ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

8.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΕ ΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της αγωγής σε τοίχωμα κυλίνδρου μηχανής (σχήμα 8.1α) μπορεί να μελετηθεί μέσα από την μελέτη της μετάδοσης θερμότητος δια αγωγής σε μια πλάκα απείρων διαστάσεωνν. Πχ στο x=0 (εσωτερικό τοίχωμα χιτωνίου, σχήμα 8.1β) μια ροή θερμότητος με μια περιοδική συνιστώσα εφαρμόζεται στην πλάκα και σε x=L (εξωτερικό τοίχωμα χιτωνίου) η θερμοκρασία της επιφανείας διατηρείται σταθερή (δια ψύξης, π.χ. Ferguson (1986), Rogowski (1953), Judge (1972)). Το πρόβλημα αυτό απαιτεί λύση της εξίσωσης:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad (8.1)$$

με τις ακόλουθες οριακές συνθήκες:

$$-k\frac{\partial T}{\partial x} = q_0'' + q_1'' \sin(\omega t) \quad \sigma\tau o \quad x = 0 \qquad (8.2)$$

$$T = T_L \qquad \sigma\tau o \quad x = L \ (\,\beta\alpha\theta o\varsigma\ L) \qquad (8.3)$$

μαζί με μια αρχική συνθήκη:

$$T = T_i(x) \qquad \sigma\varepsilon \ \ t = 0 \qquad (8.4)$$

Μια προσεγγιστική λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να δοθεί για τις περιπτώσεις όπου:

$$\omega t \ll 1 \ \kappa\alpha\iota \ \frac{\omega L^2}{2\alpha} \ll 1 \qquad (8.5)$$

με το προκύπτον θερμοκρασιακό πεδιό εκφραζόμενο ως:

$$T = T_L + \frac{q_{0''}}{k}\left(1 - \frac{x}{L}\right) + \frac{q_{1''}}{\sqrt{2}k}\exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\,x\right)\sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\,x - \frac{\pi}{4}\right) \qquad (8.6)$$

οπου τα $q_0^{''}$, $q_1^{''}$ προκυπτουν απο τους υπολογισμους του κυκλου (Ferguson, 1986).

Η λύση αυτή δείχνει ότι:

1) Η θερμοκρασία επιφανείας στο x=0 ταλαντώνεται με την ίδια συχνότητα με την εφαρμοζόμενη ροή θερμότητας αλλά με διαφορά φάσεως π/4.
2) Το εύρος της ταλάντωσης ελαττώνεται εκθετικά με την απάσταση x απο την επιφάνεια και έχει ελαττωθεί στο 10% εκείνου της εσωτερικής επιφάνειας σε ένα βάθος:

$$l = -\ln(0.10)\sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = 2.3\sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \qquad (8.7)$$

Για μια μηχανή εργαζόμενη με 2000 rpm (ω=209 s^{-1}) και κατασκευασμένη απο χυτοσίδηρο (α=21x10^{-6} m^2/s) το μήκος αυτό είναι μάλλον μικρό, l=1.00 mm. Για αλουμίνιο l=2.2 mm και για μερικώς σταθεροποιημένα zirconia (κεραμικό που χρησιμοποιείται σε πρωτότυπες μηχανές σαν μόνωση) l=0.7 mm. Το μέγεθος l ειναι ένα μέτρο του πόσο βαθειά στο υλικό του χιτωνίου του κυλίνδρου διεισδύουν οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας (ή της ροής θερμότητας σε σχέση πάντα με την μέση τιμή, σχήμα 8.1γ). Για βάθη μεγαλύτερα του l η κατανομή της θερμοκρασίας ειναι ουσιαστικά σταθερή και ίση με την μέση θερμοκρασία (η οποία προέρχεται απο την μέση ροή θερμότητας). Εν γένει το μήκος l είναι μικρό σε σύγκριση με τις κύριες διαστάσεις που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς της αγωγής (b, παχύτης χιτωνίου κλπ.) και μπορούν να γίνουν οι παρακάτω δυο απλοποιήσεις: 1) Η μεταφορά θερμότητας δι' αγωγής θεωρείται μόνιμη και προερχόμενη απο την μέση ροή θερμότητος και 2) Η μεταφορά θερμότητος δια μεταβιβάσεως λόγω της κίνησης του αερίου μπορεί να συνδυασθεί με την μεταφορά δι' αγωγής συμπεριλαμβάνοντας μια μόνο χωρητικότητα (C_1) κατα το μηκος διεισδυσης l και εν σειρά μια αντίσταση υπολογιζόμενη για μόνιμη κατάσταση. Το ανωτέρω ηλεκτρικό ανάλογο για την μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητος παρίσταται στο σχήμα

