ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Α. ΓΕΝΙΚΑ

Α.1. Στη θερμοδυναμική ανάλυση των προβλημάτων, αντιμετωπίζονται καταστάσεις όπου υφίσταται μετάδοση θερμότητας.
Η μετάδοση θερμότητας από ένα σώμα (σύστημα) σε ένα άλλο, είναι, εκτός της θερμοδυναμικής, αντικείμενο και των επιστημών περιβάλλοντος.

Ικανή και αναγκαία συνθήκη για τη μετάδοση ενέργειας υπό μορφή θερμότητας μεταξύ δυο σωμάτων (συστημάτων) είναι *η διαφορά θερμοκρασίας*.

Στη μετάδοση θερμότητας διαπιστώνεται αυτόματη και χωρίς καταβολή έργου μεταφορά θερμότητας μόνο από θερμό σε λιγότερο θερμό (ψυχρότερο) σώμα (σύστημα).
Το ίδιο μπορεί να συμβεί και στο ίδιο το σώμα (σύστημα) όταν ένα τμήμα αυτού είναι περισσότερο θερμό από το υπόλοιπο, οπότε τα θερμότερα μόρια μεταδίδουν τη θερμότητα στα αμέσως γειτονικά, έως ότου όλα τα μέρη του σώματος (συστήματος) αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία.
Δεν εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα, απλώς η μετάδοση αυτή πιστοποιείται από την αλλαγή της θερμοδυναμικής κατάστασης του σώματος (συστήματος).

Θεμελιώδης διαφορά μεταξύ της μετάδοσης θερμότητας και της μετατροπής θερμότητας σε έργο, είναι ότι στη μετάδοση θερμότητας υπεισέρχεται ως **κύριος παράγων και ο χρόνος**, ανάλογος προς τον οποίον είναι πάντοτε η συναλλασσόμενη ποσότητα θερμότητας μεταξύ δυο σημείων διαφορετικής θερμοκρασίας.
Για παράδειγμα, στο λέβητα υπάρχει μετάδοση θερμότητας αυτό όμως γίνεται αντιληπτό από τη μεταβολή του νερού σε ατμό. Το γεγονός ότι δεν είναι γνωστός ο τρόπος με τον οποίον μεταδόθηκε η θερμότητα, αποτελεί μια διαφορά μεταξύ θερμοδυναμικής και μετάδοσης της θερμότητας.
Παραλλήλως, δεν είναι γνωστός ο χρόνος κατά τη διάρκεια του οποίου πραγματοποιήθηκε η μετάδοση της θερμότητας : σε πόσο χρόνο το νερό θα μετατραπεί σε ατμό στο λέβητα, δεν μπορεί να το προσδιορίσει η θερμοδυναμική. Η θερμοδυναμική μπορεί να προσδιορίσει το ποσό της θερμότητας που απαιτείται ώστε ένα θερμοδυναμικό σύστημα σε ισορροπία (στο παράδειγμα το νερό) να αλλάξει θερμοδυναμική κατάσταση (στο παράδειγμα, ατμός) η οποία όμως θα είναι κατάσταση ισορροπίας.
Το πόσο γρήγορα θα γίνει αυτή η αλλαγή κατάστασης, μπορεί να υπολογισθεί με τη Θεωρία Μετάδοσης της Θερμότητας.

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί, ότι η αντιμετώπιση και λύση κάθε προβλήματος που αφορά στις θερμικές μηχανές και θερμικές εγκαταστάσεις, αντιμετωπίζονται με τη Θερμοδυναμική *μ α ζ ί* με τη θεωρία της Μετάδοσης της Θερμότητας.

Α.2. Υπενθυμίζεται, ότι η θερμότητα παριστάνεται από μοριακή κινητική ενέργεια (εκτός από τη μετάδοση δι' ακτινοβολίας) οπότε στο σώμα που τη λαμβάνει (αυξανομένης της εσωτερικής ενέργειας) θα υπάρξει μια αύξηση της μοριακής κινητικής ενέργειας και μια αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας.

επιτυγχάνεται όταν το ποσό θερμότητας που απορροφάται, εξισώνεται κάθε στιγμή με το ποσό θερμότητας που εκπέμπεται από το σώμα και μεταδίδεται στο περιβάλλον, ή μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας (π.χ. έργο).
Το ζήτημα της μετάδοσης της θερμότητας είναι θεμελιώδους σημασίας.

Μπορεί να γίνει αναφορά στο πλήθος των εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούνται σε όλες σχεδόν τις θερμικές εγκαταστάσεις και ιδιαίτερα στις εγκαταστάσεις παραγωγής έργου με ατμό και στις μηχανές εσωτερικής καύσεως.

Υπενθυμίζονται εδώ, οι ακόλουθοι εναλλάκτες θερμότητας :

- στους λέβητες, η θερμότητα μεταδίδεται, μέσα από μια επιφάνεια θέρμανσης, από τα θερμά αέρια στο νερό
- στους υπερθερμαντήρες ατμού, η θερμότητα μεταδίδεται μέσα από μια επιφάνεια υπερθέρμανσης, από τα καπναέρια στον ατμό
- στους προθερμαντήρες, η θερμότητα μεταδίδεται μέσα από μια επιφάνεια θέρμανσης, από τα καπναέρια ή από τον ατμό
- στους οικονομητήρες, η θερμότητα μεταδίδεται από τα καπναέρια στο νερό τροφοδοσίας
- στους θερμαντήρες τροφοδοσίας, από τον ατμό στο νερό τροφοδοσίας
- στους συμπυκνωτές, μέσα από μια επιφάνεια ψύξης, μεταδίδεται από τον ατμό στο νερό κυκλοφορίας
- στους θερμαντήρες καυσίμου, μεταδίδεται από τον ατμό στο καύσιμο
- στα ψυγεία του ελαίου λίπανσης, μεταδίδεται από το λάδι στο νερό θάλασσας.

Επισημαίνεται ακόμη, ότι σε όλα τα εξαρτήματα που λειτουργούν σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από εκείνη του περιβάλλοντος (λέβητες, σωληνώσεις, κινητήρες, συμπυκνωτές κ.λ.π.) η θερμότητα μεταδίδεται από το εσωτερικό προς το εξωτερικό μέσα από το περίβλημα εκτός από την μετάδοση σε ψυκτικό υγρό.

Οι συνθήκες μετάδοσης της θερμότητας μπορούν να παρουσιασθούν σημαντικά διαφορετικές και επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες :

- φύση και σχήμα των υλικών (καλοί και κακοί αγωγοί θερμότητας, πυρίμαχα υλικά),
- ποιότητα των ρευστών (υγροί ατμοί, αέρια, μίγματα),
- ρευστά σε ακινησία ή σε κίνηση,
- στρωτή ή τυρβώδης κίνηση,
- φορά της κίνησης,
- απλή ή διπλή κυκλοφορία, ταχύτητα των ρευστών κ.λ.π.

Β. ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μετάδοση της θερμότητας, είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σωμάτων (συστημάτων) ή μεταξύ τμημάτων ενός ίδιου σώματος (συστήματος).

Η μετάδοση της θερμότητας επιτυγχάνεται πάντοτε από τις υψηλότερες θερμοκρασίες στις χαμηλότερες, μπορεί δε να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους :

1. μετάδοση δια αγωγής (ή αγωγιμότητας)
2. μετάδοση δια μεταφοράς (ή συναγωγής)
3. μετάδοση δι' ακτινοβολίας

B.1. ***ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΙ' ΑΓΩΓΗΣ***

Είναι η μεταφορά θερμότητας από μια ζώνη σε μια άλλη ενός ίδιου σώματος (συστήματος) ή μεταξύ δύο σωμάτων σε απόλυτη επαφή.
Αυτή η μεταφορά οφείλεται σε μοριακές κινήσεις χωρίς να πραγματοποιούνται μακροσκοπικές κινήσεις της ύλης από την οποία αποτελείται το σώμα ή τα σώματα που εξετάζονται.
Το φαινόμενο της μετάδοσης της θερμότητας δι' αγωγής, μπορεί να πραγματοποιηθεί σε όλα τα φυσικά σώματα, είτε αυτά είναι στερεά, είτε είναι υγρά, είτε είναι σε αέρια μορφή. Αποκτά όμως μεγάλη σημασία στα στερεά σώματα, ιδιαίτερα στα μέταλλα τα οποία είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας. Αντίθετα, τα υγρά και τα αέρια είναι κακοί αγωγοί (εξαίρεση ο υδράργυρος όπου παρατηρείται μεταλλική αγωγιμότης).
Έστω ότι το ένα άκρο μιας μεταλλικής ράβδου είναι σε επαφή με μια θερμική πηγή, για παράδειγμα ένα δοχείο όπου συμπυκνώνεται κεκορεσμένος ατμός και το άλλο άκρο έρχεται σε επαφή με μια ψυχρή πηγή, για παράδειγμα ένα δοχείο γεμάτο πάγο. Τα δύο δοχεία που αποτελούν τις πηγές είναι κατάλληλα προστατευμένα από το περιβάλλον.
Μετά από ένα χρονικό διάστημα παρατηρείται ότι ο πάγος αρχίζει να λειώνει : επειδή ο πάγος είναι κατάλληλα μονωμένος και δεν επηρεάζεται από το περιβάλλον, έχει δεχθεί θερμότητα από τη ράβδο.
Κατά μήκος λοιπόν της ράβδου, έλαβε χώρα το φαινόμενο της μετάδοσης θερμότητας δι' αγωγής.
Εάν υπάρχουν τρεις πλάκες σε επαφή και θερμανθεί η μια εξωτερική πλευρά, παρατηρείται ότι μετά από χρόνο Δt θερμαίνεται και η άλλη εξωτερική πλευρά.

B.2. ***ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ***

Είναι η μεταφορά της θερμότητας από μια ζώνη σε μια άλλη ενός σώματος εξ αιτίας μακροσκοπικών κινήσεων της ύλης.
Αυτές οι κινήσεις οφείλονται σε διαφορετικές πυκνότητες μεταξύ των διαφορετικών ζωνών του σώματος (συστήματος) λόγω διαφορών θερμοκρασίας.

Είναι ένα φαινόμενο που συναντάται αποκλειστικά σε υγρά και αέρια.

Ας υποτεθεί ότι ανακρεμάται πάνω από μια πλάκα που περιέχει μια θερμαινόμενη αντίσταση, μια μικρή έλικα κατασκευασμένη από λεπτό μεταλλικό φύλλο. Κλείνοντας το ηλεκτρικό κύκλωμα, η πλάκα θερμαίνεται και παρατηρείται περιστροφή της έλικας : αυτό αποδεικνύει την ύπαρξη ενός ρεύματος αέρα με ανερχόμενη διεύθυνση.
Πραγματικά ο αέρας, που έρχεται σε επαφή με την πλάκα, θερμαίνεται, οπότε μειώνεται η πυκνότητά του.
Αυτή η μάζα του αέρα με μικρότερη πυκνότητα ανεβαίνει, ενώ ο γύρω αέρας πιο ψυχρός και συνεπώς πιο βαρύς, καταλαμβάνει τη θέση του. Ανεβαίνοντας ο ζεστός αέρας ψύχεται και κατεβαίνει. Δημιουργείται λοιπόν μια μεταφορά θερμότητας από μια ζώνη (= επιφάνεια της πλάκας και στρώμα αέρα σε στενή επαφή) σε μια άλλη (= η υπεράνω μάζα του αέρα) διαμέσου της μακροσκοπικής κίνησης της ύλης.

Τα ρεύματα στη μάζα των ρευστών, υγρών και αερίων, και η κίνησή τους, δημιουργούνται διότι η πυκνότητα των ρευστών ελαττώνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, 'όπως άλλωστε φαίνεται και από την παρακάτω σχέση :

$$\rho = \frac{\rho_0}{1+\gamma \times \Delta\theta}$$

Εάν η μετατόπιση των ρευστών μαζών γίνεται μόνο λόγω διαφορετικών πυκνοτήτων, τότε η μετάδοση δια συναγωγής είναι ***ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ή ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ*** (όπως γίνεται πάνω από τα θερμαντικά σώματα των κατοικιών).
Εάν η μετατόπιση του θερμού ρευστού προκαλείται κατά τεχνητό τρόπο (αντλία, ανεμιστήρα) ώστε να δημιουργούνται κανονικά ρεύματα, τότε η μετάδοση δια συναγωγής, είναι ***ΒΕΒΙΑΣΜΕΝΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ*** (εξαναγκασμένης μεταφοράς, οφείλεται δηλαδή σε διαφορά πιέσεως, όπως στις κεντρικές θερμάνσεις με χρήση κυκλοφορητή).

