (8)$$

Ο συνδυασμός των παραμέτρων που εμφανίζονται στο πρώτο σκέλος με αγκύλες της εξίσωσης (8) αναγνωρίζεται ως ο αριθμός καναλιού Rayleigh, δηλ. $\text{Ra } b/L \equiv \text{Ra}'$. Συνεπώς, στο πλήρως ανεπτυγμένο όριο, όπου $L \rightarrow \infty$ και το δεύτερο σκέλος της εξίσωσης πλησιάζει τη μονάδα, ο αριθμός Nu_o φαίνεται πως προσεγγίζει το $\text{Ra}' / 24$. Αυτό το αποτέλεσμα συμφωνεί πλήρως με τα προηγουμένως αναφερόμενα αναλυτικά και αριθμητικά αποτελέσματα (4,5,7).

Σύνθετες σχέσεις για τη ψύξη

Γενικά: Όταν μια εξίσωση είναι γνωστό ότι διαφέρει ομαλά ανάμεσα σε δυο περιοριστικές παραστάσεις, οι οποίες είναι ορισμένες με ακρίβεια, και όταν οι λύσεις για τις ενδιάμεσες τιμές της εξίσωσης είναι είτε δύσκολο να εξαχθούν είτε περιλαμβάνουν και άλλες εξισώσεις πινάκων, μια προσεγγιστική σύνθετη σχέση μπορεί να εξαχθεί, προσθέτοντας προσεγγιστικά τις δυο περιοριστικές εκφράσεις. Οι Churchill και Usagi έχουν προτείνει ότι η συχνά χρησιμοποιούμενη γραμμική επίθεση μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική περίπτωση ενός πιο γενικού αθροίσματος, με τη μορφή:

$$y = [(Az^p)^n + (Bz^q)^n]^{1/n} \quad (9)$$



Εικόνα 2: Διακύμανση αριθμού Nu για συμμετρικά ισοθερμικά πτερυγία.

Όπου

$$Y \rightarrow Az^p \text{ καθώς } z \rightarrow 0$$

$$Y \rightarrow Bz^q \text{ καθώς } z \rightarrow \infty$$

$$n > 0 \text{ αν } p < q$$

$$n < 0 \text{ αν } p > q$$

Για το πρόβλημα της φυσικής συναγωγής υπό εξέταση, η διακύμανση του αριθμού Nu_0 παίρνει τη μορφή $C_1 Ra'$ ή $C_2 \sqrt{Ra''}$ για μικρές τιμές του αριθμού Rayleigh του κενού, και για τον μεγάλο αριθμό Rayleigh αυξάνει προς το όριο του μονωμένου πτερυγίου, σε στρωτή ροή

$$Nu_L = C_3 (Ra)^{1/4}$$

για μια ισοθερμική επιφάνεια, και

(10)

$$= C_4 (Ra^*)^{1/5}$$

για μια επιφάνεια ίσης ροής. Πολλαπλασιάζοντας και τις δυο πλευρές τις εξίσωσης (10) με b/L , αυτή η σχέση μονωμένου πτερυγίου μπορεί να μετατραπεί σε μια σχέση μεταξύ του αριθμού Nusselt του καναλιού, hb/k και του αριθμού Rayleigh του καναλιού, Ra' και Ra'' , για ισοθερμικά και ίσης ροής πτερυγία, αντίστοιχα.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (9) στην φυσική απαγωγή σε κανάλια, μπορεί συνεπώς να είναι λογική η προσδοκία ότι ο αριθμός Nu_o μπορεί να ποικίλει σύμφωνα με:

$$Nu_o = [(C_1 Ra')^{-n} + (C_3 \sqrt[4]{Ra'})^{-n}]^{-1/n}$$

για ισοθερμικά πτερύγια, και

$$Nu_o = [C_2 \sqrt{Ra''}^{-n} + (C_4 \sqrt[3]{Ra''})^{-n}]^{-1/n} \quad (11)$$

για πτερύγια ίσης ροής.

Η σωστή, ή περισσότερο σωστή, τιμή για τον εκθέτη συσχετισμού, n , μπορεί να αξιολογηθεί συγκρίνοντας την εξίσωση (11) με πειραματικά δεδομένα ή υπολογισμένες τιμές του αριθμού Nu_o .

Συμμετρικά ισοθερμικά πτερύγια. Όπως σημειώθηκε παραπάνω, ο αριθμός Nu_o για τη στρωτή ελεύθερη ροή σε ισοθερμικές επιφάνειες εξαρτάται από το $(Ra')^{1/4}$ και οι καθοριστικές παραλλαγές συνήθως αντικατοπτρίζονται σε διαφορετικές τιμές του συντελεστή C_3 . Για σχετικά μικρά κάθετα πτερύγια στον αέρα και $10^4 < Ra < 10^9$, ο McAdams αναφέρει ότι το C_3 ισούται με 0.59. Αυτή η παράσταση, μαζί με την πλήρως ανεπτυγμένη σχέση του αριθμού Nu_o (εξίσωση (8)), μπορεί να εισαχθεί στην εξίσωση (11) ώστε να επιφέρει την παρακάτω:

$$Nu_o = \left[\left(\frac{1}{24} Ra' \right)^{-n} + \left(0.59 \sqrt[4]{Ra'} \right)^{-n} \right]^{-1/n} \quad (12)$$

Ο συσχετισμός Elenbaas για τον ίδιο θερμικό καθορισμό λαμβάνει τη μορφή:

$$Nu_o = \frac{1}{24} Ra' [1 - e^{-35/Ra'}]^{3/4} \quad (13)$$

Κατόπιν της διαδικασίας συσχετισμού που περιγράφεται από τους Churchill και Usagi, ο εκθέτης συσχετισμού, n , βρίσκεται ως ισούται

περίπου με το 2, επιφέροντας μια σύνθετη σχέση για δυο ισοθερμικές επιφάνειες όπως η παρακάτω:

$$Nu_o = (576/(Ra')^2 + 2.873/\sqrt{Ra'})^{-1/2} \quad (14)$$

Η κοντινή απόσταση των σημείων δεδομένων Elenbaas με τη σύνθετη σχέση, και οι ασύμπτωτες εξισώσεις και στα δυο όρια, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2, επαληθεύουν αυτήν την προσέγγιση.

Φυσική συναγωγή στο εσωτερικό περιβλημάτων

Σημαντικό ποσό της θερμότητας μίας οικίας γίνεται μέσω των παραθύρων. Έτσι αποτελεί επιδίωξη η μόνωση των παραθύρων για την εξοικονόμηση ενέργειας. Γνωστός τρόπος μόνωσης αποτελεί είναι ένα περίβλημα γνωστό ως παράθυρο με διπλό τζάμι το οποίο αποτελείται από δύο πλάκες γυαλιού με εγκλωβισμένο αέρα ανάμεσά τους. Ωστόσο υπάρχουν και άλλα είδη περιβλημάτων που περιλαμβάνουν κοιλότητες ηλιακούς συλλέκτες και κρυογενικούς θαλάμους με ομόκεντρους κυλίνδρους ή σφαίρες. Η μεταφορά θερμότητας στα περιβλήματα είναι περίπλοκη λόγω του ότι το ρευστό στο περίβλημα δεν παραμένει στάσιμο.

Σε ένα κάθετο περίβλημα το ρευστό που βρίσκεται κοντά στη θερμότερη επιφάνεια ανεβαίνει ενώ εκείνο που βρίσκεται κοντά στη ψυχρότερη κατεβαίνει δημιουργώντας περιστροφική κίνηση μέσα στο περίβλημα που ενισχύει τη μεταφορά θερμότητας μέσω αυτού.

Σε ένα κάθετο περίβλημα η μεταφορά θερμότητας εξαρτάται από το εάν η θερμότερη πλάκα βρίσκεται επάνω ή κάτω. Όταν η θερμότερη πλάκα βρίσκεται επάνω δεν αναπτύσσονται στο περίβλημα ρεύματα συναγωγής εφόσον το ελαφρύτερο ρευστό θα βρίσκεται πάντα επάνω από το βαρύτερο. Σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά θερμότητας θα γίνεται αποκλειστικά με αγωγή και θα είναι $Nu=1$. Όταν η θερμότερη πλάκα βρίσκεται κάτω το βαρύτερο ρευστό θα βρίσκεται πάντα επάνω από το ελαφρύτερο και θα υπάρχει η τάση από το ελαφρύτερο ρευστό να ανατρέψει το βαρύτερο ρευστό και να ανέβει στο επάνω μέρος όπου και θα έρθει σε επαφή με τη ψυχρότερη πλάκα και θα ψυχθεί. Ωστόσο

μέχρι να συμβεί αυτό η μεταφορά θερμότητας συνεχίζει να γίνεται με αγωγή. Όταν $Ra > 1708$ η άνωση υπερνικά την αντίσταση του ρευστού και προκαλεί ρεύματα φυσικής συναγωγής τα οποία παρατηρείται ότι έχουν τη μορφή εξαγώνων κελιών που ονομάζονται κελιά Benard. Για $Ra > 3 \cdot 10^5$ τα κελιά καταρέουν και η ροή του ρευστού γίνεται τυρβώδης.

Ο αριθμός Rayleigh για ένα περίβλημα δίνεται από τη σχέση:

$$Ra = \frac{g\beta (T_1 - T_2) \delta^3}{\nu^2} Pr$$

όπου το χαρακτηριστικό μήκος δ είναι η απόσταση της θερμής και της ψυχρής πλάκας και T_1, T_2 είναι οι θερμοκρασίες των θερμών και ψυχρών επιφανειών αντίστοιχα. Οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται στη μέση θερμοκρασία του ρευστού. Αφού βρεθεί ο αριθμός Nusselt από πίνακες προσδιορίζονται Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τη σχέση

$$h = \frac{k}{\delta} Nu$$

και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από τη σχέση

$$\dot{Q} = hA (T_1 - T_2) = k Nu A \frac{(T_1 - T_2)}{\delta}$$

Η ποσότητα $k Nu$ ονομάζεται αποτελεσματική θερμική αγωγιμότητα.

