

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

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΧΡ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ



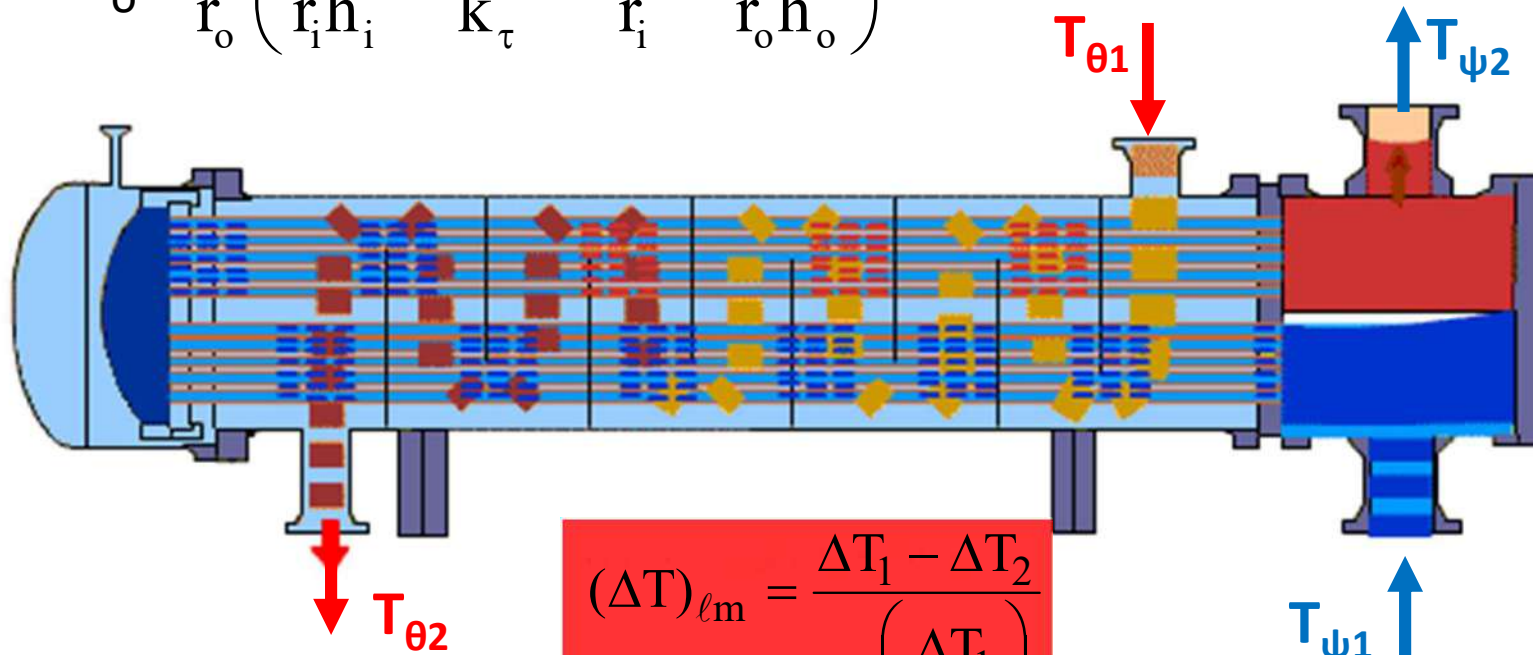
ΔT η οδηγούσα δύναμη

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

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

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

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



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

ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, U

Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μέσα σε Αυλούς

i) Στρωτή Ροή, $Re_b < 2100$

Εξίσωση των Sieder and Tate (1936)

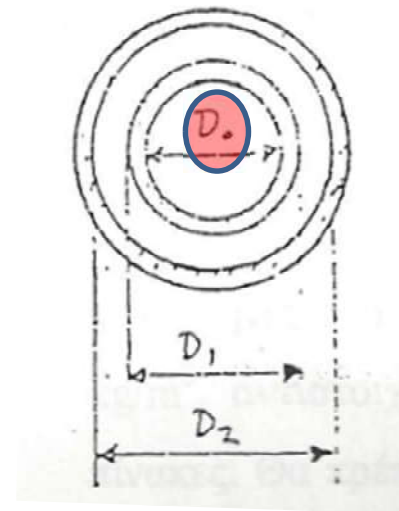
$$Nu_{lm} = \frac{h_{lm} D}{k_b} = 1.86 \left(Re_b Pr_b \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1.86 \left(\frac{4 \dot{m} c_p}{\pi k_b L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

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:

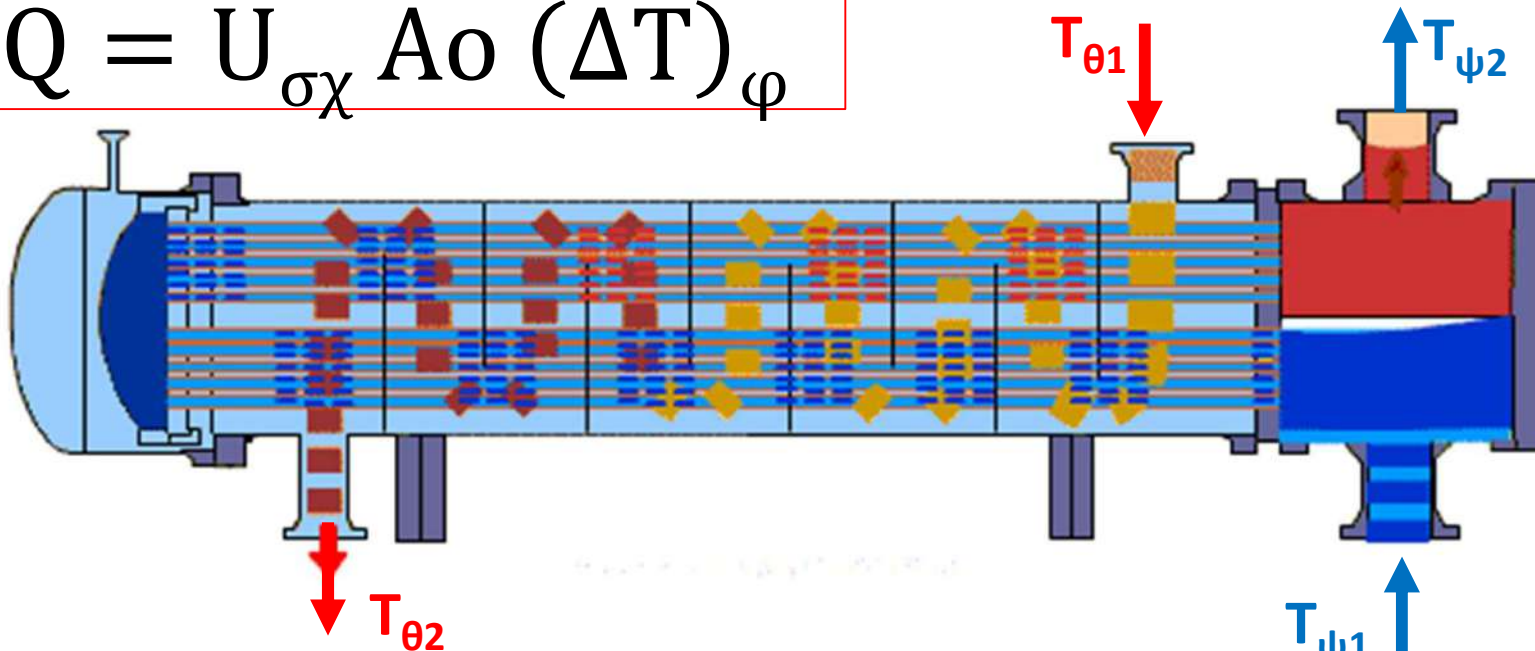
$$Q, \Delta T_1, \Delta T_2, (\Delta T)_{lm}, h_i, h_o, U_o, U_{σχ}, \Delta P$$

