

LNG Train 1 APCI Exchanger Loading in Fairless Hills (USA) – 5 NOV 07

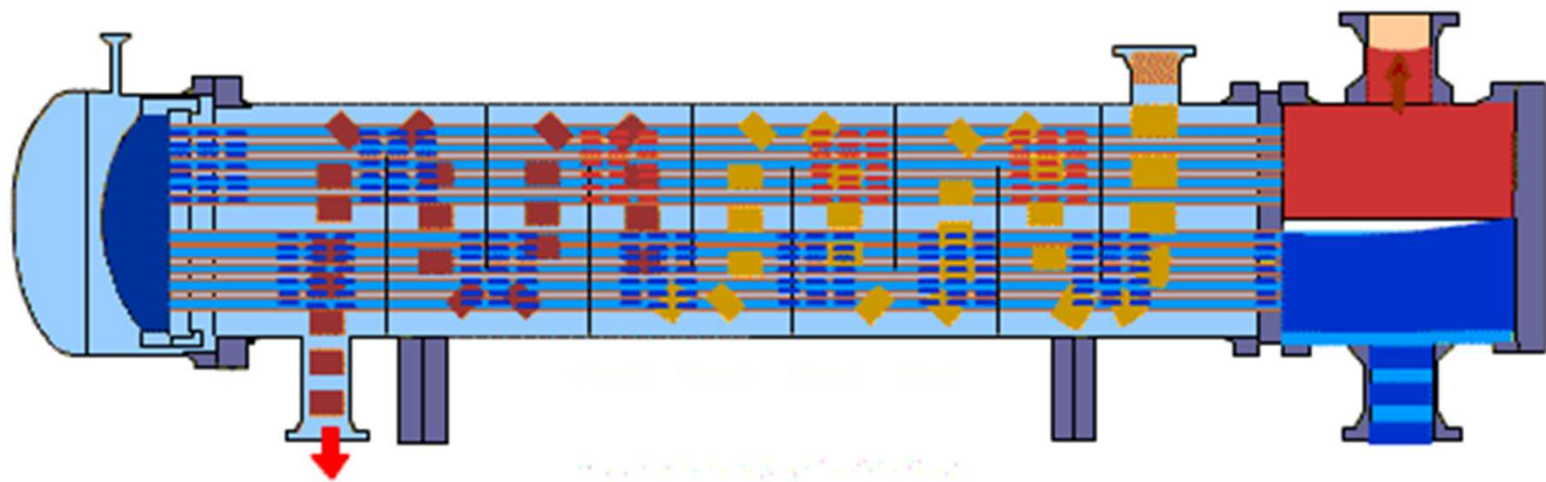


ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΧΡ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

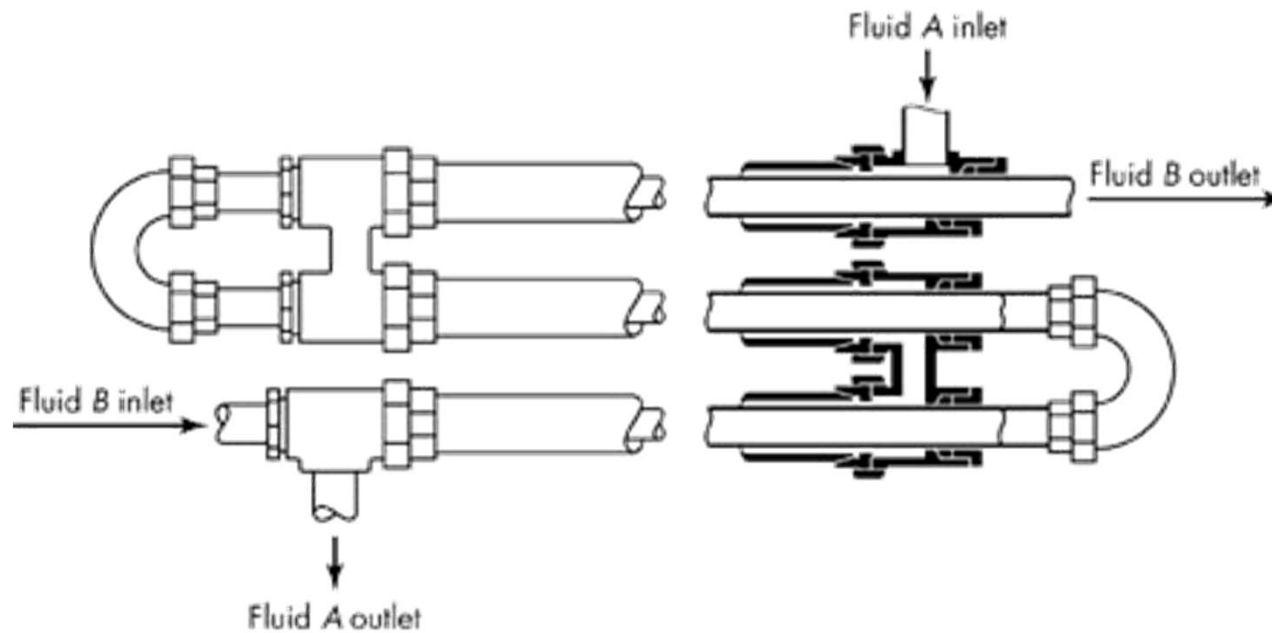
- Εναλλάκτης Θερμότητας είναι μια συσκευή μέσα στην οποία θερμότητα μεταφέρεται από ένα **θερμό** ρέον ρευστό προς ένα **ψυχρό** ρέον ρευστό.
- Αν έχουμε αλλαγή φάσης τότε ο εναλλάκτης ονομάζεται (ανάλογα) συμπυκνωτής, αναβραστήρας (θυμηθείτε Φυσικές Διεργασίες I), εξατμιστήρας, κλπ.



ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ

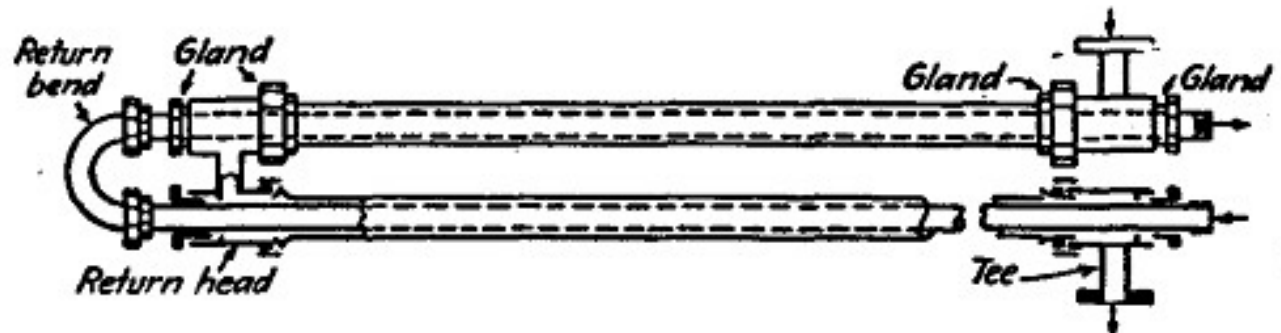
Εναλλάκτης Τύπου Διπλού Αυλού



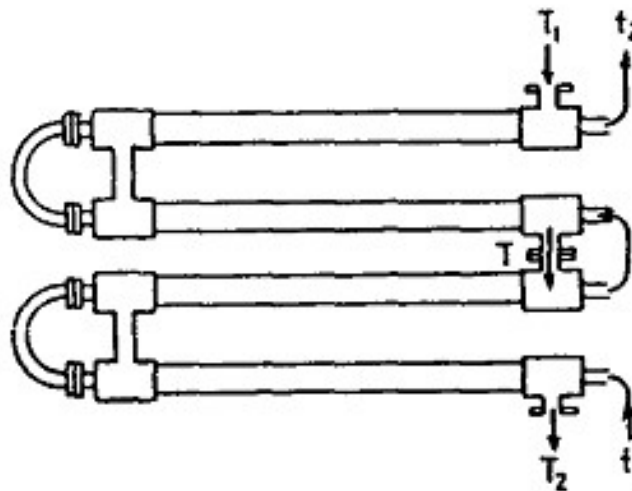
- Τυπικές διαστάσεις:
 - εσωτερικός σωλήνας 1¼ in
 - εξωτερικός σωλήνας 2½ in