8.1δ. Το στρώμα διείσδυσης (l) περιπλέκεται απο την παρουσία επιστρώσεων λαδιού ή επικαθήσεων αλλά ένα πιο πολύπλοκο μοντέλλο εν γένει δεν είναι απαραίτητο μια και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας γύρω απο την $\overline{T}_l$ ειναι πολύ μικρότερες της θερμοκρασιακής διαφοράς T_g-$\overline{T}_l$ (βλεπε σχημα 8.1). Το l θεωρείται μικρό όταν η μηχανή εργάζεται υπο σταθερές και υψηλές στροφές. Οταν η μηχανή επιβραδύνεται ή επιταχύνεται το μήκος διεύσδυσης είναι αισθητά μεγαλύτερο και συνεπώς ανάλυση του πλήρους κύκλου λειτουργίας της μηχανής πρέπει εν γένει να συμπεριλέβει την ασταθή αγωγή.

8.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΕΠΑΦΗ

Εδώ εμπειρικοί και ημιεμπειρικοί συσχετισμοί δίδουν τον αριθμό Nu συναρτήσει των αριθμών Re και Pr οπως και στις γενικώτερες περιπτώσεις μετάδοσης δια μεταβιβάσεως (convective heat transfer, σχήμα 8.2). Ενας συσχετισμός, Taylor (1968, 1977), που χρησιμοποιείται είναι (για ενα μέσο, ως προς τον χρόνο, αριθμό Nu):

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}_g\, b}{k_g} = 10.4\, Re^{0.75} \qquad (8.8)$$

οπου οι αριθμοί Nu και Re ειναι βασισμενοί στην διάμετρο του κυλίνδρου b. Η ταχύτητα που ορίζει τον Re βασίζεται στην παροχή αερίων ανα μονάδα διατομής του εμβόλου.

$$Re = \frac{(\dot{m}_\alpha + \dot{m}_f)\, b}{A_p\, \mu_g} \quad \kappa\alpha\iota \quad \left(D_r = \frac{\dot{m}_\alpha}{\rho_\infty V_d} \right) \qquad (8.9)$$

Η ανωτέρω εξίσωση είναι πιο ευκολόχρηστη εαν γραφεί ως:

$$Re = \begin{cases} \dfrac{D_r}{4} \dfrac{\rho_\infty \overline{U}_p\, b}{\mu_g}(1+F) & 4/\chi\rho o\nu\eta \\[2ex] \dfrac{D_r}{2} \dfrac{\rho_\infty \overline{U}_p\, b}{\mu_g}(1+F) & 2/\chi\rho o\nu\eta \end{cases}$$

Εκτός απο το ρ_∞ όλες οι άλλες ιδιότητες του αερίου (g) υπολογίζονται στην μέση ενεργό θερμοκρασία, $\overline{T}_g$. Η ροή θερμότητας τότε είναι:

$$\dot{Q}_l = \overline{h}_g A_p (\overline{T}_g - T_w) \qquad (8.11)$$

όπου $A_p = \frac{1}{4}\pi b^2$.

Η ανωτέρω προσέγγιση με ένα μέσο (χρονικά: 0-4π) συντελεστή μεταβίβασης, $\overline{h}_g$, για την συνολική μετάδοση θερμότητος δια μεταβίβασης ειναι κατάλληλη για την αρχική εκτίμηση της επίδρασης της ταχύτητας του εμβόλου επι των απωλειών θερμότητας λόγω μεταβίβασης.