Συσχέτιση Φυσικής και Εξαναγκασμένης Συναγωγής

Η φυσική συναγωγή μπορεί να βοηθήσει ή να βλάψει τη μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή ανάλογα με τις σχετικές διευθύνσεις των κινήσεων λόγω άνωσης και εξαναγκασμένης συναγωγής:

- Στη βοηθητική ροή, η ροή άνωσης γίνεται προς την ίδια διεύθυνση με την εξαναγκασμένη συναγωγή άρα η φυσική συναγωγή βοηθά την εξαναγκασμένη συναγωγή και ενισχύει τη μεταφορά θερμότητας.
- Στην αντίθετη ροή, η ροή άνωσης γίνεται προς την αντίθετη διεύθυνση με την εξαναγκασμένη συναγωγή άρα η φυσική συναγωγή αντιτίθεται στην εξαναγκασμένη συναγωγή και μειώνει τη μεταφορά θερμότητας.
- Στην εγκάρσια ροή, η ροή άνωσης είναι κάθετη προς την εξαναγκασμένη κίνηση. Η εγκάρσια ροή ενισχύει την ανάμιξη του ρευστού και επομένως ενισχύει τη μεταφορά θερμότητας.

Ένα ερώτημα που δημιουργείται κατά την ψύξη εξοπλισμού όπου παράγεται θερμότητα είναι αν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί

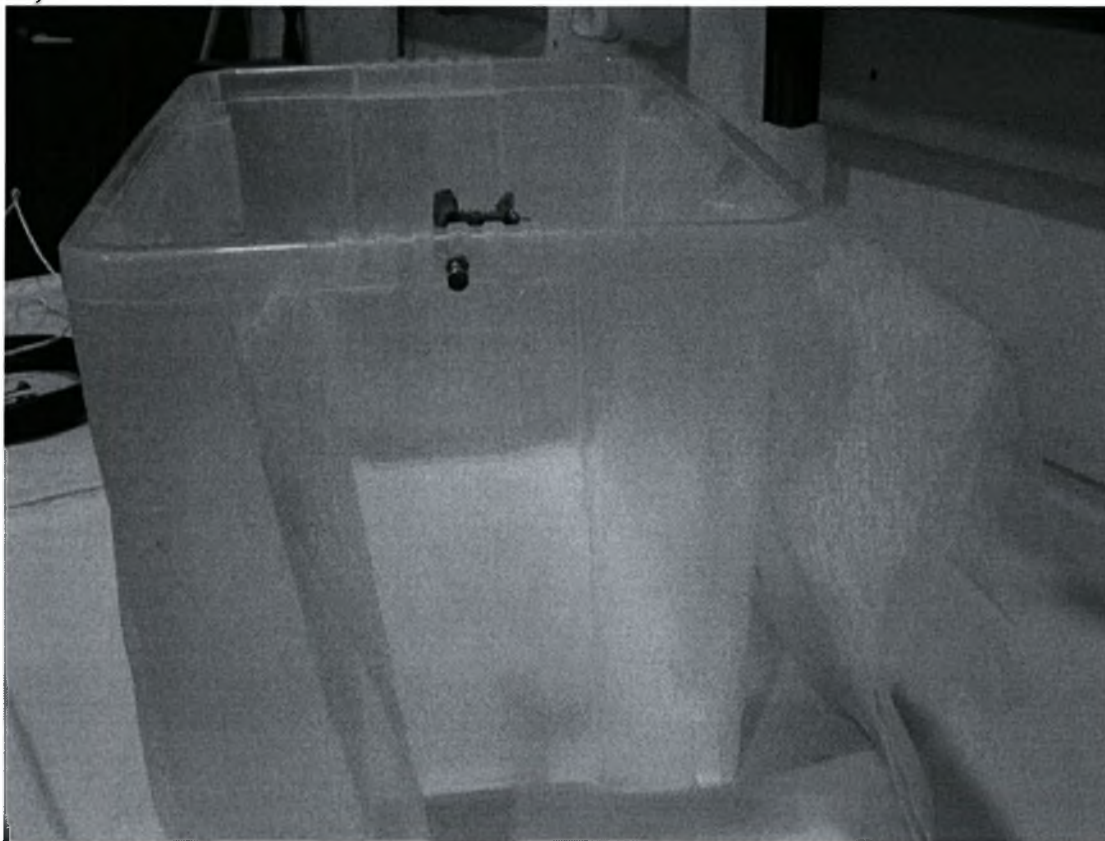
φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή. Η απάντηση εξαρτάται από τη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας. Για μία σταθερή τιμή κατανάλωσης ισχύος και εμβαδού τα h και T_s είναι αντιστρόφως ανάλογα. Επομένως η διάταξη θα λειτουργεί σε υψηλότερη θερμοκρασία όταν ο h είναι χαμηλός(συνηθισμένο στη φυσική συναγωγή)και σε χαμηλότερη θερμοκρασία όταν ο h είναι υψηλός (συνηθισμένο στην εξαναγκασμένη συναγωγή).

Η φυσική συναγωγή προτιμάται περισσότερο όταν δε χρειάζονται ανεμιστήρες ή αντλίες και επομένως αποφεύγονται όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με αυτά όπως θόρυβος,δονήσεις,κατανάλωση ισχύος,δυσλειτουργία.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

3.1 Εξαρτήματα της πειραματικής διάταξης

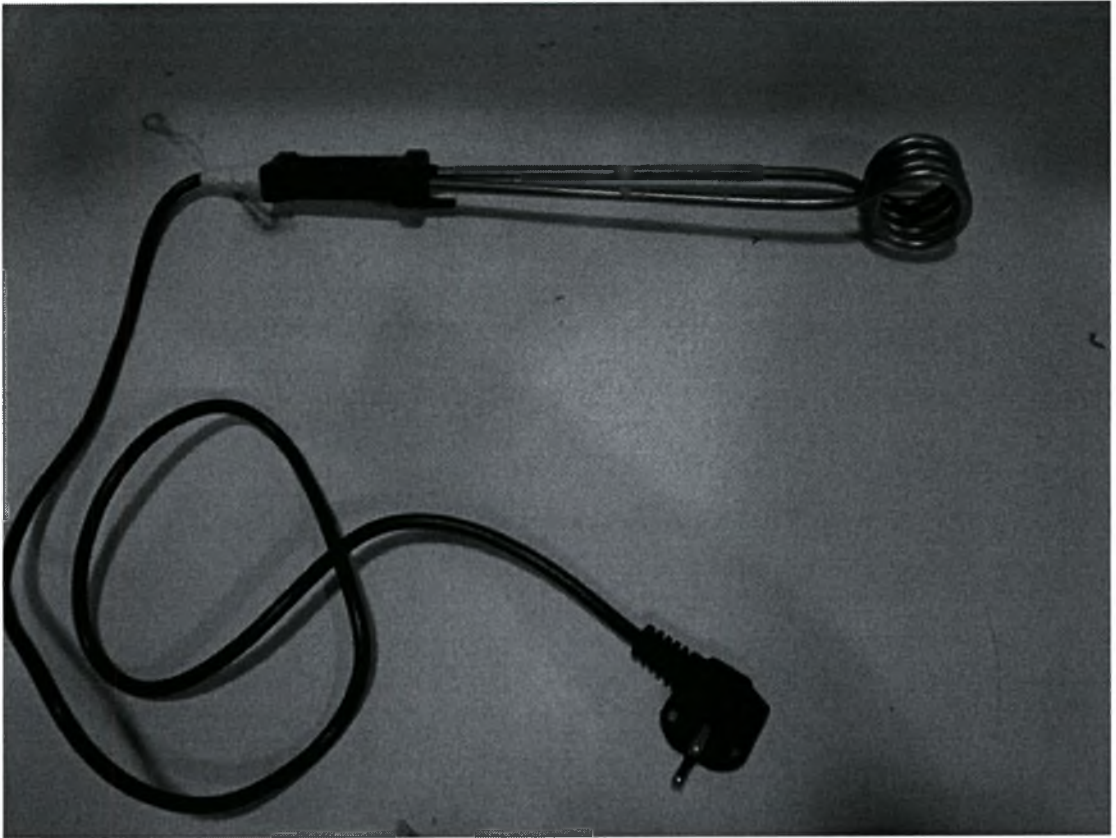
Η διάταξη και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα με σκοπό την προσέγγιση του συντελεστή συναγωγής από τις μετρήσεις των δεδομένων του προβλήματος αποτελείται από ένα διάφανο δοχείο(Εικόνα 3.1),ορθογωνικού σχήματος, διαστάσεων 0,5 m*0,2 m*0,4 m,από πλαστικό υλικό.



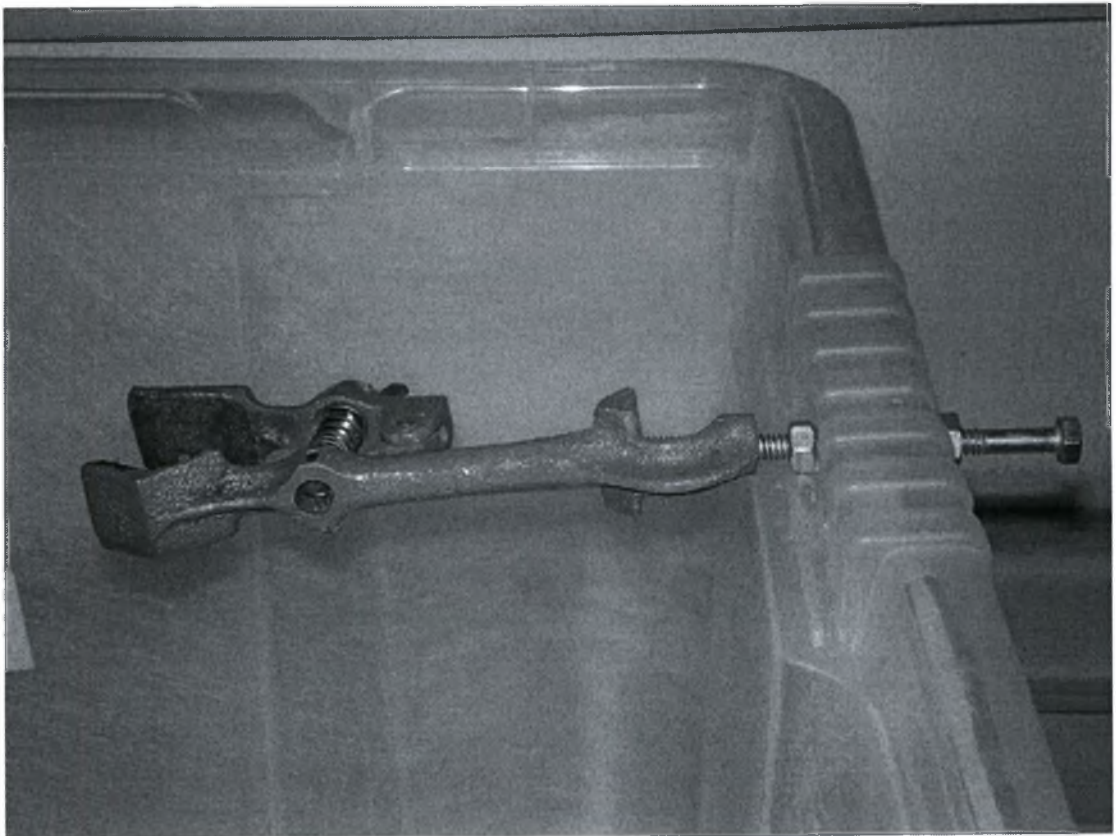
Εικόνα 3.1

Για την καλύτερη προσέγγιση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν ως μονωτικό υλικό τυλίγματα από υαλοβάμβακα στα εξωτερικά τοιχώματα του δοχείου και επιφάνειες από φελιζόλ στην επιφάνεια του θερμού ρευστού με σκοπό τη μείωση των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον και τη ελαχιστοποίηση της εξατμησης του νερού αντίστοιχα.