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

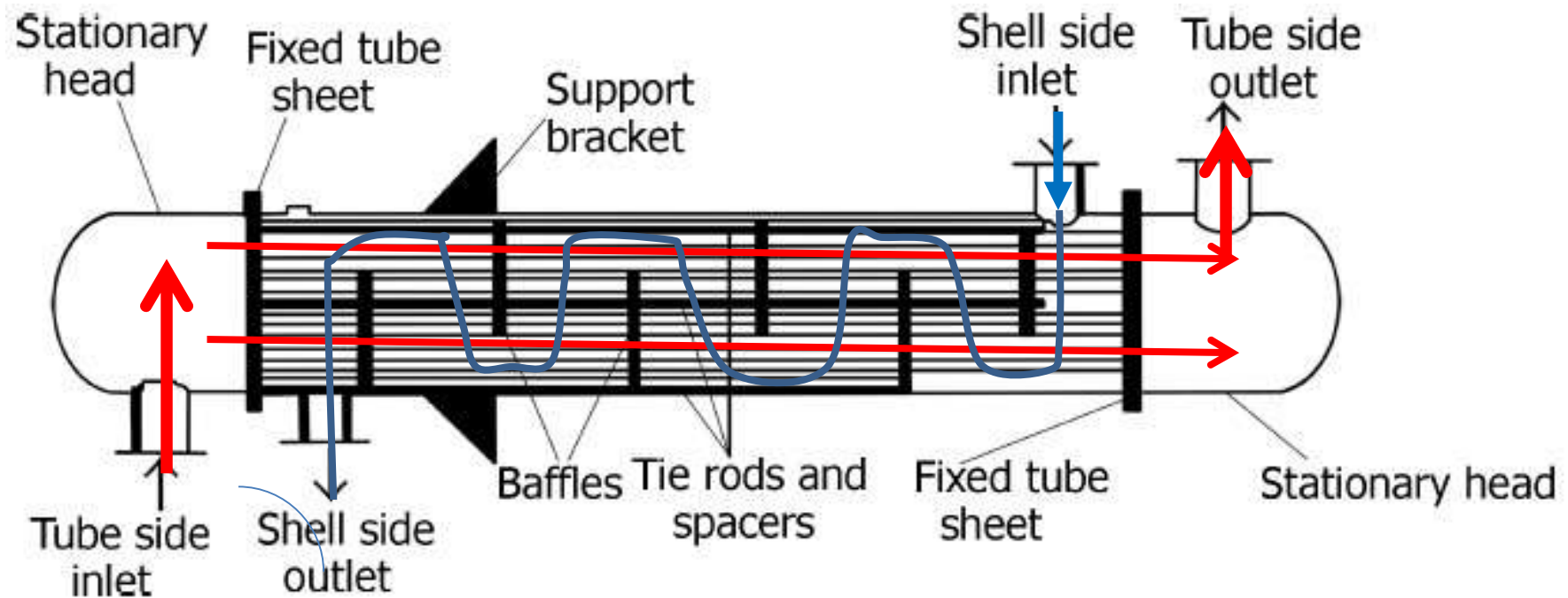
$$Q = U_o A_o (\Delta T)_{lm}$$

Ισχύει για συνδυασμό ομορροής και αντιρροής

$$Q = U_{σχ} A_o (\Delta T)_\varphi$$

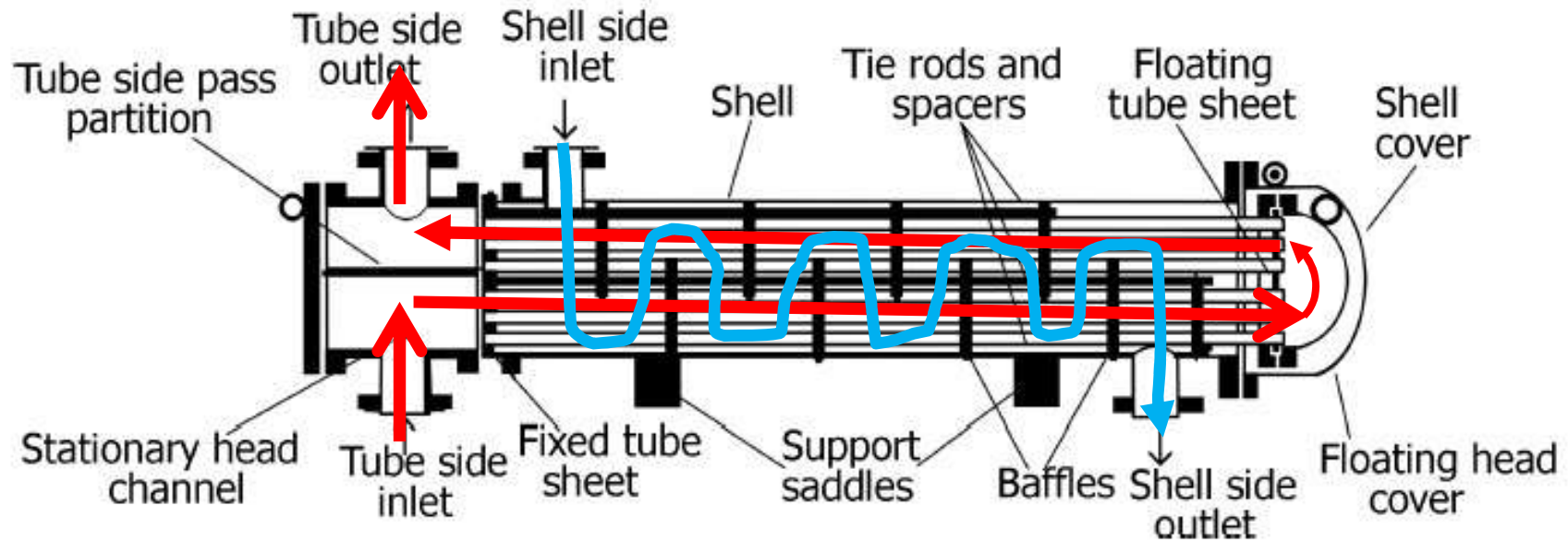


ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ Εναλλάκτης Τύπου κελύφους αυλών



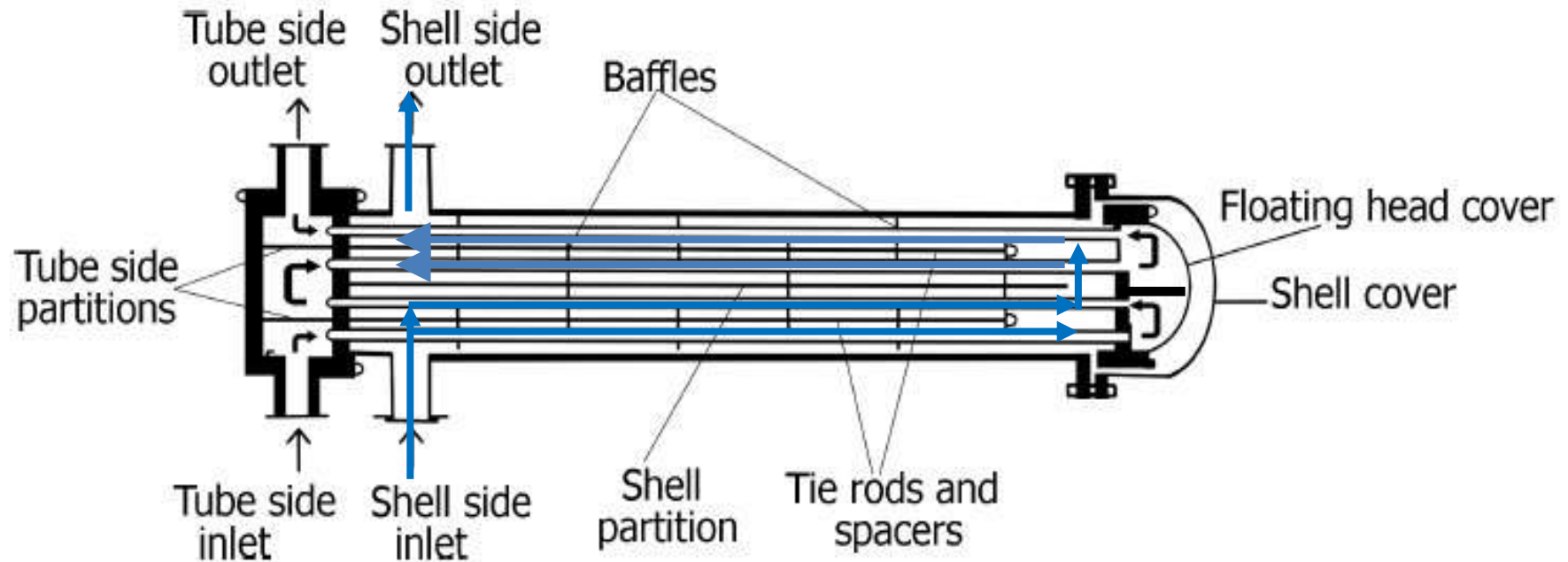
Εναλλάκτης τύπου κελύφους-αυλών με ολισθαίνον τοίχωμα στηρίξεως. **Διάταξη καθαρής αντιρροής**. Εχουμε ένα πέρασμα του ρεύματος μέσα από το κέλυφος και ένα πέρασμα του άλλου ρεύματος μέσα από τους αυλούς, γι' αυτό ο τύπος αυτός χαρακτηρίζεται ως **1-1**.

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**.

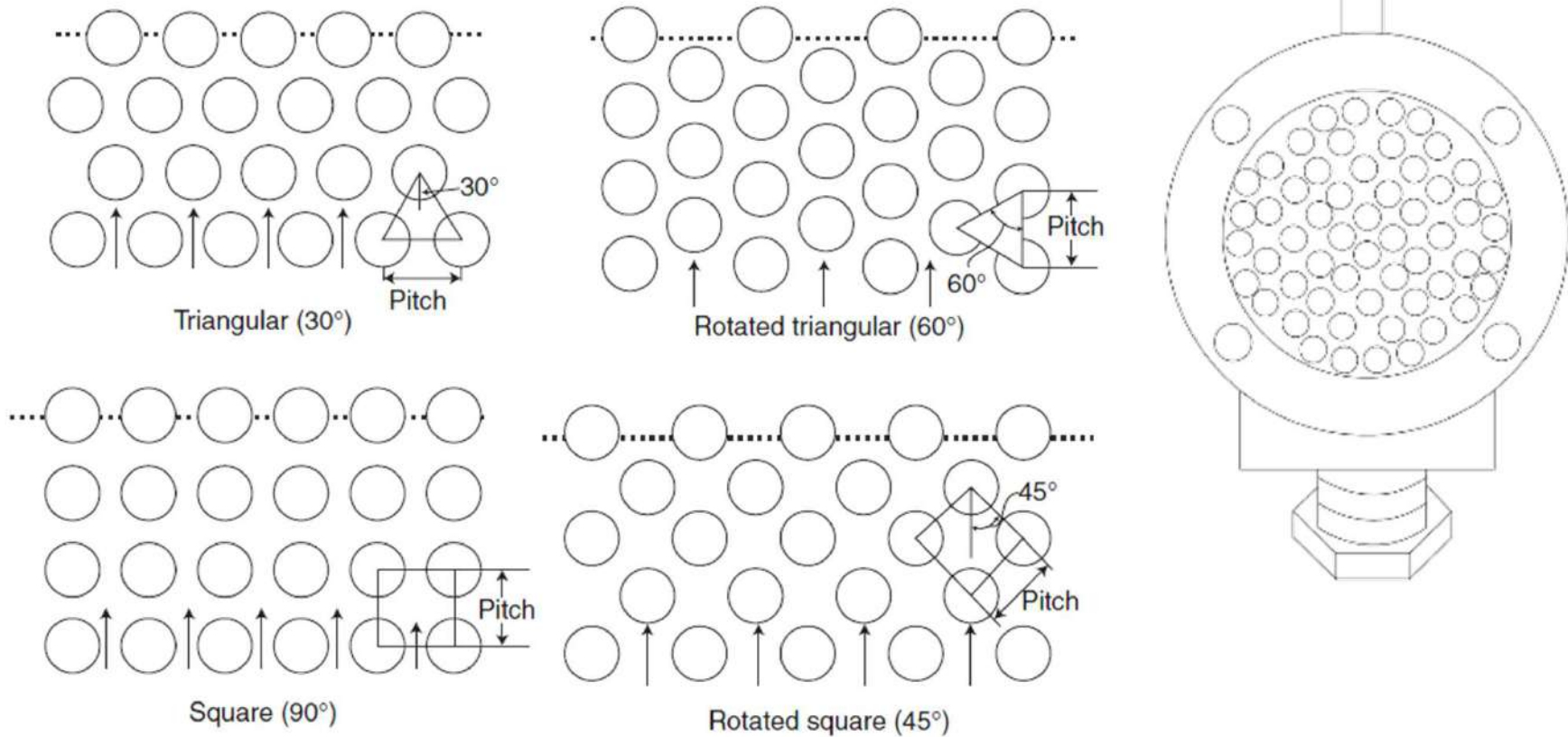
ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ Εναλλάκτης Τύπου κελύφους αυλών