Πίνακας 8.1 Τύποι συντελεστών μεταφοράς θερμότητος που χρησιμοποιούνται για τον κύλινδρο μηχανής

	Τρόπος που λαμβάνεται ο μέσος συντελεστής	Χρήση για
$\overline{h}$ (x,t)	Χρονικά και χωρικά μέσος	Υπολογισμό χρονικά μόνιμου ενεργειακού ισολογισμού
$\boldsymbol{h}(\overline{x},t)$	Στιγμιαίος στο χρόνο, χωρικά μέσος	Υπολογισμό μεταφοράς θερμότητος συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου
$\boldsymbol{h}$(x,t)	Στιγμιαίος στο χρόνο και τοπικός	Τοπικούς υπολογισμούς θερμικών τάσεων

Εν γένει ο συντελεστής μετάδοσης δια μεταβίβασης, h, μεταβάλλεται απο θέση σε θέση και εξαρτάται απο τον χρόνο της μηχανής. Στους σύγχρονους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται συσχετισμοί που συνδέουν ενα στιγμιαίο χωρικό μέσο συντελεστή h και ενας τέτοιος ημιεμπειρικός συσχετισμός είναι του Woschni (1967) (αναφέρεται στον Taylor (1968, 1977)) όπου οι Nu, h_g ειναι συναρτήσεις του χρόνου:

$$Nu = \frac{h_g b}{k_g} = 0.035 \left(\frac{U_{m,g} b}{\nu_g} \right)^{0.8} \qquad (8.12)$$

οπου στον Re υπεισέρχεται η ταχύτητα των καυσαερίων (ή αερίων),

$U_{m,g}$,και υπολογίζεται ως εξής:

Όταν οι βαλβίδες είναι κλειστές

$$U_{m,g}\left(\frac{m}{s}\right)=2.28\,\overline{U}_p+0.00324\,\frac{T_0 V}{V_0}\,\frac{\Delta P_c}{P_0} \qquad (8.13)$$

οπου $\overline{U}_p=\dfrac{\omega s}{\pi}$ η μέση ταχύτης εμβόλου

T_0= η θερμοκρασία στον κύλινδρο κατα το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής (K)

V_0= ο όγκος του κυλίνδρου κατα το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής

V= ο στιγμιαίος όγκος του κυλίνδρου = V(θ)

ΔP_c= η στιγμιαία αύξηση της πίεσης στον κύλινδρο λόγω καύσης που υπολογίζεται σαν την πίεση στον κύλινδρο κατα την καύση μείον την πίεση που επικρατεί στον κύλινδρο χωρις καύση αλλά με το έμβολο στην ίδια θέση (δηλαδή στην ίδια γωνία του στροφάλου). Η δεύτερη πίεση υπολογίζεται με την χρήση της σχέσης ισεντροπικής συμπίεσης, $PV^{\gamma}=P_0V_0^{\gamma}=ct$.

P_0= η πίεση κατα το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής.

Όταν οι βαλβίδες είναι ανοικτές

$$U_{m,g}=6.18\,\overline{U}_p \qquad (8.14)$$

Χρησιμοποιώντας τις θερμοκρασίες, T_g, και τους συντελεστές, h_g, απο τον υπολογισμό ενος κύκλου της μηχανής υπολογίζουμε μια μέση χρονικά θερμοκρασία

$$\overline{T}_g=\frac{1}{4\pi \overline{h}_g}\int_0^{4\pi} h_g\,T_g\,d\theta \qquad (8.15)$$

και ενα μέσο χρονικά συντελεστή μεταφοράς θερμότητος

$$\overline{h}_g=\frac{1}{4\pi}\int_0^{4\pi} h_g\,d\theta \qquad (8.16)$$

Οι απώλειες θερμότητας λόγω μεταβίβασης είναι επίσης σημαντικές στον σχεδιασμό των εξαγωγών ιδιαίτερα σε μηχανές με καταλυτικούς μετατροπείς ή στροβιλοπλήρωση. Οι Hires και Pochmara (1976) (αναφορά Ferguson, 1986) συσχέτισαν αριθμούς Nu και Re για μια σειρά οπών (όπως στο σχ. 8.3) με Nu τον στιγμιαίο Nu

