



Τ.Ε.Ι. ΑΘΗΝΑΣ / Σ.Τ.Ε.Φ.

ΤΜΗΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ

Οδός Αγ.Σπυρίδωνος, 12210 Αιγάλεω, Αθήνα

Τηλ.: 2105385355, email: ptsiling@teiath.gr

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΗΡΕΜΟΥΝΤΟΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ

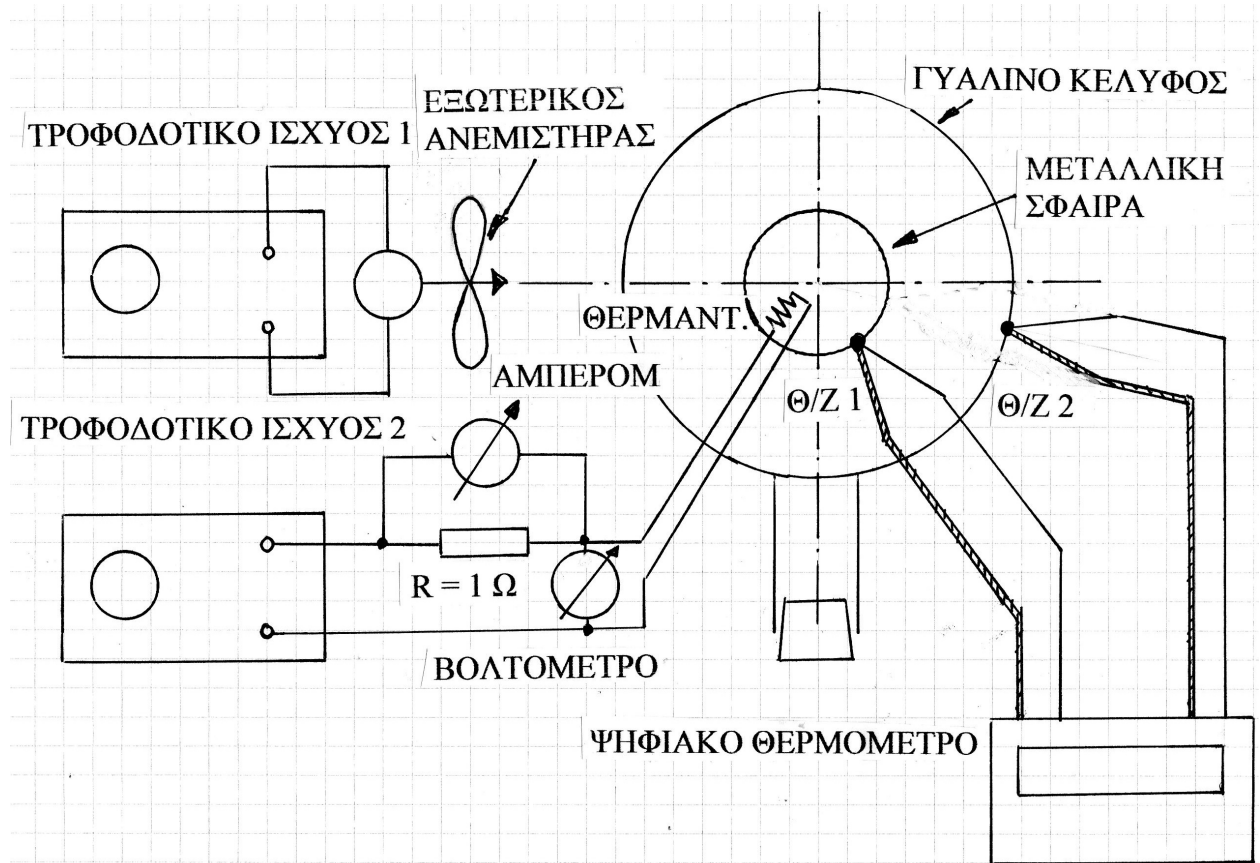
1.Σκοπός της άσκησης, εξοπλισμός και πειραματική διάταξη