- Για $A \lesssim 10 - 12 \text{ m}^2$

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ Εναλλάκτης Τύπου Διπλού Αυλού

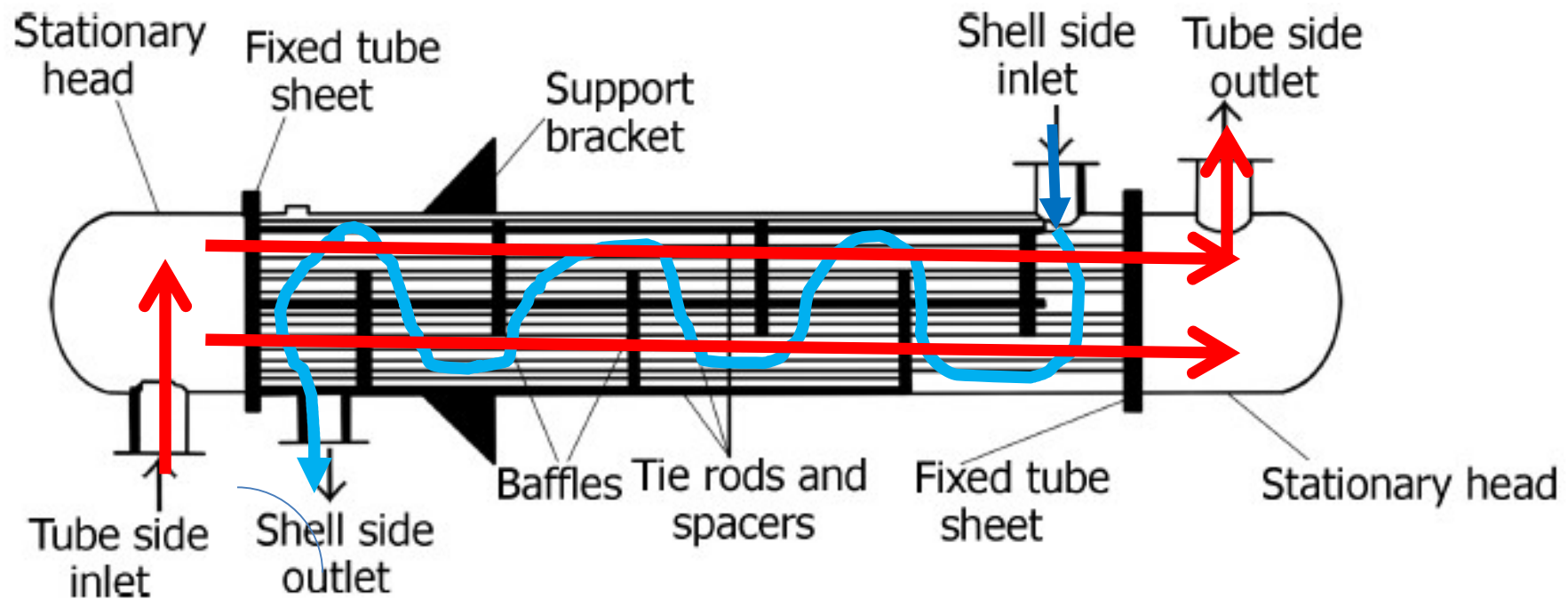


Εναλλάκτης τύπου διπλού αυλού μια “φουρκέτα”



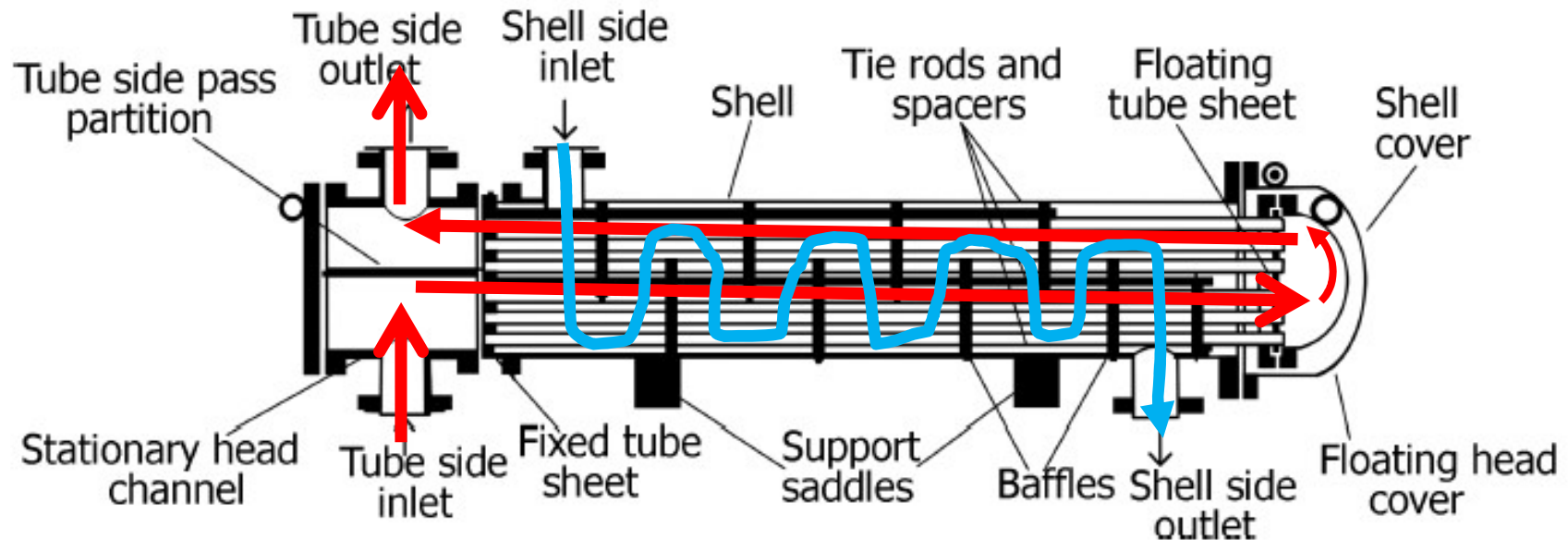
Εναλλάκτης τύπου διπλού αυλού. Δύο φουρκέτες σε σειρά

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ Εναλλάκτης Τύπου κελύφους αυλών