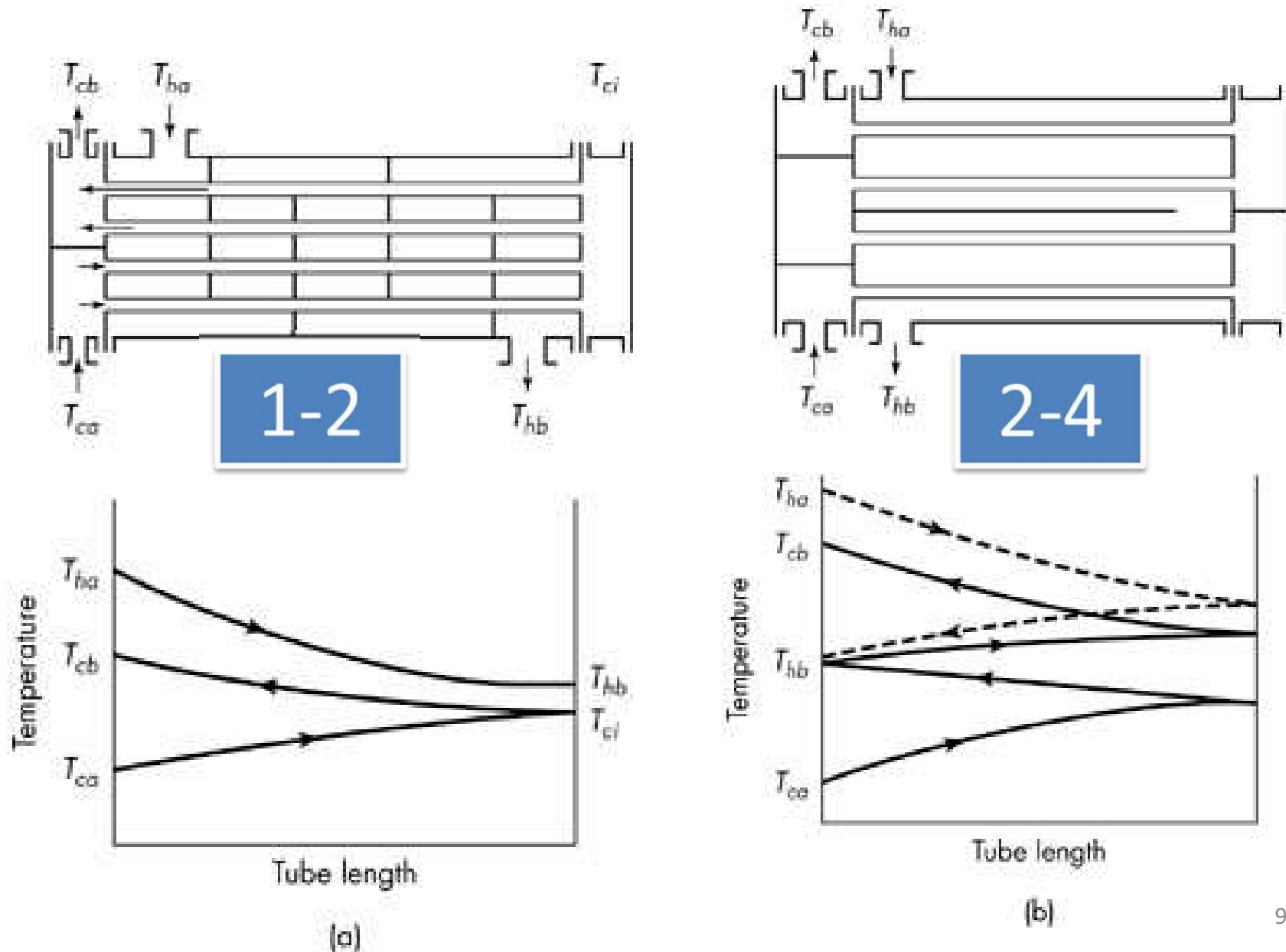
Εναλλάκτης κελύφους-αυλών τύπου **2-4** (δύο περάσματα στο κέλυφος, τέσσερα περάσματα στους αυλούς) με ολισθαίνον τοίχωμα στηρίξεως.

Εναλλάκτες Θερμότητας

- ΤΕΜΑ (Tubular Exchanger Manufacturers Association)



Εναλλάκτες πολλαπλών διαδρομών



Διόρθωση της $(\Delta T)_{lm}$

- Η ΔT για την κάθε διαδρομή δεν είναι γραμμική συνάρτηση της θερμοότητας. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ο παράγοντας διόρθωσης F_G

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

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

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

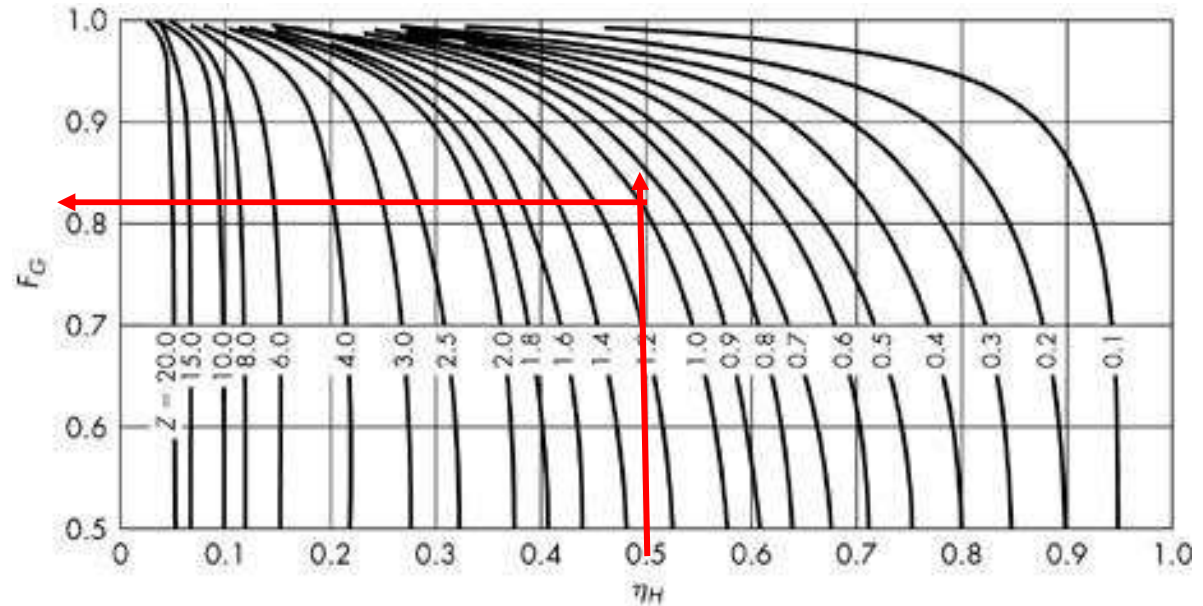
- $Z = \frac{\text{πτώση θερμοκρασίας θερμού ρευστού}}{\text{αύξηση θερμοκρασίας ψυχρού ρευστού}} = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$

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

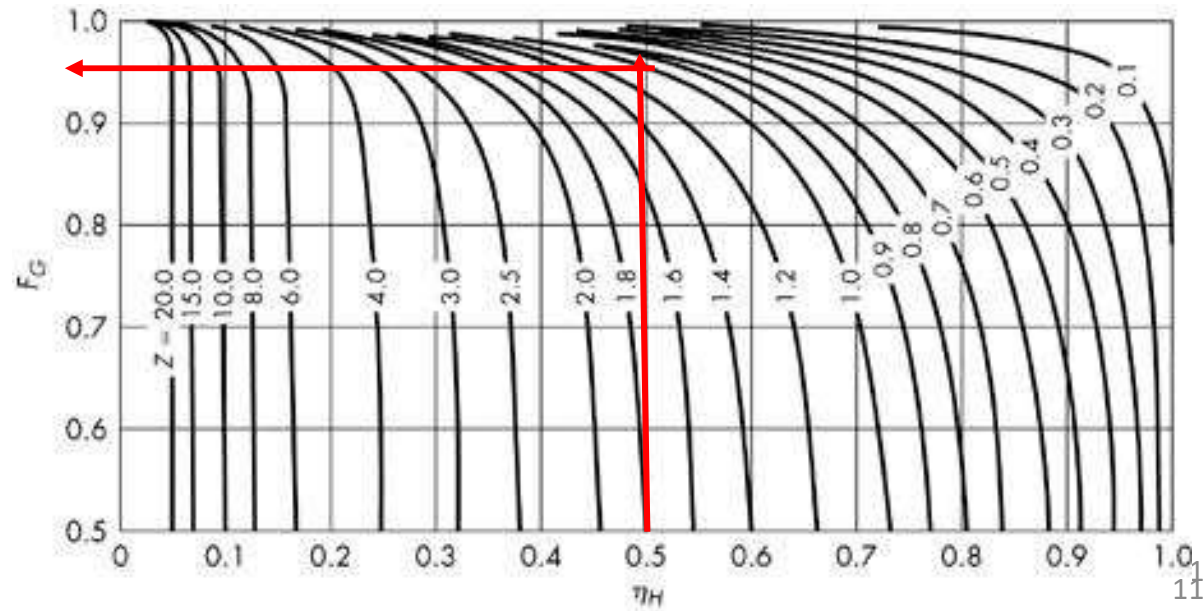
$$(\Delta T)_\phi = F_G (\Delta T)_{lm} \quad 0 < F_G < 1 \quad = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

Διόρθωση της LMTD

1-2



2-4



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h

Υπολογισμός του Εξωτερικού Συντελεστή

Μεταφοράς Θερμότητας (μέσα στο κέλυφος)

Ένας 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
μ_b =	δυναμικό ιξώδες του εξωτερικού ρευστού στη θερμοκρασία μίξεως
μ_w =	δυναμικό ιξώδες του εξωτερικού ρευστού στη θερμοκρασία του τοιχώματος

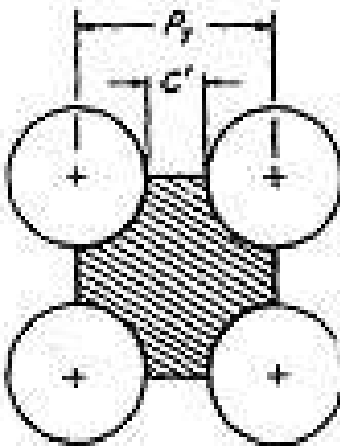
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h

Υπολογισμός του Εξωτερικού Συντελεστή

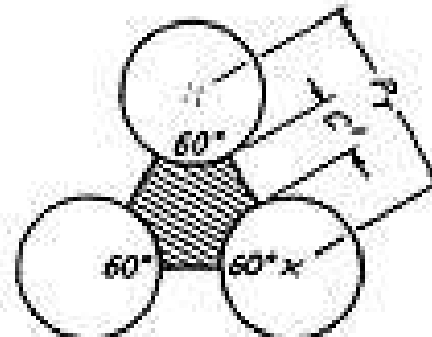
Μεταφοράς Θερμότητας

Η ισοδύναμη διάμετρος ορίζεται, εδώ, ως εξής:

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

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


(α) - Square pitch.



(β) - Triangular pitch.

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

Υπολογισμός ισοδύναμης διαμέτρου. B_σ 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_χ = βήμα χωρισμάτων
 B_σ = 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_{κ} (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.