Ο σκοπός της εργαστηριακής άσκησης είναι η μελέτη του φαινομένου μετάδοσης θερμότητας με φυσική συναγωγή από την ελεύθερη επιφάνεια θερμαινόμενης συμπαγούς σφαίρας και του θερμικού ισοζυγίου σε περιβάλλον ηρεμούντος ατμοσφαιρικού αέρα. Προκειμένου να εξασφαλισθούν οι συνθήκες φυσικής συναγωγής η μεταλλική σφαίρα τοποθετείται σε γυάλινη φιάλη με λεπτά τοιχώματα που ψύχεται με βεβιασμένη ροή αέρα προκειμένου να διατηρούνται τα τοιχώματα της σε χαμηλή θερμοκρασία σε τρόπο ώστε να επιταχύνεται η περίοδος της ασυμπτωτικής προσέγγισης του συστήματος σε Μ.Κ. Η όλη πειραματική διάταξη που απαρτίζεται από την θερμαινόμενη ορειχάλκινη συμπαγή σφαίρα μέσα στην συγκεντρική σφαιρική κοιλότητα (γυάλινη φιάλη αναλυτικής χημείας σφαιρικού πυθμένα, χωρητικότητας 1 lt) τοποθετείται μέσα στο πεδίο ροής ανεμιστήρα, η θέση του οποίου ρυθμίζεται στην βάση του με την βοήθεια των ανάλογων κοχλιών σύσφιξης σε κατάλληλο ύψος, ώστε το επαγόμενο ρεύμα αέρα να περιρρέει ομοιόμορφα όλη την εξωτερική επιφάνεια της φιάλης.

Η ορειχάλκινη σφαίρα ($k=80 - 120 \text{ W/mK}$), διαμέτρου 35 mm διαθέτει διάτρηση εντός της οποίας τοποθετείται ο θερμαντήρας με μορφή ηλεκτρικής λυχνίας αλογόνου. Ο θερμαντήρας τροφοδοτείται με την βοήθεια ηλεκτρικών αγωγών από εξωτερική ηλεκτρική πηγή. Μέσα σε δεύτερη διάτρηση μικρού βάθους τοποθετείται θερμοζευγος τύπου "Κ" που σταθεροποιείται στην επιφάνεια της σφαίρας με σιλικόνη υψηλής θερμοκρασίας, του οποίου οι αγωγοί διέρχονται διαμέσου της οπής του πώματος της φιάλης για σύνδεση με την πρώτη είσοδο του ψηφιακού θερμομέτρου δύο διαύλων.

Η μεταλλική σφαίρα τοποθετείται συγκεντρικά στο εσωτερικό της σφαιρικής με την βοήθεια χαλύβδινου κοχλία στήριξης που προσδένει το σύστημα σταθερά στην βάση και στο ελαστικό πώμα της διαμέσου παρεμβάσματος φελλού, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Για την μείωση των θερμικών απωλειών αγωγής και την αποφυγή θερμικών γεφυρών παρεμβάλλεται στον κοχλία

ανάρτησης μονωτικός κυλινδρικός άξονας βακελίτου μήκους 60 mm. Η εξωτερική επιφάνεια της θερμαινόμενης μεταλλικής σφαίρας καλύπτεται με λεπτή στρώση μαύρης βαφής, συνολικού ημισφαιρικού συντελεστή εκπομπής $\varepsilon \cong 0.95$ για την ευχερέστερη αποβολή θερμότητας με ακτινοβολία. Στην εξωτερική επιφάνεια της γυάλινης φιάλης προσκολλάται δεύτερο θερμοζεύγος τύπου «Κ» για την μέτρηση της θερμοκρασίας της.



Σχήμα 1. Σκαρίφημα της γυάλινης φιάλης, της μεταλλικής σφαίρας κα της ανάρτησής της

2.Υπολογισμός των απωλειών φυσικής συναγωγής και το θερμικό ισοζύγιο του συστήματος σε Μ.Κ.