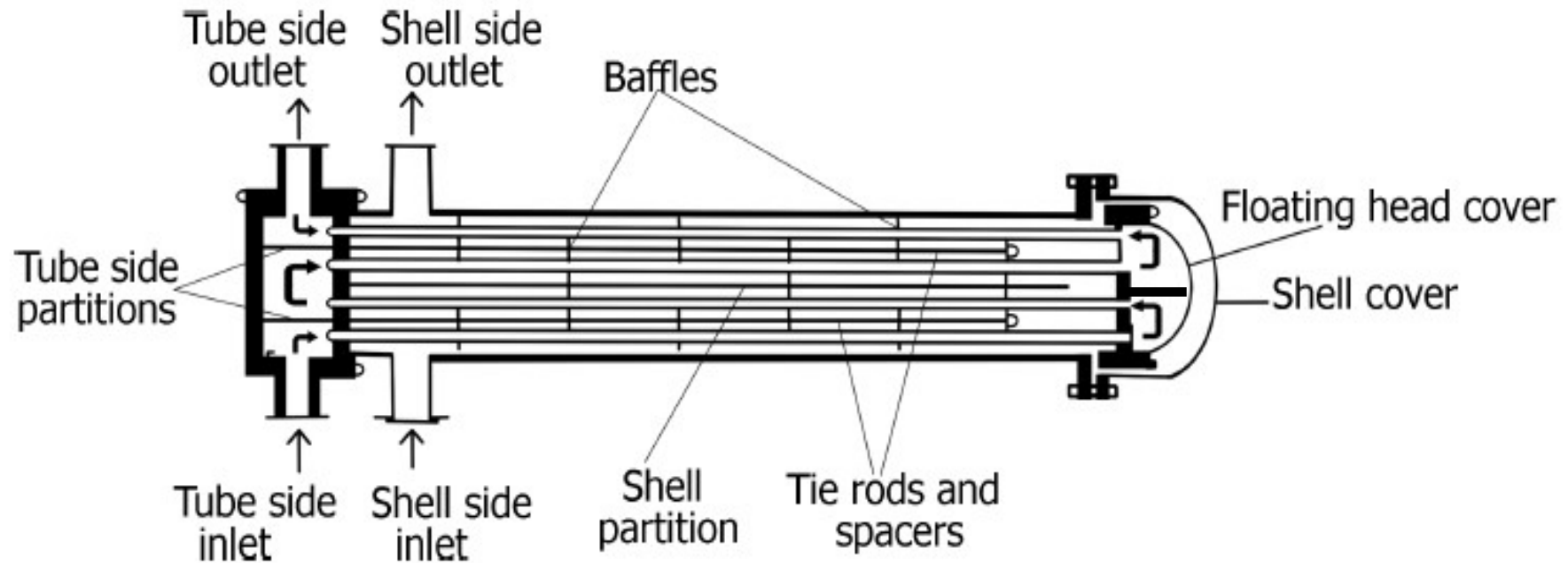
Εναλλάκτης τύπου κελύφους-αυλών με ολισθαίνον τοίχωμα στηρίξεως. [Διάταξη καθαρής αντιρροής](#). Εχουμε ένα πέρασμα του ρεύματος μέσα από το κέλυφος και ένα πέρασμα του άλλου ρεύματος μέσα από τους αυλούς, γι' αυτό ο τύπος αυτός χαρακτηρίζεται ως **1-1**.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ Εναλλάκτης Τύπου κελύφους αυλών



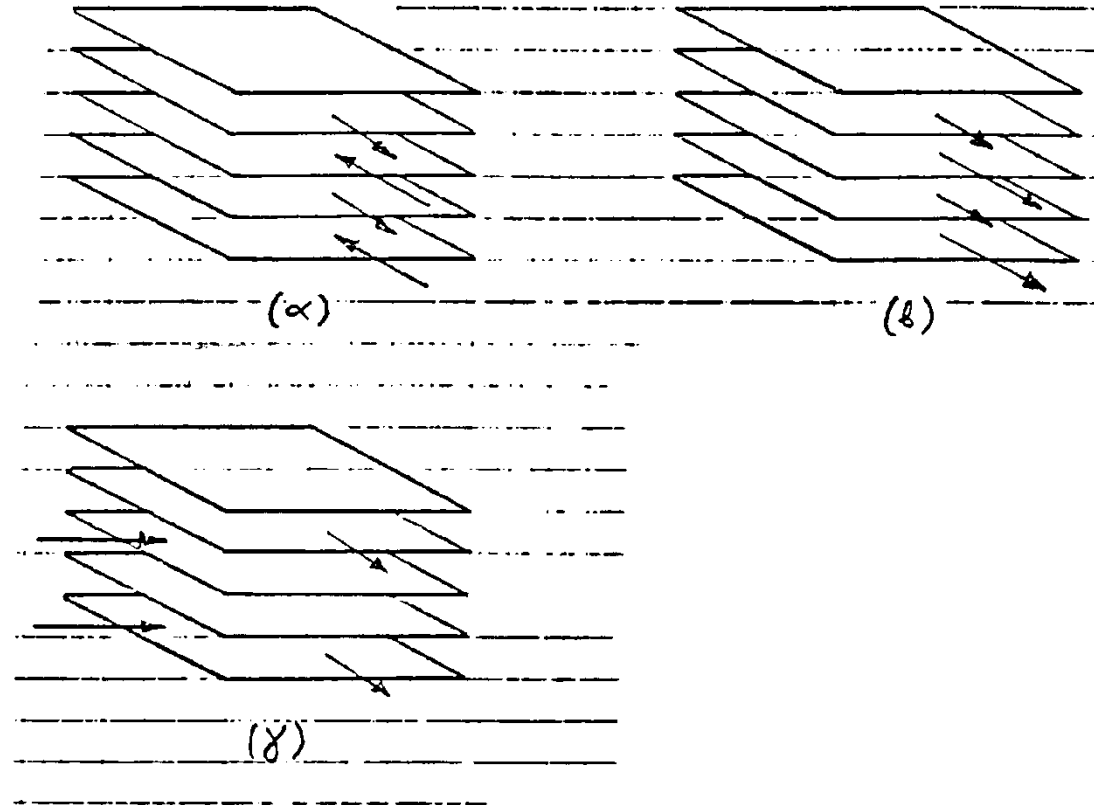
Εναλλάκτης κελύφους-αυλών τύπου **1-2**. Ο τύπος αυτός λειτουργεί **εν μέρει κατ' αντιρροή και εν μέρει κατ' ομορροή**.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ Εναλλάκτης Τύπου κελύφους αυλών



Εναλλάκτης κελύφους-αυλών τύπου **2-4** (δύο περάσματα στο κέλυφος, τέσσερα περάσματα στους αυλούς) με ολισθαίνον τοίχωμα στηρίξεως.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ
Εναλλάκτης με επίπεδα τοιχώματα

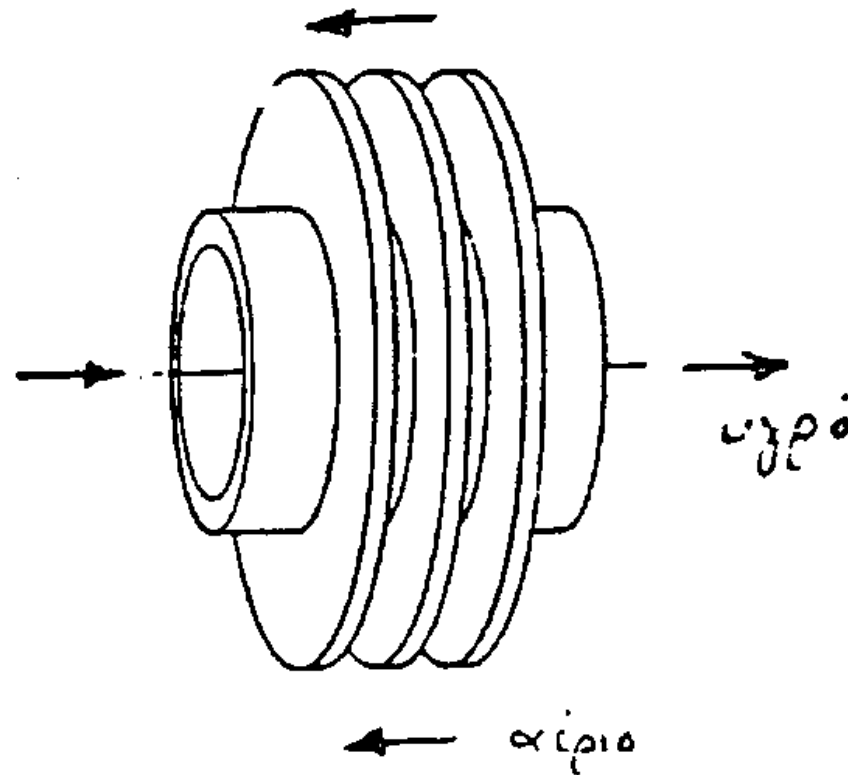


Εναλλάκτες με επίπεδα τοιχώματα (α) αντιρροή, (β) ομορροή, (γ) διασταυρούμενες ροές

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ

Εναλλάκτης με εκτεταμένες επιφάνειες

(αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής προς την πλευρά ενός ρευστού, όπου ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι μικρός)