Β.3. ***ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΔΙ' ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ***

Μεταξύ δύο σωμάτων (συστημάτων) πραγματοποιείται πάντα εναλλαγή ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών, χωρίς παρουσία ενδιάμεσης ύλης, με αποτέλεσμα τη μεταφορά θερμότητας από το σώμα (σύστημα) με υψηλότερη θερμοκρασία, στο σώμα (σύστημα) με χαμηλότερη θερμοκρασία.
Η μετάδοση θερμότητας δι' ακτινοβολίας, πραγματοποιείται σύμφωνα με τους νόμους μετάδοσης του φωτός (με ηλεκτρομαγνητικά κύματα).
Έτσι τα κύματα ακτινοβολίας μεταδίδεται ευθύγραμμα με διαφορετικό μήκος απ' ότι οι ακτίνες φωτός και προς όλες τις κατευθύνσεις.
Η ποσότητα της ενέργειας και επομένως η σπουδαιότητα της θερμικής εναλλαγής, εξαρτάται :

- από τη φύση των σωμάτων
- από τη μεταξύ τους θέση
- από τη θερμοκρασία της επιφάνειάς τους
- από την απορροφητικότητα του μεταξύ του μέσου.

Το περισσότερο διαπερατό μέσον είναι το κενό. Τα αέρια είναι αρκετά διαπερατά, ενώ τα υγρά (για στρώματα πάχους που συναντώνται στην πράξη) και τα στερεά είναι αδιαπέραστα.
Η μετάδοση θερμότητας δι' ακτινοβολίας είναι αμελητέα όταν τα σώματα που ακτινοβολούν έχουν θερμοκρασία περιβάλλοντος.
Παράδειγμα μετάδοσης θερμότητας δι' ακτινοβολίας μεταξύ δύο σωμάτων με διαφορετικές θερμοκρασίες αποτελεί ο ήλιος και η γήινη σφαίρα :
η θερμότητα του ήλιου φθάνει στην επιφάνεια της γης με ακτινοβολία μέσω του κενού και μόνο κοντά στο φλοιό της γης μέσω στρωμάτων αερίων και ατμών διαφορετικής απορροφητικής ικανότητας.
Από τις ακτίνες που προσπίπτουν σε ένα σώμα (σύστημα), άλλες απορροφώνται, άλλες αντανακλώνται.
Στην πρώτη περίπτωση το σώμα ονομάζεται ***ΜΕΛΑΝ***, ενώ στη δεύτερη ***ΛΕΥΚΟ***.

Γ. Η μετάδοση θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί ταυτόχρονα και με τους τρεις προαναφερόμενους τρόπους.

Για παράδειγμα, από ένα θερμό τοίχωμα σε ένα κρύο (= λιγότερο θερμό) ρευστό σε επαφή με το τοίχωμα, η θερμότητα μεταδίδεται με απ' ευθείας επαφή (= αγωγή), με μεταφορά που οφείλεται στις κινήσεις των υγρών μορίων που θερμαίνονται στο τοίχωμα και απομακρύνουν τη θερμότητα που απορρόφησαν, και τέλος με ακτινοβολία του τοιχώματος.

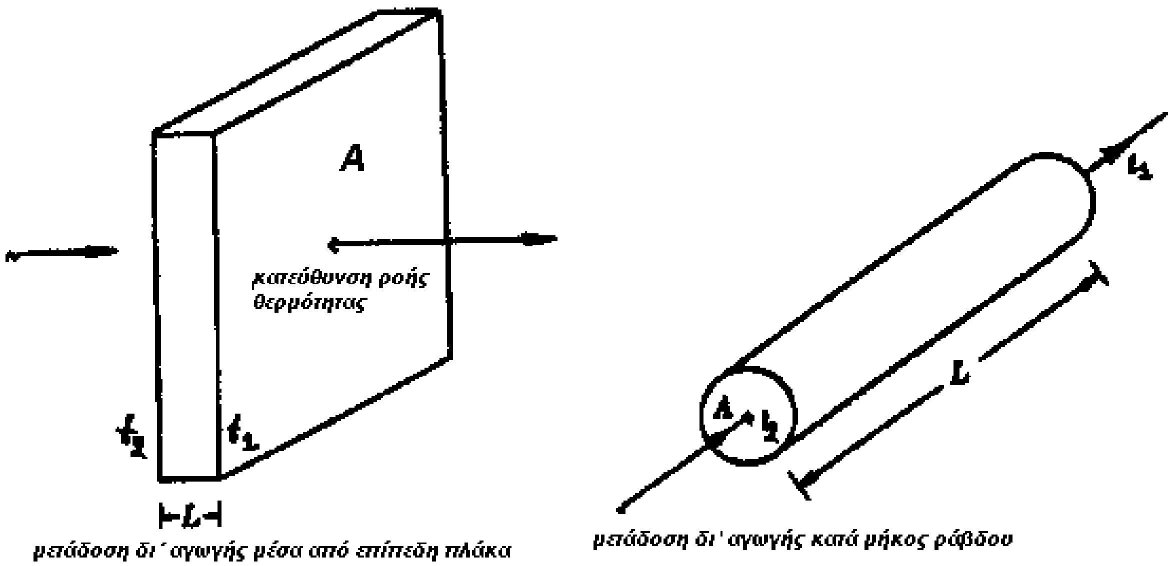
ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΙ' ΑΓΩΓΗΣ (νόμος FOURIER)

Εάν στο άκρο μιας μεταλλικής ράβδου τεθεί μια φλόγα τότε το άλλο άκρο βαθμιαία ζεσταίνεται παρ' ότι δεν είναι σε άμεση επαφή με τη φλόγα.
Τα άτομα του θερμού άκρου αυξάνουν τις ταλαντώσεις τους με την αύξηση της θερμοκρασίας και στις κρούσεις τους με τα κοντινά άτομα που κινούνται πιο αργά δίδουν σε αυτά μέρος της κινητικής τους ενέργειας, και στη συνέχεια στα άτομα που είναι περισσότερο μακριά από τη φλόγα. Με τον τρόπο αυτό διαπιστώνεται μετάδοση ενέργειας που οφείλεται στη θερμική διέγερση από ένα άτομο στο επόμενο, παρ΄ότι κάθε άτομο παραμένει στην αρχική του θέση.

Είναι γνωστό ότι τα μέταλλα είναι καλοί αγωγοί και του ηλεκτρισμού και της θερμότητας. Η ικανότητα ενός μετάλλου να μεταδίδει ηλεκτρικό ρεύμα οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτό υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία συμβάλλουν και στη διαδικασία μετάδοσης της θερμικής ενέργειας από τα θερμά μέρη στα λιγότερο θερμά του μετάλλου.

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή λαμβάνει χώρα σε ένα σώμα όταν τα διάφορα μέρη του ευρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες και η κατεύθυνση της ροής είναι από σημεία με υψηλότερη θερμοκρασία σε εκείνα με χαμηλότερη.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια επίπεδη πλάκα με επιφάνεια A και πάχος L, μεγέθη που έχουν την ίδια σημασία και για τη ράβδο του σχήματος.



ΣΧΗΜΑ 87

Όλη η αριστερή πλευρά της πλάκας διατηρείται σε μια θερμοκρασία t_2 και όλη η δεξιά επιφάνεια του ελάσματος σε μια θερμοκρασία t_1 μικρότερη της t_2 (όπως και στην περίπτωση της ράβδου).

Η θερμότητα διαπερνά την πλάκα από αριστερά προς τα δεξιά.

Μετά από ένα χρονικό διάστημα που έχουν διατηρηθεί οι δύο προαναφερόμενες θερμοκρασίες στην αριστερή και δεξιά επιφάνεια της πλάκας, διαπιστώνεται ότι η θερμοκρασία στα εσωτερικά σημεία ελαττώνεται με την απόσταση, από την περισσότερο θερμή επιφάνεια προς τη λιγότερο θερμή. Σε κάθε σημείο η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στο χρόνο.
Το ποσό θερμότητας Q που διαπερνά την πλάκα στη μονάδα του χρόνου, είναι ευθέως ανάλογο με την επιφάνεια Α, τη διαφορά θερμοκρασίας (t_2 - t_1) και αντιστρόφως ανάλογο με το πάχος L, δηλαδή :

$$Q \propto -\frac{A \cdot (t_2 - t_1)}{L}$$

Αυτή η σχέση γίνεται εξίσωση όταν πολλαπλασιαστεί με μια σταθερά Κ η τιμή της οποίας εξαρτάται από το υλικό της επίπεδης πλάκας, δηλαδή :

$$\boxed{Q = -K \cdot \frac{A \cdot (t_2 - t_1)}{L}}$$ **(1) ,** όπου :

Q = το ποσό θερμότητας στη μονάδα του χρόνου $(\frac{kcal}{h})$

A = θερμαινόμενη επιφάνεια (m^2)

L = πάχος της επιφάνειας (m)

Το αρνητικό πρόσημο στην προηγούμενη σχέση, υπάρχει διότι το ποσό θερμότητας είναι μια θετική ποσότητα, δεδομένου όμως ότι η ροή θερμικής ενέργειας γίνεται από το θερμό στο λιγότερο θερμό, η θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος της ροής μειώνεται δηλαδή είναι αρνητική. Επομένως με το αρνητικό πρόσημο διορθώνεται η αρνητική τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας ώστε το τελικό ποσό θερμότητας είναι πάντα θετική ποσότητα.

Με αναφορά στα σχήματα της προηγούμενης σελίδας, και συγκεκριμένα στην περίπτωση της ράβδου, το ποσό θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\boxed{Q = 2 \cdot \pi \cdot H \cdot K \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{R}{r}}}$$ **(2)**

Η σταθερά ***Κ*** ονομάζεται ***συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας*** του υλικού και εκφράζει το ποσό της θερμότητας που μεταδίδεται δια αγωγής ανά μονάδα επιφάνειας του υλικού, ανά μονάδα χρόνου, ανά μονάδα πάχους και για διαφορά θερμοκρασίας ενός βαθμού.

Ο συντελεστής Κ μεταβάλλεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Στους τεχνικούς υπολογισμούς το να λαμβάνεται υπ΄ όψιν αυτή η μεταβολή, οδηγεί σε μαθηματικές εξισώσεις που επιλύονται δύσκολα. Είναι προτιμότερο να θεωρείται σταθερός ο Κ και ίσος με τη μέση αριθμητική τιμή υπολογισμένη με βάση τις τιμές του στα άκρα του διαστήματος των θερμοκρασιών που εξετάζεται το φαινόμενο.

Για τα αέρια και τους ατμούς δίδονται εμπειρικές σχέσεις με τις οποίες μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής Κ στην επιθυμητή θερμοκρασία. Οι σχέσεις που περισσότερο χρησιμοποιούνται είναι :

- για τον αέρα : $k_t = 0{,}02 + 6 \cdot 10^{-5} \cdot t \quad \left(\frac{kcal}{m \cdot h \cdot {}^0C}\right)$

- για τον ατμό νερού : $k_t = 0,0145 + 5,5 \cdot 10^{-5} \cdot t \quad \left(\frac{kcal}{m \cdot h \cdot {}^0C} \right)$
- για το διοξείδιο του άνθρακα : $k_t = 0,012 + 4,7 \cdot 10^{-5} \cdot t \quad \left(\frac{kcal}{m \cdot h \cdot {}^0C} \right)$

όπου η θερμοκρασία t είναι σε (${}^0C$).

Ο επόμενος πίνακας 1, δίνει τιμές του Κ για τα πιο συνήθη υλικά.