Με την προϋπόθεση απουσίας εξωτερικών συνθηκών που επάγουν και συντηρούν την ροή του αέρα στο εσωτερικό της γυάλινης φιάλης (εξωτερικά επαγόμενο ρεύμα ροής ή μηχανικά επαγόμενη κίνηση του αέρα) η μοναδική αιτία “φυσικής” ροής είναι η διαφορά θερμοκρασίας

μεταξύ των επιφανειών της θερμαινόμενης μεταλλικής σφαίρας και της γυάλινης φιάλης T_1 και T_∞ αντιστοίχως. Η διαφορά θερμοκρασίας, $T_1 > T_\infty$, προκαλεί θέρμανση της στοιβάδας του αέρα που ευρίσκεται σε άμεση επαφή με την επιφάνειά της θερμαινόμενης μεταλλικής σφαίρας. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη ελάττωση της πυκνότητας σε σχέση με την πυκνότητα του ψυχρότερου αέρα σε επαφή με την ψυχρή γυάλινη φιάλη γεγονός που δημιουργεί διαφορές πυκνότητας και συνθήκες μόνιμης ροής αέρα γύρω από την θερμαινόμενη σφαιρική επιφάνεια. Η ροή αυτή συντηρείται εφόσον $T_1 \neq T_\infty$, με αποτέλεσμα όταν $T_1 = T_\infty$ η ροή να καταστέλλεται.

Οι απώλειες θερμότητας με φυσική συναγωγή από την εξωτερική επιφάνεια της σφαίρας σε μόνιμη κατάσταση, υπολογίζονται από την σχέση,

$$Q_{cv} = \bar{h} \cdot A_s \cdot (T_s - T_g) \quad (1)$$

όπου \bar{h} ο μέσος συντελεστής φυσικής συναγωγής και A_s η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας της σφαίρας που δίνεται από τη σχέση,

$$A_s = 4\pi \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 = \pi \cdot D_1^2 \quad (2)$$

όπου D_1 η διάμετρος της ορειχάλκινης σφαίρας. Η μέση τιμή του συντελεστή φυσικής συναγωγής δίδεται σύμφωνα με την θεωρία από την γενική σχέση 4.20 των σημειώσεων,

$$\bar{h} = \left(\frac{\bar{k}_a}{L}\right) Nu \quad (3)$$

όπου \bar{k}_a ο μέσος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα, Nu ο αριθμός Nusselt και L χαρακτηριστικό γραμμικό μέγεθος. Δεχόμενοι ότι, $r_1 \ll r_2$, (κάτι που ισχύει με επαρκή ακρίβεια δεδομένου ότι $r_1 = 17.5$ mm και $r_2 = 62.5$ mm), είναι δυνατόν να υποθέσουμε ότι η παρουσία της περιβάλλουσας σφαιρικής κοιλότητας δεν διαταράσσει σημαντικά την ελεύθερη ανάπτυξη του οριακού στρώματος και του πεδίου ροής γύρω από την σφαίρα, με αποτέλεσμα ο μέσος αριθμός Nu να υπολογίζεται συναρτήσει του αριθμού Rayleigh από την ακόλουθη συσχέτιση της βιβλιογραφίας (σχέση 4.53, σελίδα 162 των Σημειώσεων Μετάδοσης Θερμότητας),

$$\overline{Nu} = 2 + \frac{0.589 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.469}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (4)$$

που ισχύει για αδιάστατους αριθμούς Ra και Pr,

$$Pr \geq 0.7 \text{ και } Ra \leq 10^{11} \quad (5)$$

Ο αδιάστατος αριθμός Ra δίδεται σύμφωνα με την θεωρία από την σχέση 4.11, σελίδα 127,

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (6)$$

όπου,

g η επιτάχυνση της βαρύτητας $g=9.81 \text{ m/s}^2$

β συντελεστής διαστολής ογκου (παραγρ.4.4.1),

$$\beta = 1/\bar{T} \quad (\text{K}^{-1})$$

όπου σαν μέση **απόλυτη** (Kelvin) θερμοκρασία λαμβάνουμε την,

$$\bar{T} = \frac{T_s + T_g}{2} \quad (7)$$

που είναι η μέση απόλυτη θερμοκρασία του αέρα που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία της επιφάνειας της μεταλλικής σφαίρας και γυάλινης φιάλης.