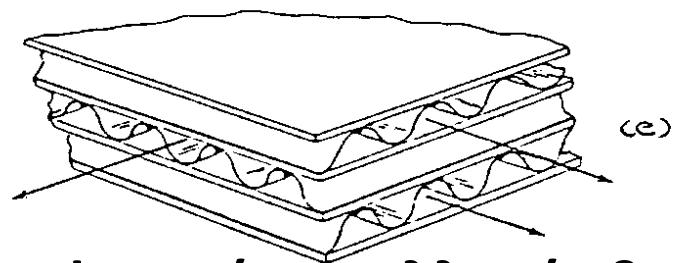
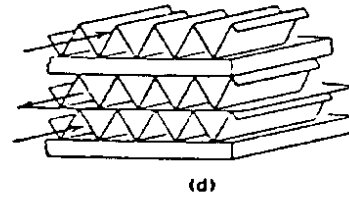
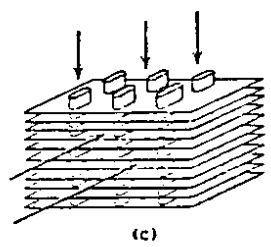
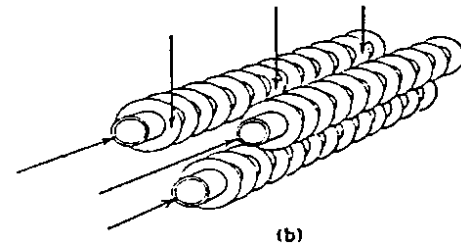
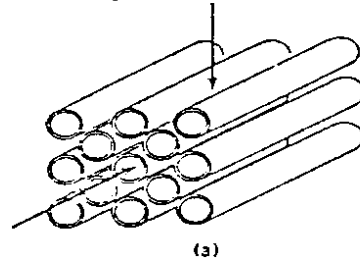


Πτερύγια επάνω σε αυλό για την ενίσχυση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Συμπαγείς Εναλλάκτες Θερμότητας

(μεγάλη αποδοτικότητα και μικρός όγκος)

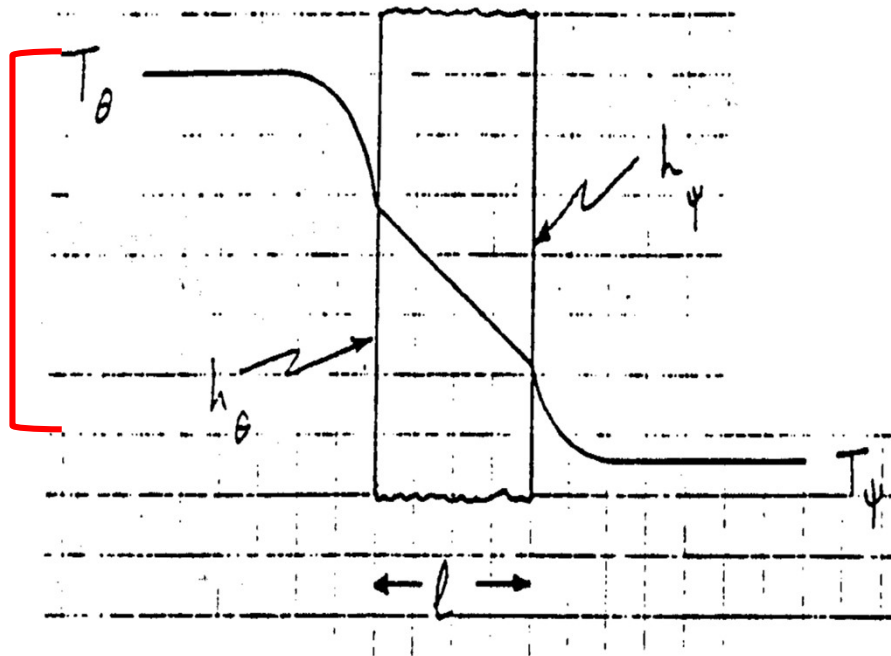


Συνήθεις διατάξεις επιφανειών εναλλαγής θερμότητας σε συμπαγείς εναλλάκτες

ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ , U

Επίπεδο Τοίχωμα

$$Q_{\theta} = \dot{m}_{\theta} c_{p\theta} \Delta T_{\theta} = \dot{m}_{\psi} c_{p\psi} \Delta T_{\psi} = Q_{\psi}$$



$$Q = AU\Delta T$$

$$\Delta T = (T_{\theta} - T_{\psi})$$

ΔT η οδηγούσα δύναμη

$$U = \left(\frac{1}{h_{\theta}} + \frac{l}{k\tau} + \frac{1}{h_{\psi}} \right)^{-1}$$

Κατανομή Θερμοκρασιών αριστερά (ρέει **θερμό** ρευστό) και δεξιά (ρέει **ψυχρό** ρευστό) της επίπεδης πλάκας

ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ , U

Επίπεδο Τοίχωμα

A = επιφάνεια τοιχώματος

U = ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

ΔT = διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ρευμάτων

T_{θ} = θερμοκρασία θερμού ρευστού

T_{ψ} = θερμοκρασία ψυχρού ρευστού

h_{θ} = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στη θερμή πλευρά

h_{ψ} = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στη ψυχρή πλευρά

l = πάχος τοιχώματος

k_{τ} = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του τοιχώματος

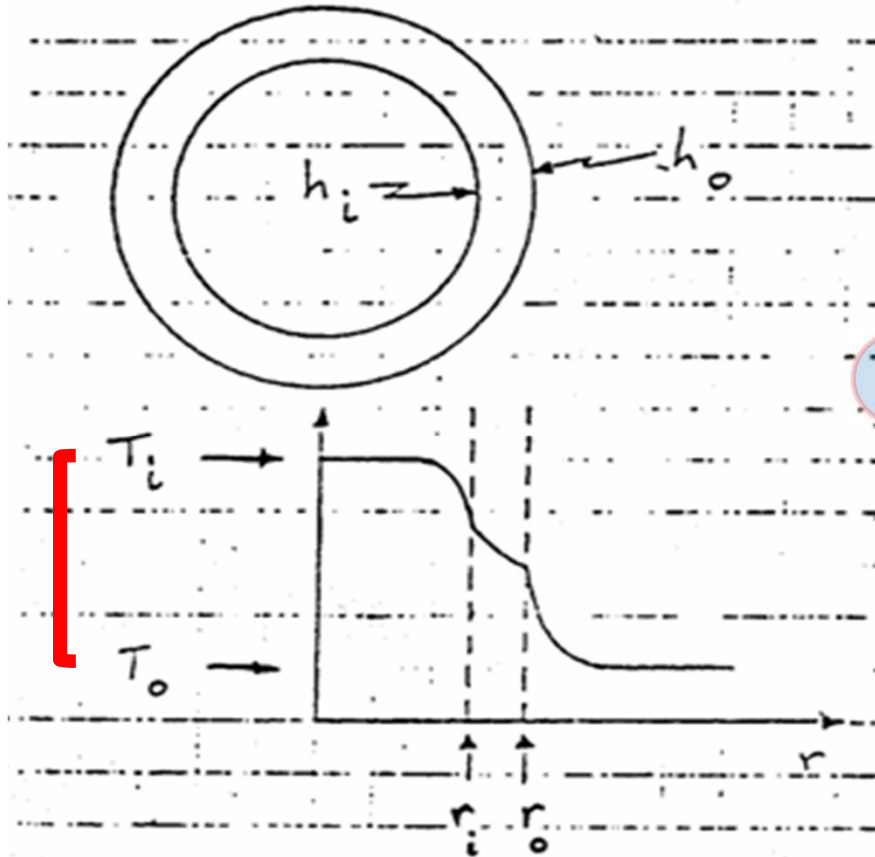
$$Q = AU\Delta T$$

$$\Delta T = (T_{\theta} - T_{\psi})$$

$$U = \left(\frac{1}{h_{\theta}} + \frac{l}{k_{\tau}} + \frac{1}{h_{\psi}} \right)^{-1}$$

ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ , U

Τοίχωμα Αυλού



$$Q = A_o U_o \Delta T = A_i U_i \Delta T$$

$$\Delta T = T_i - T_o$$

$$A_o = 2\pi r_o L$$

$$U_o = \frac{1}{r_o} \left(\frac{1}{r_i h_i} + \frac{1}{k_\tau} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{r_o h_o} \right)^{-1}$$

$$A_i = 2\pi r_i L$$

$$U_i = \frac{1}{r_i} \left(\frac{1}{r_i h_i} + \frac{1}{k_\tau} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{r_o h_o} \right)^{-1}$$

Κατανομή θερμοκρασίας μέσα και έξω από τον αυλό. Περίπτωση όπου το θερμό ρεύμα ρέει στο εσωτερικό του αυλού.

ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ , U

Συντελεστή Ρυπάνσεως

Αποθέματα στις επιφάνειες ενός εναλλάκτη δημιουργούν μια πρόσθετη **θερμική** αντίσταση και έτσι **μειώνουν** τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Αυτό πρέπει να προβλέπεται στο σχεδιασμό

$$\frac{1}{U_{\sigma\chi}} = \frac{1}{U} + R_{\rho,\varepsilon\sigma} + R_{\rho,\varepsilon\xi} \quad U_{\sigma\chi} = \frac{U}{1 + R_p U}$$

U= ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

$U_{\sigma\chi}$ = διορθωμένη τιμή του U, για σχεδιασμό

$R_{\rho,\varepsilon\sigma}$ = συντελεστής ρυπάνσεως εσωτερικής επιφάνειας

$R_{\rho,\varepsilon\xi}$ = συντελεστής ρυπάνσεως εξωτερικής επιφάνειας

$$R_p = R_{\rho,\varepsilon\sigma} + R_{\rho,\varepsilon\xi}$$

Πίνακας 4.1. Συντελεστές Ρυπάνσεως (σε m² K/W)#

ΥΓΡΑ

Νερό (απεσταγμένο)	0.0001
Νερό (λιμνήσιο, πηγαδίσιο, βρύσης)	0.0002-0.0004
Νερό (ποταμίσιο)	0.0005-0.0007
Οργανικά υγρά (καθαρά)	0.0002
Υγρά θερμάνσεως και ψύξεως	0.0002
Λιπαντικά έλαια (καθαρά)	0.0002
Έλαια μετασχηματιστών	0.0002
Ελαιόλαδο, σπορέλαιο κλπ.	0.0005
Προϊόντα πυθμένα από απόσταξη πετρελαίου 25°API και πάνω	0.0004
Προϊόντα πυθμένα από απόσταξη πετρελαίου, 25°API και κάτω	0.0009

Πίνακας 4.1. Συντελεστές Ρυπάνσεως (σε m² K/W)[#]

ΑΕΡΙΑ

Αέρας	0.0004
Ατμός (χωρίς ίχνη ελαίου)	0.0
Ατμός (με ίχνη ελαίου)	0.0002
Ατμοί αλκοόλης	0.0
Οργανικοί ατμοί	0.0001
Αέρια προϊόντα αποστάξεως (~1 atm)	0.0002- 0.0005
Καυσαέρια μηχανών Diesel	0.0020
Αέρια από καύση ή μετατροπή άνθρακα	0.00 20

ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ , U

Προεκτεταμένες Επιφάνειες

Συντελεστής προεκτεταμένης επιφάνειας, α_f

$\alpha_f = [\text{επιφάνεια πτερυγίων} / \text{επιφάνεια τοιχώματος} / \text{απουσία των πτερυγίων}]$

Συντελεστής ακάλυπτης επιφάνειας, α_w

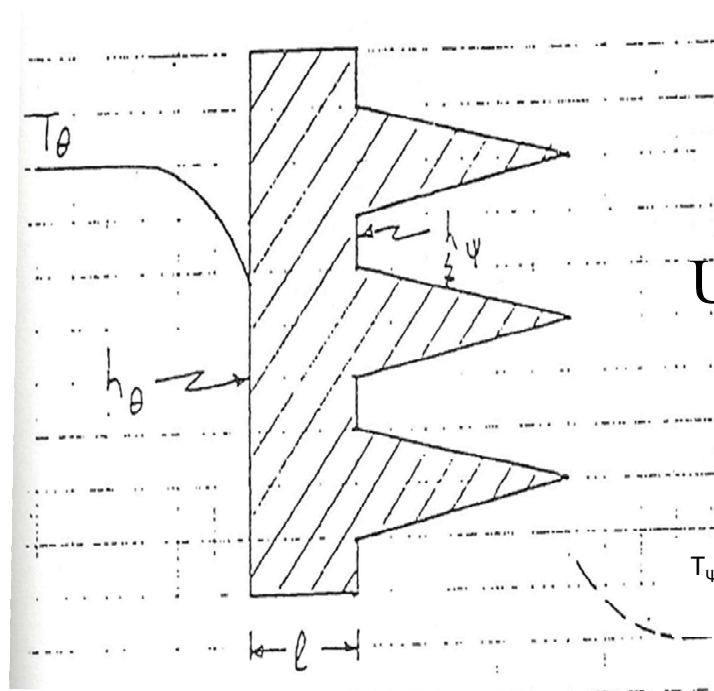
$\alpha_w = [\text{επιφάνεια ακάλυπτης επιφάνειας τοιχώματος} / \text{επιφάνεια τοιχώματος} / \text{απουσία των πτερυγίων}]$

$\eta_f = Q / Q_{\text{ιδανικό}} = \text{αποτελεσματικότητα των πτερυγίων}$

ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ , U

Προεκτεταμένες Επιφάνειες

Επίπεδα τοιχώματα με πτερύγια ή άκανθες



Συντελεστής **προεκτεταμένης επιφάνειας**, α_f
 $\alpha_f = [\text{επιφάνεια πτερυγίων} / \text{επιφάνεια τοιχώματος απουσία των πτερυγίων}]$

$$U = \left(\frac{1}{h_\theta} + \frac{1}{k_\tau} + \frac{1}{(\eta_f \alpha_f + \alpha_w) h_\psi} \right)^{-1}$$

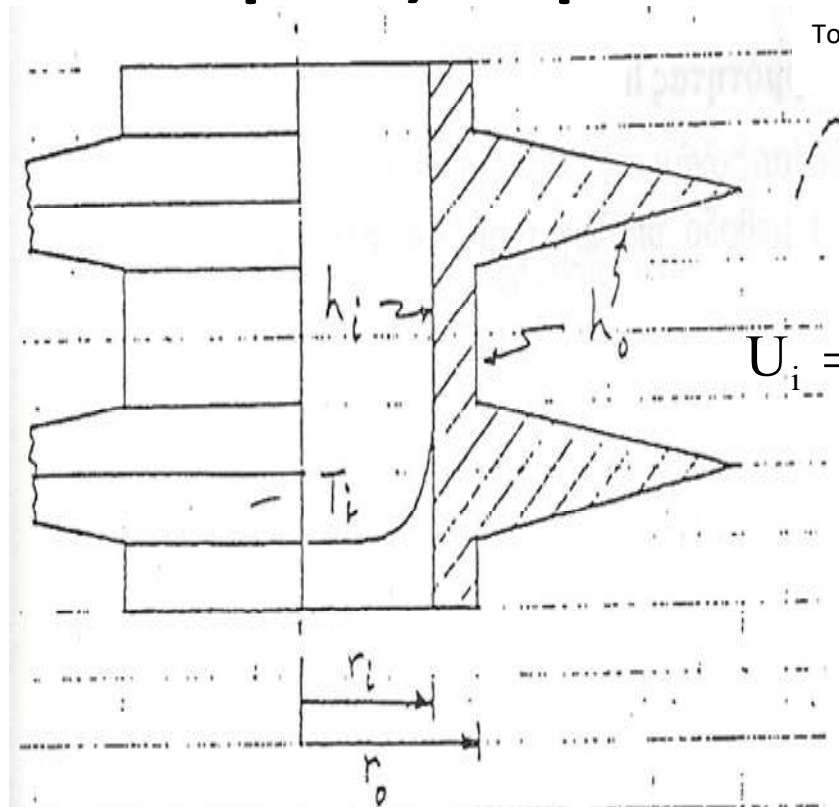
Συντελεστής **ακάλυπτης επιφάνειας**, α_w
 $\alpha_w = [\text{επιφάνεια ακάλυπτης επιφάνειας τοιχώματος} / \text{επιφάνεια τοιχώματος απουσία των πτερυγίων}]$

Τομή επιπέδου τοιχώματος με πτερύγια τριγωνικής διατομής.
 Περίπτωση ψυχρού αερίου στην πλευρά των πτερυγίων.

ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ , U

Προεκτεταμένες Επιφάνειες

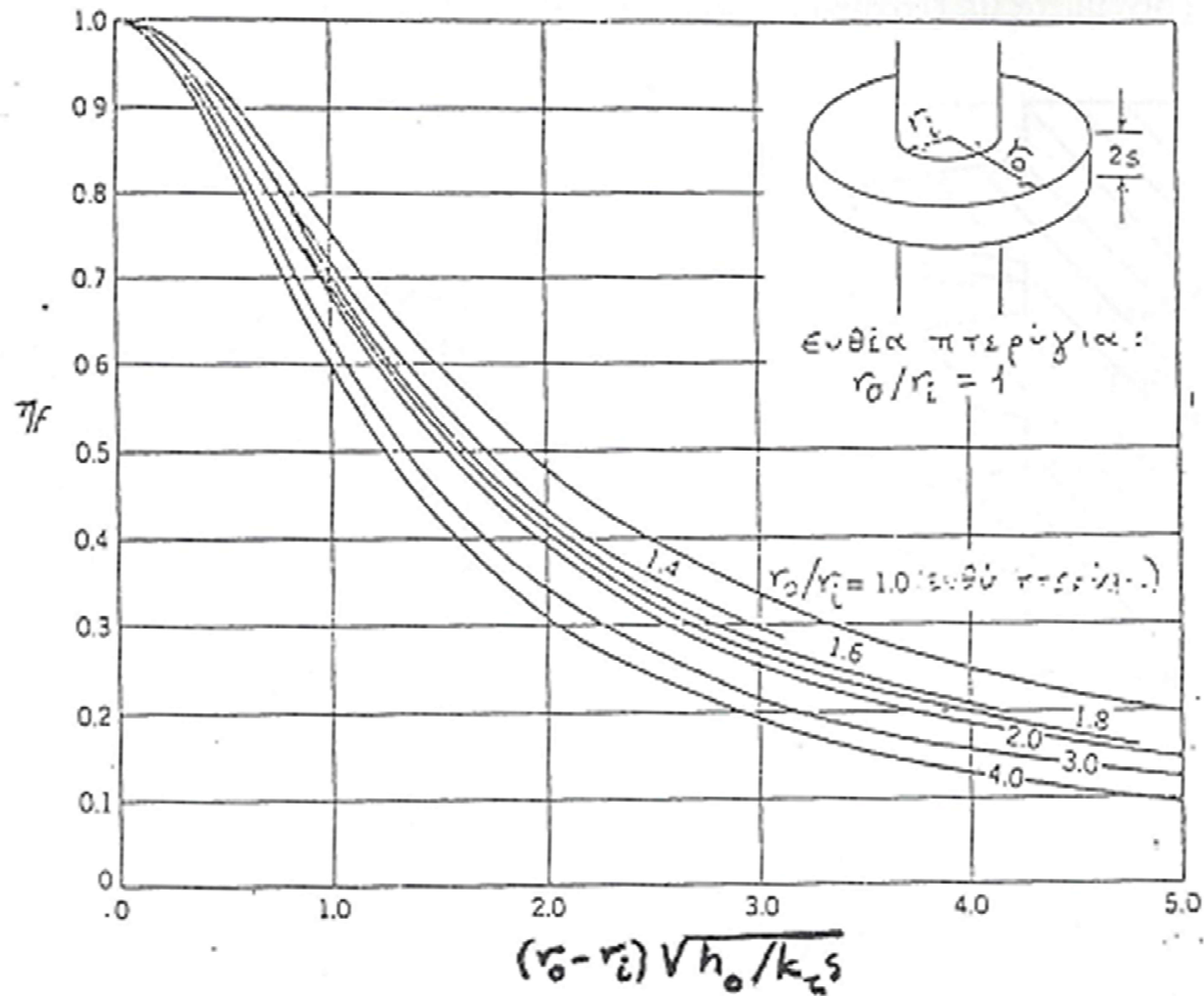
Αυλοί με Εξωτερικά Πτερύγια



$$U_i = \frac{1}{r_i} \left(\frac{1}{r_i h_i} + \frac{1}{k_\tau} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{(\eta_f \alpha_f + \alpha_w) r_o h_o} \right)^{-1}$$

Αυλός με πτερύγια τριγωνικής διατομής. Περίπτωση θερμού αερίου στην πλευρά των πτερυγίων.

$\eta_f = Q/Q_{\text{ιδανικό}} = \text{αποτελεσματικότητα των πτερυγίων}$



Συντελεστής αποτελεσματικότητας για δακτυλιοειδή πτερύγιο ομοιόμορφου πάχους (ευθεία πτερύγιο για πτερύγιο για $r_o/r_i=1$).

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h_{lm}

Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μέσα σε Αυλούς

i) Στρωτή Ροή, $Re_b < 2100$

$$Re_b < 2100$$

Εξίσωση των Sieder and Tate (1936)

$$Re_b Pr_b \frac{D}{L} > 10$$

$$Nu_{lm} = \frac{h_{lm} D}{k_b} = 1.86 \left(Re_b Pr_b \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1.86 \left(\frac{4 \dot{m} c_p}{\pi k_b L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

Ορισμοί

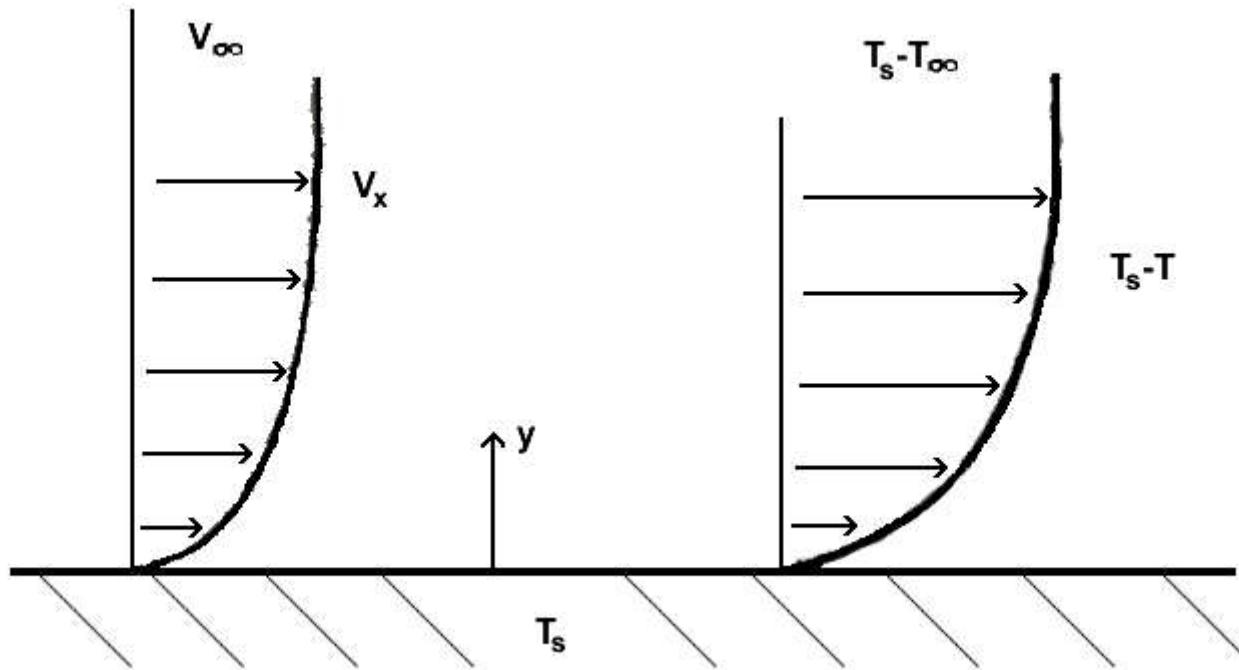
$Re = [\rho U D] / \mu = [G D] / \mu = \text{αδρανειακές δυνάμεις} / \text{ιξώδεις δυνάμεις}$