Για τη θέρμανση του θερμού ρευστού χρησιμοποιήθηκε μία βυθιζόμενη αντίσταση(Εικόνα 3.2),κατάλληλη για θέρμανση ρευστού,με ισχύ 1500 watt. Για τη στήριξη της βυθιζόμενης αντίστασης χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο υποστήριγμα(Εικόνα 3.3) που εφάρμοσε στο δοχείο.

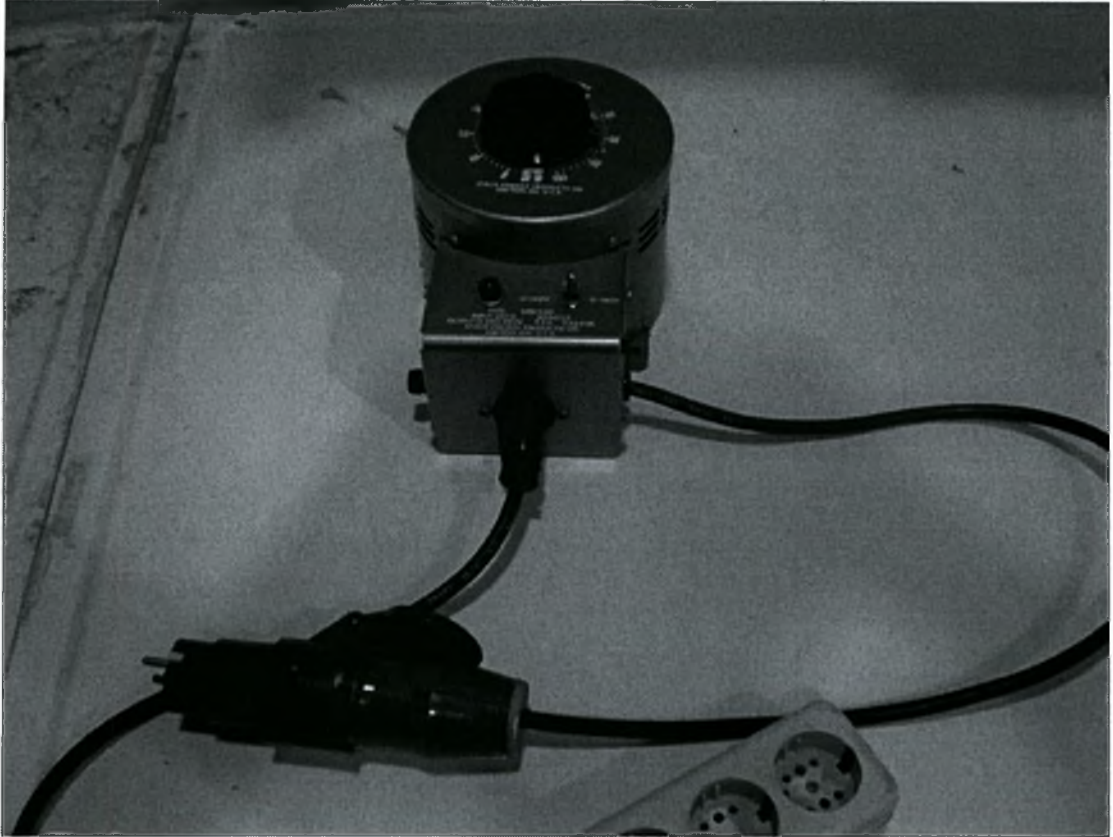


Εικόνα 3.2



Εικόνα 3.3

Για τη ρύθμιση της τάσης της βυθιζόμενης αντίστασης σε διάφορες τιμές επιλέχθηκε ρυθμιστής τάσης(variac) (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4

Ο εναλλάκτης θερμότητας(Εικόνα 3.5 και 3.6) που επιλέχθηκε για τη ψύξη του θερμού ρευστού είναι από χαλκό,ορθογωνικού σχήματος ,διαστάσεων $0,2\text{ m} \times 0,24\text{ m} \times 0,065\text{ m}$, με 24 αυλούς και 56 πτερύγια. Για τη στήριξη του εναλλάκτη χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ορθογωνικά υποστηρίγματα, από πλέξι-γκλας ,διαστάσεων $6,5\text{ cm} \times 3,5\text{ cm} \times 3,5\text{ cm}$. Τα δύο σωληνάκια που τοποθετήθηκαν στην είσοδο και την έξοδο του εναλλάκτη ήταν από πλαστικό ενώ για την καλύτερη εφαρμογή τους στα στόμια του εναλλάκτη χρησιμοποιήθηκαν δύο σφιγκτηράκια.



Εικόνα 3.5



Εικόνα 3.6

3.2 Συναρμολόγηση των εξαρτημάτων της πειραματικής διάταξης και έναρξη λειτουργίας.

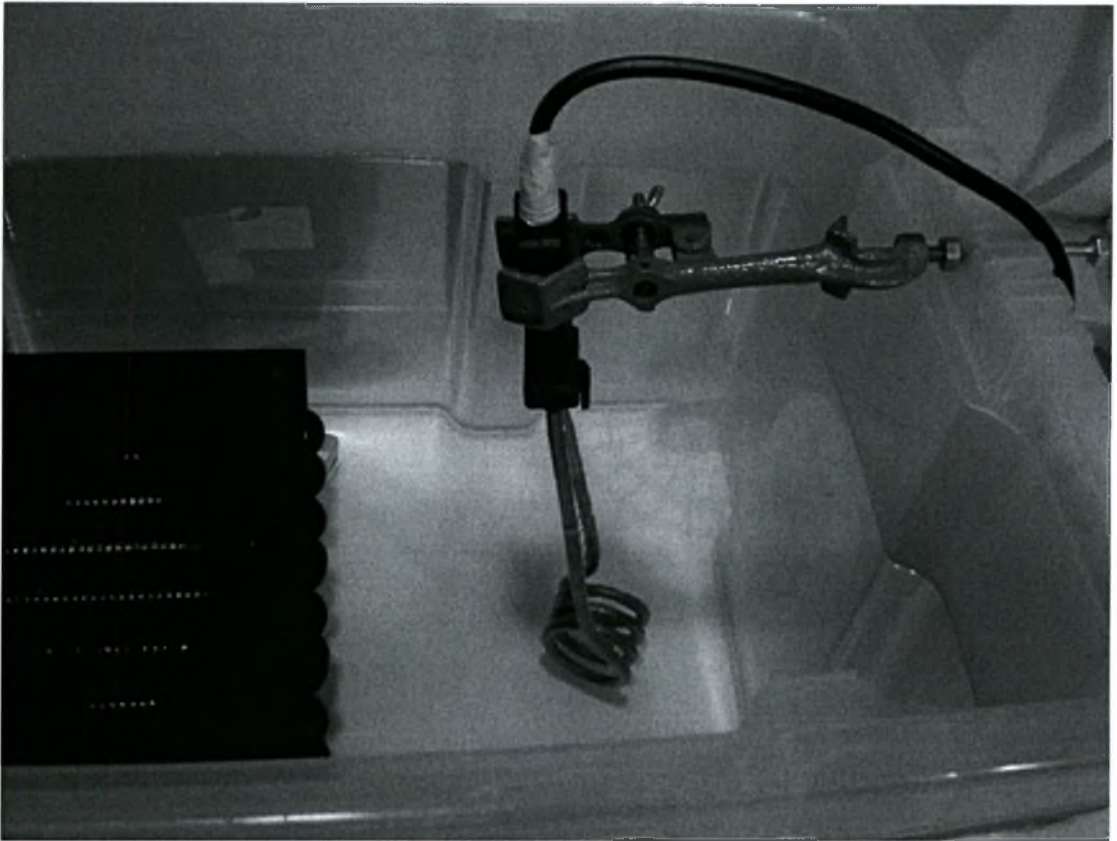
Προσαρμόζουμε το υποστήριγμα με τη χρήση βίδας και παξιμαδίων στο δοχείο. Τοποθετούμε την αντίσταση στο υποστήριγμα.

Τυλίγουμε το δοχείο με τον υαλοβάμβακα για να μειώσουμε τις απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον.



