

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.

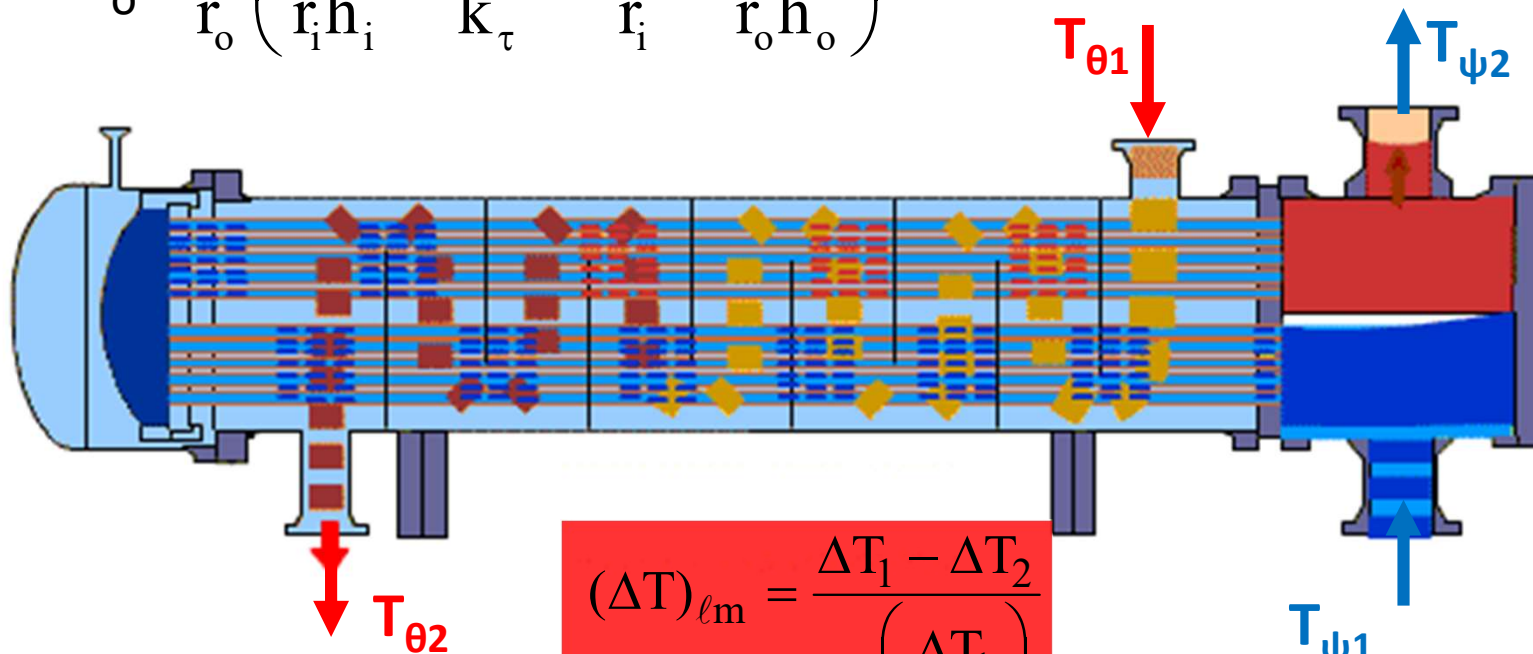
# $\Delta T$ η οδηγούσα δύναμη

$$Q = \dot{m}_\theta c_{p\theta} (T_{\theta 1} - T_{\theta 2}) = \dot{m}_\psi c_{p\psi} (T_{\psi 1} - T_{\psi 2})$$

$$Q = A_o U_{\sigma\chi} (\Delta T)_{lm}$$

$$U_{\sigma\chi} = \frac{U}{1 + R_\rho U}$$

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



$$(\Delta T)_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

# ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, U

Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μέσα σε Αυλούς

## i) Στρωτή Ροή, $Re_b < 2100$

Εξίσωση των Sieder and Tate (1936)

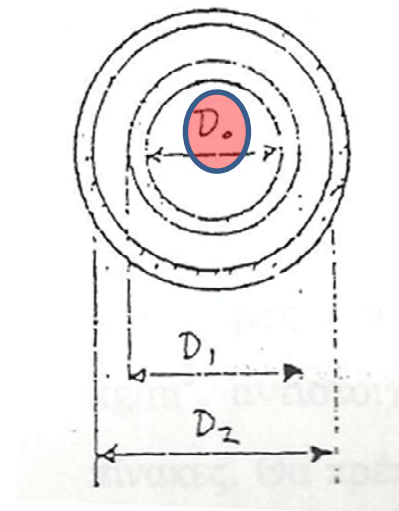
$$Nu_{lm} = \frac{h_{lm} D}{k_b} = 1.86 \left( Re_b Pr_b \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1.86 \left( \frac{4 \dot{m} c_p}{\pi k_b L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

## Έντονα τυρβώδης ροή, Sieder and Tate, 1936

Για  $L/D > 10$ , για  $Re_b > 20000$

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

~~$$D_e = 4 \frac{\frac{\pi}{4} (D_i^2 - d_0^2)}{\pi d_0} = \frac{D_i^2 - d_0^2}{d_0}$$~~



# Εναλλάκτης Κελύφους Αυλών

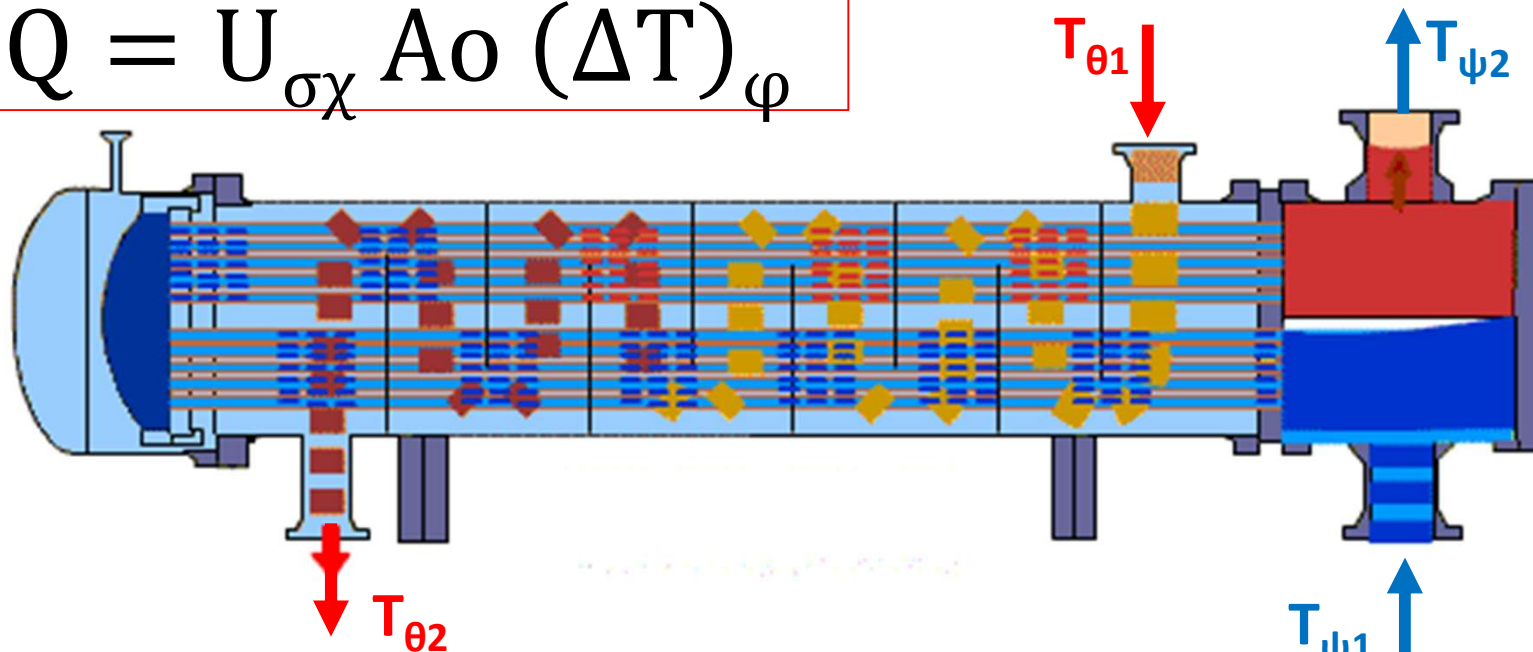
## Υπολογισμοί:

$$Q, \Delta T_1, \Delta T_2, (\Delta T)_{lm}, h_i, h_o, U_o, U_{\sigma\chi}, \Delta P$$

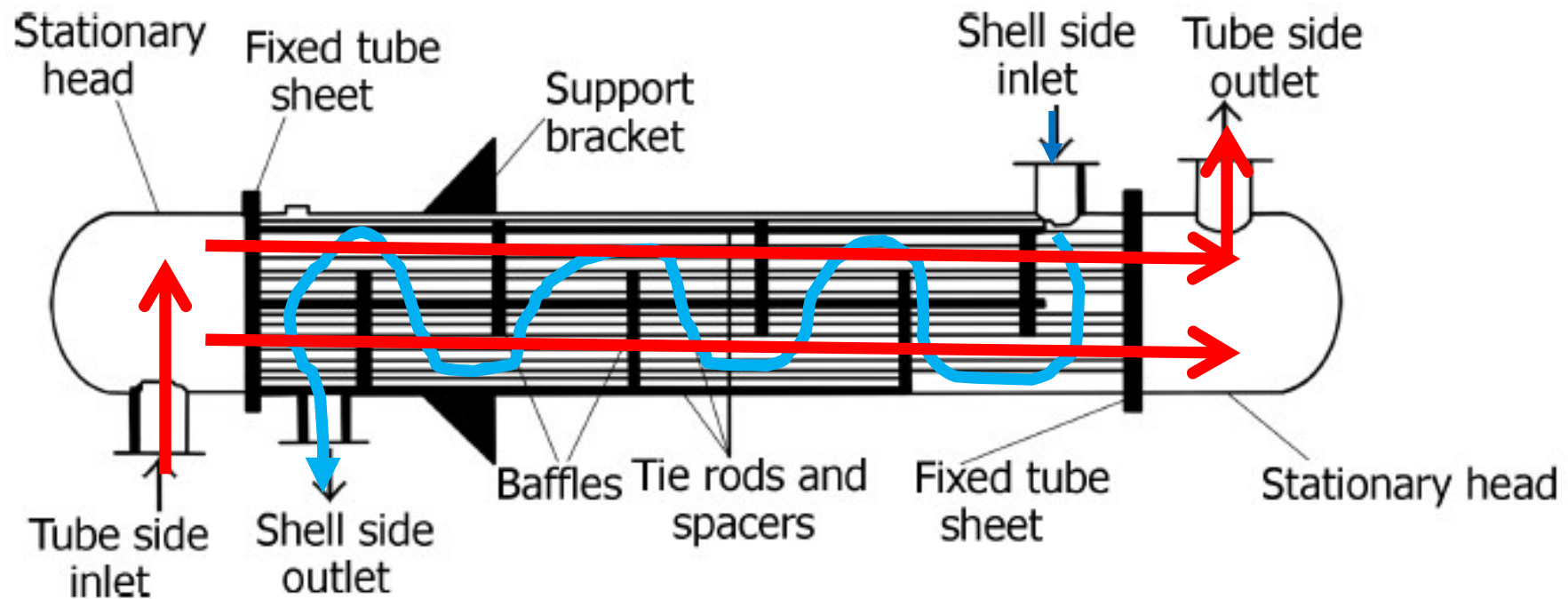
$$Q = \dot{m}_\theta c_{p\theta} (T_{\theta 1} - T_{\theta 2}) = \dot{m}_\psi c_{p\psi} (T_{\psi 1} - T_{\psi 2})$$

$$Q = U_o A_o (\Delta T)_{lm} \quad (\Delta T)_\phi = (\Delta T)_{lm} F_T, \quad 0 < F_T < 1$$

$$Q = U_{\sigma\chi} A_o (\Delta T)_\phi$$



# ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ Εναλλάκτης Τύπου κελύφους αυλών

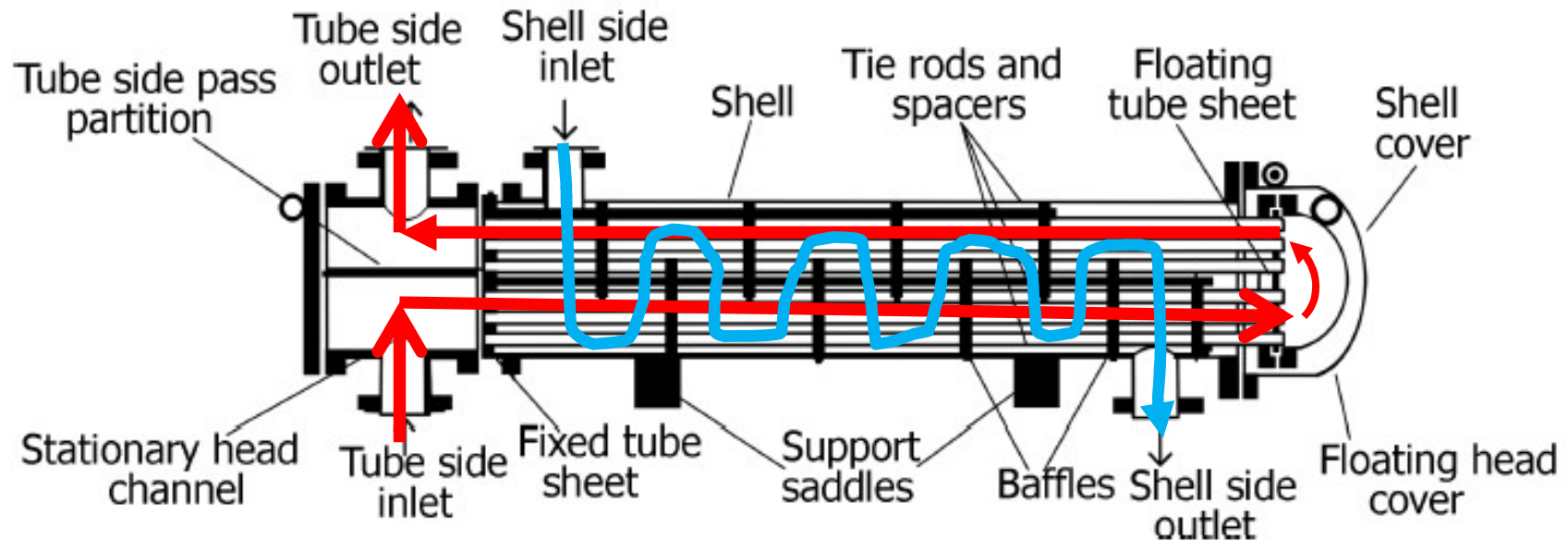


Εναλλάκτης τύπου κελύφους-αυλών με ολισθαίνον τοίχωμα στηρίξεως. **Διάταξη καθαρής αντιρροής**. Εχουμε ένα πέρασμα του ρεύματος μέσα από το κέλυφος και ένα πέρασμα του άλλου ρεύματος μέσα από τους αυλούς, γι' αυτό ο τύπος αυτός χαρακτηρίζεται ως **1-1**.

# ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

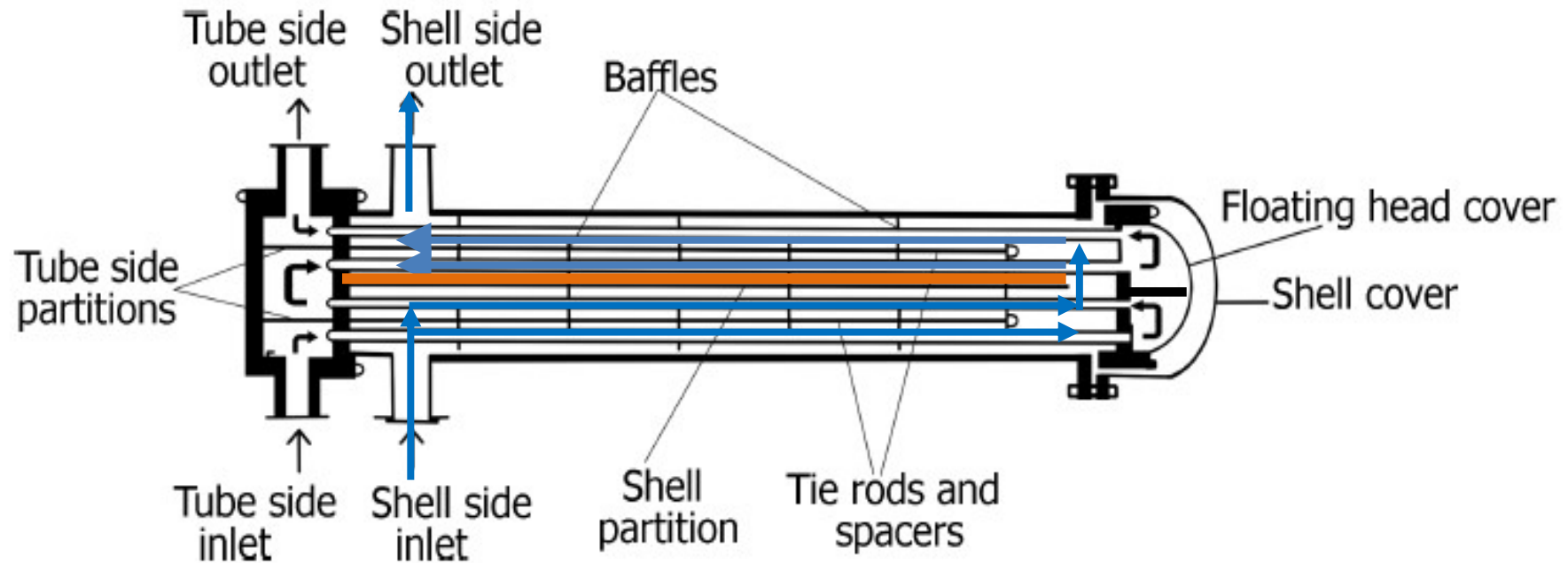
## ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ

### 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

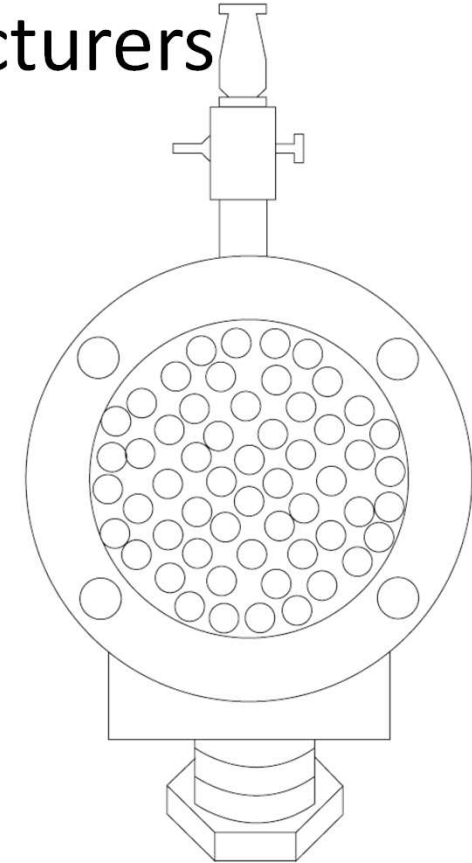
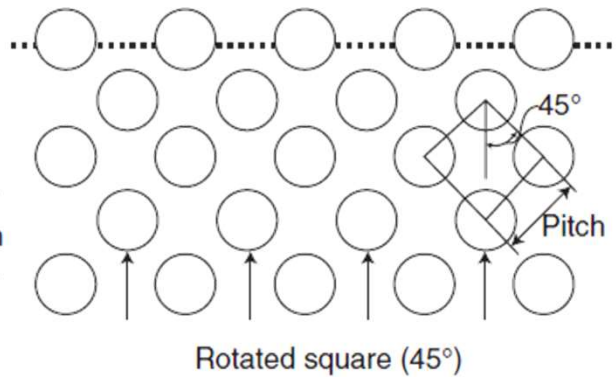
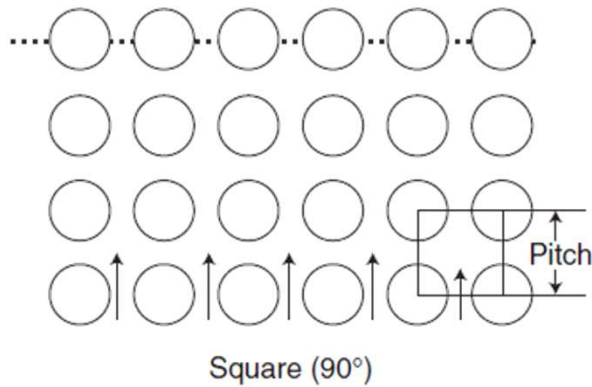
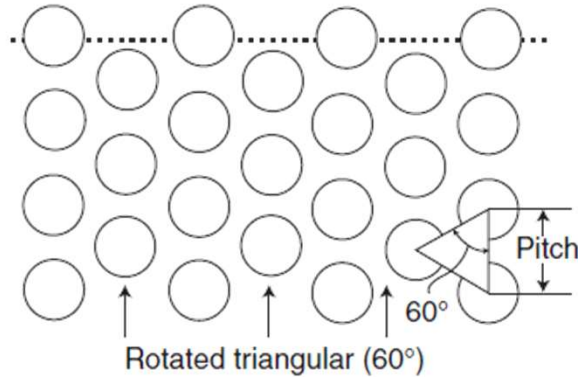
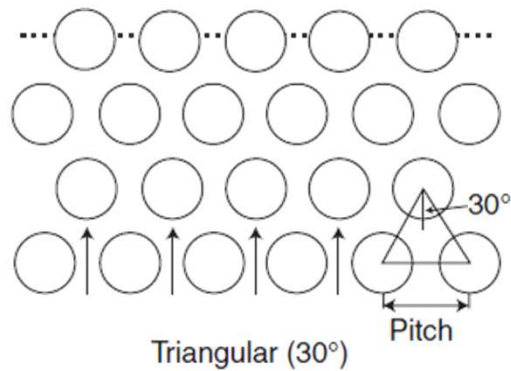


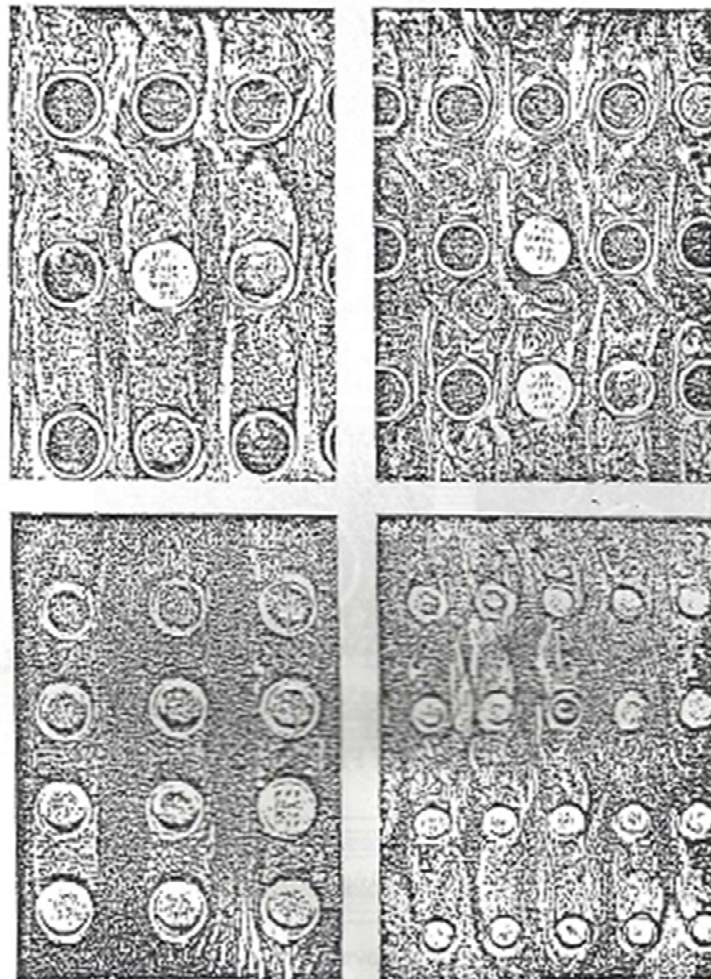
Εναλλάκτης κελύφους-αυλών τύπου **2-4** (δύο περάσματα στο κέλυφος, τέσσερα περάσματα στους αυλούς) με ολισθαίνον τοίχωμα στηρίξεως.



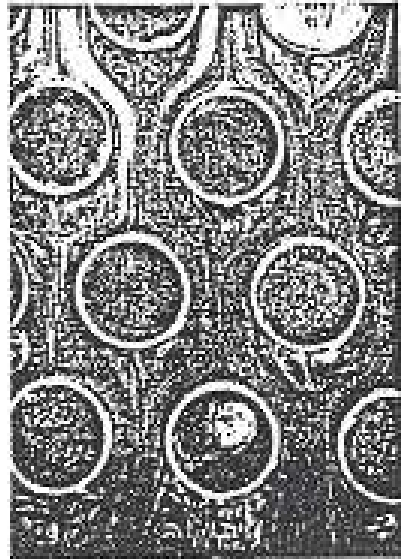
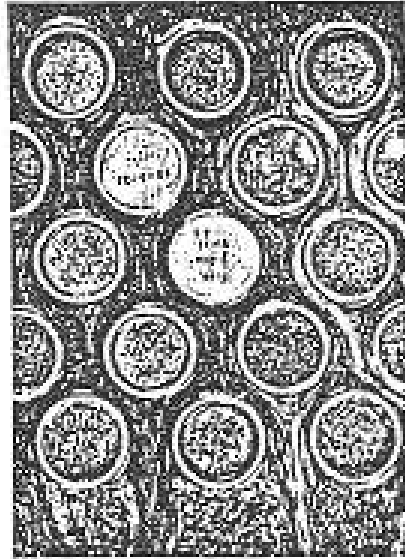
# Εναλλάκτες Θερμότητας

- TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association)





Τροχιές ροής μεταξύ παραλλήλων σωλήνων με ορθογωνική διάταξη.  
Πηγή: R.D. Wallis, "Photographic Study of Fluid Flow Between Banks of Tubes", *Engineering*, **148** (1933).

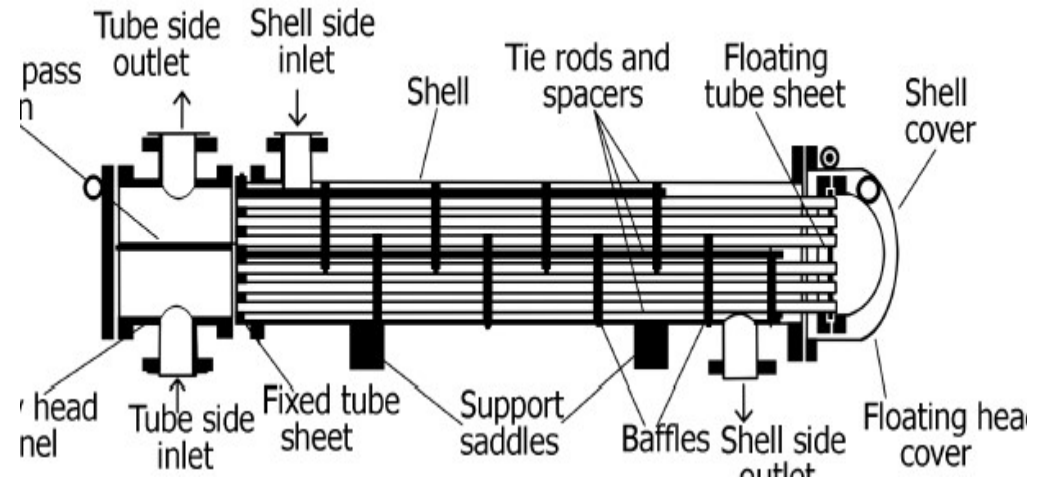
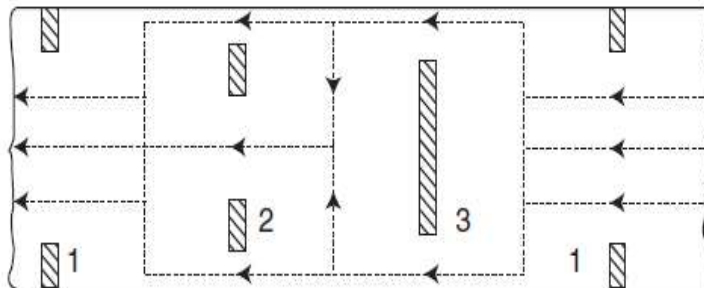
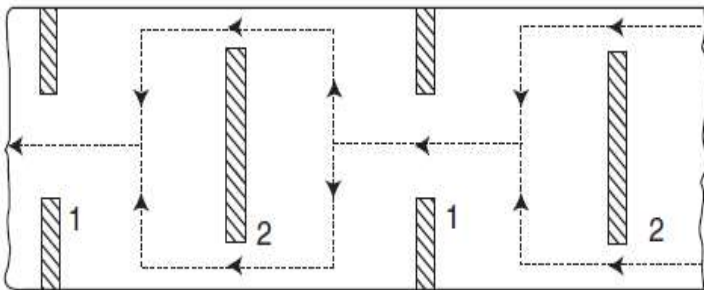
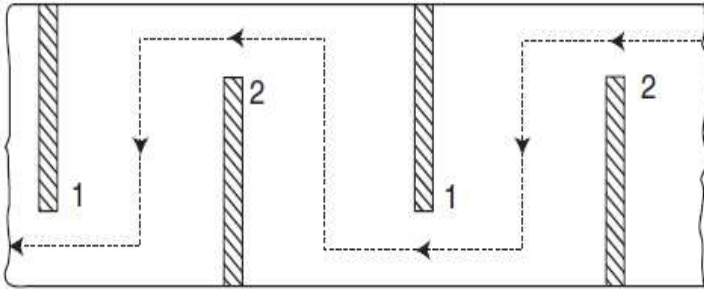


Οι σωλήνες εναλλακτών θερμότητας καλούνται επίσης και αυλοί ή σωλήνες συμπυκνωτών και είναι ειδικού τύπου. Προς τούτο δεν πρέπει να συγχέονται με τους κοινούς σωλήνες για μεταφορά υγρών. Ένα χαρακτηριστικό των αυλών εναλλακτών είναι ότι η ονομαστική εξωτερική τους διάμετρος είναι με μεγάλη ακρίβεια ίση με την πραγματική εξωτερική τους διάμετρο.