$\Delta T = T_s - T_g$: Διαφορά των δύο μετρούμενων θερμοκρασιών

$\bar{\nu}$: Μέσο κινηματικό ιξώδες του αέρα στην μέση θερμοκρασία (m^2/s)

$\bar{\alpha}$: Μέση θερμική διαχυτότητα του αέρα (thermal diffusivity)

στην μέση θερμοκρασία (m^2/s)

L παριστά το χαρακτηριστικό γραμμικό μέγεθος που σύμφωνα με την θεωρία δίδεται από την σχέση,

$$L = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D_1$$

α : Thermal diffusivity

$$\alpha = k / (\rho \cdot C_p)$$

k = θερμική αγωγιμότητα αεραγωγού

ρ = πυκνότητα

C_p = ειδική θερμοχωρητικότητα

Οι μέσες τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων $\bar{\nu}$, $\bar{\alpha}$ και \bar{Pr} υπολογίζονται από τον πίνακα του προσαρτήματος των σημειώσεων σαν το ημίθροισμα των αντιστοίχων τιμών για τις μετρούμενες θερμοκρασίες της θερμαινόμενης σφαίρας T_s και κελύφους T_g ,

$$\bar{\nu} = \frac{\bar{\nu}(T_s) + \bar{\nu}(T_g)}{2} \quad (8)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\alpha}(T_s) + \bar{\alpha}(T_g)}{2} \quad (9)$$

$$\bar{Pr} = \frac{\bar{Pr}(T_s) + \bar{Pr}(T_g)}{2} \quad (10)$$

Επίσης η θερμαινόμενη σφαίρα συναλλάσσει θερμότητα με τα εσωτερικά τοιχώματα της σφαιρικής φιάλης με ακτινοβολία. Το μέτρο των θερμικών απωλειών με ακτινοβολία είναι ανάλογο της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των συγκεντρικών σφαιρικών επιφανειών. Η θερμαινόμενη σφαίρα περιβάλλεται εξολοκλήρου από την μεγάλων διαστάσεων εσωτερική κοιλότητα του κελύφους της φιάλης με $r_1 \ll r_2$. Σύμφωνα με την θεωρία για συναλλαγή θερμότητας μεταξύ τεφρών επιφανειών ισχύει

$$Q_R = \epsilon_s \cdot A_s \cdot \sigma \cdot [(t_s + 273)^4 - (t_g + 273)^4] \quad (12)$$

όπου $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ η σταθερά Stefan-Boltzmann (σελ.181 των σημειώσεων).

Οι απώλειες αγωγής από την μεταλλική θερμαινόμενη σφαίρα οφείλονται στην ύπαρξη του κοχλία στήριξης, των αγωγών θερμοζευγών και κυρίως των χάλκινων αγωγών τροφοδοσίας του θερμαντήρα. Εξαιτίας του μεγάλου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των υλικών, οι θερμικές απώλειες είναι σημαντικές και είναι δυνατόν να υπολογισθούν με καλή προσέγγιση από την σχέση,

$$Q_{cd} = (\overline{AU}) \cdot (T_s - T_g) \quad (13)$$

Όπου (\overline{AU}) ο μέσο ισοδύναμο γινόμενο συνολικού συντελεστή μεταβιβάσεως θερμότητας και επιφάνειας που για την δεδομένη διάταξη λαμβάνεται $(\overline{AU}) = 0.07 \text{ W/K}$.