<u>ΠΙΝΑΚΑΣ Ι</u>

<u>Α) Μέταλλα</u>

Θερμοκρασία / **Μέταλλο**	0 ^OC	100 ^OC	200 ^OC	300 ^OC	400 ^OC	500 ^OC	600 ^OC
Αλουμίνιο	174	177	197	234	274	320	360
Άργυρος	360	355	350	345	340	335	330
Σίδηρος	60	57	52	47	42	40	34
Νικέλιο	51	50	49	48,5	48	47	46
Χαλκός	335	330	327	322	315	312	307
Ψευδάργυρος	96	92	88	85	80	-	-

<u>Β) Στερεά και Υγρά</u>

Υλικό	^OC	***K***	***Υλικό***	^OC	***k***
Αμίαντος	25	0,04	Υπολλείματα άνθρακα	25	0,12
Τσιμέντο	25	1,1 – 1,5	Άσφαλτος	0	0,5 – 0,55
Σκυρόδεμα	25	0,7 – 1,2	Άνθρακας (κάρβουνο)	20	0,15
Αλεύρι	25	0,062	Γραφίτης σε σκόνη	20	0,35
Ασβεστοκονίαμα	25	0,4 – 0,5	Ξύλο	25	0,05 – 0,06
Ξηρά τούβλα	-	0,4 – 0,6	Κηροζίνη	30	0,13
Υγρά τούβλα	-	0,6 – 0,9	Βαζελίνη	30	0,20
Ρετσινόλαδο	30	0,155	Λάδι κυλίνδρων	30	0,132
Ελαιόλαδο	30	0,145	*Λάδι μετασχηματιστών*	*30*	*0,115*

<u>Γ) Νερό</u>

^OC	***K***	^OC	***K***	^OC	***k***	^OC	***k***
0	0,477	30	0,519	60	0,562	90	0,605
10	0,491	40	0,533	70	0,576	100	0,615
20	0,505	50	0,548	80	0,590		

<u>Δ) Αέρας</u>

^OC	0	25	50	100	200	300	500
k	0,020	0,022	0,023	0,026	0,031	0,036	0,045

Ε) Μονωτικά

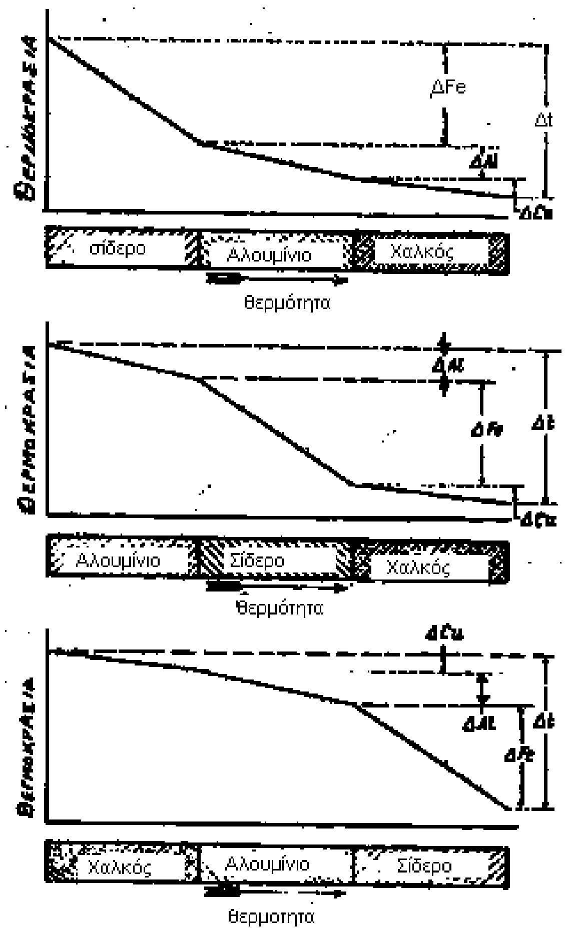
Υλικά	**200 ^{O}C**	**600 ^{O}C**	**1000 ^{O}C**
Πυρότουβλα	0,5 – 0,6	0,8 – 0,95	1,1 – 1,3
Μαγνησία	1,1 – 1,2	1,2 – 1,35	1,4 – 1,5

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από τη φύση του υλικού και για το ίδιο το υλικό δεν είναι πάντα σταθερός αλλά εξαρτάται από την κατάσταση συνοχής και τη θερμοκρασία.

Ο καλλίτερος αγωγός είναι ο άργυρος μετά ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο ορείχαλκος (μπρούντζος). Για υγρά και αέρια και για υλικά που είναι κακοί αγωγοί θερμότητας, ο συντελεστής Κ έχει πολύ χαμηλές τιμές.

Όταν η θερμότητα μεταδίδεται μέσα από μια σειρά διαφορετικών υλικών που έχουν διαφορετική αγωγιμότητα (όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα), η ποσότητα θερμότητας που διαπερνά το κάθε ένα είναι σταθερή αλλά είναι διαφορετικές οι πτώσεις της θερμοκρασίας.

Ειδικότερα, με ίδιο το πάχος, η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι μικρότερη για το υλικό που είναι καλός αγωγός και είναι μεγαλύτερη για το υλικό που προβάλει μεγαλύτερη αντίσταση στη μετάδοση της θερμότητας. Επίσης η ολική μεταβολή της θερμοκρασίας παραμένει η ίδια, με σταθερές τις υπόλοιπες συνθήκες, μεταβάλλοντας τη σειρά των ίδιων υλικών



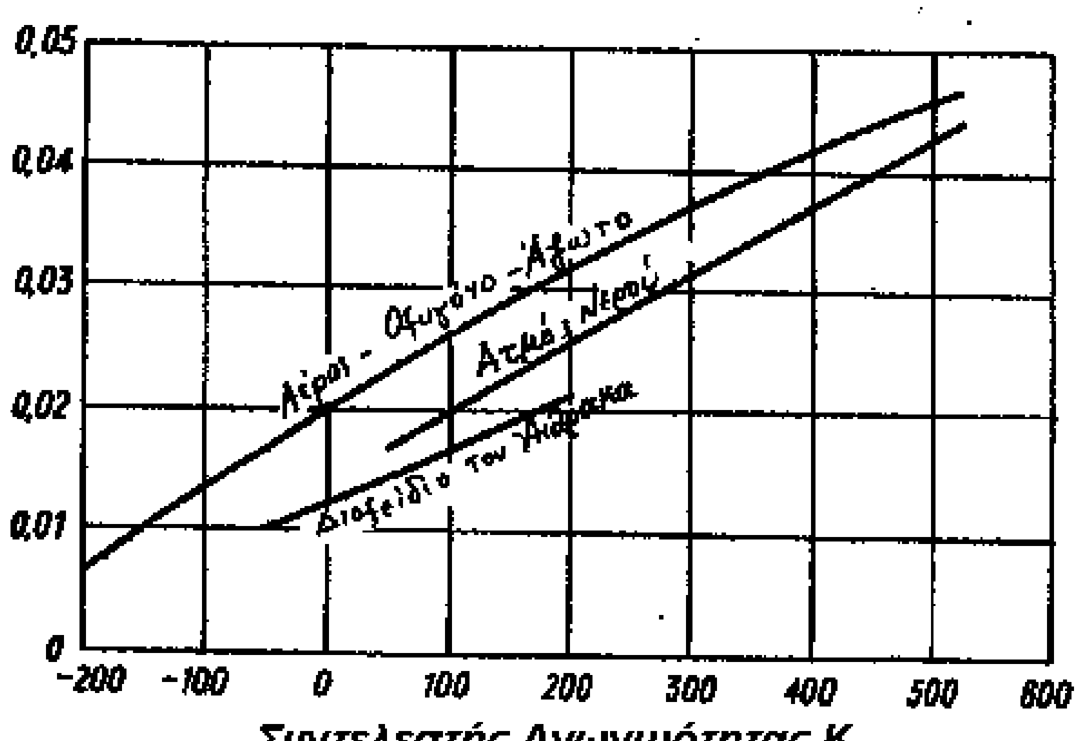
ΣΧΗΜΑ 88

Συγκρίνοντας διάφορα υλικά, με βάση τη θερμική τους αγωγιμότητα, θεωρώντας ίδιο το πάχος και ίδια τη μεταβολή της θερμοκρασίας, προκύπτει ότι για τη μετάδοση ίσης ποσότητας θερμότητας απαιτούνται (κατά προσέγγιση) σε 100^0 C :

- 1,00 cm^2 επιφάνειας χαλκού
- 2,00 cm^2 επιφάνειας αλουμινίου
- 3,50 cm^2 επιφάνειας ορείχαλκου
- 6,00 cm^2 επιφάνειας σιδήρου
- 11,00 cm^2 επιφάνειας μόλυβδου
- 46,00 cm^2 επιφάνειας υδραργύρου
- 360,00 cm^2 επιφάνειας πορσελάνης
- 650,00 cm^2 επιφάνειας νερού (στάσιμου)
- 5000,00 cm^2 επιφάνειας πριονιδίων φελλού ή ξύλου
- 12.000,00 cm^2 επιφάνειας αέρα
- 20.000,00 cm^2 επιφάνειας διοξειδίου του άνθρακα

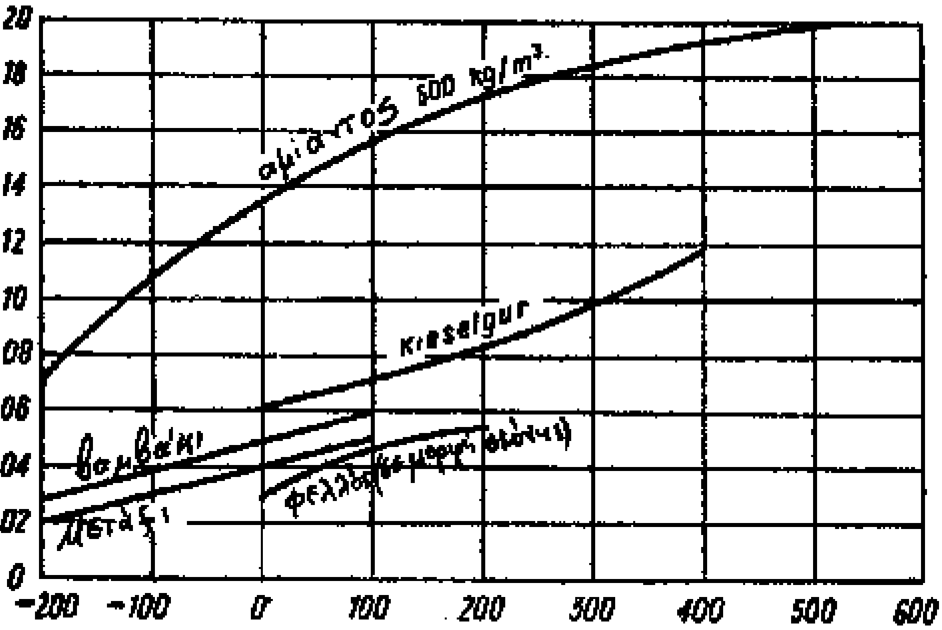
Οι προηγούμενες τιμές επιτρέπουν μια σύγκριση στις τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων υλικών.

Το διάγραμμα του σχήματος δίδει τιμές του συντελεστή αγωγιμότητας K $\left({kcal}/{m \cdot h \cdot {}^0C} \right)$ σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία (^{O} C) για τον αέρα, το οξυγόνο, το άζωτο, το διοξείδιο του άνθρακα και τον ατμό νερού.



<u>*ΣΧΗΜΑ 89*</u>

Επίσης στο διάγραμμα του παρακάτω σχήματος δίδονται οι τιμές του K για διάφορα μονωτικά.



Συντελεστής Αγωγιμότητας K

ΣΧΗΜΑ 90

Παράδειγμα 1

Να υπολογισθεί η θερμική ροή που μεταδίδεται δια αγωγής δια μέσου ενός σιδηρού ελάσματος πάχους 50 mm, επιφάνειας 0,50 m^2 με 400 (^{O}C) και 100 (^{O}C) θερμοκρασίες στις δύο πλευρές του ελάσματος. Να επαναληφθεί ο υπολογισμός για έλασμα από χαλκό στις ίδιες συνθήκες.

Λύση

Επειδή το διάστημα των τιμών της θερμοκρασίας είναι αρκετά μεγάλο, ευρίσκεται η μέση τιμή του συντελεστή αγωγμότητας.