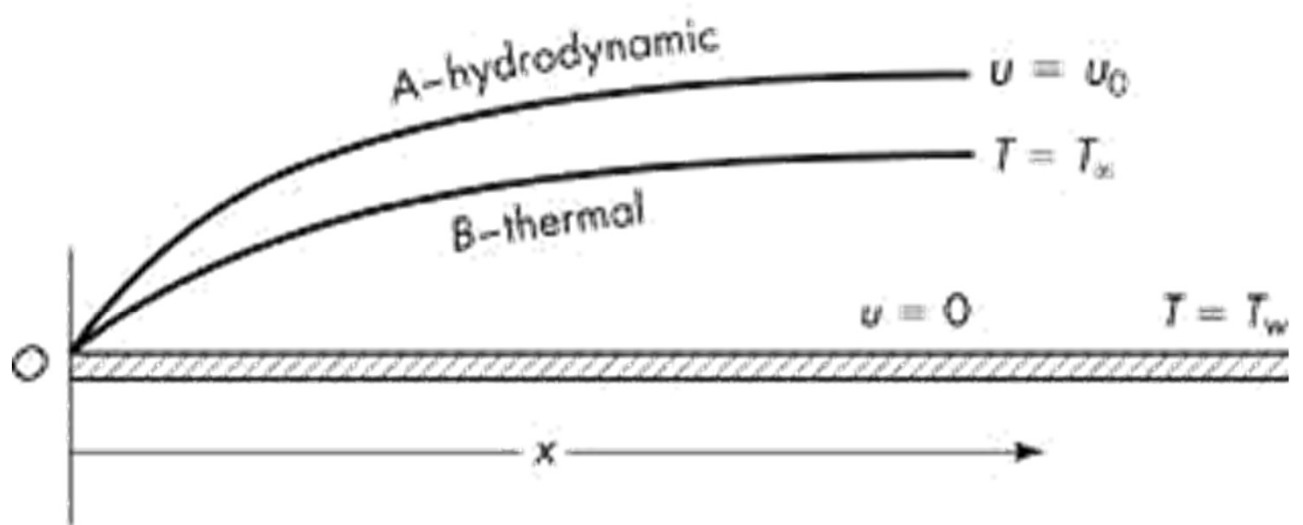
$Pr_b = \nu / \alpha$, $\nu = \mu / \rho$, κινηματικό ιξώδες,

$\alpha = \kappa / (\rho c_p)$, συντελεστής θερμικής διαχύσεως

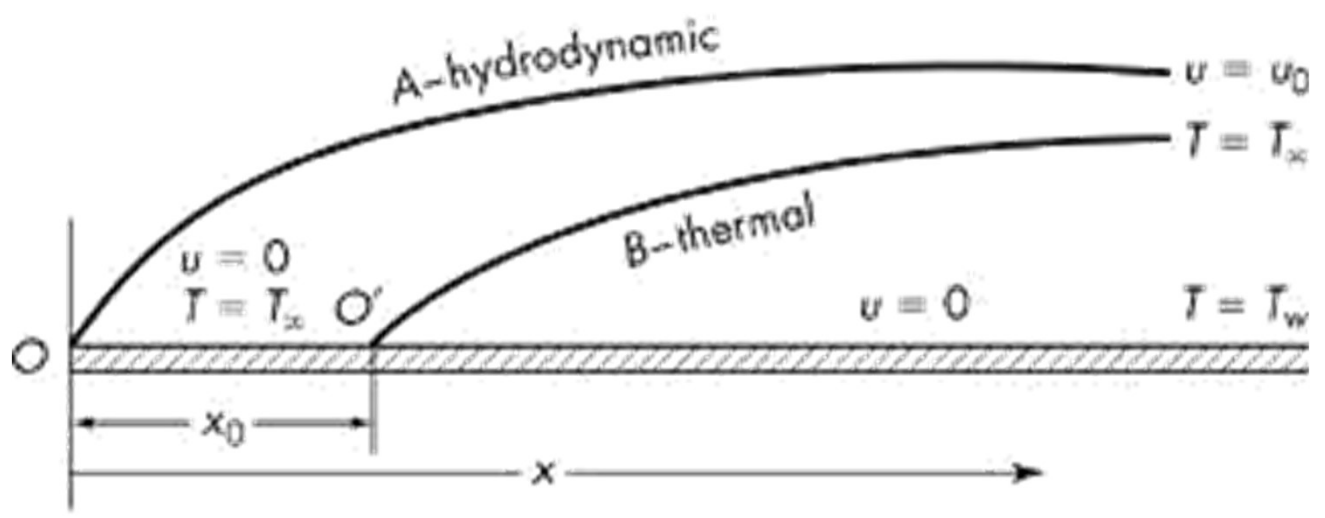
$Pr_b = \frac{c_p \mu_b}{k_b} = \text{Διαχυτότητα ορμής} / \text{θερμική διαχυτότητα}$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h





(a)



(b)

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h

Nu_{lm} = μέσος αριθμός *Nusselt* για τη μέση λογαριθμική θερμοκρασία

h_{lm} = μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για τη μέση λογαριθμική θερμοκρασία

k_b = συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού στη θερμοκρασία μίξεως T_b

Re_b = αριθμός *Reynolds* στην T_b

Pr_b = αριθμός *Prandtl* στην T_b

G = $\rho \langle v \rangle$ = μαζική ταχύτητα του ρευστού

μ_b = ιξώδες του ρευστού στην T_b

μ_w = ιξώδες του ρευστού στη θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος T_w

m = μαζική παροχή του ρευστού

c_p = ειδική θερμότητα του ρευστού

Το ιξώδες, η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοχωρητικότητα υπολογίζονται στην μέση θερμοκρασία μίξεως, $T_b = 1/2 [(T_{b,εισ} + T_{b,εξ})]$. Το μ_w υπολογίζεται στην μέση θερμοκρασία τοιχώματος, $T_w = (1/2) [(T_{w,εισ} + T_{w,εξ})]$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h_{lm}

Έντονα τυρβώδης ροή, Sieder and Tate, 1936

Για $L/D > 10$, για $Re_b > 20000$

$$Nu_{lm} = \frac{h_{lm} D}{k_b} = 0.026 Re_b^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