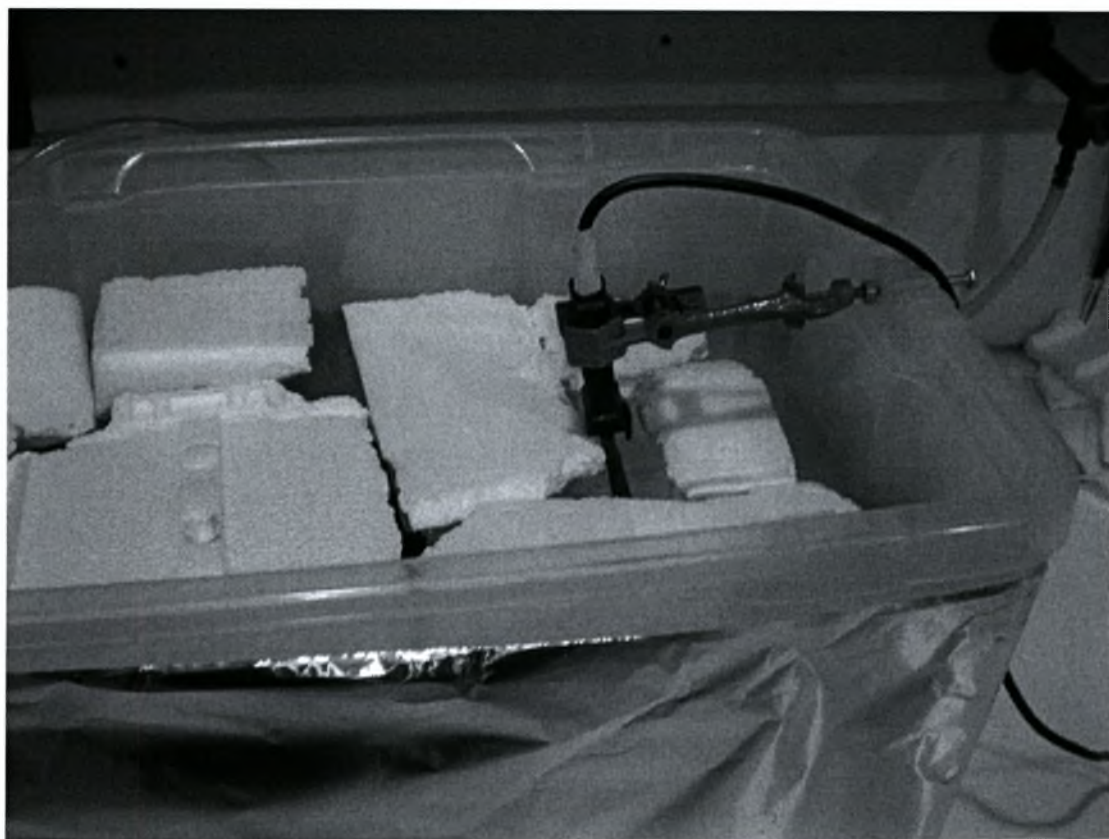
Εικόνα 3.7

Συνδέουμε τα δύο σωληνάκια στα σωληνάκια εισόδου και εξόδου του εναλλάκτη. Τοποθετούμε τον εναλλάκτη εντός του δοχείου με τη βοήθεια των υποστηριγμάτων. Προσαρμόζουμε το ένα σωληνάκι στη βρύση του εργαστηρίου και το άλλο το τοποθετούμε στην αποχέτευση. Γεμίζουμε το δοχείο με νερό βρύσης.



Εικόνα 3.8

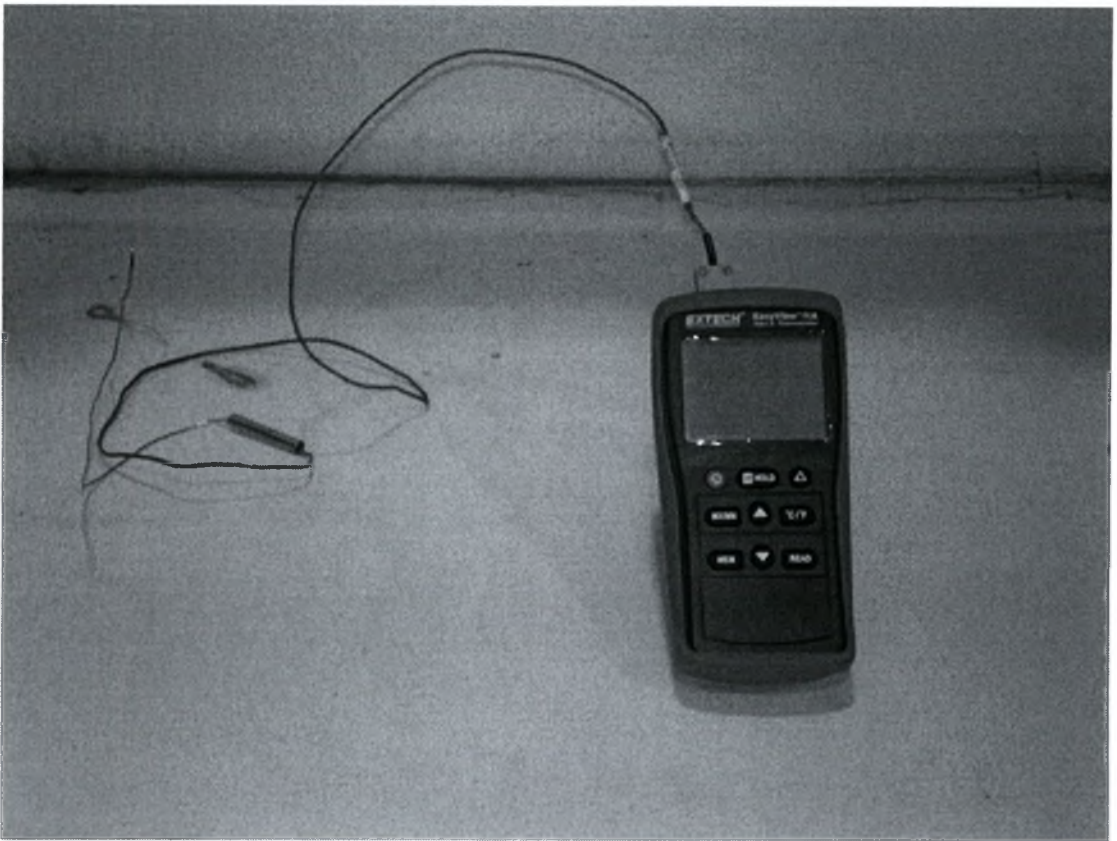
Τοποθετούμε τις επιφάνειες του φελιζόλ στην επιφάνεια του νερού με σκοπό τη μείωση των απωλειών θερμότητας στο περιβάλλον. Συνδέουμε την αντίσταση με το ρυθμιστή τάσης και το ρυθμιστή τάσης στο ρεύμα. Ρυθμίζουμε σε τιμή επιθυμητής τάσης και θέτουμε σε λειτουργία. Αρχίζει η θέρμανση του νερού. Ανοίγουμε την παροχή της βρύσης.



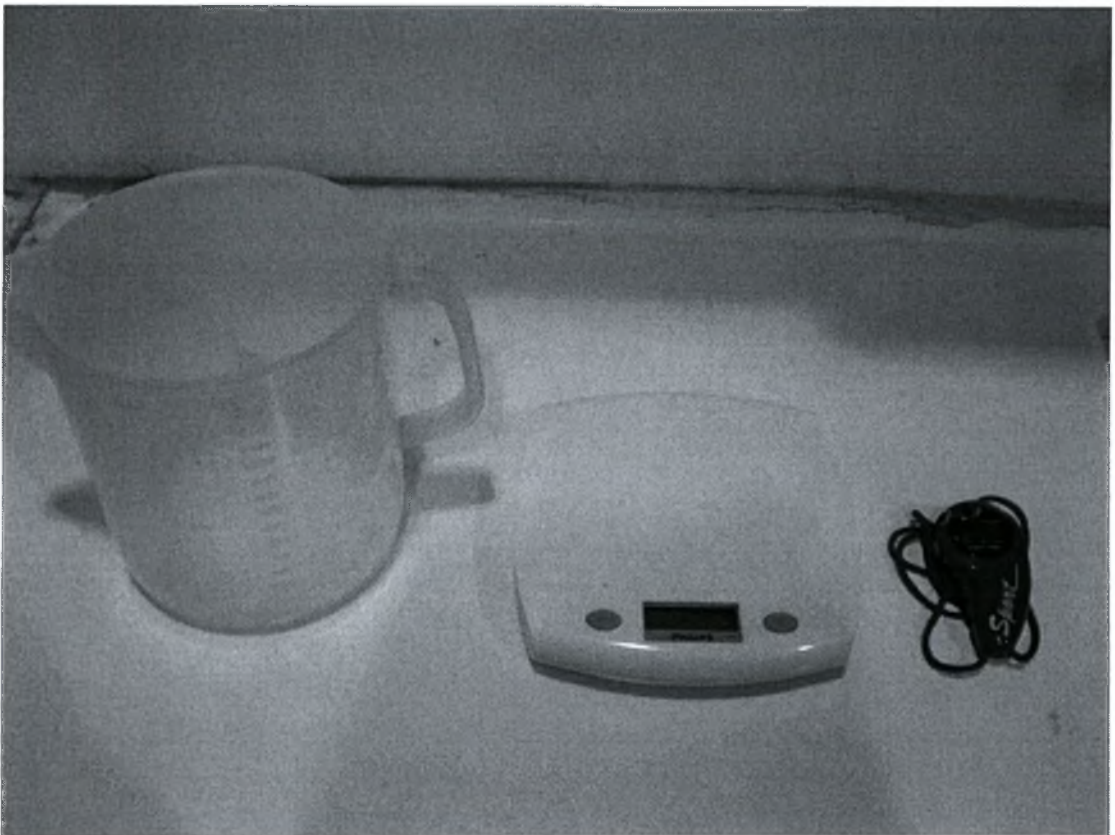
Εικόνα 3.9

3.3 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν και μεγέθη που καταγράφηκαν

Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν ένα θερμοστοιχείο (Εικόνα 3.10), ένα δοχείο χωρητικότητας 1500 ml (Εικόνα 3.11), μία ζυγαριά ακριβείας μέχρι και 3 Kg (Εικόνα 3.11), ένα χρονόμετρο (Εικόνα 3.11).



Εικόνα 3.10



Εικόνα 3.11

Καταγράφουμε την τάση που έχουμε ρυθμίσει για τη μέτρηση. Τοποθετούμε το θερμοστοιχείο εντός του θερμού ρευστού και περιμένουμε να σταθεροποιηθεί η ένδειξή του ώστε να επικρατήσουν μόνιμες συνθήκες στο πείραμα. Καταγράφουμε την ένδειξη του θερμοστοιχείου για το νερό του δοχείου σε τέσσερα σημεία. Στη συνέχεια μετράμε τις τιμές των θερμοκρασιών στην είσοδο και την έξοδο του εναλλάκτη με τη βοήθεια του θερμοστοιχείου. Τέλος προσδιορίζουμε την παροχή του ψυχρού νερού συγκεντρώνοντας την ποσότητα του νερού για ένα λεπτό της ώρας στο μικρό δοχείο και καταγράφουμε την ένδειξη της ζυγαριάς.