Από τον πίνακα I προκύπτει :

$$k_m = \frac{42+57}{2} = 49,5 \ \left(\frac{kcal}{m \cdot h \cdot {}^0C}\right)$$

$$k_{m'} = \frac{315+330}{2} = 322,5 \ \left(\frac{kcal}{m \cdot h \cdot {}^0C}\right)$$

Οπότε, η ροή θερμότητας, για κάθε μια περίπτωση, είναι :

α) Σιδηρό έλασμα : $Q = -k_m \cdot \frac{A \cdot (t_2 - t_1)}{L} = -49,5 \cdot \frac{0,5 \cdot (100-400)}{0,05} = 148,5 \cdot 10^3 \ \left(\frac{kcal}{h}\right)$

β) Έλασμα από χαλκό :

$$Q' = -k_{m'} \cdot \frac{A \cdot (t_2 - t_1)}{L} = -322,5 \cdot \frac{0,5 \cdot (100-400)}{0,05} = 967,5 \cdot 10^3 \ \left(\frac{kcal}{h}\right)$$

Παράδειγμα 2

Να υπολογισθεί το πάχος που πρέπει να έχει μια στρώση από πυρίμαχα τούβλα ώστε η εξωτερική πλευρά να είναι σε θερμοκρασία 25 (^{O} C), όταν μεταδίδεται ποσό θερμότητας $Q = 1.000 \left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h}\right)$ από την εσωτερική πλευρά που ευρίσκεται σε θερμοκρασία 1000 (^{O} C).

Λύση

Επειδή δεν είναι γνωστή η επιφάνεια της στρώσης, οι υπολογισμοί γίνονται αναγάγοντας το ποσό θερμότητας στη μπονάδα επιφάνειας :

$$q = \frac{Q}{A} = -k\frac{t_2 - t_1}{L} \Rightarrow L = -k \cdot \frac{t_2 - t_1}{q} = -k \cdot \frac{\Delta t}{q}$$

Από τον πίνακα Ι, για μέση θερμοκρασία 512,5 (^{O} C) προκύπτει $k = 0,756 \left(\frac{kcal}{m \cdot h \cdot {}^0C}\right)$, οπότε το πάχος που προκύπτει είναι :

$$L = -0,756 \cdot \frac{25 - 1000}{\frac{1000}{1}} = 0,737\ m$$

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (νόμος του Newton)

Το φαινόμενο της μετάδοσης θερμότητας δια μεταφοράς (ή συναγωγής) οφείλεται σε μεταφορά θερμότητας λόγω κίνησης ρευστών μαζών :

- εξ αιτίας διαφοράς θερμοκρασίας (επομένως και πυκνότητας)
- εξ αιτίας διαφορών πιέσεως, προκαλούμενες μηχανικά.

Στην πρώτη περίπτωση η διαδικασία είναι *ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ* ενώ στη δεύτερη περίπτωση *ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ.*

Τοποθετώντας μέσα σε ρευστό μέσο (π.χ. αέρα) μια ζεστή πλάκα (κάθετη) το ρευστό σε επαφή με την πλάκα ζεσταίνεται και μειώνεται η πυκνότητά του. Η ρευστή μάζα σε επαφή με την πλάκα γίνεται πιο ελαφριά και ανέρχεται, στο δε ελεύθερο χώρο έρχεται ρευστή μάζα λιγότερο θερμή η οποία υφίσταται την ίδια μεταβολή.
Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται έως ότου η θερμοκρασία του ρευστού και της πλάκα εξισορροπηθούν.

Σε πρώτη προσέγγιση το ρευστό σε επαφή με την πλάκα θεωρείται στάσιμο, αλλά η διαδικασία και η σχέση υπολογισμού μπορεί να εφαρμοστεί και σε ρευστά σε κίνηση.

Το ποσό της θερμότητας που μεταδίδεται στην περίπτωση αυτή στη μονάδα του χρόνου, δίδεται από τη σχέση :

$\boxed{Q = a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot A \cdot \left(t_f - t_p\right)}$ (3) $\boxed{Q = a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot A \cdot \left(t_p - t_f\right)}$ $(3a)$

όπου :

- A = επιφάνεια της πλάκας, (m^2)
- $a_{\sigma\upsilon\nu}$ = συντελεστής συναγωγής, $\left(kcal \middle/ m^2 \cdot h \cdot {}^0C \right)$
- t_f = μέση θερμοκρασία του ρευστού (${}^0C$)
- t_p = μέση θερμοκρασία της πλάκας (${}^0C$)
- Q = ποσό θερμότητας, $\left(kcak \middle/ h \right)$

Οι δύο σχέσεις διαφέρουν στις περιπτώσεις που $t_f > t_p$ ή $t_f < t_p$ οπότε ισχύουν είτε για μετάδοση θερμότητας από ένα ρευστό προς την πλάκα, είτε από την πλάκα προς το ρευστό, και επομένως από ρευστό προς ένα άλλο ρευστό μέσα από ένα τοίχωμα, όπως γενικά συμβαίνει σε όλους τους εναλλάκτες θερμότητας.

Ο συντελεστής συναγωγής δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες δεδομένου ότι στο φαινόμενο υπεισέρχονται διάφορα μεγέθη που έχουν σχέση με τη φύση των ουσιών που μετέχουν στη διαδικασία, όπως ειδικό βάρος, πυκνότητα, ιξώδες, συντελεστές διαστολής, φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή, χαρακτηριστικά κίνησης των ρευστών, ομαλή ή τυρβώδης ροή, συμπύκνωση ατμών, βρασμός υγρών κ.λ.π.

Η περίπτωση στάσιμων υγρών ενδιαφέρει τη μετάδοση θερμότητας από την επιφάνεια θέρμανσης του νερού στο λέβητα, ή τη μετάδοση της θερμότητας από τον ατμό εξαγωγής στην επιφάνεια του συμπυκνωτή (εναλλάκτη θερμότητας).

Συντελεστής συναγωγής $a_{\sigma\upsilon\nu}$

Ο υπολογισμός του βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα μεγάλου αριθμού πειραμάτων, από τα οποία βρέθηκε ότι ο ΄΄α΄΄ δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = f\left(l,\ \Delta t,\ c',\ \nu,\ \beta \cdot g,\ k,\ w\right)}$ **(4)** όπου :

$l = \pi\acute{\alpha}\chi o\varsigma\left(m\right)$

$c' = c \cdot p = o\gamma\kappa o\mu\varepsilon\tau\rho\iota\kappa\acute{\eta}\ \ \theta\varepsilon\rho\mu\acute{o}\tau\eta\tau\alpha\ \left(kcal \middle/ m^3 \cdot {}^0C \right)$

$\nu = \kappa\iota\nu\eta\mu\alpha\tau\iota\kappa\acute{\eta}\ \ \sigma\upsilon\nu\varepsilon\kappa\tau\iota\kappa\acute{o}\tau\eta\tau\alpha\ \left(m^2 \middle/ h \right) = \dfrac{\mu}{\rho}$

$\beta = \sigma\upsilon\nu\tau\varepsilon\lambda\varepsilon\sigma\tau\acute{\eta}\varsigma\ \ \delta\iota\alpha\sigma\tau o\lambda\acute{\eta}\varsigma$

$\mathrm{K} = \sigma\upsilon\nu\tau\varepsilon\lambda\varepsilon\sigma\tau\acute{\eta}\varsigma\ \ \theta\varepsilon\rho\mu\iota\kappa\acute{\eta}\varsigma\ \ \alpha\gamma\omega\gamma\iota\mu\acute{o}\tau\eta\tau\alpha\varsigma$

$w = \tau\alpha\chi\acute{\upsilon}\tau\eta\tau\alpha\ \ \rho\varepsilon\upsilon\sigma\tau o\acute{\upsilon}\ \ (\alpha\pi\acute{o}\ \ \alpha\upsilon\tau\acute{\eta}\nu\ \ \varepsilon\xi\alpha\rho\tau\acute{\alpha}\tau\alpha\iota\ \ o\ \ \chi\rho\acute{o}\nu o\varsigma\ \ \varepsilon\pi\alpha\varphi\acute{\eta}\varsigma,$
$\alpha\rho\alpha\ \ \eta\ \ \varepsilon\nu\alpha\lambda\lambda\alpha\gamma\acute{\eta}\ \ \theta\varepsilon\rho\mu\acute{o}\tau\eta\tau\alpha\varsigma$

Σημείωση :

Το γεγονός ότι ο συντελεστής συναγωγής εξαρτάται από το γινόμενο ($\beta \cdot g$) εξηγείται ως εξής :

Η δύναμη που ανεβάζει τα ζεστά στρώματα και κατεβάζει τα κρύα στρώματα, υπολογίζεται από τη μεταβολή του ειδικού βάρους :

$$d\gamma = g \cdot dp$$

από το νόμο μεταβολής $\rho \; = f(\theta\varepsilon\rho\mu o\kappa\rho\alpha\sigma\acute{\iota}\alpha)$ είναι :

$\rho_t = \rho_0 \cdot (1 - \beta \cdot t)$ και παραγωγίζοντας προκύπτει : $d\delta = -\delta_0 \cdot \beta \cdot dt$, οπότε αντικαθιστώντας είναι :

$$d\gamma = -g \cdot \beta \cdot \delta_0 \cdot dt$$

από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι το γινόμενο ($\beta \cdot g$) είναι παράμετρος που επηρεάζει τη φυσική συναγωγή.

Όλες οι προηγούμενες παράμετροι βρίσκονται σε σχέσεις αδιάστατες :

$\alpha\rho\iota\theta\mu\acute{o}\varsigma \;\; \tau o\upsilon \;\; Nusselt$: $\boxed{Nu = \dfrac{a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot l}{k}}$ (5)

$\alpha\rho\iota\theta\mu\acute{o}\varsigma \;\; \tau o\upsilon \;\; \mathrm{Re}\,ynolds$: $\boxed{\mathrm{Re} = \dfrac{w \cdot l}{v}}$ (6)

$\alpha\rho\iota\theta\mu\acute{o}\varsigma \;\; \tau o\upsilon \;\; \mathrm{Pr}\,andtl$: $\boxed{\mathrm{Pr} = \dfrac{c' \cdot v}{k}}$ (7)

$\alpha\rho\iota\theta\mu\acute{o}\varsigma \;\; \tau o\upsilon \;\; Grashof$: $\boxed{Gr = \dfrac{\beta \cdot g \cdot l^3 \cdot \Delta t}{v^2}}$ (8)

Βρέθηκε η παρακάτω σχέση : $\boxed{Nu = \dfrac{a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot l}{k} = f_1(\mathrm{Re},\; \mathrm{Pr},\; Gr)}$ **(9)**

α) φυσική συναγωγή

$w = 0, \quad \mathrm{Re} = 0, \quad \boxed{Nu = f_2(\mathrm{Pr}, Gr)}$ (10)

β) εξαναγκασμένη συναγωγή

$\beta \cdot g = \alpha\mu\varepsilon\lambda\eta\tau\acute{\varepsilon}o, \quad \boxed{Nu = f_3(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr})}$ (11)

Στα αέρια ο αριθμός του Pr είναι σταθερός και η τιμή του εξαρτάται από τον αριθμό των ατόμων που υπάρχουν στο μόριο.

Είναι :

$-\alpha\acute{\varepsilon}\rho\iota o \quad \mu o\nu o\alpha\tau o\mu\iota\kappa\acute{o}$: $\Pr \cong 0,67$
$-\alpha\acute{\varepsilon}\rho\iota o \quad \delta\iota\alpha\tau o\mu\iota\kappa\acute{o}$: $\Pr \cong 0,72$
$-\alpha\acute{\varepsilon}\rho\iota o \quad \tau\rho\iota\alpha\tau o\mu\iota\kappa\acute{o}$: $\Pr \cong 0,90$
$-\alpha\acute{\varepsilon}\rho\iota o \quad \mu\varepsilon$ άτομα > 3 : $\Pr \cong 1,00$

Εάν ο αριθμός Pr υπολογισθεί μέσα στη σταθερά, τότε : $\boxed{\mathrm{N}u = f_4\left(\mathrm{Re}\right)}$ (**12**).

Από την πειραματική ανάλυση προέκυψε το αποτέλεσμα ότι :

$$\boxed{Nu = \frac{a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot l}{k} = A \cdot \left(\mathrm{Re}\right)^m \cdot \left(\Pr\right)^n \cdot \left(Gr\right)^s}, \quad (\mathbf{13})$$

όπου η σταθερά A και οι εκθέτες λαμβάνουν τιμές ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση.

<u>ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ</u> $a_{\sigma\upsilon\nu}$

Από τη σχέση (13) προκύπτει ότι είναι απαραίτητος πρώτα ο υπολογισμός των αδιάστατων αριθμών και στη συνέχει ο υπολογισμός του αριθμού Nusselt. Από τη σχέση αυτή προκύπτει ο συντελεστής συναγωγής : $\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = Nu \cdot \frac{k}{l}}$ (**14**)

Ο υπολογισμός των αδιάστατων αριθμών προυποθέτει τη γνώση των τιμών των φυσικών χαρακτηριστικών του ρευστού, για τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο *<u>πίνακας 2</u>*. Επειδή αυτά τα χαρακτηριστικά μεγέθη μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, μπορεί να ληφθεί για τους υπολογισμούς η τιμή που αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία μεταξύ της θερμοκρασίας του ρευστού και της θερμοκρασίας του τοιχώματος.