Οι σωλήνες αυτοί κατασκευάζονται από διάφορα μέταλλα, όπως: χάλυβες, χαλκός, ορείχαλκος, 70-30 χαλκός-νικέλιο, αλουμίνιο, κράμματα αλουμινίου κλπ. Το πάχος του τοιχώματος καθορίζεται από τον αριθμό **BWG (Birmingham wire gage)** του σωλήνα ή ανάλογους αριθμούς. Τα κυριότερα μεγέθη σωλήνων που απαντούν στην πράξη δίνονται στον Πίνακα 4.3. **Οι σωλήνες με εξωτερική διάμετρο  $\frac{3}{4}$  in και 1 in είναι οι πιο συνηθισμένοι στην κατασκευή εναλλακτών.**

Διάμετρος Σωλήνα OD, in	BWG	Πάχος τοίχου in	ID, in	Επιφάνεια Διατομής in <sup>2</sup>	Επιφάνεια ανά 1 ft μήκους ft <sup>2</sup>		Βάρος ανά 1 ft μήκους για χάλυβα lb
					Εξωτερική	Εσωτερική	
1/2	12	0.109	0.282	0.0625	0.1309	0.0748	0.493
	14	0.083	0.334	0.0876		0.0874	0.403
	16	0.065	0.370	0.1076		0.0969	0.329
	18	0.049	0.402	0.127		0.1052	0.258
	20	0.035	0.430	0.145		0.1125	0.190
3/4	10	0.134	0.482	0.182	0.1963	0.1263	0.965
	11	0.120	0.510	0.204		0.1335	0.884
	12	0.109	0.532	0.223		0.1393	0.817
	13	0.095	0.560	0.247		0.1466	0.727
	14	0.083	0.584	0.268		0.1529	0.647
	15	0.072	0.606	0.289		0.1587	0.571
	16	0.065	0.620	0.302		0.1623	0.520
	17	0.058	0.634	0.314		0.1660	0.469
	18	0.049	0.652	0.334		0.1707	0.401
1	8	0.165	0.670	0.355	0.2618	0.1754	1.61
	9	0.148	0.704	0.389		0.1843	1.47
	10	0.134	0.732	0.421		0.1916	1.36
	11	0.120	0.760	0.455		0.1990	1.23
	12	0.109	0.782	0.479		0.2048	1.14
	13	0.095	0.810	0.515		0.2121	1.00
	14	0.083	0.834	0.546		0.2183	0.890
	15	0.072	0.856	0.576		0.2241	0.781
	16	0.065	0.870	0.594		0.2277	0.710
	17	0.058	0.884	0.613		0.2314	0.639
18	0.049	0.902	0.639	0.2361	0.545		
1 ¼	8	0.165	0.920	0.665	0.3271	0.2409	2.09
	9	0.148	0.954	0.714		0.2498	1.91
	10	0.134	0.982	0.757		0.2572	1.75
	11	0.120	1.01	0.800		0.2644	1.58
	12	0.109	1.03	0.836		0.2701	1.45

# Εναλλάκτες Θερμότητας Τοποθέτηση ανακλαστήρων



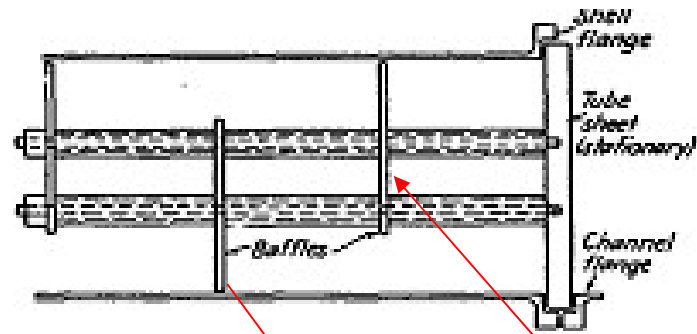


FIG. 7.5. Baffle spacer detail (enlarged).

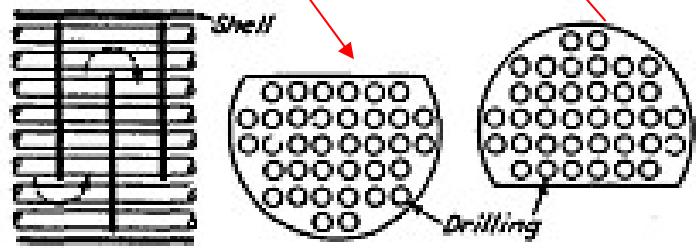
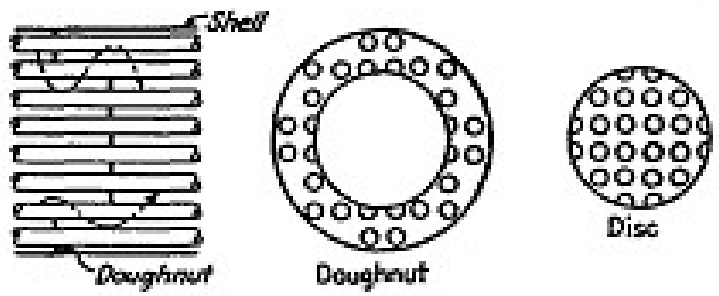
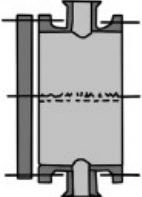

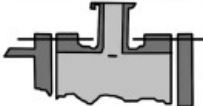
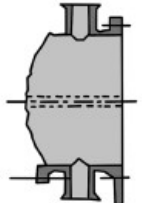
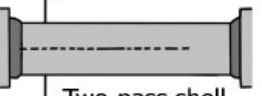

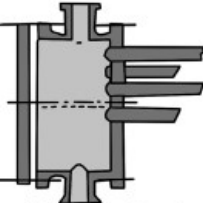
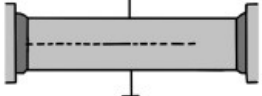

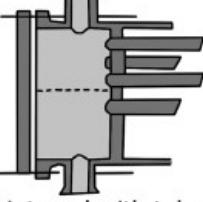

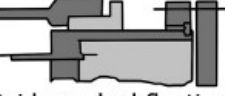
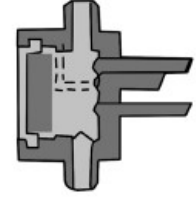
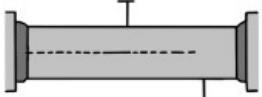


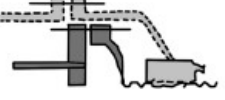
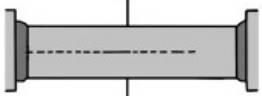




FIG. 7.6. Segmental baffle detail.



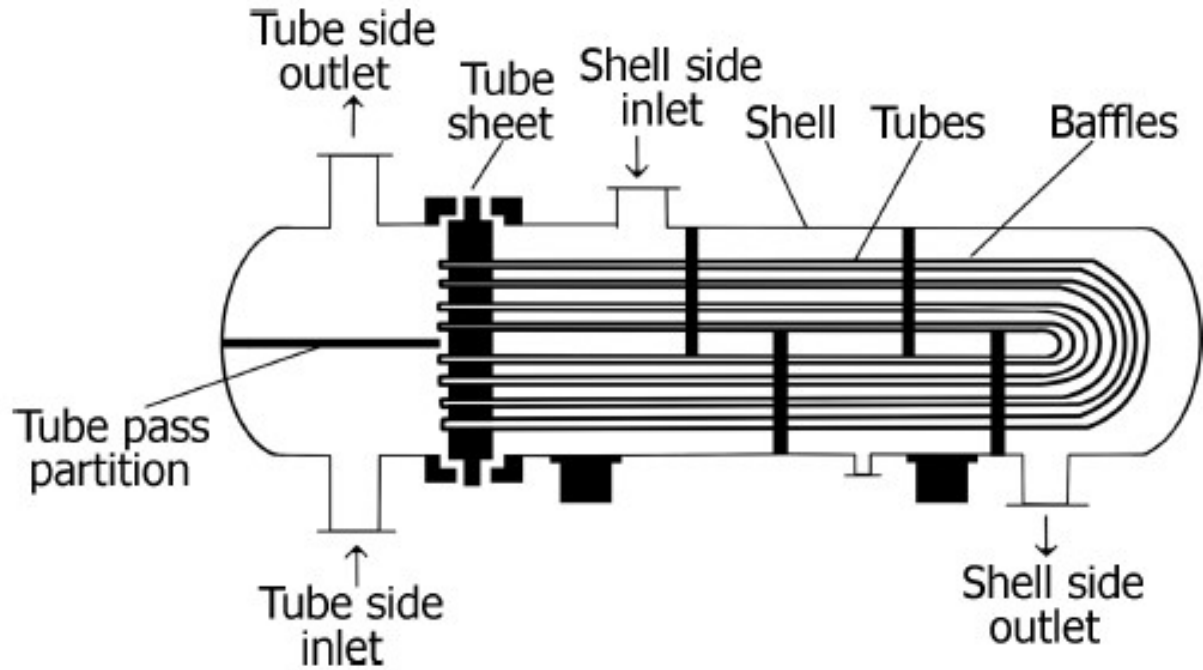
Τυπική διάταξη σωλήνων και χωρισμάτων. Τα χωρίσματα που απεικονίζονται έχουν «κόψιμο 25%», δηλαδή τους λείπει 25% του ύψους για να είναι κυκλικά

Stationery head types	Shell types	Rear head types
<p>A</p>  <p>Removable channel and cover</p>	<p>E</p>  <p>One-pass shell</p>	<p>L</p>  <p>Fixed tube sheet like "A" stationery head</p>
<p>B</p>  <p>Bonnet (integral cover)</p>	<p>F</p>  <p>Two-pass shell with longitudinal baffle</p>	<p>M</p>  <p>Fixed tube sheet like "B" stationery head</p>
<p>C</p>  <p>Integral with tube sheet removable cover</p>	<p>G</p>  <p>Split flow</p>	<p>N</p>  <p>Fixed tube sheet like "C" stationery head</p>
<p>N</p>  <p>Channel integral with tube sheet and removable cover</p>	<p>H</p>  <p>Double split flow</p>	<p>P</p>  <p>Outside packed floating head</p>
<p>D</p>  <p>Special high-pressure closers</p>	<p>J</p>  <p>Divided flow</p>	<p>S</p>  <p>Floating head with backing device</p>
	<p>K</p>  <p>Kettle-type reboiler</p>	<p>T</p>  <p>Pull-through floating head</p>
	<p>X</p>  <p>Cross flow</p>	<p>U</p>  <p>U-tube bundle</p>
		<p>W</p>  <p>Externally sealed floating tube sheet</p>