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

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

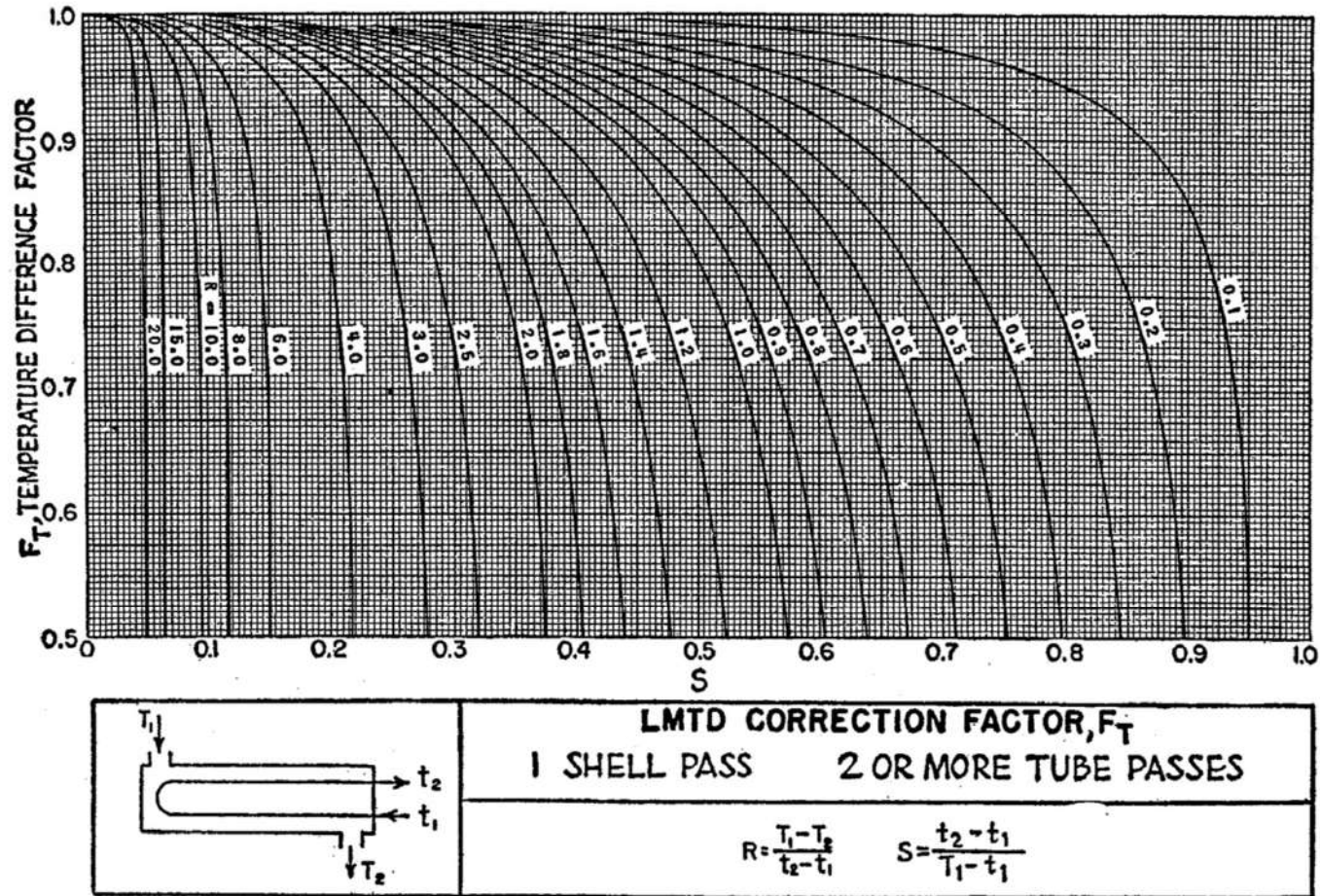
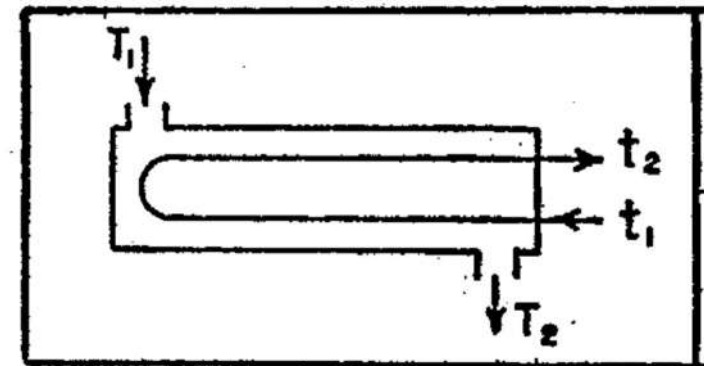


FIG. 18. LMTD correction factors for 1-2 exchangers. (Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association, 2d ed., New York, 1949.)

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

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

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



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

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

Απώλειες Υδροστατικής Κεφαλής Μέσα στο Κελύφος

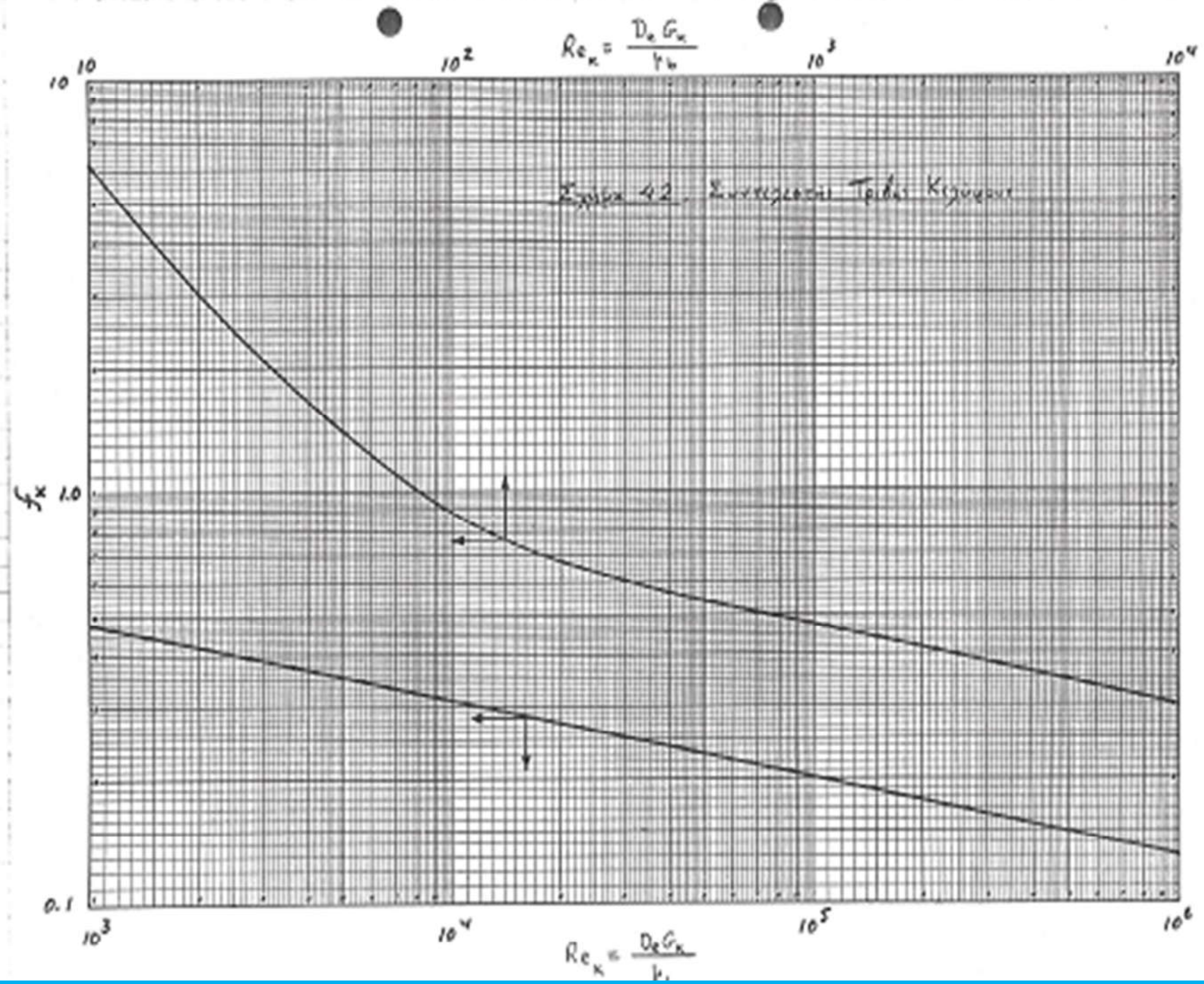
Η πτώση πίεσεως μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του κελύφους δίνεται από την ακόλουθη ημιαμπειρική σχέση (Kern, 1950):

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

όπου: $(\Delta p)_\kappa$ = πτώση πίεσεως
 ρ_κ = πυκνότητα του ρευστού του κελύφους
 N_χ = αριθμός χωρισμάτων (χωρίς τα τοιχώματα στηρίξεως)
 D_κ = εσωτερική διάμετρος κελύφους
 D_e = ισοδύναμη διάμετρος δέσμης σωλήνων, Εξισ. (32)
 G_κ = μαζική ταχύτητα, Εξισ. (35)
 μ_b, μ_w =δυναμικό ιξώδες του ρευστού του κελύφους στην θερμοκρασία μίξεως και στη θερμοκρασία του τοίχου
 f_κ = 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_κ περιλαμβάνει και τις απώλειες εισόδου και εξόδου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι $N_\chi + 1 = \frac{\ell_\sigma}{B_\chi}$ όπου ℓ_σ =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_δ = αριθμός διαδρομών

ℓ_σ = μήκος ενός σωλήνα (αυλού)

d_i = εσωτερική διάμετρος σωλήνα

ρ_σ = πυκνότητα ρευστού σωλήνων

G_σ = μαζική ταχύτητα ρευστού σωλήνων

μ_b, μ_w = δυναμικό ιξώδες του ρευστού σωλήνων στη θερμοκρασία μίξεως και τη θερμοκρασία τοίχου, αντίστοιχα

A_σ = επιφάνεια διατομών σωλήνων, ανά διαδρομή

N_σ = αριθμός σωλήνων μέσα στο κέλυφος

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

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου

Το προϊόν πυθμένος μιας αποστακτικής στήλης πετρελαίου είναι **κεροζίνη** ειδικού βάρους **42° API** που έχει θερμοκρασία **200°C** και μαζική παροχή **19850 kg/hr**. Το ρεύμα αυτό πρέπει να ψυχθεί στους **93°C** από ένα ρεύμα **ακάθαρτου πετρελαίου**, ειδικού βάρους **34°API** και με μαζική παροχή **68600 kg/hr**. Το ακάθαυτο πετρέλαιο έρχεται από τη δεξαμενή αποθηκεύσεως με θερμοκρασία **37°C**.

Η επιτρεπτή πτώση πίεσης μέσα στον εναλλάκτη, για κάθε ρεύμα, είναι **0.65 atm**. Από πείρα ξέρουμε ότι σε τέτοιες εφαρμογές ο ολικός συντελεστής ρυπάνσεως είναι **$5.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$** . Στην αποθήκη εξαρτημάτων της βιομηχανικής μονάδας υπάρχει ένας εναλλάκτης τύπου 1-4 με τα ακόλουθα στοιχεία: εσωτερική διάμετρος κελύφους 21 1/4 in, αριθμός αυλών 158, αυλοί από κοινό χάλυβα με εξωτερική διάμετρο 1 in, 13 BWG, διάταξη αυλών τετραγωνική με βήμα 1 ¼ in, μήκος αυλού 16 ft, βήμα χωρισμάτων 5 in.

Είναι ο εναλλάκτης αυτός κατάλληλος για χρήση στην προκειμένη περίπτωση; Έλεγχος με ΔP και R_p ?