<u>ΠΙΝΑΚΑΣ 2</u>

$t \ \left({}^0C\right)$	**k**	**Y**	**c'**	**Pr**
		A) Φυσικά χαρακτηριστικά του αέρα		
0	0,0205	0,049	0,315	0,75
50	0,0235	0,068	0,267	0,77
100	0,0262	0,084	0,238	0,76
200	0,0311	0,13	0,183	0,76
300	0,036	0,18	0,150	0,75
400	0,040	0,23	0,129	0,75
500	0,044	0,29	0,116	0,76
600	0,048	0,36	0,102	0,77
800	0,055	0,50	0,086	0,78

Β) Φυσικά χαρακτηριστικά του διοξείδιο του άνθρακα

0	0,012	0,028	0,387	0,90
50	0,014	0,035	0,333	0,84
100	0,017	0,045	0,303	0,81
200	0,022	0,071	0,244	0,79
300	0,027	0,10	0,214	0,79
400	0,031	0,14	0,177	0,80
500	0,036	0,18	0,165	0,81
600	0,042	0,22	0,155	0,81
800	0,052	0,31	0,133	0,80

Γ) Θερμική αγωγιμότης του ατμού νερού

atm / ^0C	1	2	4	6	8	10
100	0,0204	-	-	-	-	-
120	0,0216	0,0228	-	-	-	-
140	0,0228	0,0238	-	-	-	-
160	0,0241	0,0249	0,0265	0,0283	-	-
180	0,0253	0,0260	0,0273	0,0289	0,0308	0,0350
200	0,0266	0,0272	0,0284	0,0296	0,0314	0,0343
220	0,0278	0,0284	0,0294	0,0305	0,0321	0,0345
240	0,0291	0,0297	0,0306	0,0315	0,0329	0,0351
260	0,0305	0,0310	0,0318	0,0326	0,0339	0,0359
280	0,0317	0,0322	0,0330	0,0338	0,0349	0,0369
300	0,0331	0,0336	0,0343	0,0351	0,0361	0,0382
320	0,0345	0,0350	0,0356	0,0364	0,0374	0,0394
340	0,0358	0,0363	0,0369	0,0378	0,0387	0,0407

Δ) Κινηματική συνεκτικότης (ιξώδες) του ατμού νερού

atm / ^0C	1	2	4	6	8	10
100	0,0782	-	-	-	-	-
120	0,0879	0,0439	-	-	-	-
140	0,0972	0,0490	-	-	-	-
160	0,108	0,0544	0,0274	0,018	-	-
180	0,118	0,0594	0,0299	0,020	0,0155	0,013
200	0,130	0,0652	0,0324	0,022	0,017	0,014
220	0,141	0,0710	0,0360	0,023	0,018	0,015
240	0,154	0,0775	0,0385	0,026	0,020	0,017
260	0,165	0,0836	0,0421	0,028	0,022	0,018
280	0,179	0,0904	0,0457	0,031	0,023	0,019
300	0,194	0,0972	0,0490	0,033	0,025	0,021
320	0,207	0,104	0,0526	0,036	0,027	0,022
340	0,222	0,111	0,0565	0,038	0,029	0,024

Ε) Φυσικές χαρακτηριστικές του νερού σε ατμοσφαιρική πίεση

$t\left({}^0C\right)$	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**100**
k	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,58	0,59
$\nu \cdot 10^4$	64,5	46,8	36,0	29,0	23,7	20,0	17,2	14,9	13,2	11,7	10,6
Pr	13,3	9,5	7,1	5,5	4,4	3,6	3,0	2,5	2,2	1,9	17

ΣΤ) Φυσικές χαρακτηριστικές του νερού από (120 – 200) $\left({}^{0}C\right)$ στην αντίστοιχη πίεση κορεσμού

$t\left({}^{0}C\right)$	120	140	160	180	200
$p\ (atm)$	1,96	3,57	6,10	9,88	15,3
k	0,59	0,59	0,59	0,58	0,57
$\nu \cdot 10^{4}$	9,0	7,8	6,8	6,2	5,7
Pr	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8

Ζ) Τιμές του συντελεστή διαστολής του νερού στις διάφορες θερμοκρασίες

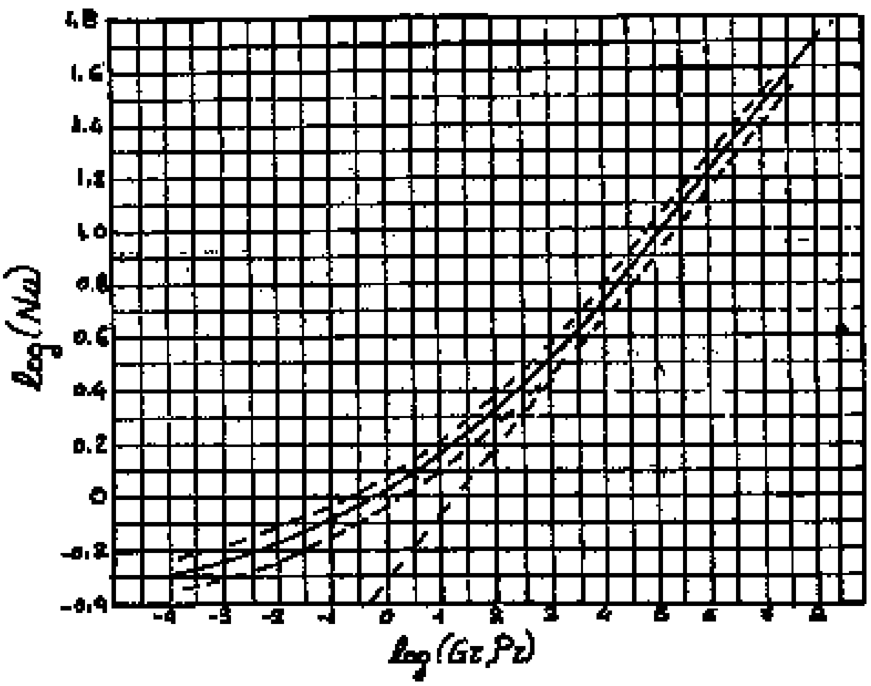
$t\left({}^{0}C\right)$	20	40	60	80	100
Β	$2{,}1 \cdot 10^{-4}$	$4{,}0 \cdot 10^{-4}$	$5{,}3 \cdot 10^{-4}$	$6{,}3 \cdot 10^{-4}$	$7{,}3 \cdot 10^{-4}$

Επειδή τα φυσικά στοιχεία του ρευστού μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, στους υπολογισμούς λαμβάνεται η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία τοιχώματος – ρευστού.

Ι) ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ

α) οριζόντιοι κύλινδροι εμβαπτιζόμενοι εξωτερικά από ρευστό σε θερμοκρασία μικρότερη του τοιχώματος

Επιλέγεται σαν παράμετρος η εξωτερική διάμετρος (l) και χρησιμοποιείται το παρακάτω διάγραμμα το οποίο δίδει το λογάριθμο του αριθμού του Nusselt σε συνάρτηση του λογαρίθμου του γινομένου μεταξύ των αριθμών Grasshof και Prandtl.



ΣΧΗΜΑ 91

Οι διακεκομμένες καμπύλες ορίζουν το πεδίο του οποίου η συνεχής καμπύλη δίδει τη μέση πορεία.
Για τις τιμές του $\lg(Gr \cdot \Pr)$ μεταξύ 3 και 8 μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση :

$$\boxed{Nu = 0,50 \cdot (Gr \cdot \Pr)^{0,25}} \qquad \textbf{(15)}$$

Στην περίπτωση του αέρα μεταξύ (0 και 200) ^{0}C θέτοντας Pr = 0,75 κατά τον Groeber προκύπτει :

$$\boxed{Nu = 0,47 \cdot (Gr)^{0,25}} \qquad \textbf{(15α)}$$

<u>β)</u> Επίπεδες πλάκες

Κατακόρυφες πλάκες ύψους μεγαλύτερου του 1,00 μέτρου σε αέρα συνήθους θερμοκρασίας (Griffiths και Davis):

$$\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = 1,70 \cdot (\Delta t)^{0,25}} \qquad \textbf{(16)}$$

Εάν το ύψος είναι μικρότερο του 1,00 μέτρου …….. : $\boxed{Nu = 0,60 \cdot (Gr \cdot \Pr)^{0,25}}$ **(17)**

<u>Οριζόντιες πλάκες :</u>

- ρευστό που λούζει την εξωτερική όψη : $\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{T_1 - T_2}{L}}}$ **(18)**
- ρευστό που λούζει την εσωτερική πλευρά : $\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = 0,55 \cdot \sqrt[4]{\frac{T_1 - T_2}{L}}}$ **(19)**
-

όπου T_1 και T_2 είναι οι απόλυτες θερμοκρασίες της πλάκας και του αέρα και L η πλευρά (σε μέτρα) της πλάκας.

II) ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΣΥΝΑΓΩΓΗ

<u>α)</u> στο εξωτερικό ενός κυλινδρικού σωλήνα με ροή κάθετη στον άξονα του κυλίνδρου :

$$\boxed{Nu = 0,385 \cdot (\Pr)^{0,30} \cdot (\mathrm{Re})^{0,56}} \qquad \textbf{(20)}$$

Για τον αέρα, θέτοντας Pr = σταθερό, είναι (κατά Reiher) : $\boxed{Nu = 0,35 \cdot (\mathrm{Re})^{0,56}}$ **(21)**

Οι δύο προηγούμενες σχέσεις ισχύουν για Re > 1000.
Εάν 0,1 < Re < 1000, χρησιμοποιείται η σχέση : $\boxed{Nu = 0,32 + 0,43 \cdot (\mathrm{Re})^{0,52}}$ **(22)**

Για τις σερπαντίνες ισχύουν οι ίδιες σχέσεις με διάμετρο σωλήνα τη διάμετρο της σερπαντίνας.

β) στο εσωτερικό σωλήνων : θεωρώντας τη θερμοκρασία του ρευστού ίση με τη θερμοκρασία εισόδου – εξόδου και τη γεωμετρική παράμετρο ίση με την εσωτερική διάμετρο, για αέρια και υγρά με μικρή πυκνότητα και Re > 10.000 είναι :

$$\boxed{Nu = 0,023 \cdot (\mathrm{Pr})^{0,40} \cdot (\mathrm{Re})^{0,80}} \qquad \textbf{(23)}$$

ΙΙΙ) ΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΙ ΑΤΜΟΙ

Για κάθετες πλάκες ύψους Η, ο μέσος συντελεστής $a_{συν}$ είναι :

$$\boxed{\left(a_{συν}\right)_m = \frac{4}{3 \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot k^3 \cdot \rho^3 \cdot r}{\mu \cdot H \cdot \left(t_r - t_0\right)}}} \qquad \textbf{(24)}$$

όπου : r = θερμότητα συμπυκνώσεως
t_0 = θερμοκρασία του ψυχόμενου τοιχώματος
t_v = θερμοκρασία (ισορροπίας) του ατμού

Για οριζόντιο κύλινδρο, στην προηγούμενη σχέση η ρίζα πολλαπλασιάζεται με 0,725.

Για σύστημα σωλήνων τοποθετημένων επάλληλα (ο ένας πάνω στον άλλο) η ρίζα πολλαπλασιάζεται με $\frac{0,725}{\sqrt[4]{n}}$, όπου n = αριθμός των σωλήνων.

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ του $a_{συν}$, σε $\left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot {}^0C}\right)$

Για τις ενδεικτικές τιμές που προκύπτουν από την πράξη, είναι :

t_1 = θερμοκρασία τοιχώματος, σε ^0C
t_2 = θερμοκρασία ρευστού, σε
w = ταχύτητα του ρευστού, σε $\left(\frac{m}{h}\right)$

1. Στάσιμο νερό : $\boxed{a_{συν} = 150 - 2000}$ **(25)**

Σε μεγάλες ποσότητες και κάθετα τοιχώματα : $\boxed{a_{συν} = (3-10) \cdot \left(40 + \frac{t_1 - t_2}{2}\right)}$ **(26)**

Στον υπολογισμό θεωρούνται οι μεγαλύτερες τιμές για τις μεγαλύτερες Δt, με Δt μεταξύ (1 – 80) ^0C.