Εικόνα 3.12



Εικόνα 3.13

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΡΥΘΜΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ-ΙΣΧΥΣ ΑΝΙΣΤΑΣΗΣ

Θα γίνει προσδιορισμός του ρυθμού με τον οποίο προσδίδεται θερμότητα στο νερό του δοχείου(θερμό ρευστό) από την βυθιζόμενη αντίσταση χωρίς να λαμβάνει ταυτόχρονα χώρα η διαδικασία της ψύξης.

-Ο θεωρητικός (μέγιστος)ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας προσδιορίζεται ως εξής:

Θεωρώντας ότι όλη η θερμότητα που παράγεται από την αντίσταση(1500watt) προσδίδεται στο νερό του δοχείου θα ισχύει(αρχική θερμοκρασία νερού 24,3 °C)

$$M c_{p,\delta} dT_{\delta} = \dot{Q}_R dt \rightarrow \frac{dT_{\delta}}{dt} = \frac{\dot{Q}_R}{M c_{p,\delta}} = \frac{1500 \frac{J}{s}}{30 \text{ Kg} * 4180 \frac{J}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}} =$$

$$0,012 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}} = 0,72 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \rightarrow$$

Επομένως η καμπύλη θα είναι μία ευθεία γραμμή με κλίση $\phi=35^{\circ}$.

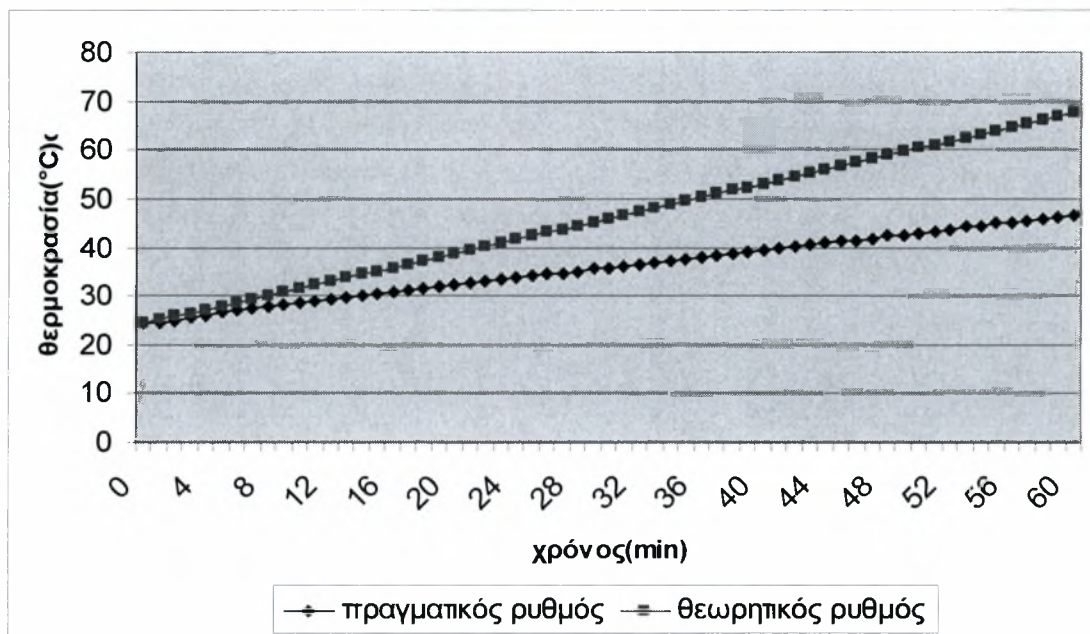
-Ο πραγματικός ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας θα προσδιοριστεί πειραματικά. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε θέρμανση του νερού στο δοχείο χωρίς να λάβει χώρα ψύξη του νερού με τη βοήθεια του εναλλάκτη και καταγράφηκε η θερμοκρασία του με τη βοήθεια του θερμοστοιχείου στο τέλος κάθε λεπτού της διαδικασίας. Τοποθετήθηκαν επιφάνειες φελιζόλ στην επιφάνεια του νερού και τυλίγματα υαλοβάμβακα στις επιφάνειες του δοχείου για μείωση των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι:

T(°C)	t(min)
24,3	0
24,4	1
24,8	2
25,7	3
26,1	4
26,8	5
27,2	6
27,6	7
27,9	8
28,2	9

28,6	10
29	11
29,3	12
29,6	13
30	14
30,4	15
30,8	16
31,2	17
31,6	18
31,9	19
32,2	20
32,6	21
33	22
33,3	23
33,7	24
34	25
34,4	26
34,7	27
35,1	28
35,5	29
35,8	30
36,2	31
36,5	32
36,9	33
37,3	34
37,6	35
38	36
38,3	37
38,7	38
39,1	39
39,4	40
39,8	41
40,1	42
40,5	43
40,9	44
41,2	45
41,5	46
41,8	47
42,4	48
42,5	49
42,8	50
43,3	51
43,7	52
44,2	53
44,5	54
44,9	55
45,2	56
45,6	57
45,9	58
46,3	59
46,7	60

Πίνακας 4.1

Παρακάτω δίνεται η απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων για το θεωρητικό και τον πραγματικό ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας:



Παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση του πραγματικού ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας βρίσκεται χαμηλότερα από αυτή του θεωρητικού ρυθμού. Από την άλλη και η καμπύλη του πραγματικού ρυθμού που σχηματίζεται είναι μία ευθεία γραμμή. Από την περαιτέρω σύγκριση των δύο καμπυλών εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι απώλειες της θερμότητας από το θερμό νερό είναι μικρές. Οπότε μπορούμε να λάβουμε ως παραδοχή στη συνέχεια ότι η θεωρητική ηλεκτρική ισχύς της βυθιζόμενης αντίστασης αποδίδεται εξ' ολοκλήρου στο θερμό νερό.

4.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει η μέτρηση των διαστάσεων και ο υπολογισμός των δεδομένων του εναλλάκτη που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής. Τα δεδομένα που πρέπει να υπολογιστούν είναι η καθαρή συνολική επιφάνεια των αυλών A_b και η καθαρή συνολική επιφάνεια των πτερυγίων A_f που έρχονται σε επαφή με το θερμό ρευστό.

Ο αριθμός των αυλών του εναλλάκτη είναι $N=24$. Ο αριθμός των πτερυγίων του εναλλάκτη είναι $N'=56$.

-Η επιφάνεια του ενός αυλού δίνεται από τη σχέση:

$$A'_b = \pi D x = 3,14 * 0,01 * 0,24 = 0,007536 \text{ m}^2$$

Για να υπολογίσουμε τη συνολική επιφάνεια των αυλών που έρχεται σε επαφή με το θερμό νερό θα υπολογίσουμε τη συνολική των αυλών και από αυτή θα αφαιρέσουμε την επιφάνεια των αυλών που καλύπτεται από τα πτερύγια.

Καθαρή συνολική επιφάνεια των αυλών:

$$A_b = A'_b N - \pi D t N' =$$

$$0,007536 * 24 - 3,14 * 0,01 * 0,001 * 56 = 0,179 \text{ m}^2$$

-Η συνολική επιφάνεια του ενός πτερυγίου δίνεται από τη σχέση:

$$A''_f = w * L = 0,2 * 0,065 = 0,013 \text{ m}^2$$

Η επιφάνεια του ενός πτερυγίου χωρίς την επιφάνεια που καλύπτουν οι αυλοί που διέρχονται από αυτή δίνεται από τη σχέση :

$$A'_f = A''_f - N \pi r^2 = 0,013 - [24 * 3,14 * (0,005)^2] = 0,011116 \text{ m}^2$$

Επομένως η καθαρή συνολική επιφάνεια των πτερυγίων που έρχεται σε επαφή με το θερμό ρευστό είναι

Καθαρή συνολική επιφάνεια πτερυγίων

$$A_f = N' A'_f = 56 * 0,011116 = 0,6225 \text{ m}^2$$

4.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΔΟΧΕΙΟ

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η πειραματική διάταξη, με έμφαση στα τέσσερα σημεία Α, Β, Γ, Δ τα οποία αφορούν τις περιοχές που ελήφθησαν οι μετρήσεις της θερμοκρασίας για το θερμό ρευστό του δοχείου.

Πιο αναλυτικά:

- στο σημείο Α πάνω από τον εναλλάκτη καταγράφηκαν οι μετρήσεις $T_{\delta 1}$.
- στο σημείο Β κάτω από τον εναλλάκτη καταγράφηκαν οι μετρήσεις $T_{\delta 2}$.
- στο σημείο Γ κοντά στην επιφάνεια του θερμού νερού και ανάμεσα από τον εναλλάκτη και την βυθιζόμενη αντίσταση καταγράφηκαν οι μετρήσεις $T_{\delta 3}$.
- στο σημείο Δ στο μέσο της επιφάνειας του θερμού νερού και του πάτου του δοχείου, ανάμεσα από τον εναλλάκτη και την βυθιζόμενη αντίσταση καταγράφηκαν οι μετρήσεις $T_{\delta 4}$.



4.4 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Από τη πειραματική διαδικασία καταγράφηκαν κάποιες μετρήσεις και κάποια δεδομένα που συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 5.4 και αφορούνε:

- τη θερμοκρασία εισόδου του εναλλάκτη T_{wi}
- τη θερμοκρασία εξόδου του εναλλάκτη T_{wo}
- τις θερμοκρασίες σε συγκεκριμένα σημεία του δοχείου $T_{\delta 1}$ $T_{\delta 2}$ $T_{\delta 3}$ $T_{\delta 4}$
- την παροχή του ψυχρού υγρού που διέρχεται από τον εναλλάκτη m
- την τάση στα άκρα της βυθιζόμενης αντίστασης V
- τη μέγιστη θεωρητική ισχύ που προσδίδεται απο τη βυθιζόμενη αντίσταση στο θερμο νερό του δοχείου Q_{θ}

$$Q_{\theta} = \frac{V^2}{R}, \quad R=32,3\Omega$$

T_{wi} (°C)	T_{wo} (°C)	$T_{\delta 1}$ (°C)	$T_{\delta 2}$ (°C)	$T_{\delta 3}$ (°C)	$T_{\delta 4}$ (°C)	m (Kg/sec)	V (Volts)	Q_{θ} (Watt)
ΠΡΩΤΗ ΕΝΟΤΗΤΑ								
19,5	21	36,3	21,3	37,2	27,3	0,175	132	539,4
19,5	20,7	36,7	20,3	37,4	27,6	0,175	154	734,2
19,5	20,7	37,6	20	37,7	28,2	0,175	176	959
19,5	20,8	39,3	19,8	39	29,8	0,175	198	1213,7
19,5	21	41,7	21,3	41,2	32,2	0,175	220	1500
ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ								
22,2	23,4	42,3	22,6	43	32,5	0,178	176	959
22,2	23,2	43	23	43,4	33	0,186	198	1213,7
22,2	23,4	43,3	22,9	43,8	34	0,186	220	1500

Πίνακας 4.2

Σημείωση: Παρατηρώντας τις τιμές που προκύπτουν στην έξοδο του ψυχρού ρευστού σε σύγκριση με τη θεωρητική ισχύ που προσδίδεται στο ψυχρό ρευστό προκύπτει ένα ασυμβίβαστο σε σχέση με τη θεωρητική προσέγγιση του ζητήματος που τυχόν να οφείλεται σε σφάλμα κατά τη μέτρηση τους.