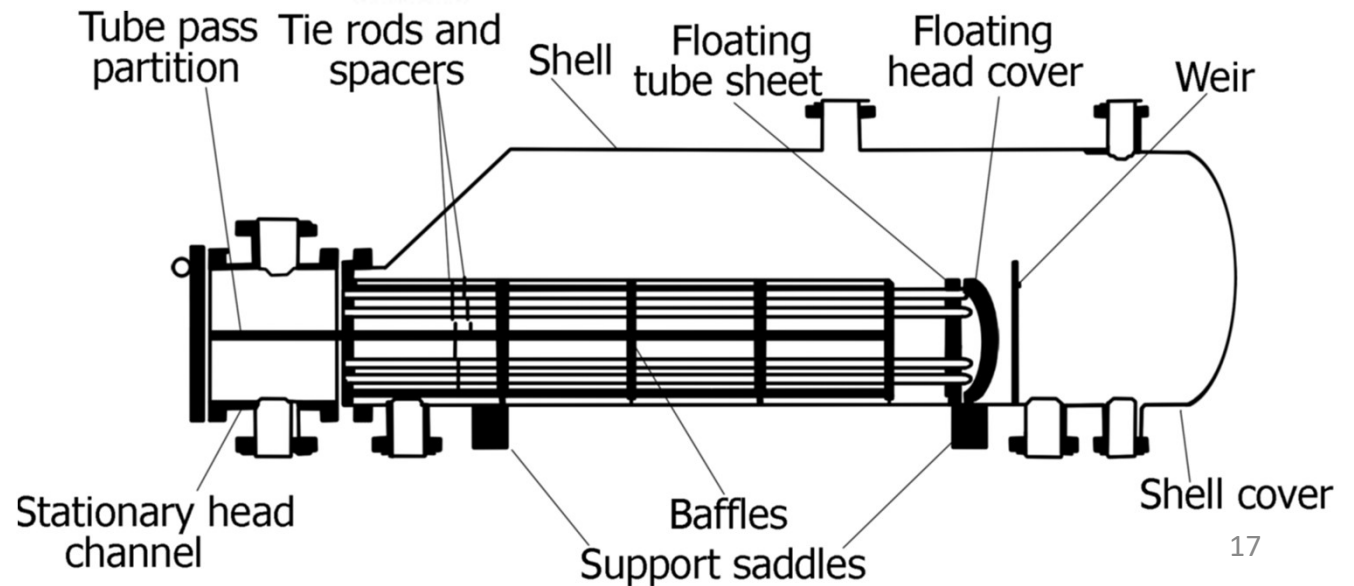


# Εναλλάκτες πολλαπλών διαδρομών

U-bundle

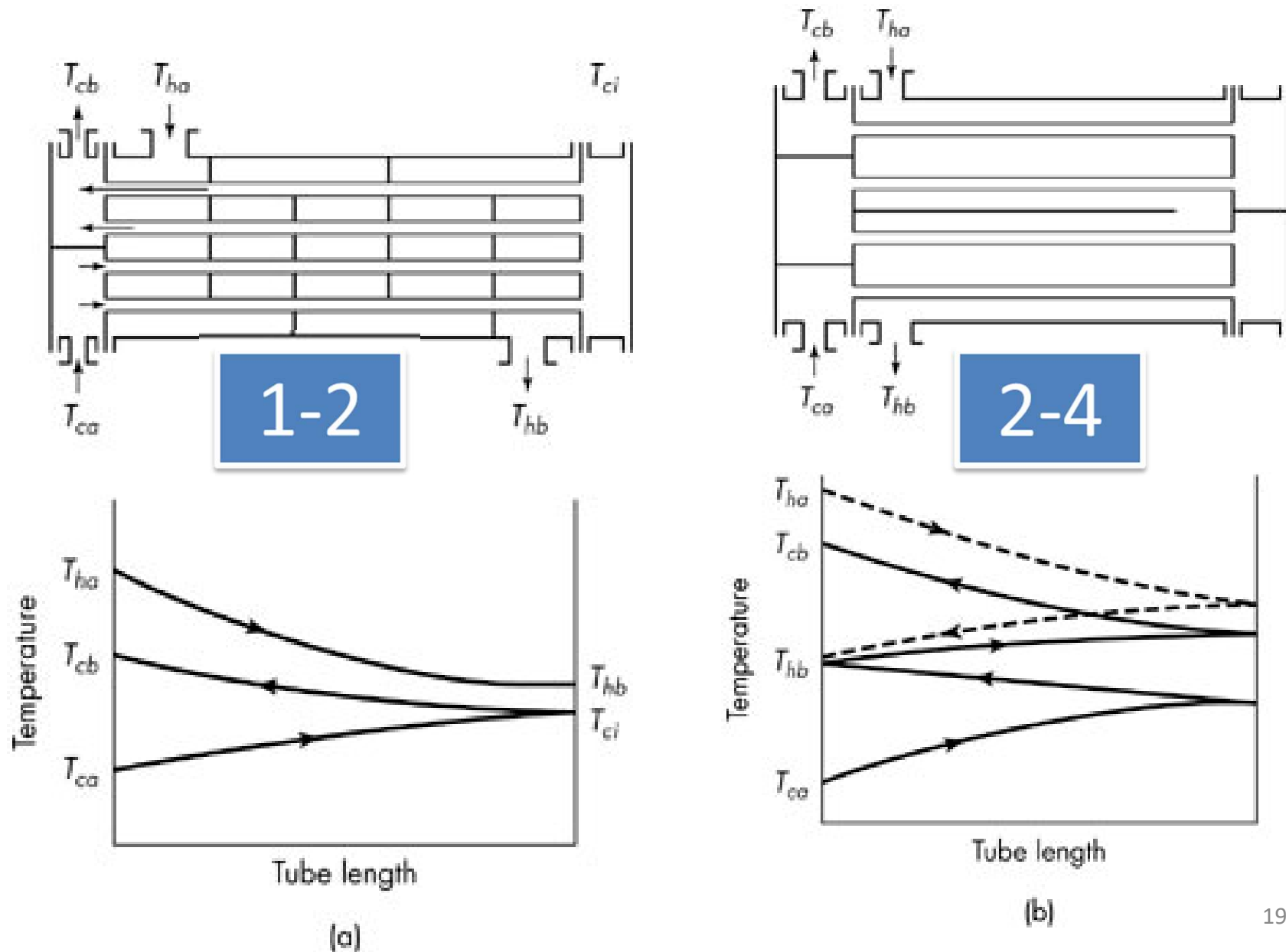


T- reboiler





# Εναλλάκτες πολλαπλών διαδρομών



# Διόρθωση της $(\Delta T)_{lm}$

- Η  $\Delta T$  για την κάθε διαδρομή δεν είναι γραμμική συνάρτηση της θερμότητας. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ο παράγοντας διόρθωσης  $F_G$

$$F_G = \frac{\sqrt{Z^2 + 1} \ln \left( \frac{1 - \eta_H}{1 - Z\eta_H} \right)}{(Z - 1) \ln \left( \frac{2 - \eta_H(Z + 1 - \sqrt{Z^2 + 1})}{2 - \eta_H(Z + 1 + \sqrt{Z^2 + 1})} \right)} \quad \text{όπου}$$

$$Z = \frac{T_{ha} - T_{hb}}{T_{cb} - T_{ca}}$$

$$\eta_H = \frac{T_{cb} - T_{ca}}{T_{ha} - T_{ca}}$$

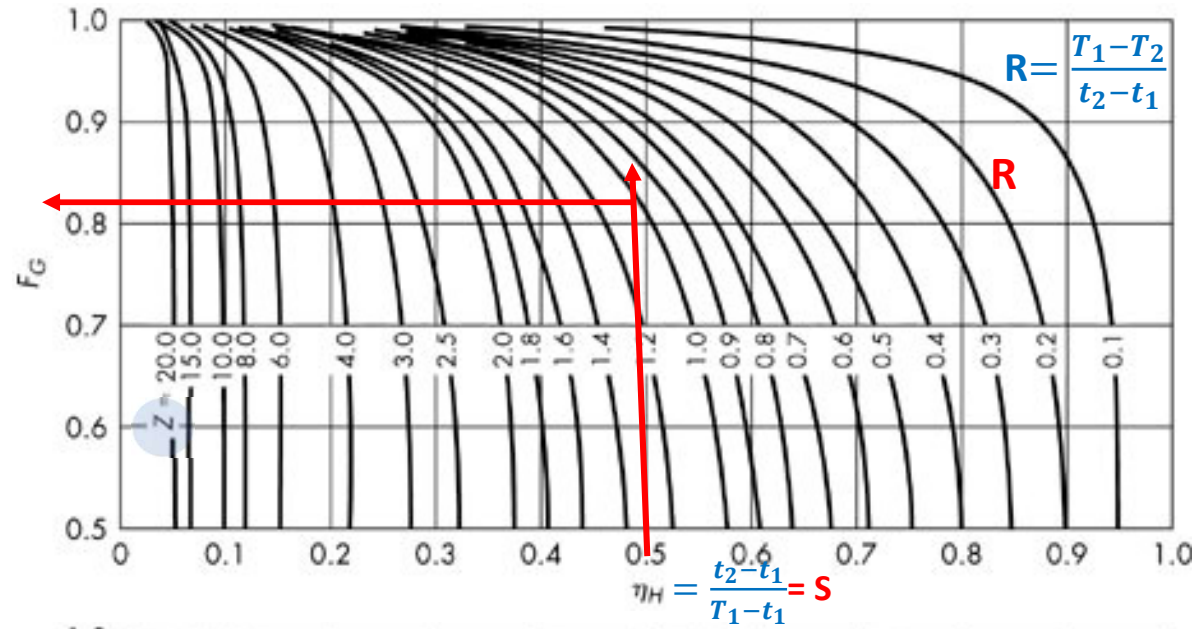
- $Z = \frac{\text{πτώση θερμοκρασίας θερμού ρευστού}}{\text{αύξηση θερμοκρασίας ψυχρού ρευστού}} = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = R$

- $\eta_H = \text{θερμική αποτελεσματικότητα} = \frac{\text{αύξηση θερμοκρασίας ψυχρού ρευστού}}{\text{μέγιστη δυνατή αύξηση θερμοκρασίας}}$

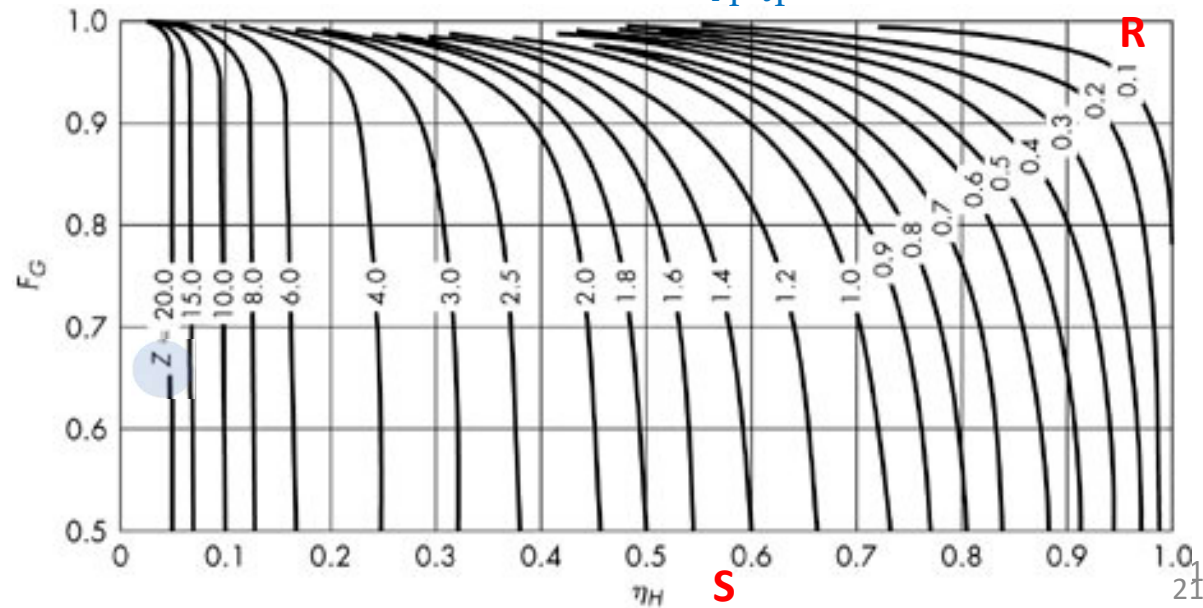
$$(\Delta T)_\phi = F_G (\Delta T)_{lm} \quad 0 < F_G < 1 \quad = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = S$$

# Διόρθωση της LMTD

1-2



2-4



# ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, $h$

## Υπολογισμός του Εξωτερικού Συντελεστή

### Μεταφοράς Θερμότητας (μέσα στο κέλυφος)

Ενας επιτυχής συσχετισμός για τυρβώδη ροή, με αριθμό Reynolds από 2000 μέχρι 1000000, χωρίς αλλαγή φάσεως (δηλ. χωρίς συμπύκνωση), για χωρίσματα με κόψιμο 25% είναι ο ακόλουθος (KERN, 1950):

$$\frac{h_0 D_e}{k} = 0.36 \left( \frac{D_e G_k}{\mu_b} \right)^{0.55} \left( \frac{c_{p,k} \mu_b}{k} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

Όπου  $h_0$  ο εξωτερικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

$D_e$	ισοδύναμη διάμετρος (βλ. κατωτέρω)
$G_k$	μαζική ταχύτητα (βλ. κατωτέρω)
$k$	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του εξωτερικού ρευστού
$c_{p,k}$	ειδική θερμοχωρητικότητα του εξωτερικού ρευστού
$\mu_b$	δυναμικό ιξώδες του εξωτερικού ρευστού στη θερμοκρασία μίξεως
$\mu_w$	δυναμικό ιξώδες του εξωτερικού ρευστού στη θερμοκρασία του τοιχώματος

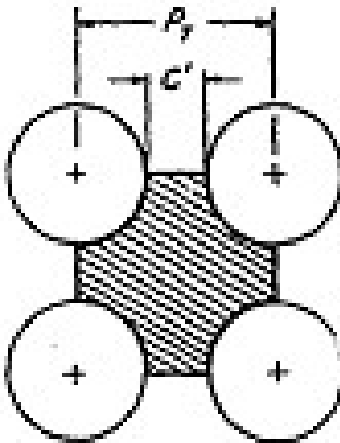
# ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, $h$

## Υπολογισμός του Εξωτερικού Συντελεστή

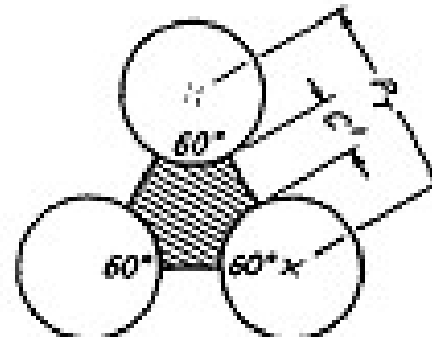
### Μεταφοράς Θερμότητας

Η ισοδύναμη διάμετρος ορίζεται, εδώ, ως εξής:

$$D_e = 4 \frac{\text{επιφάνεια εγκάρσιας διατομής}}{\text{βρεχόμενη περίμετρος}}$$

$$D_e = \frac{(4B_\sigma^2 - \pi d_0^2)}{\pi d_0}$$


(a)–Square pitch.



(b)–Triangular pitch.

$$D_e = \frac{(2\sqrt{3}B_\sigma^2 - \pi d_0^2)}{\pi d_0}$$

Υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου.  $B_\sigma$  είναι το βήμα και  $C$  είναι το διάστημα. Οι σκιασμένες επιφάνειες είναι οι στοιχειώδεις εγκάρσιες διατομές.  $d_0$  είναι η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα.

## ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, **h**

### Υπολογισμός του Εξωτερικού Συντελεστή Μεταφοράς Θερμότητας

Η μαζική ταχύτητα ορίζεται, εδώ, ως εξής  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ :

$$G_k = \dot{m}_k / A_k = (\rho v)$$

Όπου  $\dot{m}_k$  είναι η μαζική παροχή του εξωτερικού ρευστού και  $A_k$ =επιφάνεια εγκάρσιας ροής μέσω της δεσμίδας των σωλήνων.