[1] **API=βαθμός API (American Petroleum**

Institute). Ισχύει

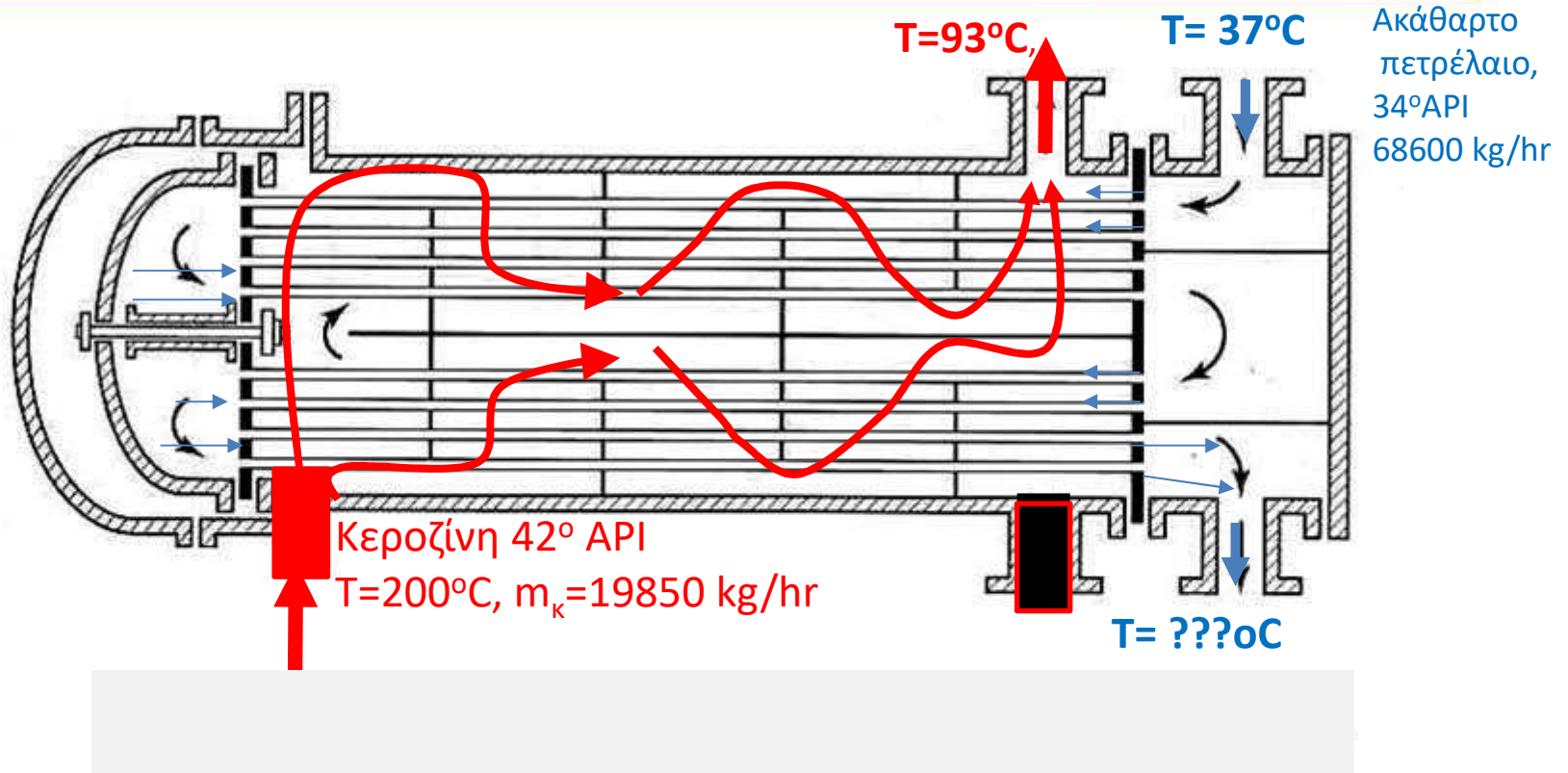
$$\rho_{60^\circ F} = \rho_{\text{νερο},60^\circ F} \frac{141.5}{131.5 + ^\circ \text{API}}$$

$$\rho_{60^\circ F, \text{κηρ}} = 0,8155 \rho_{\text{νερο}, 60^\circ F}$$

$$\rho_{60^\circ F, \text{πετρ}} = 0,855 \rho_{\text{νερο}, 60^\circ F}$$

API ↗ , ρ_{oil} ↘

Heat Exchangers - Types



1-4 Heat Exchanger: 1 Shell pass- 4 tube passes

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Δεδομένα: Θερμό-Κηροζίνη, Ψυχρό-Ακάθαρο Πετρέλαιο

$\dot{m}_\theta = 19850 \text{ kg/hr} = 5.514 \text{ kg/s}$	$\dot{m}_\psi = 68600 \text{ kg/hr} = 19.06 \text{ kg/s}$
$s_\theta = 42^\circ\text{API}$	$s_\psi = 37^\circ\text{API}$
$T_{\theta,\text{εισ}} = 200^\circ\text{C}$	$T_{\psi,\text{εισ}} = 37^\circ\text{C}$
$T_{\theta,\text{εξ}} = 93^\circ\text{C}$	$T_{\psi,\text{εξ}} = ;$
$(\Delta p)_\theta \leq 0.65 \text{ atm}$	$(\Delta p)_\psi \leq 0.65 \text{ atm}$
$R_\rho = 5.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$	

Εναλλάκτης: Τύπος 1-4

Ένα πέρασμα στο κέλυφος, 4 περάσματα στους σωλήνες

Ποιο υγρό θα διοχετευτεί στο κέλυφος και ποιο μέσα από τους σωλήνες?

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Γεωμετρικά Δεδομένα

Παράμετρος	
Διάμετρος Κελύφους	$D_k = 21 \frac{1}{4} \text{ in} = 0.5398 \text{ m}$
Αριθμός σωλήνων	$N_\sigma = 158$
Αριθμός διαδρομών (σωλήνων)	$N_\delta = 4$
Εξωτερική διάμετρος σωλήνων	$d_0 = 1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$
Εσωτερική διάμετρος σωλήνων	$D_i = 0,819 \text{ in} = 0,02057 \text{ m}$
Μήκος σωλήνων	$\ell_\sigma = 16 \text{ ft} = 4.877 \text{ m}$
Βήμα σωλήνων	$B_\sigma = 1 \frac{1}{4} \text{ in} = 0.03175 \text{ m}$
Βήμα χωρισμάτων	$B_x = 5 \text{ in} = 0.127 \text{ m}$

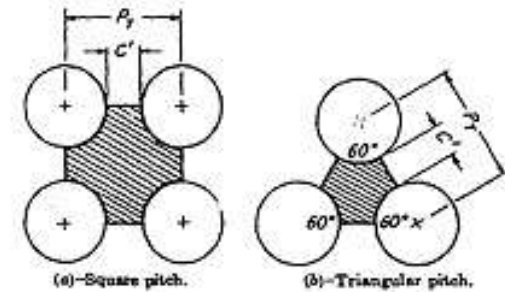
Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Υπολογισμός Γεωμετρικών χαρακτηριστικών του Εναλλάκτη

Ισοδύναμη διάμετρος σε τετραγωνική διάταξη των σωλήνων

$$D_e = \frac{(4B_\sigma^2 - \pi d_0^2)}{\pi d_0} \quad (33)$$

$$D_e = \frac{(4 \times 0.03175^2 - \pi \times 0.0254^2)}{\pi \times 0.0254} = 25.13 \times 10^{-3} \text{ m}$$



Χωρίσματα με κόψιμο 25%

A_κ = επιφάνεια εγκάρσιας ροής μέσω της δεσμίδας των σωλήνων.

$$A_\kappa = \frac{0.5398(0.03175 - 0.0254)0.127}{0.03175} = 13.71 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (84)$$

Αριθμός χωρισμάτων, N_χ $N_\chi + 1 = \frac{\ell_\sigma}{B_\chi}$ $N_\chi + 1 = \frac{4.877}{0.127} = 38.4$ $N_\chi + 1 = 39$

$$A_\sigma = \left(\frac{158}{4}\right) \left(\frac{\pi}{4}\right) 0.02057^2 = 13.13 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (87)$$

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

A_σ = επιφάνεια διατομών σωλήνων, ανά διαδρομή

Επιφάνεια Εναλλαγής (εξωτερική επιφάνεια όλων των σωλήνων)

$$A_0 = N_\sigma \ell_\sigma \pi d_0 = 158 \times 4.877 \times \pi \times 0.0254 = 61.49 \text{ m}^2$$

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Ισοζύγιο Ενέργειας: $Q = \dot{m}_\theta c_{p,\theta} (T_{\theta,\epsilon\iota\sigma} - T_{\theta,\epsilon\xi}) = \dot{m}_\psi c_{p,\psi} (T_{\psi,\epsilon\xi} - T_{\psi,\epsilon\iota\sigma})$

$$T_{\psi,\epsilon\xi} = T_{\psi,\epsilon\iota\sigma} + \frac{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}} (T_{\theta,\epsilon\iota\sigma} - T_{\theta,\epsilon\xi}) \quad \text{Αλλά, } c_{p,\theta} =; \quad c_{p,\psi} =;$$

$$T_{\theta,m} = \frac{1}{2}(T_{\theta,\epsilon\iota\sigma} + T_{\theta,\epsilon\xi}) = \frac{1}{2}(200 + 93) = 146.5^\circ \text{C} \quad T_{\theta,m} = 146.5 * 1.8 + 32 = 295.7^\circ \text{F}$$

$$c_{p,\theta} = 0.610 \text{ Btu}/\ell \text{ b}_m^\circ \text{F} = 0.610 \times 4186.8 \text{ J}/\text{kg}^\circ \text{K} = 2554 \text{ J}/\text{kg}^\circ \text{K}$$

Κεροζίνη ειδικού βάρους 42° API

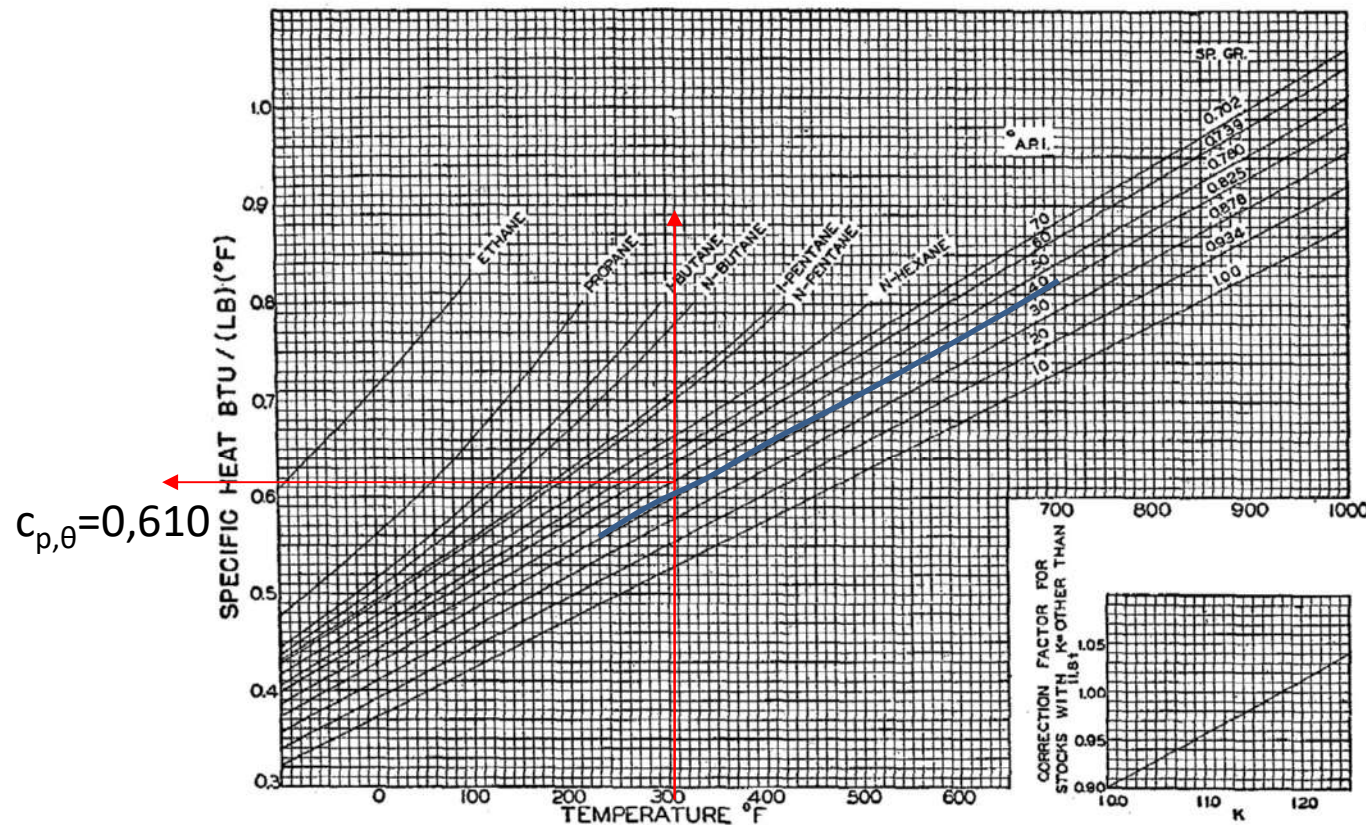


FIG. 4. Specific heats of hydrocarbon liquids. [Holcomb and Brown, *Ind. Eng. Chem.*, 34, 595 (1942).]
† K = characterization factor.