4.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ

Η θερμότητα που μεταφέρεται από το θερμό ρευστό του δοχείου προς την επιφάνεια των αυλών του εναλλάκτη είτε μέσω των πτερυγίων είτε απευθείας στους αυλούς δίνεται από τη σχέση :

$$Q = h_o (A_b + n_f A_f) (T_\delta - T_b) \rightarrow \frac{Q}{h_o (A_b + n_f A_f)} = T_\delta - T_b \quad (1)$$

Από την άλλη η θερμότητα που μεταφέρεται από την επιφάνεια των αυλών του εναλλάκτη προς το νερό ψύξης που διέρχεται από τους αυλούς δίνεται από τη σχέση :

$$Q = h_i A_b (T_\delta - T_w) \rightarrow \frac{Q}{h_i A_b} = T_b - T_w \quad (2)$$

Θεωρώντας ότι η θερμότητα που μεταφέρεται από το θερμό ρευστό του δοχείου προς την επιφάνεια των αυλών του εναλλάκτη μεταφέρεται στη συνέχεια εξολοκλήρου προς το νερό ψύξης που διέρχεται από τους αυλούς και προσθέτοντας κατά μέλη τις δύο παραπάνω σχέσεις έχουμε :

$$(1) + (2) \rightarrow Q \left[\frac{1}{h_i A_b} + \frac{1}{h_o (A_b + n_f A_f)} \right] = T_\delta - T_w$$

Υποθέτουμε ότι η θερμική αντίσταση $\frac{1}{h_i A_b}$ είναι πολύ μικρότερη

από τη θερμική αντίσταση $\frac{1}{h_o (A_b + n_f A_f)}$ αφού η μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια των αυλών προς το νερό ψύξης γίνεται μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής άρα θα έχει πολύ υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

$$\frac{1}{h_i A_b} \ll \frac{1}{h_o (A_b + n_f A_f)}$$

Λαμβάνοντας υποψίν την παραδοχή προκύπτει τελικά η σχέση :

$$Q = h_o (A_b + n_f A_f) (T_\delta - T_w)$$

4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ h_o

-Από την προηγούμενη ενότητα ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ προέκυψε η σχέση η οποία συσχετίζει το συντελεστή συναγωγής h_o με τη θερμορροή από το θερμό ρευστό προς το νερό ψύξης Q :

$$Q = h_o (A_b + n_f A_f) (T_\delta - T_w) \quad (\alpha)$$

-Το ποσό της θερμότητας που απάγεται απο το θερμό ρευστό μέσω του εναλλάκτη δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \dot{m} c_{p,w} (T_{wo} - T_{wi}) \quad (\beta)$$

-Από το ισοζύγιο ενέργειας ισχύει ότι $(\alpha)=(\beta)$

- Υποσημείωση:

$$T_\delta = \frac{T_{\delta 1} + T_{\delta 2}}{2}$$

$$T_w = \frac{T_{wo} + T_{wi}}{2}$$

$$c_{p,w} = 4180 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C}$$

-Αρχικά θεωρούμε ότι $n_f = 1$ κάτι το οποίο θα ελέγξουμε στη συνέχεια αν ισχύει αφού προσεγγίσουμε πρώτα το συντελεστή συναγωγής h_o .

-Θέτουμε $A_o = (A_b + A_f)$

-Από τα παραπάνω η σχέση που προκύπτει για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής είναι :

$$h_o = \frac{\dot{m} c_{p,w} (T_{wo} - T_{wi})}{A_o (T_\delta - T_w)}$$

-Ωστόσο λόγω του σφάλματος που προέκυψε στη μέτρηση των θερμοκρασιών εξόδου του ψυχρού ρευστού ο αριθμητή της παραπάνω σχέσης θα αντικατασταθεί από τη θεωρητική ισχύ που προσδίδεται από τη βυθιζόμενη αντίσταση θεωρώντας ότι η θερμότητα αυτή απάγεται εξ'ολοκλήρου από τον εναλλάκτη .Επομένως η σχέση που προκύπτει είναι :

$$h_o = \frac{Q_{\theta}}{A_o (T_{\delta} - T_w)}$$

ΠΡΩΤΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

- Για την πρώτη μέτρηση έχουμε :

$$h_o = \frac{Q_{\theta}}{A_o (T_{\delta} - T_w)} = \frac{539,4}{0,8015 * (28,8 - 20,25)} = 78,712 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

- Για τη δεύτερη μέτρηση έχουμε :

$$h_o = \frac{Q_{\theta}}{A_o (T_{\delta} - T_w)} = \frac{734,2}{0,8015 * (28,5 - 20,1)} = 109,051 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

- Για την τρίτη μέτρηση έχουμε :

$$h_o = \frac{Q_{\theta}}{A_o (T_{\delta} - T_w)} = \frac{959}{0,8015 * (28,8 - 20,1)} = 137,53 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

- Για την τέταρτη μέτρηση έχουμε :

$$h_o = \frac{Q_{\theta}}{A_o (T_{\delta} - T_w)} = \frac{1213,7}{0,8015 * (29,55 - 20,15)} = 161,094 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

- Για την πέμπτη μέτρηση έχουμε :

$$h_o = \frac{Q_{\theta}}{A_o (T_{\delta} - T_w)} = \frac{1500}{0,8015 * (31,5 - 20,25)} = 166,355 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

- Για την έκτη μέτρηση έχουμε :

$$h_o = \frac{Q_6}{A_o (T_s - T_w)} = \frac{959}{0,8015 * (32,45 - 22,8)} = 123,99 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

- Για την έβδομη μέτρηση έχουμε :

$$h_o = \frac{Q_7}{A_o (T_s - T_w)} = \frac{1213,7}{0,8015 * (33 - 22,7)} = 147,018 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

- Για την όγδοη μέτρηση έχουμε :

$$h_o = \frac{Q_8}{A_o (T_s - T_w)} = \frac{1500}{0,8015 * (33,1 - 22,8)} = 181,698 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τους παραπάνω υπολογισμούς θα γίνει προσδιορισμός ενός μέσου συντελεστή συναγωγής υπολογίζοντας το μέσο όρο των παραπάνω τιμών :

$$h_o = \frac{1}{8} (78,712 + 109,051 + 137,53 + 161,094 + 166,355 + 123,99 + 147,018 + 181,698)$$

Επομένως μία μέση τιμή του συντελεστή συναγωγής είναι :

$$h_o = 138,181 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

4.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ n_f

Προηγουμένως για τον υπολογισμό του συντελεστή συναγωγής θεωρήθηκε ότι η τιμή του n_f ισούται με ένα. Εδώ θα γίνει έλεγχος της ορθότητας αυτής της επιλογής με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος και αν χρειασθεί επαναπροσέγγιση της τιμής του.

Για τα ορθογωνικά πτερύγια όπως αυτά του εναλλάκτη ισχύει ότι :

$$n_f = \frac{\tanh(a L)}{a L}$$

όπου

$$a = \sqrt{\frac{h_o A_c}{k_s p}} = \sqrt{\frac{h_o w t}{k_s 2 w}} = \sqrt{\frac{h_o t}{2 k_s}}$$

L: το μήκος του πτερυγίου

w: το πλάτος του πτερυγίου

t : το πάχος του πτερυγίου

k_s : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού των πτερυγίων

Έχουμε από τα δεδομένα :

$$h_o = 138,181 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

$$t = 0,001 m$$

$$k_s = 52 \frac{W}{m \text{ } ^\circ C} \quad (\text{για τον ορείχαλκο του εμπορίου 90 \% Cu, 10 \% Al})$$

$$L = 0,065 m$$

Επομένως

$$a = \sqrt{\frac{h_0 t}{2k_s}} = \sqrt{\frac{123,34 * 0,001}{2 * 52}} = 0,035$$

$$aL = 0,035 * 0,065 = 0,0023$$

$$\begin{aligned} \tanh(0,0023) &= \\ \frac{e^{0,0023} - e^{-0,0023}}{e^{0,0023} + e^{-0,0023}} &= \frac{1,0023 - 0,9977}{1,0023 + 0,9977} = \frac{0,0046}{2} \\ \rightarrow \tan h(0,002275) &= 0,0023 \end{aligned}$$

Άρα

$$n_f = \frac{\tanh(0,0023)}{0,0023} = \frac{0,0023}{0,0023} = 1$$

Αποδुकνύεται ότι ορθώς σε προηγούμενους υπολογισμούς θεωρήσαμε

$n_f = 1$.