Εδώ, η  $A_k$  δίνεται από τη σχέση

$$A_k = \frac{D_k C B_\chi}{B_\sigma} = \frac{D_k (B_\sigma - d_0) B_\chi}{B_\sigma}$$

όπου:  $D_k$ =εσωτερική  
διάμετρος του κελύφους  
 $C$ =διάστημα μεταξύ  
σωλήνων  
 $B_\chi$ = βήμα χωρισμάτων  
 $B_\sigma$ = βήμα σωλήνων



# ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, **h**

## Υπολογισμός του Εξωτερικού Συντελεστή Μεταφοράς Θερμότητας

$$\frac{h_0 D_e}{k} = 0.36 \left( \frac{D_e G_{\kappa}}{\mu_b} \right)^{0.55} \left( \frac{c_{p,\kappa} \mu_b}{k} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

$$j_H = 0.36 Re_{\kappa}^{0.55} \quad j_H \equiv \left( \frac{h_0 D_e}{k} \right) \left( \frac{c_p \mu_b}{k} \right)^{-1/3} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{-0.14}$$

$$Re_{\kappa} \equiv \frac{D_e G_{\kappa}}{\mu_b}$$

Μια ευρύτερη σχέση μεταξύ  $j_H$  και  $Re_{\kappa}$  (για  $10 \leq Re_{\kappa} \leq 10^6$ ) δίνεται στο Σχήμα 4.36 των σημειώσεων σας. Η ροή είναι τυρβώδης ακόμη και για  $Re_{\kappa} \sim 10$  λόγω της δαιδαλώδους δομής της δέσμης των σωλήνων.



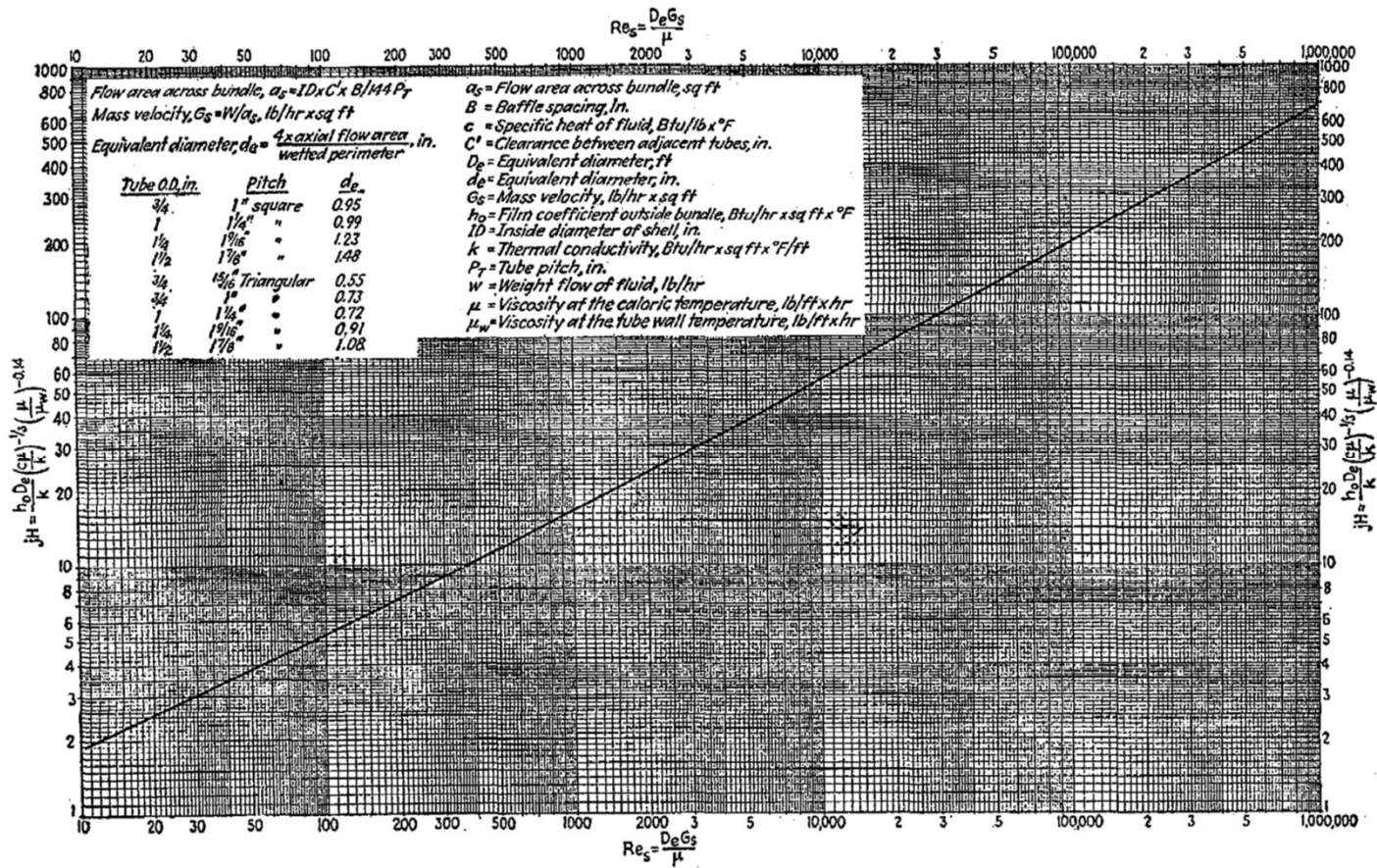


FIG. 28. Shell-side heat-transfer curve for bundles with 25% cut segmental baffles.

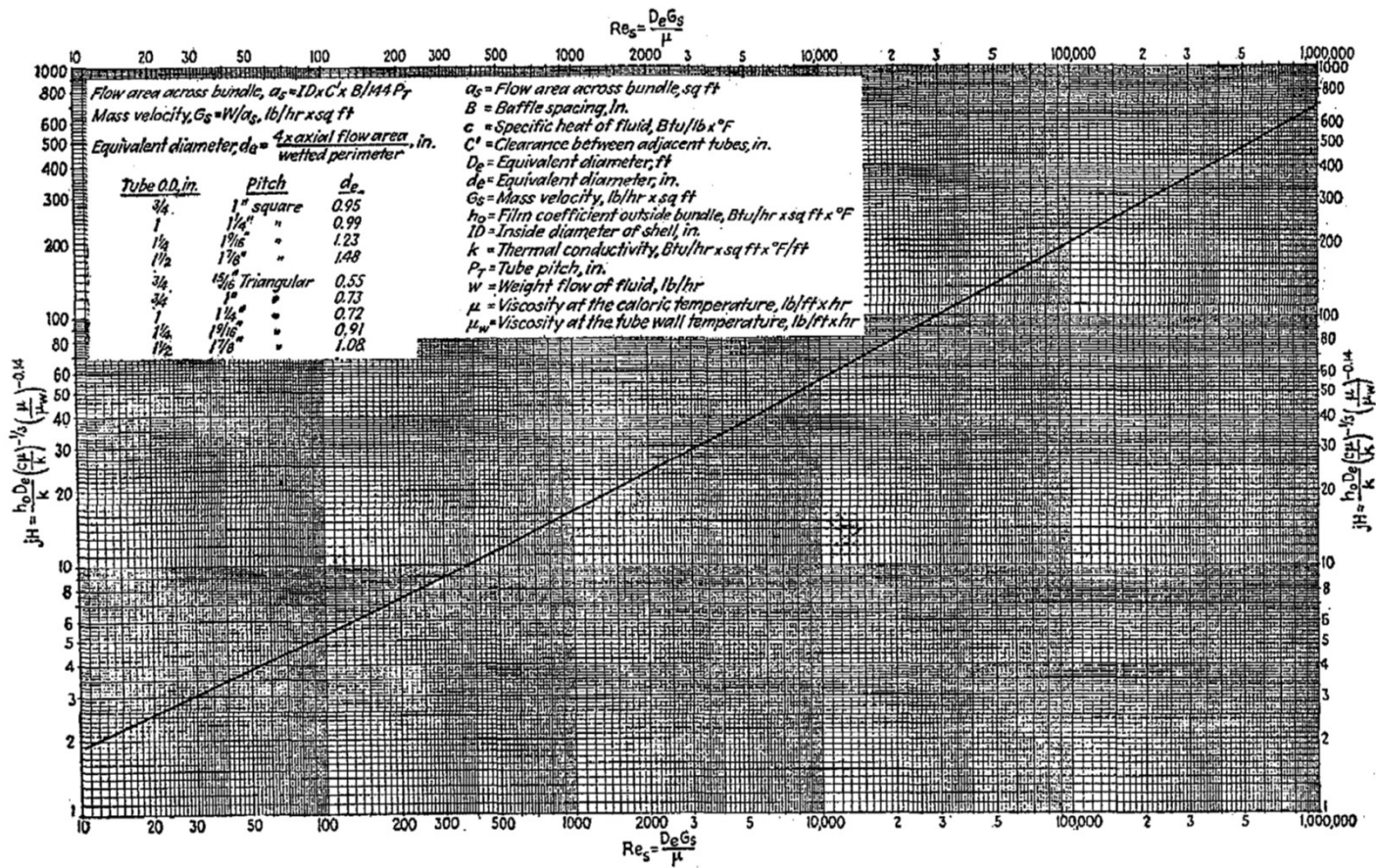


FIG. 28. Shell-side heat-transfer curve for bundles with 25% cut segmental baffles.

# Η Φαινομένη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2

$$Q = U_0 A_0 (\Delta T)_\phi = \dot{m}_\kappa c_{p,\kappa} (T_1 - T_2) = \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma} (t_2 - t_1)$$

$$(\Delta T)_\phi = \frac{(T_1 - T_2)}{(U_0 A_0 / \dot{m}_\kappa c_{p,\kappa})} = \frac{(t_2 - t_1)}{(U_0 A_0 / \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma})}$$

$T$ = θερμοκρασία εξωτερικού υγρού σε μία θέση  $x$

$t^I$ = θερμοκρασία του εσωτερικού υγρού στην πρώτη διαδρομή σε μια θέση  $x$

$t^{II}$ = θερμοκρασία του εσωτερικού υγρού στη δεύτερη διαδρομή σε μία θέση  $x$

$a_0 = A_0 / l_\sigma$  = εξωτερική επιφάνεια σωλήνων ανά μονάδα μήκους  
=  $N_\sigma \pi d_0$  (οπότε  $dA = a_0 dx$ ,  $A = a_0 x$ )

Η Φαινόμενη Διαφορά Θερμοκρασίας  $(\Delta T)_\phi$  σ' ένα  
Εναλλάκτη Τύπου 1-2

$$Q = U_{\sigma\chi} A_0 (\Delta T)_\phi$$

$$A_0 = N_\sigma \ell_\sigma \pi d_0$$

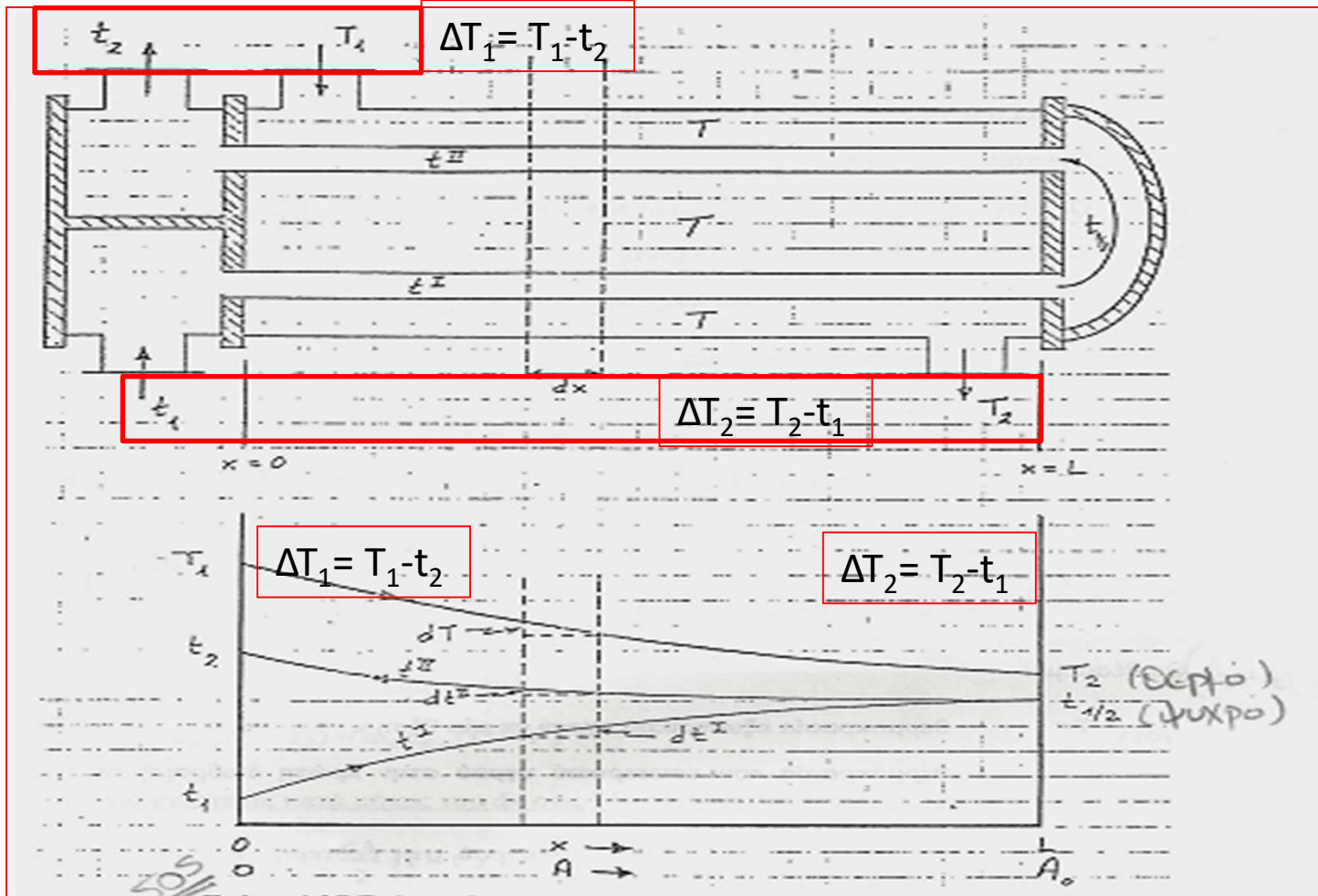
$$Q = U_0 A_0 (\Delta T)_{\ell m} F_T$$

όπου  $(\Delta T)_{\ell m}$  είναι η λογαριθμική μέση διαφορά θερμοκρασία και  $F_T$  ορίζεται ως

$$F_T = \frac{(\Delta T)_\phi}{(\Delta T)_{\ell m}} = \text{συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας}$$