2. Νερό σε κίνηση : $\boxed{a_{συν} = 200 - 10.000}$ **(27)**

Για ταχύτητες $w < 7200\left(\frac{m}{h}\right)$ είναι $\boxed{a = 200\cdot\left(1+0,002\cdot t_2\right)\cdot w}$ **(28)**

3. **Νερό σε βρασμό** : $\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = 2000 - 6000}$ (**29**)

4. **Ατμός νερό σε συμπύκνωση** : $\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = 6.000 - 40.000}$ (**30**), με μέση τιμή 10.000

5. **Αέρας σε ηρεμία** σε πίεση $p\left(\frac{kp}{m^2}\right)$ και κάθετα τοιχώματα :

$$a_{\sigma\upsilon\nu} = 2\cdot\sqrt{\frac{p}{10.000}}\cdot\sqrt[4]{\left(t_1 - t_2\right)} \quad \textbf{(31)}$$

6. **Στάσιμος αέρας** γύρω από κύλινδρο διαμέτρου D (m) :

$$\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = \frac{1}{\sqrt[4]{D}}\cdot\sqrt{\frac{p}{10.000}}\cdot\sqrt[4]{\left(t_1 - t_2\right)}} \quad \textbf{(32)}$$

7. **Αέρας** που λούζει κάθετα τοιχώματα : $\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = 5 + \left(\frac{w}{1100}\right)}$ (**33**).

Για ταχύτητες μικρότερες από 18.000 $\left(\frac{m}{h}\right)$ η τιμή του α μεταβάλλεται μεταξύ 5 και 21.

8. **Αέρια και υπέρθερμοι ατμοί** μέσα σε σωλήνες : $\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = X\cdot\left(\frac{p}{10.000}\right)\cdot\frac{w}{\left(273 + t_2\right)}}$ **(34),**

όπου η τιμή του X μεταβάλλεται μεταξύ 0,20 και 0,50 με τιμές τόσο μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του γινομένου $\left(d\cdot w\cdot p\right)$ δηλαδή της διαμέτρου του σωλήνα, της ταχύτητας και της πίεσης του ατμού.

9. **Αέρας και αέρια** σε ισχυρή κίνηση : $\boxed{a_{\sigma\upsilon\nu} = 500}$ **(35).**

Παράδειγμα 1

Μια κυλινδρική ράβδος διαμέτρου 1΄΄ και μήκους 1,00 μέτρου, ευρίσλκεται μέσα σε ήρεμο αέρα σε θερμοκρασία 20 ^0C. Η πλευρική επιφάνεια της ράβδου είναι σε θερμοκρασία 200 ^0C που θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη.
Υποθέτοντας ότι η θερμότητα μεταδίδεται μόνο με συναγωγή και μόνο στρην πλευρική επιφάνεια, να υπολογισθεί ο απαιτούμενος χρόνος για μετάδοση 1000 kcal.

Λύση

Το ποσό θερμότητας που εναλλάσσεται διαμέσου της πλερικής επιφάνειας που έχει εμβαδόν $A = \pi \cdot d \cdot l$, δίδεται από τη σχέση (3), δηλαδή :

$$Q = a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot A \cdot \left(t_f - t_p\right) \ \left(kcak/h\right)$$

Ο απαιτούμενος χρόνος για εναλλαγή 1000 kcal, ευρίσκεται διαιρώντας αυτό το ποσό θερμότητας με το Q :

$$\tau\left(h\right) = \frac{1000\left(kcal\right)}{Q\left(\frac{kcal}{h}\right)}$$

Οπότε, απομένει ο υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής.

1. *Υπολογισμός του* $a_{\sigma\upsilon\nu}$

Από όλες τις σχέσεις που έχουν γραφεί στο παρόν κεφάλαιο για τον υπολογισμό του $a_{\sigma\upsilon\nu}$, πρέπει να επιλεγεί εκείνη που αναφέρεται σε περιπτώσεις παρόμοιες με την προκείμενη. Στην προκείμενη περίπτωση, ένας κύλινδρος είναι εμβαπτισμένος σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασίας που επικρατεί στην επιφάνεια μεταφοράς της θερμότητας και σε φυσική συναγωγή.

Επομένως, χρησιμοποιείται η σχέση (15) της Ι α), ήτοι :

$$Nu = 0,50 \cdot \left(Gr \cdot \Pr\right)^{0,25}, \quad \text{όπου} \quad Nu = \frac{a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot l}{k}$$

Ο υπολογισμός των επιμέρους μεγεθών, γίνεται με χρήση της μέσης θερμοκρασίας :

$$t_m = \frac{200+20}{2} = 110 \ (^0C)$$

οπότε από τον πίνακα 2, προκύπτουν οι παρακάτω τιμές :

$$c' = 0,23\ \left(\frac{kcal}{m^3 \cdot {}^0C}\right)$$

$$\nu = 0,0886\ \left(\frac{m^2}{h}\right)$$

$$k = 0,0267\ \left(\frac{kcal}{m \cdot h \cdot {}^0C}\right)$$

Επίσης :

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{(273+110)} = \frac{1}{383}\left(\frac{1}{{}^0K}\right)$$

$$g = 9,81\left(\frac{m}{\sec^2}\right) = 1,27 \cdot 10^8\left(\frac{m}{h^2}\right)$$

$$d = 1'' = 0.0254\ m$$

<u>*α) αριθμός Grashof*</u>

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot l^3 \cdot \Delta t}{\nu^2} = \frac{\frac{1}{383} \cdot 1,27 \cdot 10^8 \cdot (0,0254)^3 \cdot (200-20)}{(0,0886)^2} = 124590$$

<u>*β) αριθμός Prandtl*</u>

$$\Pr = \frac{c' \cdot \nu}{k} = \frac{0,23 \cdot 0,0886}{0,0267} = 0,7632$$

Υπάρχει η δυνατότητα για την συγκεκριμένη περίπτωση του αέρα στη θερμοκρασία που ευρίσκεται, δηλαδή μεταξύ (0 και 200) ^{0}C να ληφθεί Pr = 0,75.

Από τις δύο αρχικές σχέσεις, προκύπτει ότι ο συντελεστής συναγωγής είναι :

$$a_{\sigma\upsilon\nu.} = \frac{k}{l} \cdot 0,5 \cdot (Gr \cdot \Pr)^{0,25} = \frac{0,0267}{0,0254} \cdot 0,5 \cdot (124590 \cdot 0,7632)^{0,25} = 9,01\left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot {}^0C}\right)$$

Οπότε το ποσό θερμότητας είναι :

$$Q = a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot A \cdot (t_f - t_p) =$$

$$= a_{\sigma\upsilon\nu.} \cdot (\pi \cdot d \cdot l) \cdot (t_f - t_p) = 9,01 \cdot (\pi \cdot 0,0254 \cdot 1) \cdot (200-20) = 129,35\left(\frac{kcal}{h}\right)$$

II. Υπολογισμός του απαιτούμενου χρόνου

Δίδεται από τη σχέση : $\tau(h) = \dfrac{1000(kcal)}{Q\left(\dfrac{kcal}{h}\right)}$ = $\dfrac{1000}{129,35} = 7,731(h)$ που είναι : $7^h\ \ 43^{'}\ \ 51^{"},6$

Σημείωση : η τιμή του $a_{\sigma\upsilon\nu}$ μπορεί να υπολογισθεί και από το διάγραμμα της παραγράφου ***I α*** κατά τον ακόλουθο τρόπο :

$$(Gr \cdot \Pr) = (124590 \cdot 0,7632) = 95087$$
$$\log(Gr \cdot \Pr) = \log(95087) = 4,97812$$

Με την τιμή αυτή υψώνοντας την κάθετο στις τετμημένες (οριζόντιος άξονας) μέχρι τη συνεχή γραμμή, στις τεταγμένες προκύπτει :

$\log(Nu) = 0.885$ οπότε Nu = 7,6736 και ο συντελεστής συναγωγής είναι :

$$Nu = \frac{a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot l}{k} \Rightarrow a_{\sigma\upsilon\nu.} = \left(Nu \cdot \frac{k}{l}\right) = \left(7,6736 \cdot \frac{0,0267}{0,0254}\right) = 8,065 \ \left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot {}^0C}\right)$$

Η διαφορά στην τιμή αυτή σε σχέση με την τιμή που υπολογίσθηκε με την αναλυτική μέθοδο, οφείλεται στο γεγονός της μικρής ακρίβειας από τη γραφική μέθοδο, δεδομένου ότι η συνεχής γραμμή του διαγράμματος αντιπροσωπεύει μια μέση τιμή μεταξύ των καμπυλών που περιλαμβάνονται στην περιοχή που περιορίζεται από τις διακεκομμένες καμπύλες.

Παράδειγμα 2

Αέρας σε ατμοσφαιρική πίεση είναι σε επαφή με μια κάθετη επιφάνεια που έχει εμβαδόν 8,00 m^2. Η θερμοκρασία του αέρα είναι 76 (${}^0C$) ενώ η θερμοκρασία της κάθετης επιφάνειας είναι 80 (${}^0C$). Να υπολογισθεί η ροή θερμότητας που μεταδίδεται με καθαρή συναγωγή.

Λύση

Η εμπειρική σχέση που προτείνεται στην προκειμένη περίπτωση, είναι :

$$a_{\sigma\upsilon\nu.} = 2 \cdot \sqrt{\frac{p}{10.000}} \cdot \sqrt[4]{(t_1 - t_2)} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{10333}{10.000}\right)} \cdot \sqrt[4]{(80-76)} = 2,87\left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot {}^0C}\right)$$

Το ζητούμενο ποσό θερμότητας είναι :

$$Q = a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot A \cdot \left(t_f - t_p\right) \ = \ 2,87 \cdot 8 \cdot (80-76) = 91,8 \ \left(\frac{kcal}{h}\right)$$

Παράδειγμα 3

Με τα δεδομένα του προηγούμενου παραδείγματος, να υπολογισθεί το ποσό θερμότητας που μεταδίδεται δια συναγωγής, στην περίπτωση που ο αέρας κινείται με ταχύτητα $w = 1,80 \ \left(\frac{m}{\sec^2}\right)$.

Λύση

Ο συντελεστής συναγωγής στην προκειμένη περίπτωση, υπολογίζεται από τη σχέση : $a_{\sigma\upsilon\nu} = 5 + \left(\frac{w}{1100}\right)$, όπου η ταχύτητα είναι σε $\left(\frac{m}{h}\right)$.

Άρα : $w = 1,8 \cdot 3600 = 6480 \ \left(\frac{m}{h}\right)$ και από την προηγούμενη σχέση : $a_{\sigma\upsilon\nu.} = 5 + \left(\frac{6480}{1100}\right) = 10,9 \ \left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot {}^0C}\right)$, και το ζητούμενο ποσό θερμότητας είναι :

$$Q = a_{\sigma\upsilon\nu.} \cdot A \cdot \Delta t = 10,9 \cdot 8 \cdot (80 - 76) \ = \ 349,00 \ \left(\frac{kcal}{h}\right).$$

Η τιμή αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που προέκυψε στο προηγούμενο παράδειγμα, κάτι ασφαλώς αναμενόμενο με τον αέρα τώρα να είναι σε κίνηση.

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Ένα θερμό σώμα, τοποθετημένο ακόμα και στο κενό, εκπέμπει θερμότητα σε όλες τις κατευθύνσεις με τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας ακολουθώντας τους νόμους της οπτικής (ευθύγραμμα με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων διαφόρων μηκών), όπως για παράδειγμα οι υπέρυθρες ακτίνες.

Η ποσότητα της ακτινοβολίας εξαρτάται , εκτός από τη θερμοκρασία, και από τη φύση της επιφάνειας που εκπέμπει.

Ένα σώμα που εκπέμπει ενέργεια, τείνει να έχει μια χαμηλότερη θερμοκρασία ενώ αντιθέτως ένα σώμα το οποίο προσπίπτουν ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες απορροφά ενέργεια και η θερμοκρασία του αυξάνεται.