$$Nu = 0.158\, Re^{0.8} \qquad (8.17)$$

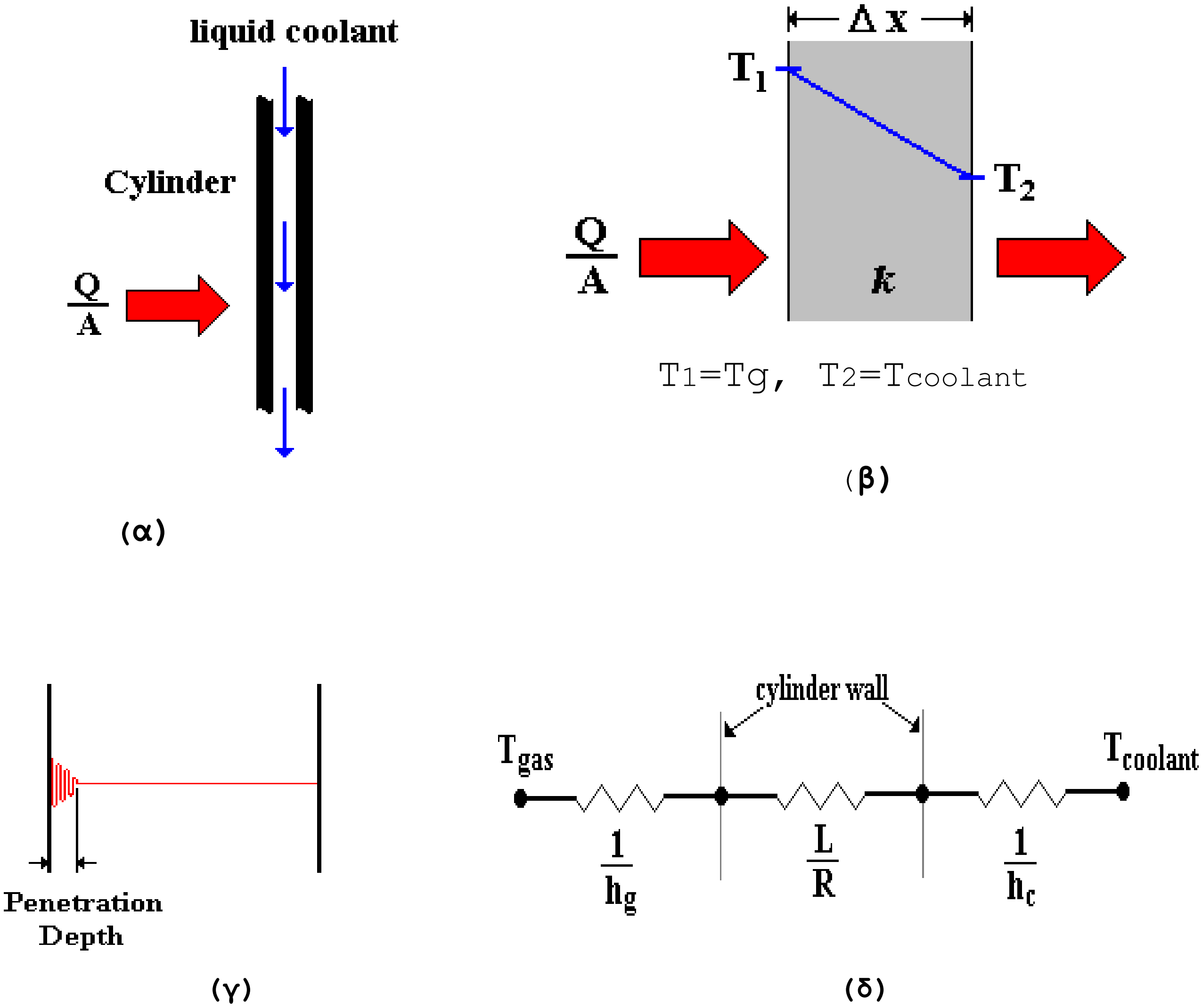
όπου $Re = \left(\dfrac{\dot{m}\, d}{\mu\, A} \right)$, με $\dot{m}$ τη στιγμιαία παροχή, d=λαιμός διατομής, A=διατομή εξόδου (ιδε σχήμα 8.3) και το μ αναφέρεται στα καυσαεριa. Οι Malchow, Sorenson και Buckius (1979) (αναφορά Ferguson, 1986) συσχέτισαν τον χωρικά και χρονικά μεσο $\overline{Nu}(\eta\ \bar{h})$17 για αγωγούς εξάτμισης κυκλικής διατομής με $\dfrac{D_e}{L_e} = 0.3$ ως:

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}\, D_e}{k_g} = 0.0483\, Re^{0.783} \qquad (8.18)$$

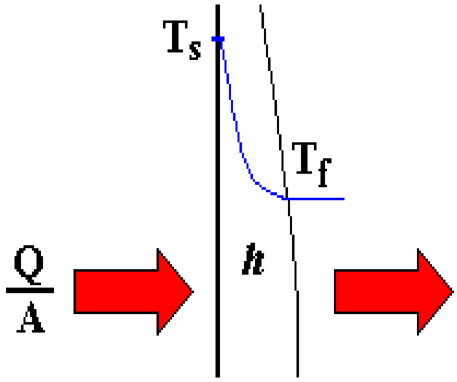
Η μετάδοση δια ακτινοβολίας συμμετέχει στο συνολικό μεταφερόμενο ποσοστό θερμότητος αθροιστικά:

$$\frac{Q}{A} = h(T_g - T_w) + \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_w^4) \qquad (8.19)$$

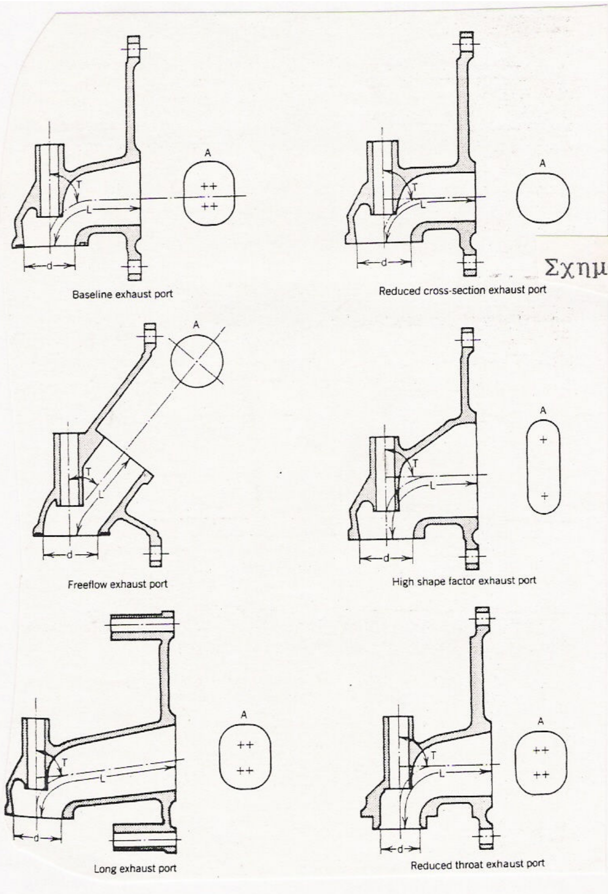
όπου ε=emmisivity και σ=σταθερα Stefan-Boltzman. Η μετάδοση δια ακτινοβολίας ειναι μικρό ποσοστό του συνολικού μεταφερόμενου ποσού και εν γένει οι ημιεμπειρικοί συσχετισμοί περιέχουν σταθερές που συμπεριλαμβάνουν αυτήν την μικρή συνεισφορά) στις μηχανές που εργάζονται με ομοιογενές μίγμα (χωρίς έγχυση). Στις Diesel λόγω παρουσίας σωματιδίων που ακτινοβολούν έντονα σε ολο το φάσμα η μεταφορά δια ακτινοβολίας συμπεριλαμβάνεται μέσω της εξ. 8.19 με ε=0.58. Το θέμα της μετάδοσης θερμότητος σε μηχανές είναι αντικείμενο συνεχιζόμενης έρευνας και συνεχώς νέοι συσχετισμοί παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία.



Σχήμα 8.1 α), β) Μετάδοση θερμότητος σε τοίχωμα κυλίνδρου, γ) μήκος διείσδυσης ταλάντωσης θερμοκρασίας και δ) αλγεβρικό ανάλογο της μετάδοσης θερμότητος στο χιτώνιο



Σχήμα 8.2 Μετάδοση θερμότητος δια επαφής από τοίχωμα κυλίνδρου



8.3

Σχημα 8.2 Τυπικες οπες εξαγωγης των οποιων ο συντελεστης μεταδοσης θερμοτητας υπολογιζεται απο την εξισωση 8.17