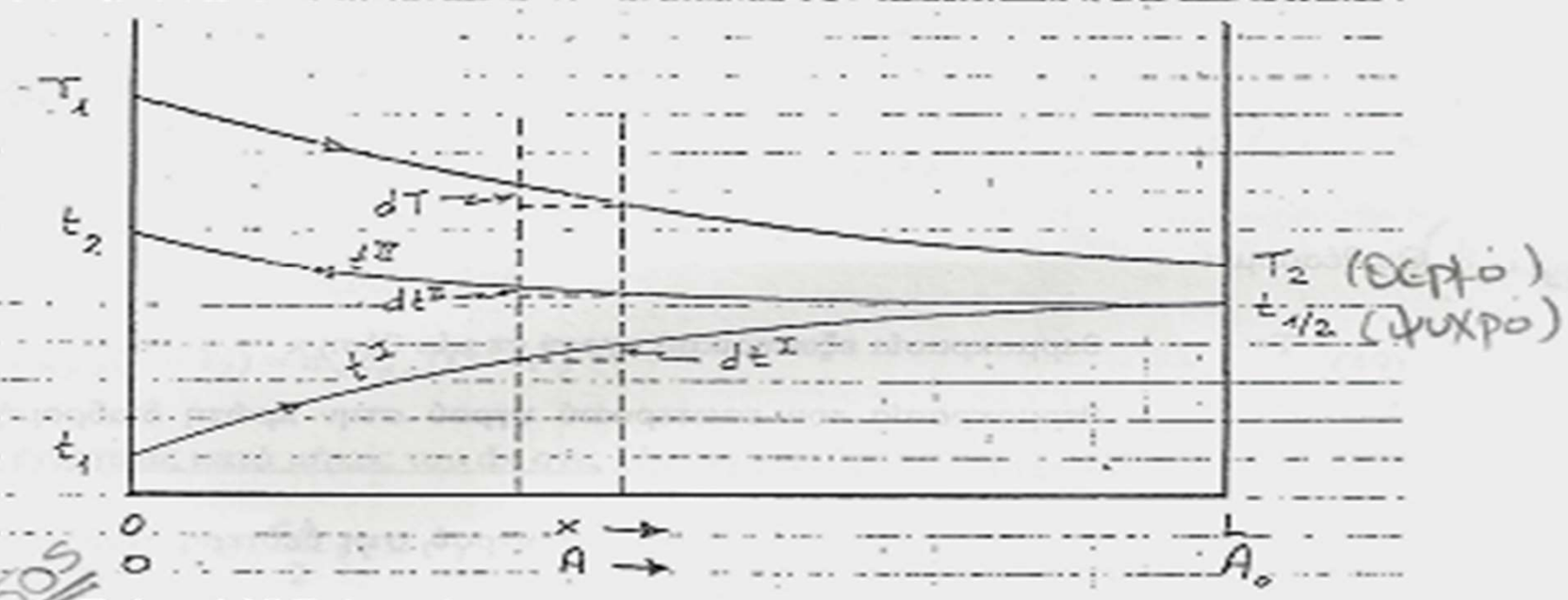
**Έτσι, το πρόβλημα ανάγεται στον προσδιορισμό του  $F_T$**

# Η Φαινόμενη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2



Σχέσεις θερμοκρασιών σ' ένα εναλλάκτη τύπου 1-2

# Υπολογισμός $(\Delta T)_\phi$





# Υπολογισμός $(\Delta T)_\phi$

Ο εναλλάκτης τύπου 1-2 λειτουργεί εν μέρει κατ' αντιρροή και εν μέρει κατ' ομορροή.

Για την ανάλυση της λειτουργίας του θα κάνουμε μερικές απλοποιητικές υποθέσεις:

1. Η θερμοκρασία του εξωτερικού ρευστού,  $T$ , είναι ομοιόμορφη επάνω σε κάθε εγκαρσία διατομή ( $x$ =σταθ.)
2. Και οι δύο διαδρομές του εσωτερικού υγρού έχουν την ίδια επιφάνεια εναλλαγής
3.  $U_0$ =σταθ. (ή  $U_{\sigma\chi}$ =σταθ.)
4. Οι μαζικές παροχές και των δύο ρευμάτων είναι σταθερές
5.  $T_1$ =σταθ.,  $t_1$ =σταθ.
6. Οι ειδικές θερμοχωρητικότητες και των δύο ρευστών είναι σταθερές
7. Δεν συμβαίνει αλλαγή φάσεως (ούτε συμπύκνωση, ούτε εξάτμιση)
8. Οι θερμικές και μαζικές απώλειες είναι αμελητέες

## Η Φαινόμενη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2

$$Q = U_0 A_0 (\Delta T)_\phi = \dot{m}_\kappa c_{p,\kappa} (T_1 - T_2) = \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma} (t_2 - t_1) \quad (45)$$

$$(\Delta T)_\phi = \frac{(T_1 - T_2)}{\boxed{(U_0 A_0 / \dot{m}_\kappa c_{p,\kappa})}} = \frac{(t_2 - t_1)}{\boxed{(U_0 A_0 / \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma})}} \quad (45')$$

$T$  = θερμοκρασία εξωτερικού υγρού σε μία θέση  $x$

$t^I$  = θερμοκρασία του εσωτερικού υγρού στην πρώτη διαδρομή σε μια θέση  $x$

$t^{II}$  = θερμοκρασία του εσωτερικού υγρού στη δεύτερη διαδρομή σε μία θέση  $x$

$a_0 = A_0 / l_\sigma =$  εξωτερική επιφάνεια σωλήνων ανά μονάδα μήκους  $= N_\sigma \pi d_0$

(οπότε  $dA = a_0 dx$ ,  $A = a_0 x$ )

Συνήθως 3 από 4 θερμοκρασίες είναι  
γνωστές, με ισοζύγιο ενέργειας  
βρίσκουμε την 4<sup>η</sup>

Στόχος ο υπολογισμός των παρονομαστών

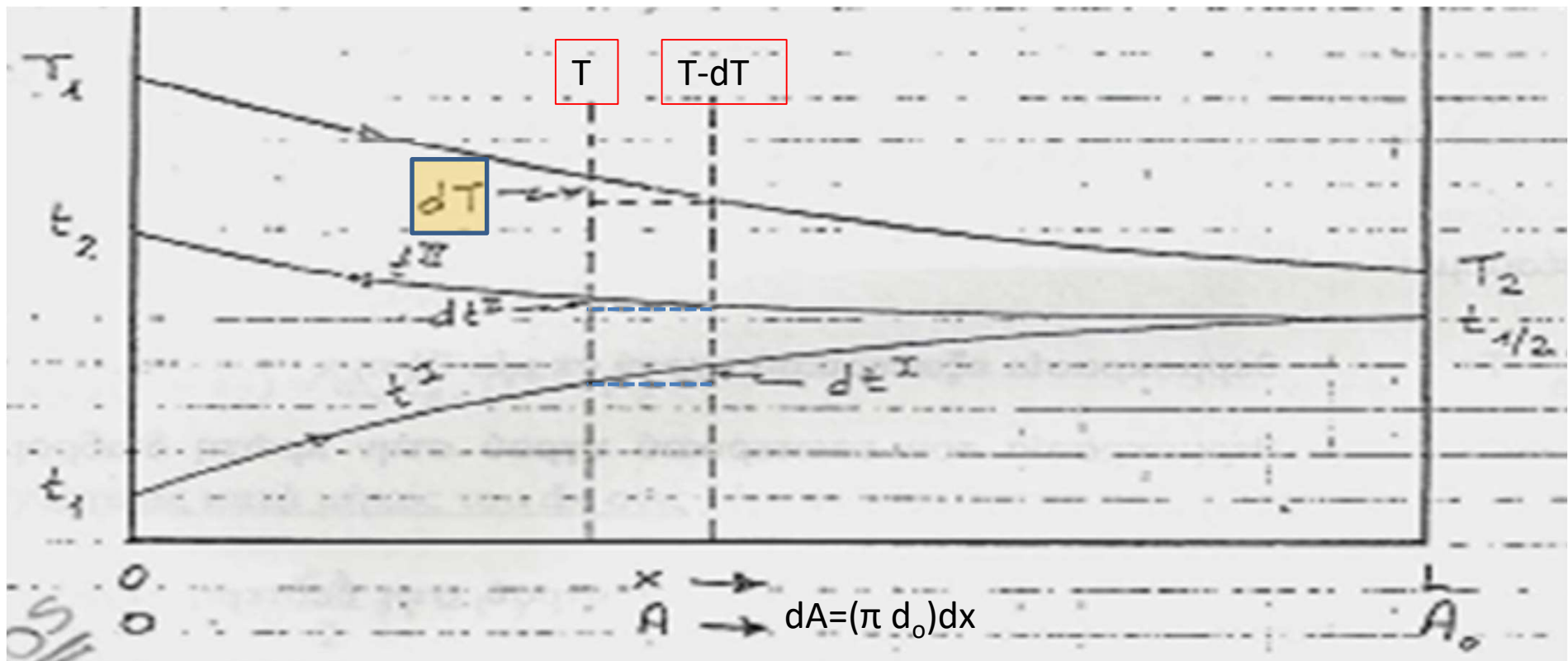
## Η Φαινομένη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2

Θεωρώντας έναν διαφορικό όγκο ελέγχου, μήκους  $dx$ , το ισοζύγιο ενέργειας μας δίνει

$$-\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa} dT = U_0 \frac{dA}{2} (T - t^I) + U_0 \frac{dA}{2} (T - t^{II}) \quad (46)$$

$$-\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa} dT = U_0 dA \left( T - \frac{t^I + t^{II}}{2} \right) \quad \text{Ολοκληρώνοντας λαμβάνουμε} \quad (\text{Άγνωστα } T, t_I, t_{II})$$

$$\int_0^{A_0} \frac{U_0}{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}} dA = - \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{\left( T - \frac{t^I + t^{II}}{2} \right)} \quad (47) \quad \rightarrow \quad \frac{U_0 A_0}{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}} = - \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{\left( T - \frac{t^I + t^{II}}{2} \right)} \quad (48)$$



## Η Φαινομένη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2

Ισοζύγιο ενέργειας από  $x=x$  μέχρι  $x=l_\sigma$

$$\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa} (T - T_2) = \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma} (t^{II} - t^I) \quad (49) \quad (53)$$

$$\text{και διαφορίζοντας, } dt^{II} = \frac{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} dT + dt^I \quad \text{δαιρώ με } dt^I \quad (54)$$

$$\frac{dt^{II}}{dt^I} = \frac{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \frac{dT}{dt^I} + 1 \quad \rightarrow \quad \frac{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \left( \frac{dT}{dt^I} \right) = \left( \frac{dt^{II}}{dt^I} \right) - 1 \quad \rightarrow \quad - \frac{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \left( \frac{dT}{dt^I} \right) = 1 - \left( \frac{dt^{II}}{dt^I} \right)$$

Ισοζύγια ενέργειας κατά μήκος του  $dx$  στις δύο διαδρομές

$$\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma} dt^I = U_0 \frac{dA}{2} (T - t^I) \quad \text{και} \quad \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma} dt^{II} = -U_0 \frac{dA}{2} (T - t^{II})$$

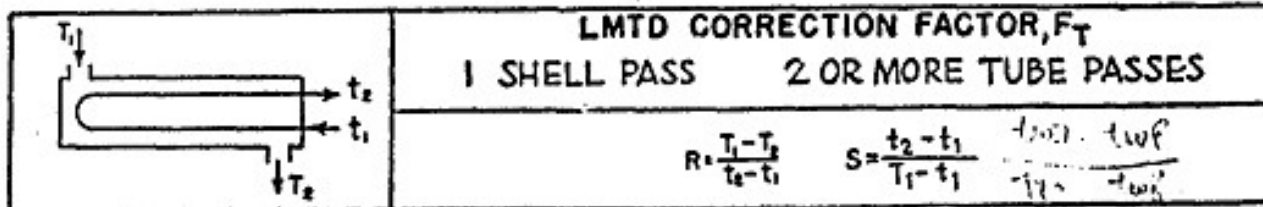
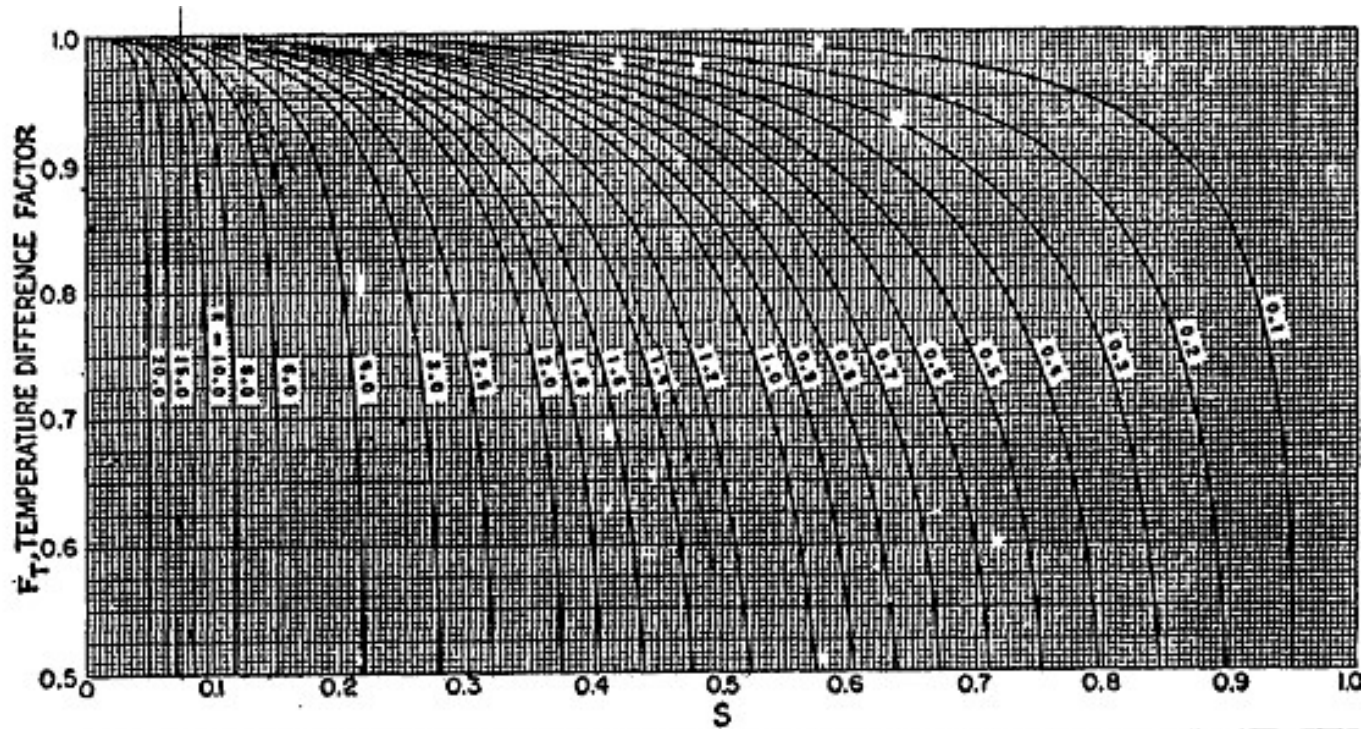
Δαιρώντας τις δύο εξισώσεις λαμβάνουμε

$$\frac{dt^{II}}{dt^I} = - \frac{T - t^{II}}{T - t^I} \quad \rightarrow \quad - \frac{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \frac{dT}{dt^I} = 1 + \frac{T - t^I - \left( \frac{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \right) (T - T_2)}{T - t^I} \quad (55)$$

Η Εξισ. (55) περιέχει δύο εξαρτημένες μεταβλητές,  $T$  και  $t^I$ . Πρέπει να απαλειφθεί η μία από τις δύο.