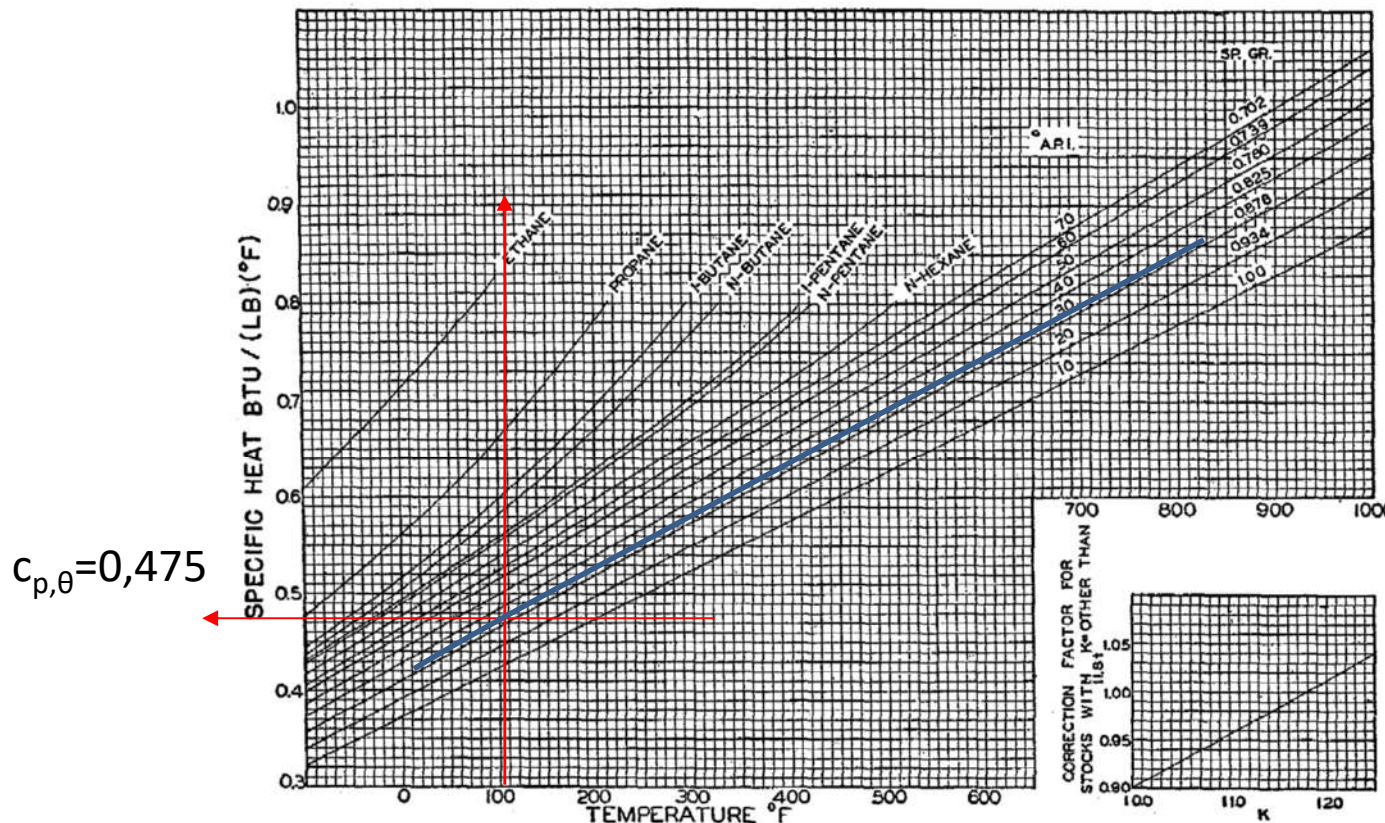
Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Ισοζύγιο Ενέργειας (συνέχεια):

$$T_{\psi,\epsilon\xi} = T_{\psi,\epsilon\iota\sigma} + \frac{\dot{m}_{\theta}c_{p,\theta}}{\dot{m}_{\psi}c_{p,\psi}} (T_{\theta,\epsilon\iota\sigma} - T_{\theta,\epsilon\xi}) \quad c_{p,\theta}: \text{OK}, \text{ Αλλά, } c_{p,\psi} \neq;$$

Μη γνωρίζοντας την $T_{\psi,\epsilon\xi}$, θέτουμε $T_{\psi,m}^{(0)} = T_{\psi,\epsilon\iota\sigma} = 37^{\circ}\text{C}$ $T_{\psi,m} = 37 * 1.8 + 32 = 98.6^{\circ}\text{F}$

$$c_{p,\psi}^{(0)} = 0.475 \text{ Btu}/\ell \text{ b}_m^{\circ}\text{F} = 1989 \text{ J}/\text{kg}^{\circ}\text{K} \quad T_{\psi,\epsilon\xi}^{(0)} = 37 + \frac{5.514 \times 2554}{19.06 \times 1989} (200 - 93) = 76.75^{\circ}\text{C}$$



Ακάθαρτο πετρελαίο,
ειδικού βάρους 34°API

$c_{p,\theta} = 0,475$

FIG. 4. Specific heats of hydrocarbon liquids. [Holcomb and Brown, *Ind. Eng. Chem.*, 34, 595 (1942).]
† K = characterization factor.

Ειδικές θερμότητες υδρογονανθράκων

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

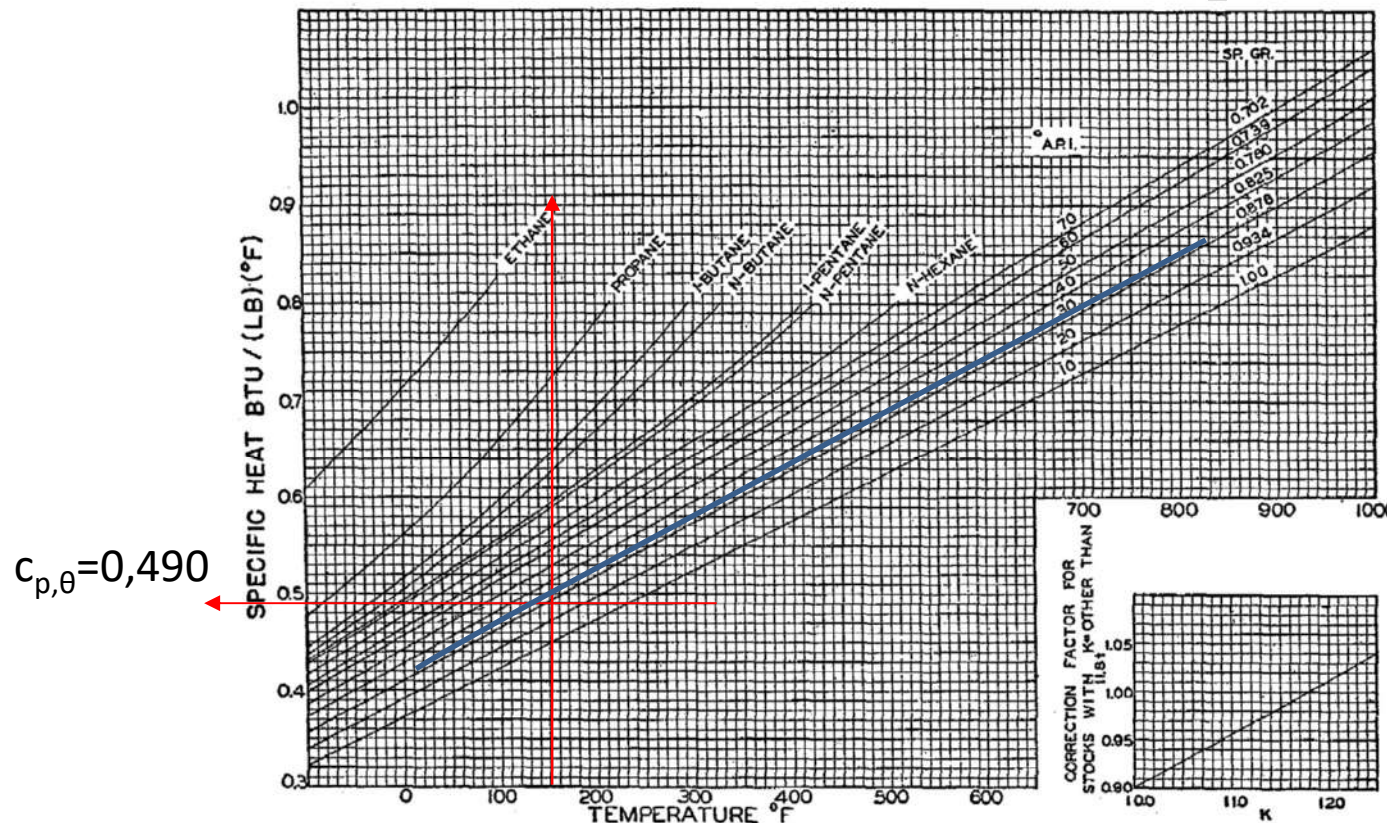
Ισοζύγιο Ενέργειας (συνέχεια):

$$T_{\psi, \varepsilon\xi}^{(0)} = 37 + \frac{5.514 \times 2554}{19.06 \times 1989} (200 - 93) = 76.75^\circ\text{C} \quad T_{\psi, m} = \frac{1}{2} (T_{\psi, \varepsilon\sigma} + T_{\psi, \varepsilon\xi}^{(0)}) = \frac{1}{2} (37 + 76.75) = 56.9^\circ\text{C}$$

$$T_{\psi, m} = 56,9 * 1.8 + 32 = 134,42 \text{ }^\circ\text{F} \quad c_{p, \psi} = 0.490 \text{ Btu} / \ell \text{ b}_m \text{ }^\circ\text{F} = 2052 \text{ J} / \text{kg} \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_{\psi, \varepsilon\xi} = 37 + \frac{5.514 \times 2554}{19.06 \times 2052} (200 - 93) = 75.5^\circ\text{C}$$

$$T_{\psi, m} = \frac{[37 + 76.5]}{2} = 57 \text{ }^\circ\text{C} = 134,6 \text{ }^\circ\text{F}$$



Ακάθαρτο πετρελαίο,
ειδικού βάρους 34°API

FIG. 4. Specific heats of hydrocarbon liquids. [Holcomb and Brown, *Ind. Eng. Chem.*, 34, 595 (1942).]
† K = characterization factor.