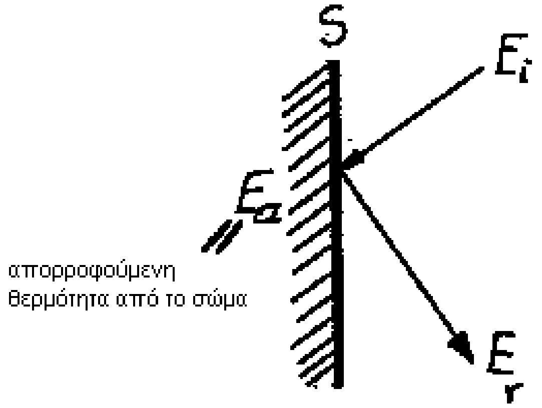
Μεταξύ δυο σωμάτων που δεν ευρίσκονται σε επαφή με διαφορετική θερμοκρασία δημιουργείται μια αμοιβαία εναλλαγή ενέργειας έως ότου τα δύο σώματα αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία.
Η ενέργεια που προσπίπτει σε ένα σώμα, απορροφάται από αυτό. Γενικά όμως η απορρόφηση δεν είναι ολική αλλά ένα μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας αντανακλάται.

Εάν A η διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων και E_ι η προσπίπτουσα ενέργεια, τότε ένα μέρος E_r της προσπίπτουσας ενέργειας αντανακλάται και ένα μέρος αυτής απορροφάται $E_a = E_i - E_r$ **(36).**

<u>*Ορίζεται :*</u>

Συντελεστής αντανακλάσεως : $r = \frac{E_r}{E_i}$ **(37)**

Συντελεστής απορρόφησης : $a = \frac{E_a}{E_i}$ **(38)**



<u>ΣΧΗΜΑ 92</u>

<u>Εξετάζονται δύο περιπτώσεις :</u>

1. όλη η προσπίπτουσα ενέργεια αντανακλάται, οπότε είναι :

$E_r = E_i, \quad E_a = 0, \quad r = 1, \quad a = 0$ και το σώμα ονομάζεται ***ΛΕΥΚΟ ΣΩΜΑ***

2. όλη η ενέργεια απορροφάται, οπότε είναι :

$E_r = 0, \quad E_a = 0, \quad r = 0, \quad a = 1$ και το σώμα ονομάζεται ***ΜΕΛΑΝ ΣΩΜΑ***

Ο συντελεστής απορρόφησης για μια ορισμένη θερμοκρασία εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Σημειώνεται ότι το ίδιο σώμα, ο συντελεστής αντανάκλασης είναι τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής απορρόφησης. Τα όρια ορίζονται από το ΙΔΑΝΙΚΟ ΜΕΛΑΝ ΣΩΜΑ και τον ΙΔΑΝΙΚΟ ΚΑΘΡΕΠΤΗ.

<u>Τα σώματα για τα οποία α < 1 ονομάζονται ΦΑΙΑ ΣΩΜΑΤΑ.</u>

Στην πράξη τα σώματα θεωρούνται φαιά και για το συντελεστή ***<u>α</u>*** λαμβάνεται μια μέση τιμή που δίδεται στον πίνακα που ακολουθεί :

ΠΙΝΑΚΑΣ 3
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Νερό και βρεγμένες επιφάνειες	0,66
Αλουμίνιο κοινό	0,05
Αλουμίνιο οξυδωμένο	0,80
Αλουμίνιο βερνικομένο	0,40
Άργυρος καθαρός	0,03
Σίδηρος κατεργασμένος εν ψυχρώ σε τόρνο	0,40
Σίδηρος οξυδωμένος	0,80
Χυτοσίδηρος (μαντέμι)	0,80
Κιμωλία	0,85
Ασβεστοκονίαμα	0,90
Υδράργυρος	0,18
Τοίχος με τούβλα	0,92
Καπνός	0,94
Ορείχαλκος (μπρούντζος) γιαλισμένος	0,04
Ορείχαλκος ματ	0,20
Χαλκός τραχύς και οξυδωμένος	0,75
Χαλκός γιαλισμένος	0,10
Άμμος	0,75
Γυαλί	0,90
Ψευδάργυρος (τσίγκος) και ψευδαργύρωση	0,20 – 0,30
Ξύλο γιαλισμένο	0,80

Σύμφωνα με το ***ΝΟΜΟ STEFAN και BOLTZMAN***, η ικανότητα ακτινοβολίας ενός σώματος για τη μονάδα επιφάνειας και για τη μονάδα του χρόνου, δίδεται από τη σχέση :

$$\boxed{\varphi = C_i \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4} \quad \left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h}\right) \quad \textbf{(39)}$$

και για μια επιφάνεια Α (m^2) :

$$\boxed{\Phi = C_i \cdot A \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4} \left(\frac{kcal}{h}\right) \qquad \textbf{(40).}$$

Οι προηγούμενες σχέσεις γράφονται και :

$$\boxed{\varphi = \sigma \cdot (T)^4} \quad \left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h}\right) \quad \textbf{(41)} \qquad \text{και} \quad \boxed{\Phi = \sigma \cdot A \cdot (T)^4} \quad \left(\frac{kcal}{h}\right) \quad \textbf{(42),}$$

θέτοντας : $\boxed{\sigma = C_i \cdot \left(\frac{1}{100}\right)^4}$ **(43)**

όπου σ = χαρακτηριστική σταθερά για το μέλαν σώμα, είναι μια παγκόσμια σταθερά δηλαδή εξαρτάται μόνο από τις μονάδες που επιλέγονται για Φ και Τ.

Ο συντελεστής σ είναι (μέγιστος για το μέλαν σώμα) ίσος με $4{,}96 \cdot 10^{-8}$ $\left(\dfrac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot {}^0K^4}\right)$ και στην περίπτωση που η ικανότητα ακτινοβολίας Φ είναι σε Watt και η θερμοκρασία Τ σε ${}^0K$ η τιμή είναι $5{,}76 \cdot 10^{-8}$ $\left(\dfrac{Watt}{m^2 \cdot {}^0K^4}\right)$.

Για τα ***φαιά σώματα***, το ποσό θερμότητας δίδεται από τη σχέση :

$$\boxed{\Phi = a \cdot \sigma \cdot T^4} \left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h}\right) \quad \textbf{(44)}$$

Στην περίπτωση των λεβήτων για το γινόμενο ($a \cdot \sigma$) λαμβάνεται τιμή :

$$\boxed{a \cdot \sigma = \left(3{,}5 - 4{,}5\right) \cdot 10^{-8}} \left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot {}^0K}\right) \quad \textbf{(45).}$$

Επίπεδα παράλληλα

Η πιο απλή περίπτωση που περισσότερο συναντάται στην πράξη, είναι εκείνη δύο παράλληλων αντικριστών επιπέδων που ανταλλάσουν θερμότητα με ακτινοβολία.

Έστω Α και Β δύο παράλληλα επίπεδα που χαρακτηρίζονται από α_1 και α_2 αντίστοιχους συντελεστές ακτινοβολίας, T_1 και T_2 αντίστοιχες θερμοκρασίες σε ${}^0K$ οι οποίες θεωρούνται σταθερές στο χρόνο, και το μέσον που ευρίσκεται μεταξύ των δύο επιφανειών διαπερατό στις θερμικές ακτινοβολίες. Θεωρούνται επίσης φαιές οι επιφάνειες.

Με αυτές τις συνθήκες, το ποσό θερμότητας που μεταδίδεται με ακτινοβολία, στη μονάδα του χρόνου και στη μονάδα επιφάνειας, είναι :

$$\boxed{\Phi_{AB} = \frac{\sigma \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\dfrac{1}{a_1} + \dfrac{1}{a_2} - 1}} \quad \textbf{(46)}$$

Γενική περίπτωση

Στη γενική περίπτωση μεταξύ δύο σωμάτων που ευρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, το ποσό θερμότητας στη μονάδα του χρόνου και στη μονάδα επιφάνειας που μεταδίδεται με ακτινοβολία, δίδεται από τη σχέση :

$$\boxed{\Phi = F_a \cdot \sigma \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right)} \left(\frac{kcal}{h}\right) \quad \textbf{(47)}$$

όπου F_a ονομάζεται **συντελεστής σχήματος** στον υπολογισμό του οποίου (υπολογισμός πολύ δύσκολος σε κάθε διαφορετική περίπτωση) λαμβάνεται υπ' όψιν ο αμοιβαίος προσανατολισμός των σωμάτων που ανταλλάσσουν θερμότητα, οι συντελεστές απορρόφησης, οι συνεχείς αντανακλάσεις στα μη φαιά σώματα κ.λ.π.

Στην ειδική περίπτωση που τα δύο σώματα είναι ομόκεντρες σφαίρες ή ομοαξονικούς κυλίνδρους, ο συντελεστής σχήματος λαμβάνει τις εξής τιμές :

- *κανονική ανάκλαση* : $\boxed{F_a = \dfrac{1}{\dfrac{1}{a_1} + \dfrac{1}{a_2} - 1}}$ **(48)**

- *πλήρης διάχυση* : $\boxed{F_a = \dfrac{1}{\dfrac{1}{a_1} + \dfrac{S_1}{S_2} \cdot \left[\dfrac{1}{a_2} - 1 \right]}}$ **(49),** όπου S_1 και S_2 τα εμβαδά των δύο επιφανειών που ανταλλάσσουν θερμότητα.

Ο νόμος *STEFAN και BOLTZMAN* ισχύει και για τις ***φλόγες*** που έχουν ικανότητα ακτινοβολίας αρκετά υψηλή. Για φλόγα που προέρχεται από καύση πετρελαίου μπορεί να θεωρηθεί ένας συντελεστής ακτινοβολίας περίπου ίσο με 4 και για φλόγες που οφείλονται στην καύση του κάρβουνου, ειδικά όταν είναι τριμμένο, ο συντελεστής C_i λαμβάνεται περίπου ίσος με 4,5.

Τα ***καυσαέρια*** έχουν αυξημένη ικανότητα ακτινοβολίας αλλά για αυτά δεν ισχύει ο προηγούμενος νόμος. Ακτινοβολούν μεγάλη ποσότητα θερμότητας το διοξείδιο του άνθρακα και ο ατμός νερού σε υψηλή θερμοκρασία.

Σύμφωνα με τον Schack, η ενέργεια ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα στρώμα αερίου είναι ανάλογη με τη θερμοκρασία, με την πίεση του αερίου και το πάχος του στρώματος. Η προτεινόμενη σχέση για τον υπολογισμό της θερμότητας που ακτινοβολείται από θερμά αέρια του CO_2 και H_2O είναι :

$$\boxed{\Phi = k \cdot A \cdot \left(t_g - t_p\right)} \left(\frac{kcal}{h}\right) \quad \textbf{(50)}$$

όπου : A = επιφάνεια ακτινοβολίας (m^2)

k = συντελεστής ακτινοβολίας σε $\left(\dfrac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot {}^0C}\right)$

t_g = θερμοκρασία των αερίων σε ${}^0C$

t_p = θερμοκρασία της επιφάνειας ακτινοβολίας σε ${}^0C$

Ο συντελεστής ακτινοβολίας των αερίων μπορεί να θεωρηθεί ίσος με το άθροισμα των αντίστοιχων συντελεστών του διοξειδίου του άνθρακα και των ατμών νερού :

$$k = k^{'} + k^{''}$$

Για τον υπολογισμό αυτών των συντελεστών υπάρχουν εμπειρικές σχέσεις. Λαμβάνεται όμως μια μέση τιμή του k που κυμαίνεται μεταξύ $(20-30)$ $\left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot {}^0C}\right)$.

Παράδειγμα 1

Να υπολογισθεί το ποσό θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου, που μεταδίδεται δια ακτινοβολίας μεταξύ των επίπεδων και παράλληλων επιφανειών δύο τοίχων από τούβλα, η μια σε θερμοκρασία 1000 ${}^0K$ και η άλλη σε θερμοκρασία 300 ${}^0K$.

Λύση

Το ποσό θερμότητας δίδεται από τη σχέση (46), δηλαδή : $\Phi_{AB} = \frac{\sigma \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} - 1}$.