Η Φαινομένη Διαφορά Θερμοκρασίας  $(\Delta T)_\phi$  σ' ένα Εναλλάκτη  
Τύπου 1-2

Θέτουμε  $R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}}{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}} \quad S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (56)$



## Η Φαινομένη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2

Θεωρώντας έναν διαφορικό όγκο ελέγχου, μήκους  $dx$ , το ισοζύγιο ενέργειας μας δίνει

$$-\dot{m}_k c_{p,k} dT = U_0 dA \left( T - \frac{t^I + t^{II}}{2} \right) \xrightarrow{(46')} \xrightarrow{(46)} -\dot{m}_k c_{p,k} dT = U_0 \frac{dA}{2} (T - t^I) + U_0 \frac{dA}{2} (T - t^{II}) \quad : dA$$

$$\dot{m}_k c_{p,k} \frac{dT}{dA} + \frac{U_0}{2} (T - t^I) + \frac{U_0}{2} (T - t^{II}) = 0 \quad (57) \quad : m_k c_{p,k}$$

$$\frac{dT}{dA} + \frac{U_0 R}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} T - \frac{U_0 R}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (t^I + t^{II}) = 0 \quad (58) \quad \text{Διαφορίζοντας ως προς } A \text{ παίρνουμε}$$

$$\frac{d^2 T}{dA^2} + \frac{U_0 R}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \frac{dT}{dA} - \frac{U_0 R}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \left( \frac{dt^I}{dA} + \frac{dt^{II}}{dA} \right) = 0$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}}{\dot{m}_k c_{p,k}}$$

$$m_k c_{p,k} = [m_\sigma c_{p,\sigma} / R]$$

$$\frac{d^2 T}{dA^2} + \frac{U_0 R}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \frac{dT}{dA} - \frac{U_0^2 R}{(2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma})^2} (t^{II} - t^I) = 0 \quad (59)$$

$$t^{II} - t^I = \frac{\dot{m}_k c_{p,k}}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (T - T_2) \Rightarrow t^{II} - t^I = \frac{1}{R} (T - T_2) \quad (60)$$

(53)

$$\frac{dt^{II}}{dA} = -\frac{U_0}{2} \frac{1}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (T - t^{II})$$

## Η Φαινομένη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2

$$\frac{d^2 T}{dA^2} + \frac{U_0 R}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \frac{dT}{dA} - \frac{U_0^2}{(2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma})^2} T = - \frac{U_0^2 T_2}{(2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma})^2} \quad (63)$$

Η Εξισ. αυτή είναι μια κανονική διαφορική εξίσωση δευτέρας τάξεως με σταθερούς συντελεστές, μη ομογενής, και μπορεί να ολοκληρωθεί με τη γνωστή μέθοδο για να πάρουμε:

$$T = T_2 + C_1 \exp \left[ -\frac{U_0 A}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (R + \sqrt{R^2 + 1}) \right] + C_2 \exp \left[ -\frac{U_0 A}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (R - \sqrt{R^2 + 1}) \right] \quad (64)$$

Οι σταθερές  $C_1$  και  $C_2$  θα προσδιορισθούν από τις οριακές συνθήκες:

$$\text{Ο.Σ.1: } T(0) = T_1 \rightarrow T_1 = T_2 + C_1 + C_2 \rightarrow T_1 - T_2 = C_1 + C_2. \quad (66)$$

$$\text{Ο.Σ.2: } T(A_0) = T_2 \rightarrow -C_1 \exp \left[ -\frac{U_0 A_0}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (R + \sqrt{R^2 + 1}) \right] = C_2 \exp \left[ -\frac{U_0 A_0}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (R - \sqrt{R^2 + 1}) \right]$$

Παίρνοντας λογαρίθμους και απλοποιώντας λαμβάνουμε  $\frac{U_0 A_0}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + 1}} \ln \left( -\frac{C_1}{C_2} \right)$  (65)

$$C_1 = - (T_1 - T_2) \frac{\exp(\phi \sqrt{R^2 + 1})}{1 - \exp(\phi \sqrt{R^2 + 1})} \quad C_2 = (T_1 - T_2) \frac{1}{1 - \exp(\phi \sqrt{R^2 + 1})} \quad \phi \equiv \frac{U_0 A_0}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \quad (70)$$

$$T = T_2 + \frac{(T_1 - T_2)}{1 - \exp \left( \frac{U_0 A_0}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \sqrt{R^2 + 1} \right)} \left\{ \exp \left[ -\frac{U_0 A}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (R - \sqrt{R^2 + 1}) \right] - \exp \left( -\frac{A}{2A_0} \frac{R + \sqrt{R^2 + 1}}{\sqrt{R^2 + 1}} \right) \right\}$$

## Η Φαινομένη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2

**(70)**

$$T = T_2 + \frac{(T_1 - T_2)}{1 - \exp\left(\frac{U_0 A_0}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} \sqrt{R^2 + 1}\right)} \left\{ \exp\left[-\frac{U_0 A}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (R - \sqrt{R^2 + 1})\right] - \exp\left(-\frac{A}{2A_0} \frac{R + \sqrt{R^2 + 1}}{\sqrt{R^2 + 1}}\right) \right\}$$

(71) Το συντελεστή  $F_T$  προσδιορίζουμε ως εξής. Διαφορίζοντας την παραπάνω εξίσωση, παίρνουμε:

$$\frac{dT}{dA} = -C_1 \frac{U_0}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (R + \sqrt{R^2 + 1}) \exp\left[-\frac{U_0 A}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (R + \sqrt{R^2 + 1})\right] - C_2 \frac{U_0}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (R - \sqrt{R^2 + 1}) \exp\left[-\frac{U_0 A}{2\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} (R - \sqrt{R^2 + 1})\right]$$

Για  $A=0$  ]  $R(t_1 + t_2) - 2RT_1 = -C_1(R + \sqrt{R^2 + 1}) - C_2(R - \sqrt{R^2 + 1})$  (73)  
 (58)

$$C_2 = \frac{R(t_1 + t_2) + (T_1 - T_2)(R + \sqrt{R^2 + 1}) - 2RT_1}{2\sqrt{R^2 + 1}} \quad C_1 = -\frac{(R + \sqrt{R^2 + 1})(T_1 - T_2) - 2\sqrt{R^2 + 1}(T_1 - T_2) - 2RT_1 + R(t_1 + t_2)}{2\sqrt{R^2 + 1}}$$

$$S = (t_2 - t_1) / (T_1 - t_1),$$

$$-\frac{C_1}{C_2} = \frac{(R - \sqrt{R^2 + 1})(t_1 - t_2) - (T_1 - t_1) - (T_1 - t_2)}{(R + \sqrt{R^2 + 1})(t_1 - t_2) - (T_1 - t_1) - (T_1 - t_2)} \quad (76) \quad -\frac{C_1}{C_2} = \frac{2 - S(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})} \quad (77)$$

$$\frac{U_0 A_0}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + 1}} \ln\left(-\frac{C_1}{C_2}\right)$$

$$(\Delta T)_\phi = \frac{(T_1 - T_2)}{(U_0 A_0 / \dot{m}_\kappa c_{p,\kappa})} = \frac{(t_2 - t_1)}{(U_0 A_0 / \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma})}$$

$$\frac{U_0 A_0}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + 1}} \ln \frac{2 - S(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})} \quad (78)$$



## Η Φαινομένη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2

$$\frac{U_0 A_0}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + 1}} \ln \frac{2 - S(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}$$

$$(\Delta T)_\phi = \frac{(T_1 - T_2)}{(U_0 A_0 / \dot{m}_\kappa c_{p,\kappa})} = \frac{(t_2 - t_1)}{(U_0 A_0 / \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma})}$$

$$(\Delta T)_\phi = \frac{(t_2 - t_1) \sqrt{R^2 + 1}}{\ln \frac{2 - S(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}}$$

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}}$$

δηλαδή, ως να είχαμε καθαρή αντιρροή.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}}{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}} \quad S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(t_2 - t_1)(R - 1)}{\ln \frac{(1 - S)}{(1 - RS)}}$$

$$F_T = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \ln \frac{(1 - S)}{(1 - RS)}}{(R - 1) \ln \frac{2 - S(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}} = (\Delta T)_\phi / (\Delta T)_{lm}$$

$$(\Delta T)_\phi = (\Delta T)_{lm} F_T$$

# Η Φαινομένη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2

$$(\Delta T)_{\ell m} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} : \text{Σαν να είχαμε καθαρή αντιρροή}$$

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εναλλάκτη, διάμετρος σωλήνων, μήκος σωλήνων, διάμετρος κελύφους, Επιφάνεια Εναλλαγής,  $A_o$

$$F_T = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \ln \frac{(1-S)}{(1-RS)}}{(R-1) \ln \frac{2 - S(R+1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R+1 + \sqrt{R^2 + 1})}}$$

Υπολογισμοί θερμοκρασιών,  $T_1, T_2, t_1, t_2, \Delta T_1, \Delta T_2, F_T, (\Delta T)_{lm} \rightarrow (\Delta T)_\phi$

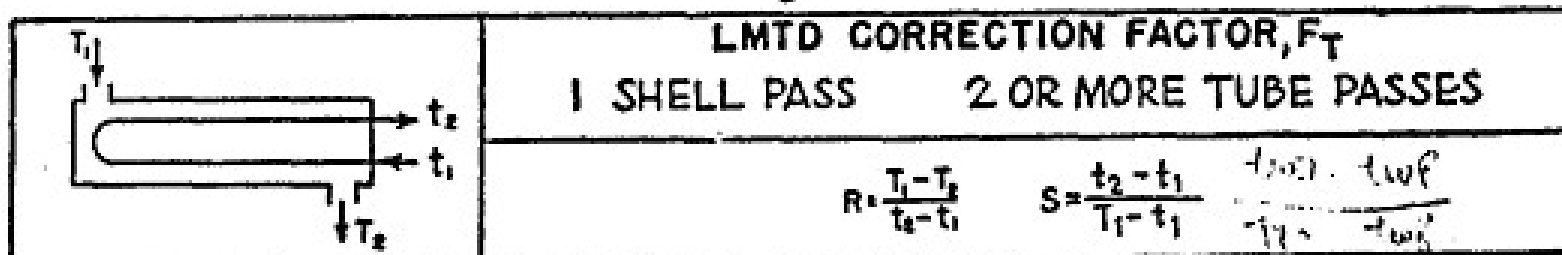
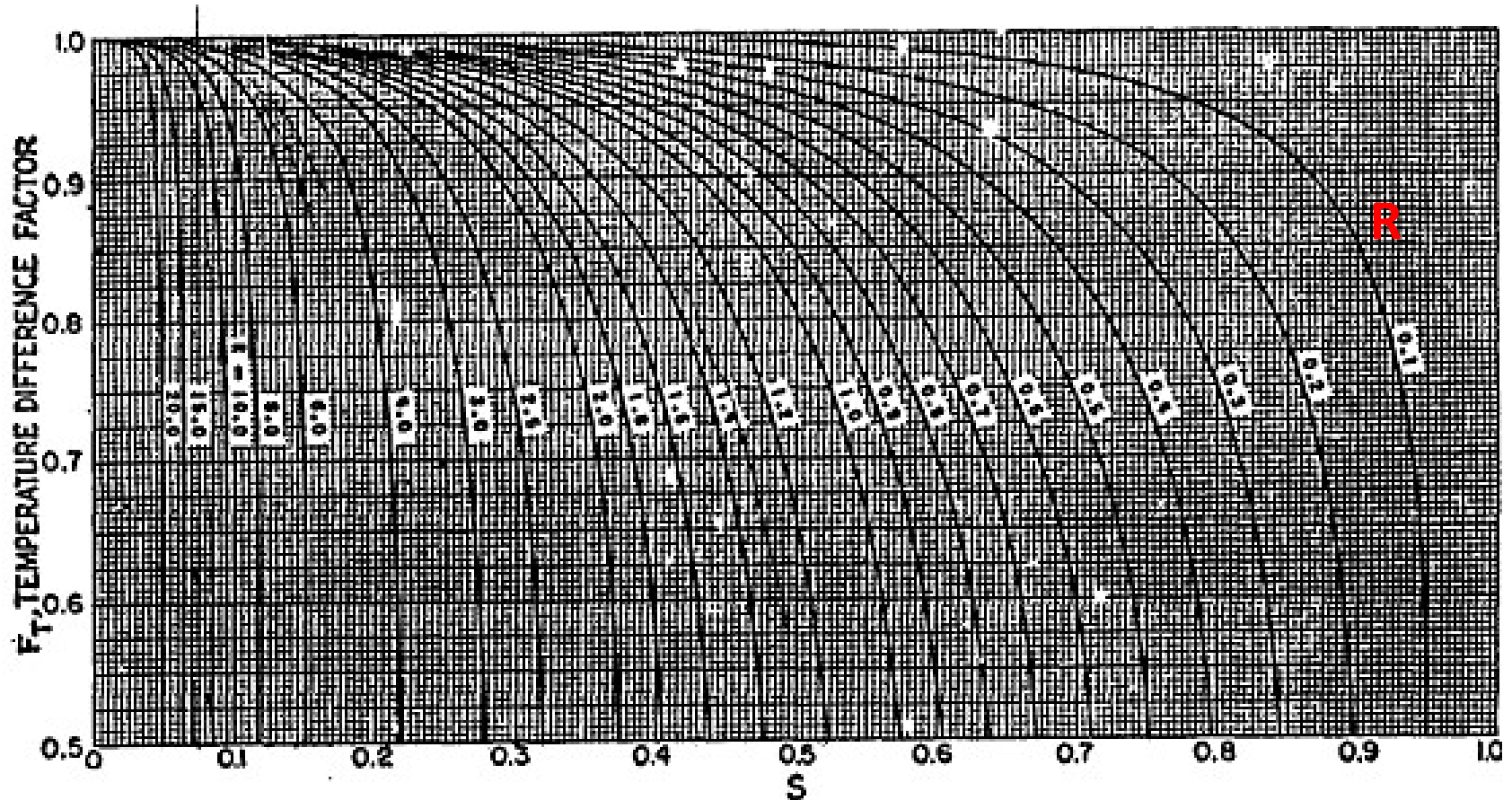
Υπολογισμοί  $h_i, h_o, U_o (U_i), R_p, U_{σχ}$