4.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΡΙΘΜΟΥ Nu

Ο αδιάστατος αριθμός Nu δίνεται από τη σχέση :

$$Nu = \frac{h_o \delta}{k}$$

όπου δ : χαρακτηριστικό μήκος του γεωμετρικού σχήματος

k : θερμική αγωγιμότητα του ρευστού που χρησιμοποιείται

-Για το κορεσμένο νερό, σε υγρή μορφή, για μία μέση θερμοκρασία $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ προκύπτει

$$k = 0,607 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

-Το χαρακτηριστικό μήκος δ σε αυτή την περίπτωση είναι το μήκος L του πτερυγίου που ισούται με

$$L = 0,065\text{m}$$

Επομένως ο αριθμός Nu προκύπτει :

ΠΡΩΤΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

- Για την πρώτη μέτρηση

$$Nu = \frac{h_o L}{k} = \frac{78,712 * 0,065}{0,607} = 8,429$$

- Για τη δεύτερη μέτρηση

$$Nu = \frac{h_o L}{k} = \frac{109,051 * 0,065}{0,607} = 11,678$$

- Για την τρίτη μέτρηση

$$Nu = \frac{h_o L}{k} = \frac{137,53 * 0,065}{0,607} = 14,727$$

- Για την τέταρτη μέτρηση

$$Nu = \frac{h_o L}{k} = \frac{161,094 * 0,065}{0,607} = 17,25$$

- Για την πέμπτη μέτρηση

$$Nu = \frac{h_o L}{k} = \frac{166,355 * 0,065}{0,607} = 17,813$$

ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

- Για την έκτη μέτρηση

$$Nu = \frac{h_o L}{k} = \frac{123,99 * 0,065}{0,607} = 13,277$$

- Για την έβδομη μέτρηση

$$Nu = \frac{h_o L}{k} = \frac{147,018 * 0,065}{0,607} = 15,743$$

- Για την όγδοη μέτρηση

$$Nu = \frac{h_o L}{k} = \frac{181,698 * 0,065}{0,607} = 19,457$$

4.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ Gr

Ο αδιάστατος αριθμός Gr δίνεται από τη σχέση :

$$Gr = \frac{g\beta (T_s - T_w) \delta^3}{\nu^2}$$

- όπου :
- g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας
 - β είναι ο συντελεστής ογκοδιαστολής
 - T_s είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας
 - T_w είναι η θερμοκρασία του ρευστού που βρίσκεται μακριά από την επιφάνεια
 - δ είναι το χαρακτηριστικό μήκος του γεωμετρικού σχήματος
 - ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού

-Η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι :

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

-Το χαρακτηριστικό μήκος δ είναι το μήκος L του πτερυγίου που ισούται με :

$$\delta = L = 0,065m$$

Επομένως ο αριθμός Gr προκύπτει :

ΠΡΩΤΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

- Για την πρώτη μέτρηση

για μέση θερμοκρασία

$$T_{\text{μέσο}} = \frac{T_{\delta} + T_w}{2} = \frac{28,8 + 20,25}{2} = 24,525 \text{ } ^\circ\text{C}$$

έχουμε

$$\beta = 0,242 * 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$
$$\nu = 0,904 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

οπότε

$$\text{Gr} = \frac{9,81 * 0,242 * 10^{-3} * (28,8 - 20,25) 0,065^3}{(0,904 * 10^{-6})^2}$$
$$= 6,821 * 10^6$$

- Για τη δεύτερη μέτρηση

για μέση θερμοκρασία

$$T_{\text{μέσο}} = \frac{T_{\delta} + T_w}{2} = \frac{28,5 + 20,1}{2} = 24,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

έχουμε

$$\beta = 0,240 * 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$
$$\nu = 0,910 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

οπότε

$$\text{Gr} = \frac{9,81 * 0,240 * 10^{-3} * (28,5 - 20,1) 0,065^3}{(0,910 * 10^{-6})^2}$$
$$= 6,559 * 10^6$$

- Για την τρίτη μέτρηση

για μέση θερμοκρασία

$$T_{\mu\epsilon\sigma\sigma} = \frac{T_{\delta} + T_w}{2} = \frac{28,8 + 20,1}{2} = 24,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

έχουμε

$$\beta = 0,241 * 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\nu = 0,906 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

οπότε

$$\text{Gr} = \frac{9,81 * 0,241 * 10^{-3} * (28,8 - 20,1) 0,065^3}{(0,906 * 10^{-6})^2}$$

$$= 6,881 * 10^6$$

- Για την τέταρτη μέτρηση

για μέση θερμοκρασία

$$T_{\mu\epsilon\sigma\sigma} = \frac{T_{\delta} + T_w}{2} = \frac{29,55 + 20,15}{2} = 24,85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

έχουμε

$$\beta = 0,245 * 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\nu = 0,897 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

οπότε

$$\text{Gr} = \frac{9,81 * 0,245 * 10^{-3} * (29,55 - 20,15) 0,065^3}{(0,897 * 10^{-6})^2}$$

$$= 7,710 * 10^6$$

- Για την πέμπτη μέτρηση

για μέση θερμοκρασία

$$T_{\text{μέσο}} = \frac{T_{\delta} + T_w}{2} = \frac{31,5 + 20,25}{2} = 25,875 \text{ } ^\circ\text{C}$$

έχουμε

$$\beta = 0,265 * 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\nu = 0,859 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

οπότε

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{9,81 * 0,265 * 10^{-3} * (31,5 - 20,25) 0,065^3}{(0,859 * 10^{-6})^2} \\ &= 10,884 * 10^6 \end{aligned}$$

ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

- Για την έκτη μέτρηση

για μέση θερμοκρασία

$$T_{\text{μέσο}} = \frac{T_{\delta} + T_w}{2} = \frac{32,45 + 22,8}{2} = 27,625 \text{ } ^\circ\text{C}$$

έχουμε

$$\beta = 0,272 * 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\nu = 0,844 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

οπότε

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{9,81 * 0,272 * 10^{-3} * (32,45 - 22,8) 0,065^3}{(0,844 * 10^{-6})^2} \\ &= 9,927 * 10^6 \end{aligned}$$

- Για την έβδομη μέτρηση

για μέση θερμοκρασία

$$T_{\text{μέσο}} = \frac{T_{\delta} + T_w}{2} = \frac{33 + 22,7}{2} = 27,85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

έχουμε

$$\beta = 0,274 * 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\nu = 0,84 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

οπότε

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{9,81 * 0,274 * 10^{-3} * (33 - 22,7) 0,065^3}{(0,84 * 10^{-6})^2} \\ &= 10,775 * 10^6 \end{aligned}$$

- Για την όγδοη μέτρηση

για μέση θερμοκρασία

$$T_{\text{μέσο}} = \frac{T_{\delta} + T_w}{2} = \frac{33,1 + 22,8}{2} = 27,95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

έχουμε

$$\beta = 0,275 * 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\nu = 0,838 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

οπότε

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{9,81 * 0,275 * 10^{-3} * (33,1 - 22,8) 0,065^3}{(0,838 * 10^{-6})^2} \\ &= 10,866 * 10^6 \end{aligned}$$

4.10 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΩΝ Nu ΚΑΙ Gr

ΠΡΩΤΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

Για την πρώτη ενότητα τα αποτελέσματα για τους αριθμούς Nu και Gr συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

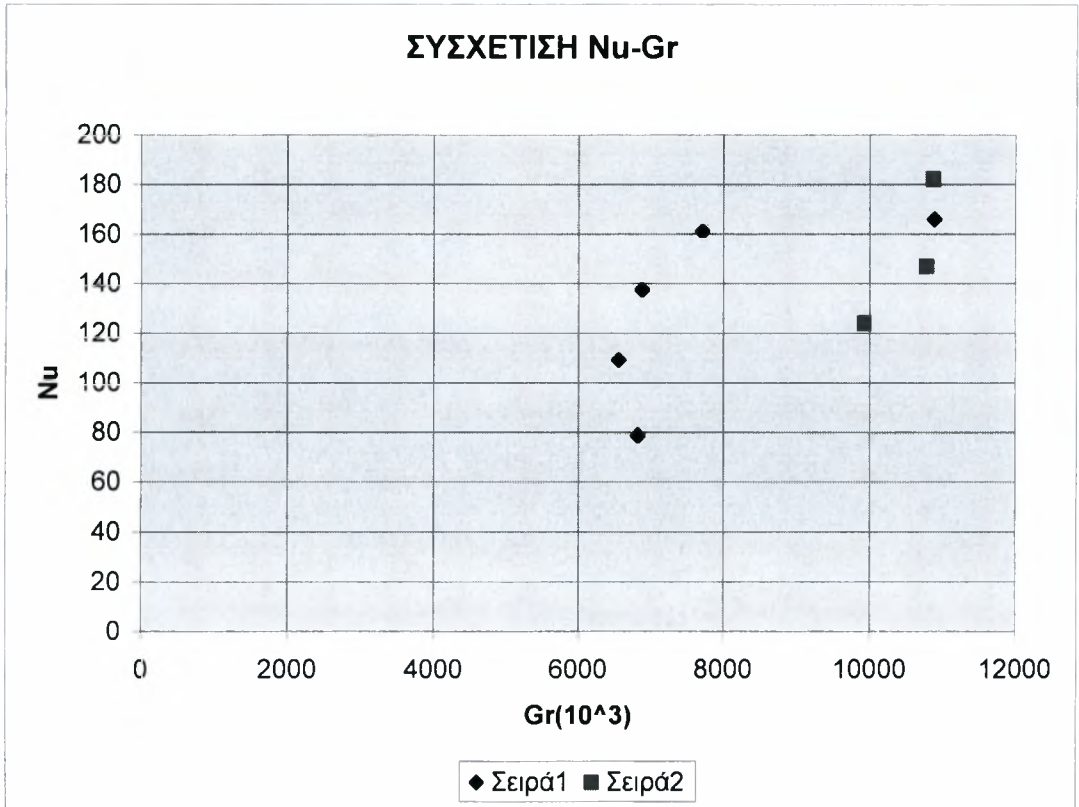
Nu	Gr
78,712	6821*10 ³
109,051	6559*10 ³
137,53	6881*10 ³
161,094	7710*10 ³
166,355	10884*10 ³

ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

Για την δεύτερη ενότητα τα αποτελέσματα για τους αριθμούς Nu και Gr συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Nu	Gr
123,99	9927*10 ³
147,018	10775*10 ³
181,698	10866*10 ³

Παρακάτω δίνεται η γραφική παράσταση που προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα.



4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

4.1 Συμπεράσματα

- Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη για τη μελέτη φυσικής συναγωγής σε εναλλάκτη πτερυγίων. Η θέρμανση του θερμού ρευστού πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια βυθιζόμενης αντίστασης. Τόσο ως θερμό όσο και ως ψυχρό ρευστό χρησιμοποιήθηκε νερό.
- Ελέγχθηκε το ολικό ισοζύγιο ενέργειας με βάση την ηλεκτρική ισχύ που προσφέρεται στο θερμό ρευστό από τη βυθιζόμενη αντίσταση και τη θερμική ισχύ που απάγεται από τον εναλλάκτη μέσω πτερυγίων.
- Με βάση τη θεωρία των θερμικών αντιστάσεων σε σειρά υπολογίστηκε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή δηλαδή ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του θερμού ρευστού και των πτερυγίων και στη συνέχεια μετασχηματίστηκε σε συσχέτιση των αδιάστατων αριθμών Nu και Gr .
- Από τα αποτελέσματα προέκυψε μία αναλογική αύξηση του αριθμού Nu με τον αριθμό Gr με γραφική παράσταση ευθεία γραμμή.