Από τον πίνακα (3) προκύπτει α = 0,92

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι $α_1 = α_2 = α$, η προηγούμενη σχέση γράφεται :

$$\Phi_{AB} = \frac{\sigma \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{2}{a} - 1} = \frac{4,96 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1000^4 - 300^4\right)}{\frac{2}{0,92} - 1} = 41900 \left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h}\right)$$

Παράδειγμα 2

Στο προηγούμενο παράδειγμα, αντικαθιστώντας την επιφάνεια από τούβλα με μικρότερη θερμοκρασία με μια πλάκα από αλουμίνιο στην ίδια θερμοκρασία των 300 ${}^0K$, το ποσό θερμότητας δια ακτινοβολίας είναι :

$\Phi_{AB} = \frac{\sigma \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} - 1}$. Από τον πίνακα)3) είναι : $α_1 = 0,05$ (αλουμίνιο) και $α_2 = 0,92$ (τούβλα), οπότε είναι :

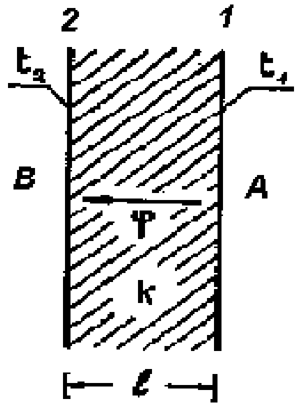
$$\Phi_{AB} = \frac{\sigma \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} - 1} = = \frac{4,96 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1000^4 - 300^4\right)}{\frac{1}{0,92} + \frac{1}{0,05} - 1} = 2460 \left(\frac{kcal}{m^2 \cdot h}\right)$$

Στην περίπτωση αυτή το ποσό θερμόητας είναι κατά πολύ μικρότερο από αυτό του προηγουμένου παραδείγματος.

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΑ ΑΠΌ ΔΥΟ ΡΕΥΣΤΑ

Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ δυο ρευστών που χωρίζονται από ένα τοιχώμα, είναι μια περίπτωση που συχνά παρουσιάζεται στην πράξη.
Αναφέρεται σαν παράδειγμα, οι καπνοί της καύσης και υγρό προς ατμοποίηση σε ένα λέβητα όπου τα δυο συστήματα χωρίζονται από σωλήνες, ή τα εξωτερικά τοιχώματα ενός λέβητα που χωρίζουν τους καπνούς από τον αέρα του περιβάλλοντος.

Έστω A και B τα δύο ρευστά σε θερμοκρασία t_1 και $t_2 < t_1$ που χωρίζονται από ένα τοίχωμα αποτελούμενο από δύο όψεις επίπεδες και παράλληλες με πάχος l , αγωγιμότητα k και υλικό ομογενές και ισότροπο (δηλαδή αγωγιμότητα k κατανεμημένη ομοιόμορφα).



ΣΧΗΜΑ 93

Γίνεται ακόμα η υπόθεση ότι οι θερμοκρασίες είναι σταθερές στο χρόνο, και ομοιόμορφα κατανεμημένες στα ρευστά.

Το ρευστό A ανταλλάσσει με την όψη 1 θερμότητα δια συναγωγής. Το τοίχωμα 1 όμως ανταλλάσσει θερμότητα δια ακτινοβολίας με τα γύρω ευρισκόμενα σώματα. Η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία θα είναι μηδέν εάν δεν υπάρχουν άλλα σώματα ή εάν το μέσον A που βρίσκεται μεταξύ τοιχώματος και γύρω σωμάτων είναι αδιαπέραστο στις ακτινοβολίες (π.χ. υγρό). Επομένως θα λάβει χώρα μια ανταλλαγή θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία μεταξύ της όψης 1 και του περιβάλλοντος (που εδώ αποτελείται από το ρευστό A και τα γύρω σώματα). Η ροή θερμότητας θα είναι το άθροισμα των ροών του κάθε φαινομένου.

Από την όψη 1 η θερμότητα μεταδίδεται δια αγωγής μέσω του υλικού του τοιχώματος μέχρι την όψη 2.

Η όψη 2 ανταλλάσσει θερμότητα δια συναγωγής με το ρευστό B και δια ακτινοβολίας με τα γύρω ευρισκόμενα σώματα.

Συνεπώς, λαμβάνουν χώρα και οι τρεις τρόποι μετάδοσης της θερμότητας.

Έχοντας υποθέσει τις θερμοκρασίες σταθερές στο χρόνο, η θερμοκρασία στο εσωτερικό του τοιχώματος θα είναι σταθερή για κάθε ισόθερμη επιφάνεια του τοιχώματος, αν και διαφορετική για κάθε επιφάνεια.

Επομένως η εισερχόμενη ροή θερμότητας θα είναι ίση με την εξερχόμενη.

Θερμότητα δια συναγωγής : $\Phi_{\sigma\upsilon\nu} = a_{\sigma\upsilon\nu} \cdot \left(t_f - t_p\right) \quad \left(\dfrac{kcal}{m^2 \cdot h}\right)$ **(51)**

όπου t_f = θερμοκρασία του ρευστού, σε ^0C

t_p = θερμοκρασία της όψης του τοιχώματος, σε ^0C

Θερμότητα δια ακτινοβολίας : $\boxed{\Phi_{\alpha\kappa\tau} = F_a \cdot \sigma \cdot \left(T_C^4 - T_P^4\right)} \quad \left(\dfrac{kcal}{m^2 \cdot h}\right)$ **(52)**

όπου T_C = απόλυτη θερμοκρασία των γύρω σωμάτων, σε ^0K

T_P = απόλυτη θερμοκρασία της όψης του τοιχώματος, σε ^0K

Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία T_C είναι διαφορετική από την θερμοκρασία του ρευστού που βρίσκεται σε επαφή και με το τοίχωμα και με τα γύρω σώματα. Σε πολλές περιπτώσεις οι θερμοκρασίες του ρευστού και των γύρω ευρισκομένων σωμάτων μπορεί να θεωρηθούν ίσες αλλά η διαφορετική διατύπωση των σχέσεων υπολογισμού των ροών θερμότητας επιβάλλει τον ξεχωριστό υπολογισμό.

Ορίζοντας :

- α_k = συντελεστή ακτινοβολίας,
- $\alpha_{o\lambda.}$ = συνολικός συντελεστής συναγωγής – ακτινοβολίας = $a_{\alpha\alpha\kappa\tau} + a_{\sigma\upsilon\nu}$

Ο υπολογισμός της ολικής ροής $\Phi_{o\lambda.} = \Phi_{\sigma\upsilon\nu} + \Phi_{\alpha\kappa\tau}$, διευκολύνεται εάν μπορεί να εκφραστεί η ροή λόγω ακτινιβολίας $\Phi_{\alpha\kappa\tau} = F_a \cdot \sigma \cdot \left(T_C^4 - T_P^4\right)$ με μια σχέση ανάλογη αυτής που δίδει τη ροή θερμότητας λόγω συναγωγής, δηλαδσή με μια σχέση τύπου :

$\boxed{\Phi_{\alpha\kappa\tau} = \alpha_{\alpha\kappa\tau} \cdot \left(t_c - t_p\right)}$ **(53)**

Για $t_c = t_p$, μπορεί επμένως να υπολογισθεί η συνολική ροή θερμότητας :

$$\Phi_{o\lambda.} = \Phi_{\sigma\upsilon\nu} + \Phi_{\alpha\kappa\tau} = \alpha_{\alpha\kappa\tau.} \cdot \left(t_f - t_p\right) + a_{\sigma\upsilon\nu.} \cdot \left(t_f - t_p\right) = \left(a_{\alpha\kappa\tau} + a_{\sigma\upsilon\nu}\right) \cdot \left(t_f - t_p\right) = a_{o\lambda.} \cdot \left(t_f - t_p\right) \quad \textbf{(54)}$$

Συντελεστής Ακτινοβολίας

Η σχέση (53) προκύπτει από τη σχέση (52) ορίζοντας ένα <u>*συντελεστή θερμοκρασίας*</u> που δίδεται από τη σχέση :

$\boxed{10^8 \cdot \tau = \dfrac{T_C^4 - T_P^4}{T_C - T_P}}$ **(55)** , όπου τ έχει μονάδες απόλυτης θερμοκρασίας στην τρίτη δύναμη.

Από την (55) προκύπτει :

$T_C^4 - T_P^4 = 10^8 \cdot \tau \cdot \left(T_C - T_P\right) = 10^8 \cdot \left(t_c - t_p\right)$ και αντικαθιστώντας στην (52) συγκρλινοντας με την (53), προκύπτει :

$\boxed{a_{\alpha\kappa\tau.} = F_a \cdot \sigma \cdot 10^8 \cdot \tau = F_a \cdot \sigma_r \cdot \tau}$ **(56).**

Η νεά σταθερά σ_r ονομάζεται <u>***μειωμένη σταθερά***</u> και προκύπτει από την απλοποίηση του 10^{-8} της σταθεράς του Stefan με το 10^8 του συντελεστή της θερμοκρασίας και θα είναι :

$$\boxed{\sigma_r = 4{,}96 \left[\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot \left(\dfrac{K}{100}\right)^4}\right]} \quad \textbf{(56α).}$$

Επειδή στην περίπτωση μετάδοσης της θερμότητας μεταξύ ρευστών που χωρίζονται με τοίχωμα, τα γύρω ευρισκόμενα σώματα (που ανταλλάσουν με τις πλευρές του τοιχώματος θερμότητα με ακτινοβολία), αναγάγονται γενικά σε επίπεδα αντικριστά παράλληλα με την όψη, ο συντελεστής F_a είναι :

$$\boxed{F_a = \frac{1}{\dfrac{1}{a_1} + \dfrac{1}{a_2} - 1}} \quad \textbf{(57)}$$

Εάν τα γύρω ευρικόμενα σώματα δεν μπορούν να θεωρηθούν σε επίπεδα παράλληλα, τότε πρέπει ο συντελεστής F_a να υπολογισθε΄λι για κάθε πε΄ριπτωση ξεχωριστά, κάτι βέβαια που είναι μια διαδικασία πολύπλοκη.

Ο συντελεστής τ της (56) μπορεί να εκφραστεί σε συνάρτηση :

- της μέσης θερμοκρασίας $T_m = \dfrac{1}{2} \cdot \left(T_C - T_P\right)$ και
- της διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta T = \left(T_C - T_P\right)$

οπότε είναι : $$\boxed{\tau = 10^{-8}\cdot\frac{T_C^4 - T_P^4}{T_C - T_P} = 10^{-8}\cdot 4\cdot T_m^3\cdot\left[1+\frac{1}{4}\cdot\left(\frac{\Delta T}{T_m}\right)^2\right]} \quad \textbf{(58)}$$

Όταν ο λόγος $\frac{\Delta T}{T_m} < 0{,}2$, η τιμή του τ είναι : $\tau' = 10^{-8}\cdot 4\cdot T_m^3$ θέτοντας $\left[1+\frac{1}{4}\cdot\left(\frac{\Delta T}{T_m}\right)^2\right] = 1$.

Ο *πίνακας 4* δίδει τις τιμές του $\tau' = f\left(T_m\right)$ $\left({}^0C\right)$, ενώ ο *πίνακας 5* δίδει τη διορθωτική τιμή $\left[1+\frac{1}{4}\cdot\left(\frac{\Delta T}{T_m}\right)^2\right]$ με την οποία πρέπει να πολλαπλασιαστεί ο τ' στην περίπτωση που $\frac{\Delta T}{T_m} > 0{,}2$.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 *του συντελεστή θερμοκρασίας* $\tau' = f\left(T_m\right)$ $\left({}^0C\right)$

t_m $\left({}^0C\right)$	τ'	t_m $\left({}^0C\right)$	τ'	t_m $\left({}^0C\right)$	τ'	t_m $\left({}^0C\right)$	τ'
-20	0,65	45	1,29	140	2,82	290	7,14
-16	0.68	50	1,35	150	3,03	300	7,53
-12	0,71	55	1,41	160	3,25	320	8,34
-8	0,74	60	1,48	170	3,48	340	9,21
-4	0.78	65	1,54	180	3,72	360	10,15
0	0,81	70	1,61	190	3,97	380	11,14
4	0,85	75	1,69	200	4,23	400	12,19
8	0,89	80	1,76	210	4,51	430	13,90
12	0,93	85	1,84	220	4,79	460	15,70
16	0,97	90	1,91	230	5,09	490	17,80
20	1,01	95	1,99	240	5,40	520	19,70
25	1,06	100	2,08	250	5,72	560	23,10
30	1,11	110	2,25	260	6,06	600	26,60
35	1,17	120	2,43	270	6,40	650	31,50
40	1,23	130	2,62	280	6,76	700	36,90

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 *για διόρθωση του συντελεστή θερμοκρασίας* $\tau' = f\left(T_m\right)$ $\left({}^0C\right)$

$\frac{\Delta T}{T_m}$	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$\left[1+\frac{1}{4}\cdot\left(\frac{\Delta T}{T_m}\right)^2\right]$	1,01	1,04	1,06	1,09	1,12	1,16	1,20	1,30	1,36	1,42	1,49	