Το θερμικό ισοζύγιο για την θερμαινόμενη σφαίρα σε μόνιμη κατάσταση επιβάλλει την ικανοποίηση της σχέσεως

$$P_e = Q_L = Q_{cv} + Q_R + Q_{cd} \quad (14)$$

με το μέγεθος Q_L που αντιπροσωπεύει τις συνολικές θερμικές απώλειες που θα πρέπει να ισούται με την θερμότητα Joule P_e που αναπτύσσεται στον ηλεκτρικό θερμαντήρα και που υπολογίζεται από την σχέση,

$$P_e = I_o \cdot V_o \quad (15)$$

όπου V_o και I_o η τάση και το ρεύμα τροφοδοσίας του θερμαντήρα αντιστοίχως.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

1. Συνδέεται ο ανεμιστήρας με το τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος μεταβλητής τάσης, τίθεται σε λειτουργία ο ανεμιστήρας σε μέγιστη παροχή (τάση περίπου 24 V), και ρυθμίζεται η θέση του ώστε η σφαιρική φιάλη να ευρίσκεται εξολοκλήρου στο πεδίο ροής του ρεύματος αέρα.
2. Συνδέονται οι εξωτερικοί ακροδέκτες του θερμαντήρα της μεταλλικής σφαίρας (μικρή λυχνία πυρακτώσεως COMPACT QUARZ, 12V, 20W) εν σειρά με την αντίσταση προστασίας ακρίβειας (shunt) 1 Ω και με το τροφοδοτικό ισχύος VARIAC του οποίου η τάση ρυθμίζεται σε μία τιμή **οπωσδήποτε μικρότερη των 12 V** εξαιτίας του, σε αντίθετη περίπτωση, σοβαρού κινδύνου καταστροφής του θερμαντήρα. Μετράται με την βοήθεια των διατιθέμενων οργάνων μετρήσεως η τάση τροφοδοσίας και το ρεύμα του θερμαντήρα και υπολογίζεται η θερμική ισχύς Joule που αναπτύσσεται από την σχέση (17).
3. Καταχωρούνται στον πίνακα οι θερμοκρασίες της μεταλλικής σφαίρας και της περιβάλλουσας σφαιρικής φιάλης συναρτήσει του χρόνου (σε διαστήματα 5-10 min) και αφήνεται το σύστημα να προσεγγίσει την θερμική ισορροπία.
4. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία 3 και αφήνεται το σύστημα να προσεγγίσει την θερμική ισορροπία για διαφορετικές στάθμες ισχύος εισόδου και καταχωρούνται οι αντίστοιχες θερμοκρασίες συναρτήσει του χρόνου. (Συνιστώνται στάθμες ισχύος που αντιστοιχούν σε τάσεις περίπου 4, 7.5 και 10 V). Τα μετρητικά αποτελέσματα του προηγούμενου πίνακα παριστάνονται γραφικά σε διάγραμμα (χιλιοστομετρικό χαρτί) στο οποίο φαίνεται η θερμοκρασία της μεταλλικής σφαίρας και της σφαιρικής κοιλότητας συναρτήσει του χρόνου. Από την γραφική παράσταση φαίνεται η σταδιακή προσέγγιση του συστήματος σε διαδοχικές καταστάσεις θερμικής ισορροπίας.
5. Για την κάθε κατάσταση θερμικής ισορροπίας και με βάση τις θερμοκρασίες T_s και T_∞ που καταχωρήθηκαν υπολογίζονται οι μέσες τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων ν , α και Pr από τις σχέσεις (8-10) με την βοήθεια των πινάκων θερμοφυσικών ιδιοτήτων της σελίδας 227 των σημειώσεων του μαθήματος.
6. Υπολογίζεται το χαρακτηριστικό γραμμικό μέγεθος από την σχέση (7), ο συντελεστής διαστολής όγκου β και ο αδιάστατος αριθμός Ra από την σχέση (6).