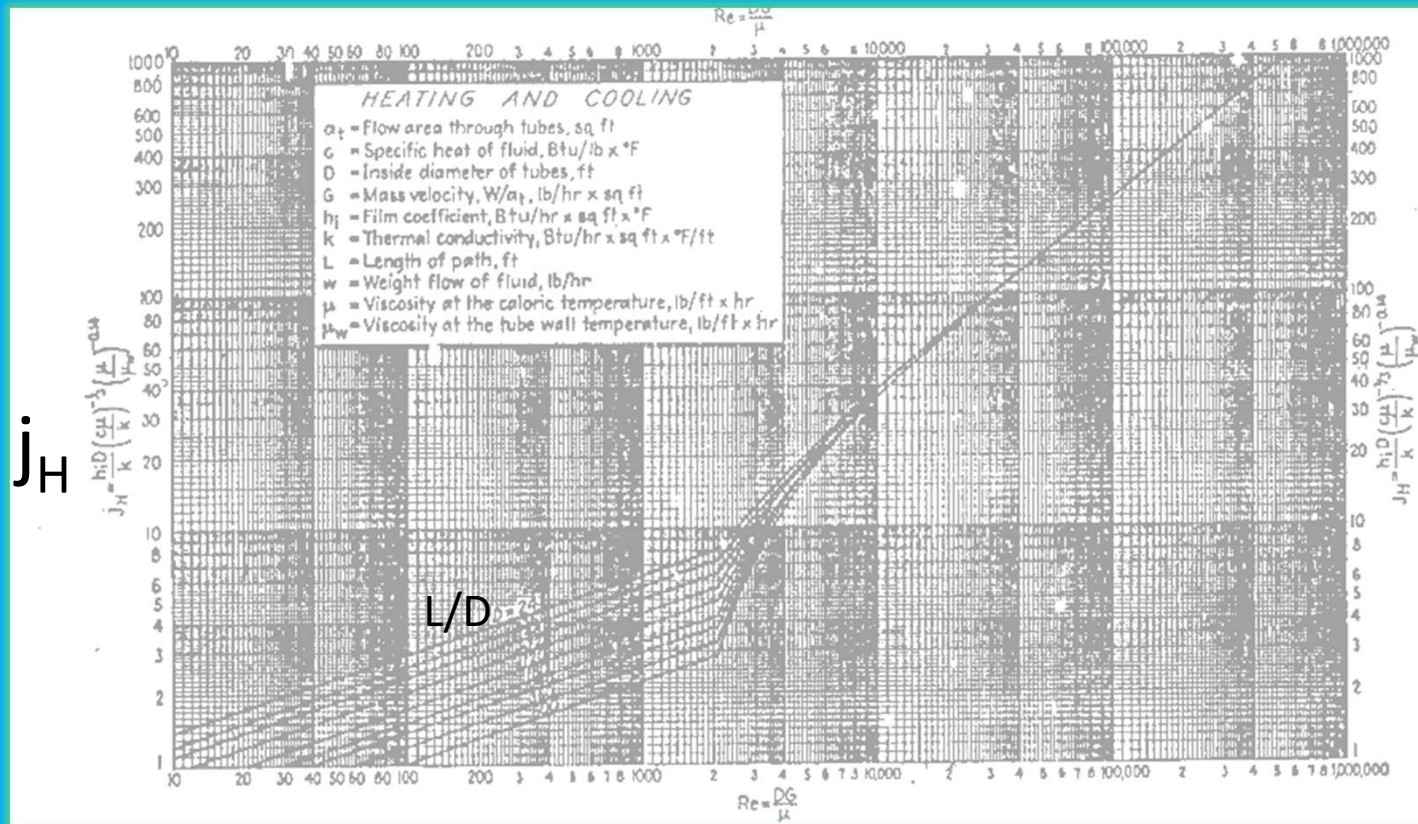
Συντελεστή $-j$ του Colburn για μεταφορά θερμότητας, j_H

$$j_H = 0.026 Re_b^{0.8} \quad Re_b > 20000, (L/D) > 10$$

$$Nu_{lm} = \frac{h_{lm} D}{k_b} = 1.86 \left(Re_b Pr_b \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1.86 \left(\frac{4 \dot{m} c_p}{\pi k_b L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

$$j_H = 1.86 \left(Re_b \frac{D}{L} \right)^{1/3} \quad Re_b < 2100, Re_b Pr_b (L/D) > 10$$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h



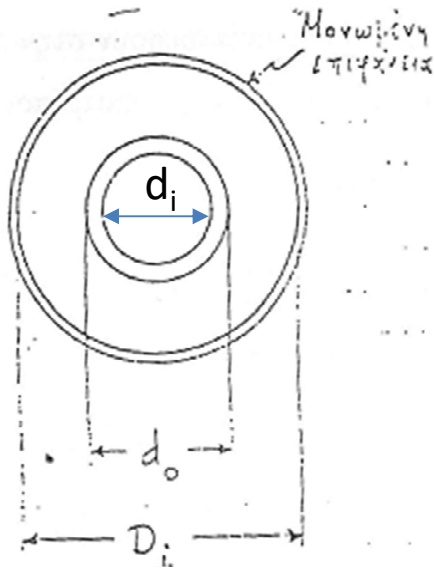
$$Re_b = \frac{GD}{\mu_b}$$

Τιμές του συντελεστή j_H για μεταφορά θερμότητας μέσα σε αυλούς. (Πηγή: Kern)

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h

Μεταφορά Θερμότητας με Συναγωγή μέσα σε Αγωγούς Δακτυλιοειδούς Διατομής

Οι εξισώσεις που ισχύουν για το εσωτερικό αυλών ισχύουν και εδώ με την ακόλουθη τροποποίηση. Αντί της διαμέτρου D , χρησιμοποιούμε την **ισοδύναμη διάμετρο**:



$$D_e = 4 \frac{\text{εμβαδόν διατομής}}{\text{περίμετρος μεταφοράς θερμότητας}}$$

$$D_e = 4 \frac{\frac{\pi}{4}(D_i^2 - d_o^2)}{\pi d_o} = \frac{D_i^2 - d_o^2}{d_o}$$

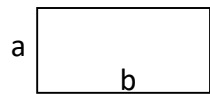
Η υδραυλική διάμετρο D_v ορίζεται ως

$$D_v = 4 \frac{\frac{\pi}{4}(D_i^2 - d_o^2)}{\pi(D_i + d_o)} = D_i - d_o$$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, **h**

Μεταφορά Θερμότητας με Συναγωγή μέσα σε Αγωγούς Μη-Κυκλικής Διατομής

Το πρόβλημα αυτό είναι περίπλοκο και τα αποτελέσματα εξαρτώνται σημαντικά από το σχήμα της διατομής. Ο αναγνώστης αναφέρεται για λεπτομέρειες στο: W.M. Rohsenow and J.P. Hartnett, "Handbook of Heat Transfer", McGraw Hill, N.Y., 1973, pp. 7-117 to 7-128.



$$D_e = 4 \frac{ab}{2b} = 2a$$

όπου οι πλευρές με μήκος a είναι μονωμένες

Αν γίνεται μεταφορά μέσω όλων των πλευρών τότε:

$$D_e = 4 \frac{ab}{2(a+b)} = 2 \frac{ab}{(a+b)}$$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h

Μια άλλη προσεγγιστική μέθοδος βασίζεται στη χρήση της αναλογίας μεταξύ μεταφοράς θερμότητας και μεταφοράς ορμής. Ιδιαίτερα απλή και χρήσιμη είναι η **αναλογία του Colburn**, που ισχύει τόσο για στρωτή όσο και για τυρβώδη ροή και που μπορεί να εκφρασθεί ως

$$\text{Nu}_x = \frac{h_x x}{k} = \frac{1}{2} C_f \text{Re}_x \text{Pr}^{1/3} \quad [100]$$

όπου x =απόσταση από την είσοδο (κατά μήκος της ροής)
 h_x =τοπικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

$$\text{Re}_x = \frac{x V_{\max} \rho}{\mu} = \text{τοπικός αριθμός Reynolds}$$

Nu_x =τοπικός αριθμός Nusselt

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho V_{\max}^2} = \text{τοπικός συντελεστής τριβής}$$

τ_w =τοπική διατμητική τάση επάνω στο τοίχωμα

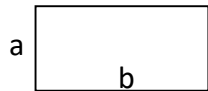
V_{\max} =τοπική μέγιστη ταχύτητα

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h

- Η Εξισ. (100) επιτρέπει τον υπολογισμό του h_x αν το C_f είναι γνωστό από τη λύση του αντίστοιχου υδροδυναμικού προβλήματος
- Η σχέση αυτή ισχύει με καλή προσέγγιση για $0.5 < Pr < 50$ και εφόσον δεν υπάρχει οπισθέλκουσα σχήματος (πράγμα που ισχύει για ροή σε ευθύγραμμους αγωγούς σταθερής διατομής).
- Η σχέση αυτή ισχύει με καλή προσέγγιση για $0.5 < Pr < 50$ και εφόσον δεν υπάρχει οπισθέλκουσα σχήματος (πράγμα που ισχύει για ροή σε ευθύγραμμους αγωγούς σταθερής διατομής).

$$\tau_w = \frac{4\mu v_{\max}}{a} \Rightarrow C_f = \frac{8}{(a\rho v_{\max} / \mu)} \rightarrow h_x = 4 \frac{k}{a} Pr^{1/3}$$

(πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή μεταξύ παραλλήλων πλακών ($a/b \ll 1$),



Σ' αυτές τις σχέσεις οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται στη «θερμοκρασία του φιλμ», $T_f = 1/2(T_b + T_w)$.