Ειδικές θερμότητες υδρογονανθράκων

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Έχουμε τώρα και τις τέσσερις θερμοκρασίες στα στόμια του εναλλάκτη. Πρέπει τώρα ν' αποφασίσουμε ποιο υγρό θα διοχετευθεί μέσω του κελύφους και ποιο μέσω των σωλήνων. Ας δοκιμάσουμε την εκλογή: **ακάθαρο πετρέλαιο μέσω κελύφους, κεροζίνη μέσω σωλήνων.**

Δοκιμαστικός Υπολογισμός Πτώσεων Πίεσης

Πλευρά Κελύφους (ακάθαρο πετρέλαιο)

Για μέση θερμοκρασία 57°C και ειδικό βάρος 34°API παίρνουμε από πίνακες με

$$\mu_{\psi,b}=3.6 \text{ cp} = 3.6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

$$G_{\kappa} = \frac{\dot{m}_{\kappa}}{A_{\kappa}} = \frac{19.06}{13.71 \times 10^{-3}} = 1390 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$Re_{\kappa} = \frac{D_e G_{\kappa}}{\mu_{\psi,b}} = \frac{25.13 \times 10^{-3} \times 1390}{3.6 \times 10^{-3}} = 9703$$

Από πίνακες, για 57°C, 34°API

$$\rho_{\psi} = 830 \text{ kg/m}^3 = \rho_{\kappa}$$

$$\Theta \text{ α υποθέσουμε } \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_{\kappa} = 1$$

$$Re_{\kappa} = 9703 \xrightarrow{\Sigma \chi. 42} f_{\kappa} = 0.31$$

$$\begin{aligned} \text{Εξίσ. (83)} \rightarrow (\Delta p)_{\kappa} &= 39 \times 0.31 \times \frac{0.5398}{25.13 \times 10^{-3}} \frac{830}{2} \times \left(\frac{1390}{830} \right)^2 \times 1 \text{ Pa} \\ &= 300.5 \times 10^3 \text{ Pa} = 300.5 \text{ kPa} = 3.06 \text{ atm} > 0.65 \text{ atm} \end{aligned}$$

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

$$N_{\chi} + 1 = 39 \quad D_{\kappa} = 21 \frac{1}{4} \text{ in} = 0.5398 \text{ m}$$

$$D_e = \frac{(4 \times 0.03175^2 - \pi \times 0.0254^2)}{\pi \times 0.0254} = 25.13 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$A_{\kappa} = \frac{D_{\kappa} C B_{\chi}}{B_{\sigma}} = \frac{D_{\kappa} (B_{\sigma} - d_0) B_{\chi}}{B_{\sigma}}$$

$$A_{\kappa} = \frac{0.5398(0.03175 - 0.0254)0.127}{0.03175} = 13.71 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_{\kappa} = 21 \frac{1}{4} \text{ in} = 0.5398 \text{ m}$$

Πλευρά Σωλήνων (κεροζίνη)

Για μέση θερμοκρασία 146.5°C και

ειδικό βάρος 42°API παίρνουμε από πίνακες με $\mu_{\theta,b}=0.40 \text{ cp} = 0.40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Ο υπολογισμός του $(\Delta p)_{\sigma}$ δεν χρειάζεται, αφού

$$(\Delta p)_{\kappa} = 3.06 \text{ atm} \gg 0.65 \text{ atm}$$

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

Βλέπουμε, δηλαδή, ότι αν προσπαθήσουμε να διοχετεύσουμε το ακάθαρο πετρέλαιο μέσω του κελύφους παίρνουμε απαγορευτικά μεγάλη πτώση πίεσης. Εξάλλου, η εκλογή αυτή θα απαιτούσε πιο συχνό και δύσκολο καθαρισμό του εξωτερικού των αυλών.

$$D_i = 0,819 \text{ in} = 0,02057 \text{ m} = 20.57 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\ell_{\sigma} = 16 \text{ ft} = 4.877 \text{ m}$$

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Ακάθαρο πετρελαίο, ειδικού βάρους 34°API

$$T_{\psi,m} = \frac{[37 + 76.5]}{2} = 57 \text{ } ^\circ\text{C} = 134,6 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\rho_{60^\circ\text{F}, \text{πετρ}} = 0,855 \rho_{\text{νερο}, 60^\circ\text{F}}$$

$$\rho_{135^\circ\text{F}, \text{πετρ}} = 0,830 \rho_{\text{νερο}, 60^\circ\text{F}} = 830 \text{ kg/m}^3$$

APPENDIX OF CALCULATION DATA

809

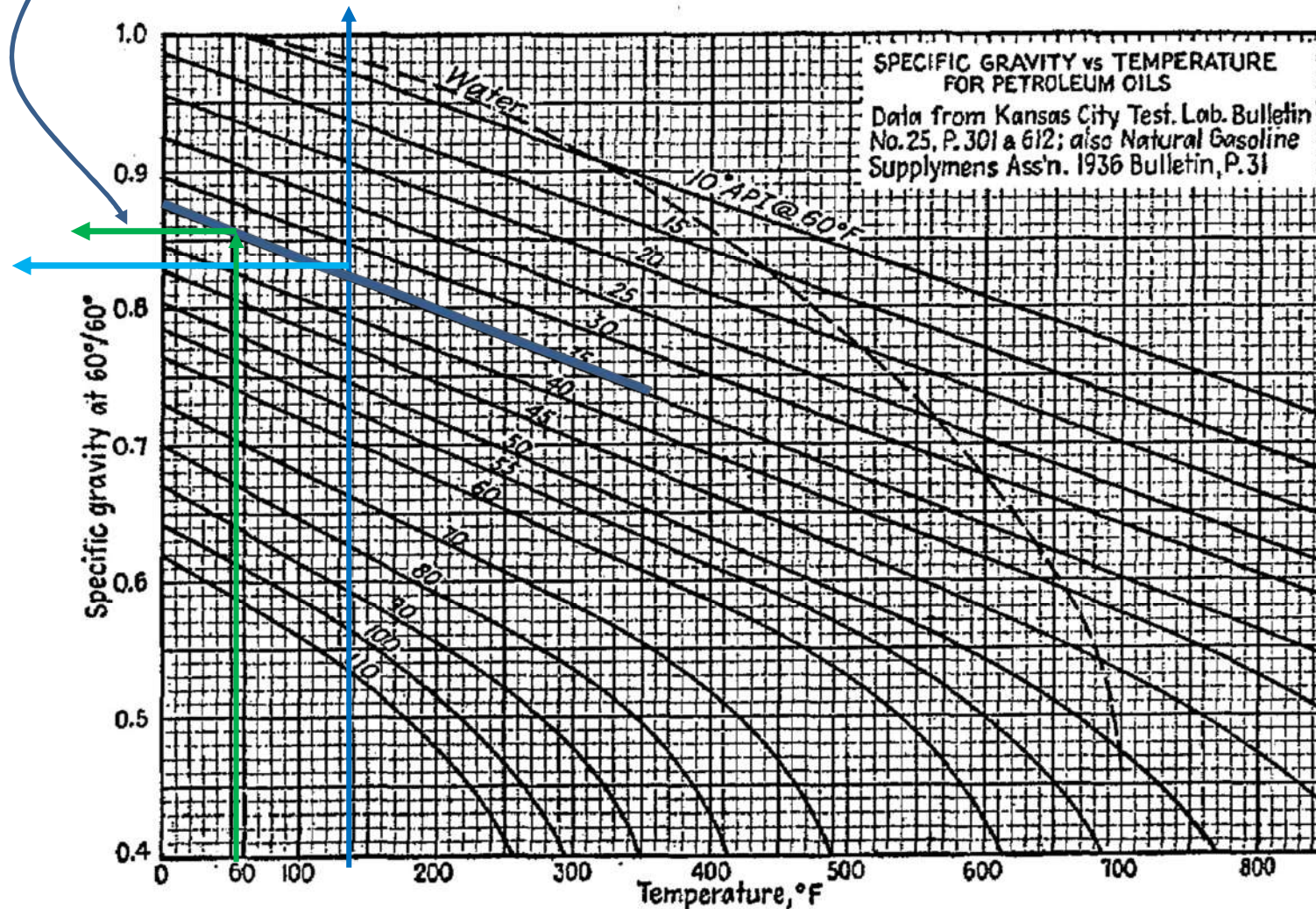


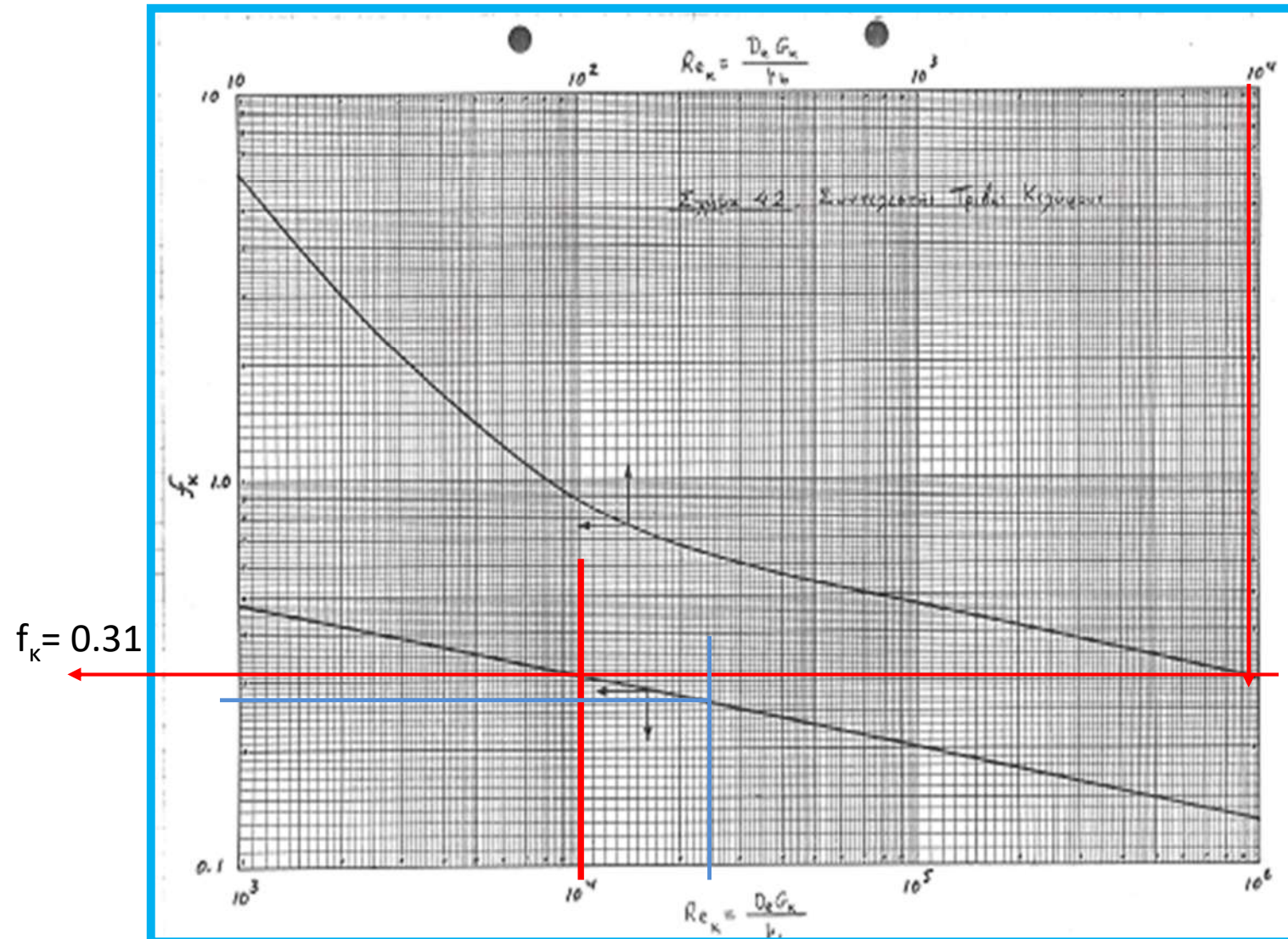
FIG. 6. Specific gravities of hydrocarbons.