4.2 Προτάσεις

- Για την αντιμετώπιση των απωλειών θερμότητας στο περιβάλλον χρησιμοποιήθηκαν τα τυλίγματα του υαλοβάμβακα στα περιφερειακά εξωτερικά τοιχώματα του δοχείου και επιφάνειες φελιζόλ στην επιφάνεια του θερμού ρευστού. Σε μελλοντική προσπάθεια της πειραματικής διαδικασίας για αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια θα μπορούσε να υπάρξει καλύτερη μόνωση. Καταρχάς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί υαλοβάμβακας για να μονωθεί η κάτω επιφάνεια του δοχείου που δεν ήταν μονωμένη και έτσι να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας από τον πάτο. Από την άλλη θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα τυλίγματα υαλοβάμβακα στα περιφερειακά εξωτερικά τοιχώματα του δοχείου καθώς και μία μεγάλη επιφάνεια, σαν καπάκι, για την επιφάνεια του θερμού ρευστού πέρα από το φελιζόλ.
- Για την αποφυγή σφαλμάτων στις μετρήσεις της θερμοκρασίας εξόδου όπως αυτά που παρατηρήθηκαν στην παρούσα προσπάθεια, θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με μεγαλύτερη προσοχή κατά τη διαδικασία των μετρήσεων και με χρήση οργάνου μέτρησης με μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Η πειραματική έρευνα μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω αν στη θέση του θερμού ρευστού χρησιμοποιηθεί κάποιο άλλο ρευστό όπως η γλυκερίνη. Σε μελλοντική προσπάθεια λοιπόν θα μπορούσε να καταγραφεί μία νέα σειρά τιμών για τη γλυκερίνη με αποτέλεσμα μία νέα προσέγγιση της συσχέτισης των αριθμών Nu και Gr .
- Όταν ο εναλλάκτης έχει πυκνά πτερύγια οι στενοί δίοδοι που σχηματίζονται τείνουν να παρεμποδίσουν ή να κάνουν το ρευστό να 'ασφυκτιά' επομένως για την πειραματική διαδικασία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί εναλλάκτης με μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των πτερυγίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

-Yunus A.Cengel(Επιμέλεια Μετάφρασης Παναγιώτης Τσιακάρης).
“Μεταφορά Θερμότητας,Μία Πρακτική Προσέγγιση.”
Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.

-A.Bar-Cohen and W.M.Rohsenow.
“Thermally Optimum Spacing of Vertical Natural Convection Cooled
Parallel Plates.”
Journal of Heat Transfer 106(1984),pp 116-123

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

M : μάζα υγρού στο δοχείο

T_{δ} : θερμοκρασία υγρού στο δοχείο (μ.ο. των $T_{\delta 1}, T_{\delta 2}$)

$T_{\delta i}, i = 1, 2, 3, 4$: θερμοκρασία ρευστου δοχείου στο σημείο i

T_{wo}, T_{wi} : θερμοκρασία εξόδου – εισόδου νερού ψύξης

T_b : θερμοκρασία επιφάνειας αυλών

T_w : μέση θερμοκρασία νερού ψύξης

\dot{Q}_R : ισχύς αντίστασης

$c_{p,\delta}$: c_p ρευστού στο δοχείο

$c_{p,w}$: c_p νερού ψύξης

\dot{m} : παροχή νερού ψύξης

λ : λόγος τάσεων

N : αριθμός αυλών

N' : αριθμός πτερυγίων

D : διάμετρος αυλού

r : ακτίνα αυλού

Q : θερμορροή από ρευστό προς νερό ψύξης

V : τάση στα άκρα της βυθιζόμενης αντίστασης

Q_{θ} : μέγιστη θεωρητική ισχύς

x : μήκος αυλού

t : πάχος αυλού

L : μήκος πτερυγίου

w : πλάτος πτερυγίου

k_s : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υλικού πτερυγίων

Π.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ-ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟΥ

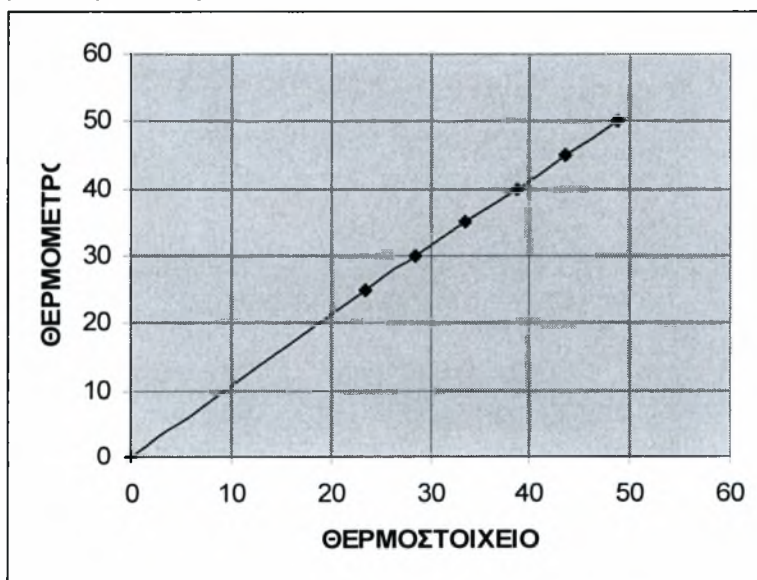
Για τον προσδιορισμό μεγαλύτερης ακρίβειας στις μετρήσεις της θερμοκρασίας ακολουθεί η καμπύλη βαθμονόμησης των ενδείξεων του θερμοστοιχείου σε σχέση με τις ενδείξεις του υδραργυρικού θερμομέτρου.

Από μετρήσεις που έγιναν σε 400 ml νερού πάρθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

θερμοστοιχείο	θερμόμετρο
0	0
23,5	25
28,4	30
33,5	35
38,7	40
43,6	45
48,7	50

Πίνακας Π.1

Οπότε η καμπύλη που προκύπτει είναι:



Παρατηρούμε ότι οι ενδείξεις του θερμοστοιχείου παρουσιάζουν σε όλες τις μετρήσεις απόκλιση προς τα κάτω που κυμαίνεται από 1,3 έως 1,6 βαθμούς °C.

Π.3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ

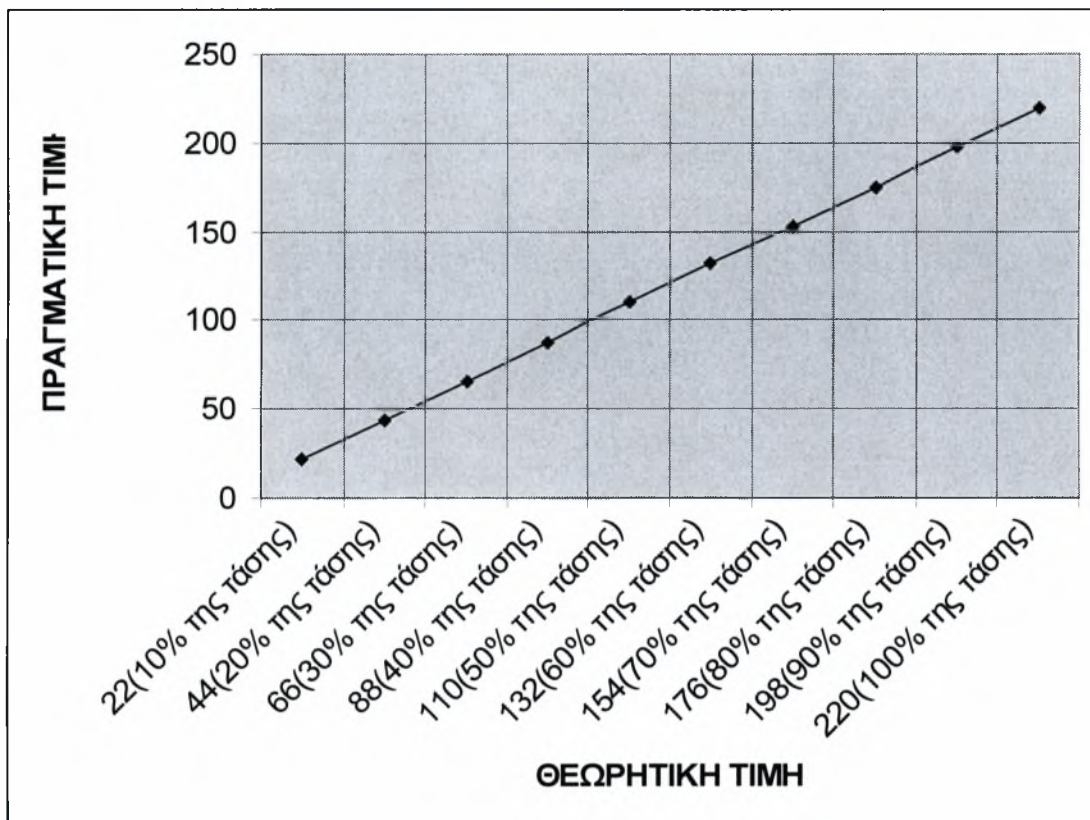
Για μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσέγγιση των αποτελεσμάτων ακολουθεί γραφική παράσταση η οποία συσχετίζει τη θεωρητική τιμή της τάση την οποία προσδίνουμε με ρύθμιση του variac, και την πραγματική τιμή της τάσης η οποία μετρήθηκε με τη χρήση βολτόμετρου για διάφορες τιμές της θεωρητικής τάσης.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ(Volt)	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ(Volt)
22(10% της τάσης)	21,83
44(20% της τάσης)	43,55
66(30% της τάσης)	65,35
88(40% της τάσης)	87,25
110(50% της τάσης)	110,75
132(60% της τάσης)	132,55
154(70% της τάσης)	153
176(80% της τάσης)	174,7
198(90% της τάσης)	197,2
220(100% της τάσης)	219,5

Πίνακας Π.2

Και η γραφική παράσταση που προκύπτει είναι:



Παρατηρούμε ότι οι τιμές της πραγματικής τάσης παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις κυρίως προς τα κάτω σε σχέση με τις τιμές της θεωρητικής τάσης.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091656