$$(\Delta T)_\phi = \frac{(t_2 - t_1) \sqrt{R^2 + 1}}{\ln \frac{2 - S(R+1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S(R+1 + \sqrt{R^2 + 1})}}$$

$$Q = U_o A_o (\Delta T)_{\ell m} F_T$$

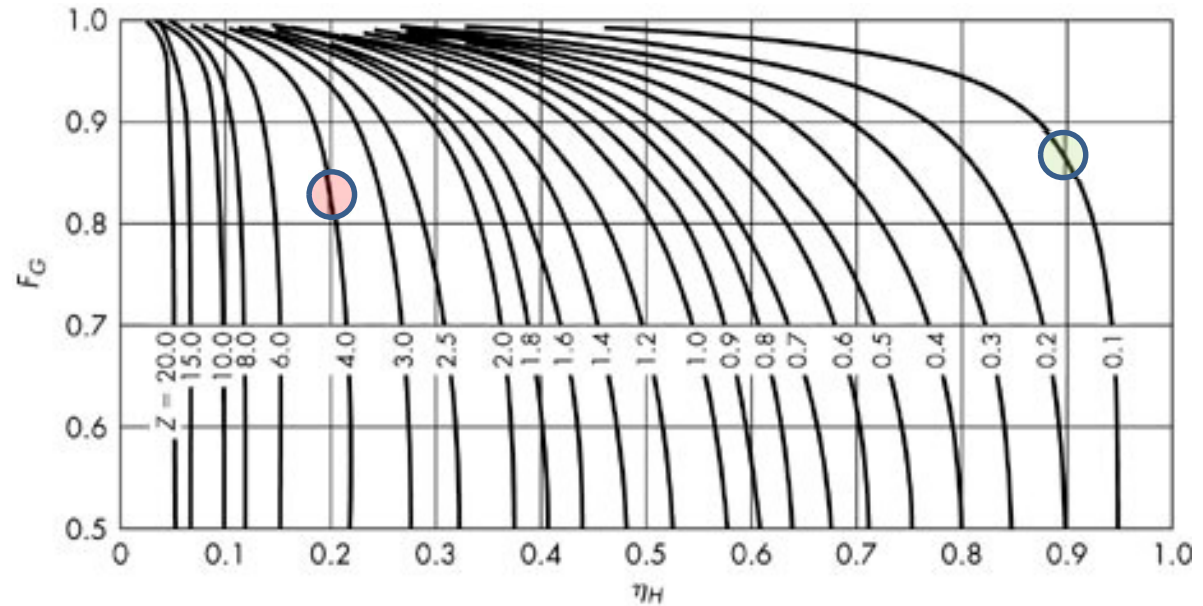
Έλεγχος  $\Delta P, R_p$

# Η Φαινομένη Διαφορά Θερμοκρασίας $(\Delta T)_\phi$ σ' ένα Εναλλάκτη Τύπου 1-2

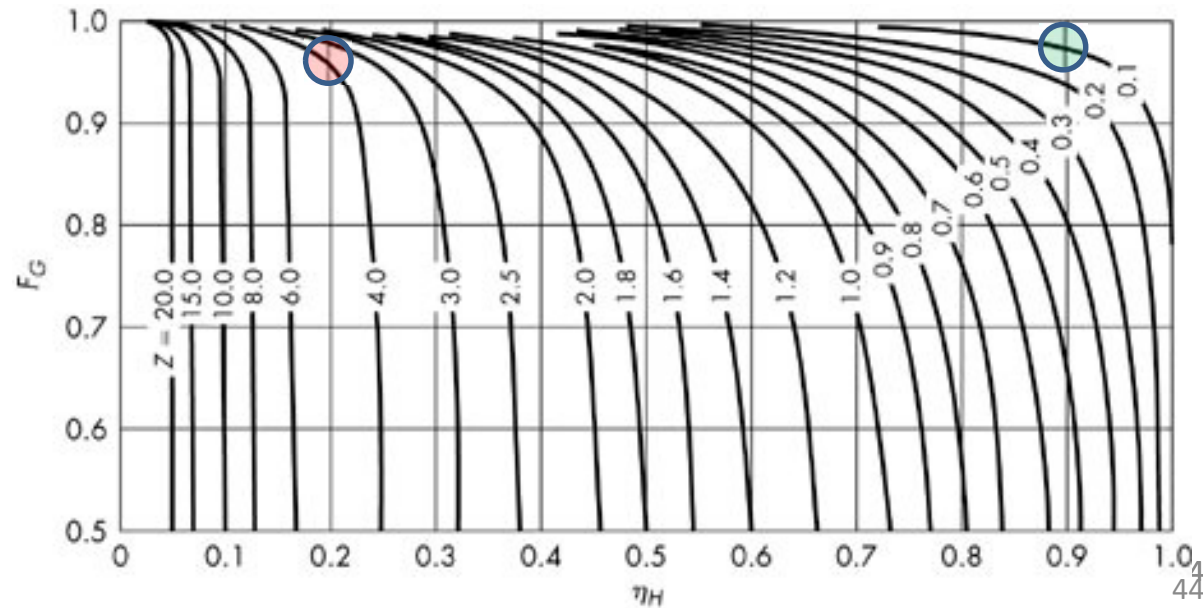


# Διόρθωση της LMTD

1-2



2-4



## Απώλειες Υδροστατικής Κεφαλής Μέσα στο Κελύφος

Η πτώση πίεσεως μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του κελύφους δίνεται από την ακόλουθη ημιαμπειρική σχέση (Kern, 1950):

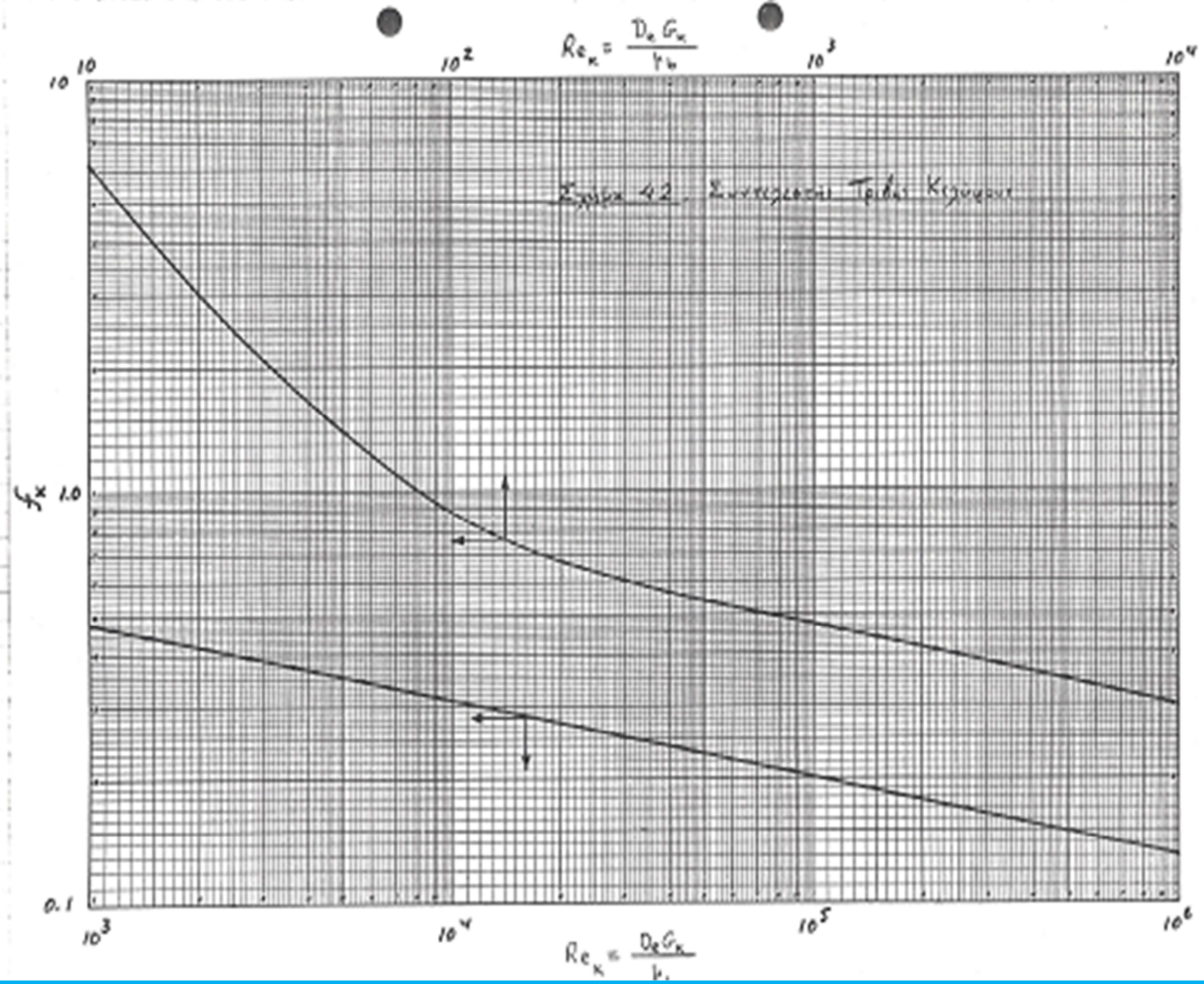
$$(\Delta p)_\kappa = (N_\chi + 1) f_\kappa \frac{D_\kappa}{D_e} \frac{\rho_\kappa}{2} \left( \frac{G_\kappa}{\rho_\kappa} \right)^2 \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_\kappa^{-0.14}$$

όπου:  $(\Delta p)_\kappa$ = πτώση πίεσεως  
 $\rho_\kappa$ = πυκνότητα του ρευστού του κελύφους  
 $N_\chi$ = αριθμός χωρισμάτων (χωρίς τα τοιχώματα στηρίζεως)  
 $D_\kappa$ = εσωτερική διάμετρος κελύφους  
 $D_e$ = ισοδύναμη διάμετρος δέσμης σωλήνων, Εξισ. (32)  
 $G_\kappa$ = μαζική ταχύτητα, Εξισ. (35)  
 $\mu_b, \mu_w$ =δυναμικό ιξώδες του ρευστού του κελύφους στην θερμοκρασία μίξεως και στη θερμοκρασία του τοίχου

$f_\kappa$ = συντελεστής τριβής του κελύφους (Σχήμα 4.42)

Ο συντελεστής τριβής του κελύφους δίνεται ως συνάρτηση του αριθμού  $Re_\kappa = D_e G_\kappa / \mu_b$  στο **Σχήμα 4.42**. Η τιμή του  $f_\kappa$  περιλαμβάνει και τις απώλειες εισόδου και εξόδου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι  $N_\chi + 1 = \frac{\ell_\sigma}{B_\chi}$  όπου  $\ell_\sigma$ =μήκος σωλήνα.



Η απώλεια πίεσως κατά μήκος των σωλήνων υπολογίζεται από τη σχέση

$$(\Delta p)_\sigma = N_\delta f \frac{\ell_\sigma}{d_i} \frac{\rho_\sigma}{2} \left( \frac{G_\sigma}{\rho_\sigma} \right)^2 \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{-0.14}$$

Επιπλέον, λαμβάνουμε υπόψη μας τις αλλαγές διαδρομής εκτιμώντας 4 κεφαλές ταχύτητας ανά διαδρομή. Οι απώλειες αυτές καλούνται απώλειες στροφών. Η αντίστοιχη πτώση πίεσως,  $(\Delta p)_{\sigma\tau}$ , δίνεται από τη σχέση

$$(\Delta p)_{\sigma\tau} = 2 N_\delta \rho_\sigma \left( \frac{G_\sigma}{\rho_\sigma} \right)^2$$

Έτσι, η ολική απώλεια πίεσως δίνεται από τη σχέση

$$(\Delta p)_{\sigma,ολ} = (\Delta p)_\sigma + (\Delta p)_{\sigma\tau}$$

$$G_\sigma = \frac{\dot{m}_\sigma}{A_\sigma}$$

$$A_\sigma = \frac{N_\sigma}{N_\delta} \frac{\pi}{4} d_i^2$$

$N_\delta$  = αριθμός διαδρομών

$\ell_\sigma$  = μήκος ενός σωλήνα (αυλού)

$d_i$  = εσωτερική διάμετρος σωλήνα

$\rho_\sigma$  = πυκνότητα ρευστού σωλήνων

$G_\sigma$  = μαζική ταχύτητα ρευστού σωλήνων

$\mu_b, \mu_w$  = δυναμικό ιξώδες του ρευστού σωλήνων στη θερμοκρασία μίξεως και τη θερμοκρασία τοίχου, αντίστοιχα

$A_\sigma$  = επιφάνεια διατομών σωλήνων, ανά διαδρομή

$N_\sigma$  = αριθμός σωλήνων μέσα στο κέλυφος

$$f = \text{συντελεστής τριβής του Fanning} = f \left( Re_\sigma, \frac{e}{d_i} \right) \quad Re_\sigma = \frac{d_i G_\sigma}{\mu_b}$$