Σχήμα Π.6 Ειδική βαρύτητα υδρογονανθράκων, σε T°/60°F (15.5°C/15.5°C). (Πηγή: Kern).

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Υπολογισμός συντελεστή τριβής στο κέλυφος

$$Re_{\kappa} = 9703 \xrightarrow{\Sigma\chi. 42} f_{\kappa} = 0.31$$



Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Εκλογή: Κεροζίνη μέσω κελύφους, ακάθαρτο πετρέλαιο μέσω σωλήνων.

Πλευρά Κελύφους

Για μέση θερμοκρασία 146.5°C και ειδικό βάρος 42°API παίρνουμε από πίνακες

$$\mu_b = 0.40 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}, \rho_k = 730 \text{ kg/m}^3$$

$$G_k = \frac{\dot{m}_k}{A_k} = \frac{5.514}{13.71 \times 10^{-3}} = 402.2 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$Re_k = \frac{D_e G_k}{\mu_b} = \frac{25.13 \times 10^{-3} \times 402.2}{0.40 \times 10^{-3}} = 25720$$

$$\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_k^{0.14} \cong 1$$

$$Re_k = 25720 \xrightarrow{\text{Σχ. 42}} f_k = 0.26$$

$$(\Delta p)_k = \underset{(39)}{39} \times 0.26 \times \frac{0.5398}{25.13 \times 10^{-3}} \times \frac{730}{2} \times \left(\frac{402.2}{730}\right)^2 \times 1 \text{ Pa}$$

$$\Rightarrow (\Delta p)_k = 24.13 \text{ kPa} = 0.246 \text{ atm}$$

$$(\Delta p)_k = 0.246 \text{ atm} < 0.65 \text{ atm}$$

$$(\Delta p)_k = (N_x + 1) f_k \frac{D_k \rho_k}{D_e} \frac{\rho_k}{2} \left(\frac{G_k}{\rho_k}\right)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_k^{-0.14}$$

Πλευρά Σωλήνων

Για μέση θερμοκρασία 57°C και ειδικό βάρος 34°API παίρνουμε από πίνακες

$$\mu_b = 3.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}, \rho_\sigma = 830 \text{ kg/m}^3$$

$$\downarrow_{(87)} G_\sigma = \frac{\dot{m}_\sigma}{A_\sigma} = \frac{19.06}{13.13 \times 10^{-3}} = 1452 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$Re_\sigma = \frac{d_i G_\sigma}{\mu_b} = \frac{0.02057 \times 1452}{3.6 \times 10^{-3}} = 8297$$

$$\frac{e}{d_i} = 0.00006 \text{ (εφελκυσμένος σωλήνας),}$$

$$f(8297, 6 \times 10^{-5}) = 0.031$$

$$\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_\sigma^{0.14} \cong 1$$

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

$$\downarrow_{(84)} (\Delta p)_\sigma = 4 \times 0.031 \times \frac{4.877}{0.02057} \times \frac{830}{2} \times \left(\frac{1452}{830}\right)^2 \times 1 \text{ Pa}$$

$$= 37.34 \times 10^3 \text{ Pa} = 37.34 \text{ kPa} = 0.38 \text{ latm}$$

$$\downarrow_{(85)} (\Delta p)_{\sigma\tau} = 2 \times 4 \times 830 \times \left(\frac{1452}{830}\right)^2$$

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

$$= 20.32 \times 10^3 \text{ Pa} = 20.32 \text{ kPa} = 0.207 \text{ atm}$$

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

$$= 0.381 + 0.207 = 0.588 \text{ atm}$$

Βλέπουμε ότι μ' αυτή την εκλογή, οι προδιαγραφές για την πτώση πίεσεως ικανοποιούνται.

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Υπολογισμός Ιξωδών των ρευστών (κηροζίνη με μέση θερμοκρασία 146.5°C=296 °F και ειδικό βάρος 42°API και ακάθαρτο πετρέλαιο 57°C=135 °F και ειδικό βάρος 34°API

Συντεταγμένες X και Y για Χρήση με το Σχ. Π.7 για τον προσδιορισμό του Ιξώδους Διαφόρων Υγρών

Ιξώδη Πετρελαϊκών Κλασμάτων

	X	Y
76° API natural gasoline	14.4	6.4
56° API gasoline	14.0	10.5
42° API kerosene	11.6	16.0
35° API distillate	10.0	20.0
34° API mid-continent crude	10.3	21.3
28° API gas oil	10.0	23.6

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Υπολογισμός Ιξωδών των ρευστών (κηροζίνη με μέση θερμοκρασία 146.5°C=296 °F και ειδικό βάρος 42°API και ακάθαρτο πετρέλαιο 57°C=135 °F και ειδικό βάρος 34°API

42° API kerosene	11.6	16.0
---------------------	------	------

$$\mu_b = 0.40 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

34° API mid- continent crude	10.3	21.3
---------------------------------------	------	------

$$\mu_b = 3.6 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

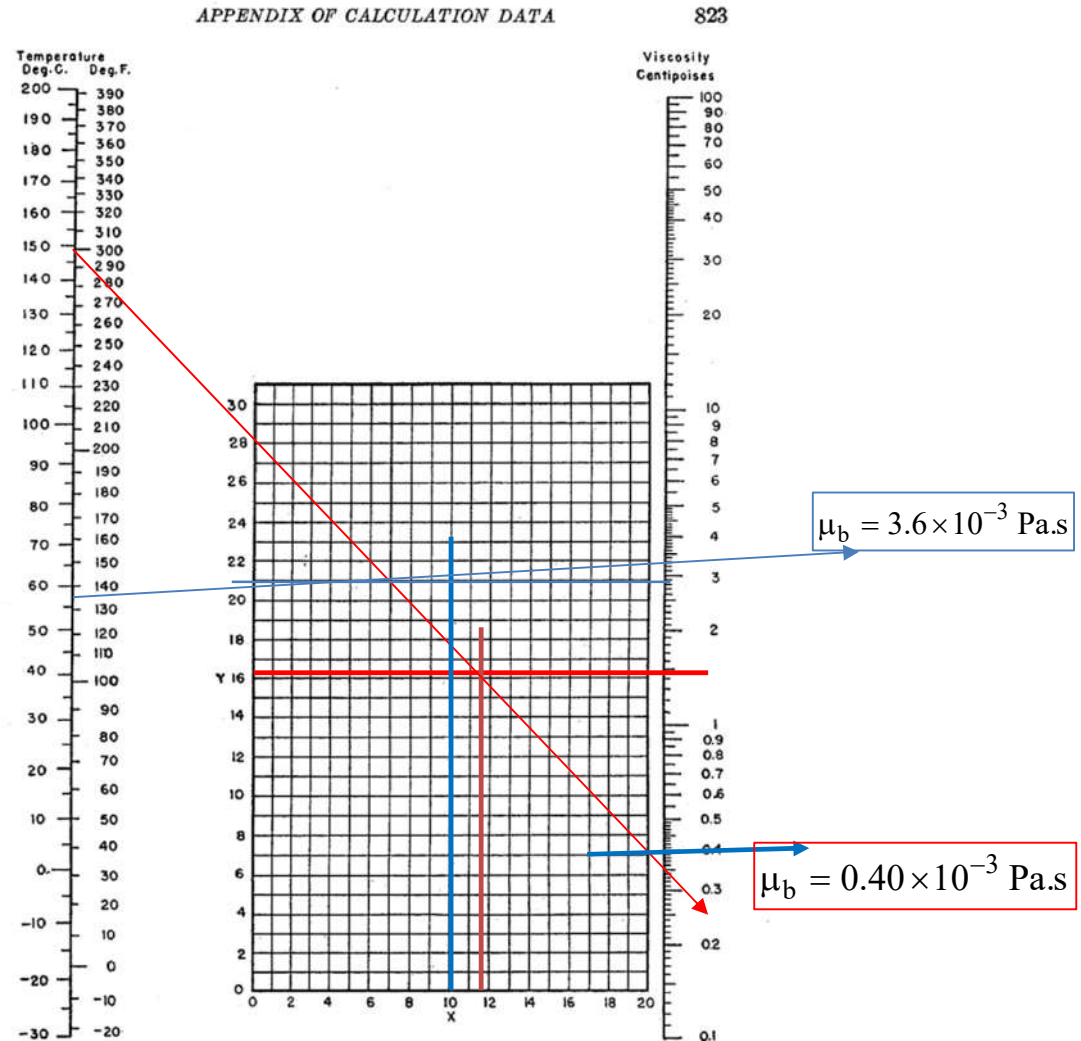


FIG. 14. Viscosities of liquids. (Perry, "Chemical Engineers' Handbook," 3d ed., McGraw Hill Book Company, Inc., New York, 1950.)

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Υπολογισμός Εναλλάκτη Υπολογισμός της $(\Delta T)_{lm}$ και του $(\Delta T)_\phi$

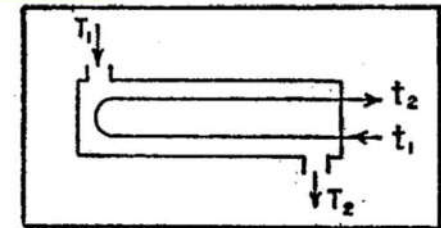
$$T_1 = 200^\circ\text{C} \quad T_2 = 93^\circ\text{C} \quad t_1 = 37^\circ\text{C} \quad t_2 = 75.5^\circ\text{C}$$

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} = \frac{(200 - 75.5) - (93 - 37)}{\ln \frac{(200 - 75.5)}{(93 - 37)}} = 85.76 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{200 - 93}{75.5 - 37} = 2.78$$

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{75.5 - 37}{200 - 37} = 0.236$$

Εξ.(82) → $F_T = 0.895$



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

$$(\Delta T)_\phi = (\Delta T)_{lm} F_T = 85.76 \times 0.895 = 76.8^\circ\text{C}$$

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθартου Πετρελαίου (συνέχεια)

Υπολογισμός Εναλλάκτη Υπολογισμός της $(\Delta T)_{lm}$ και του $(\Delta T)_\phi$

R=2.78, S=0.236

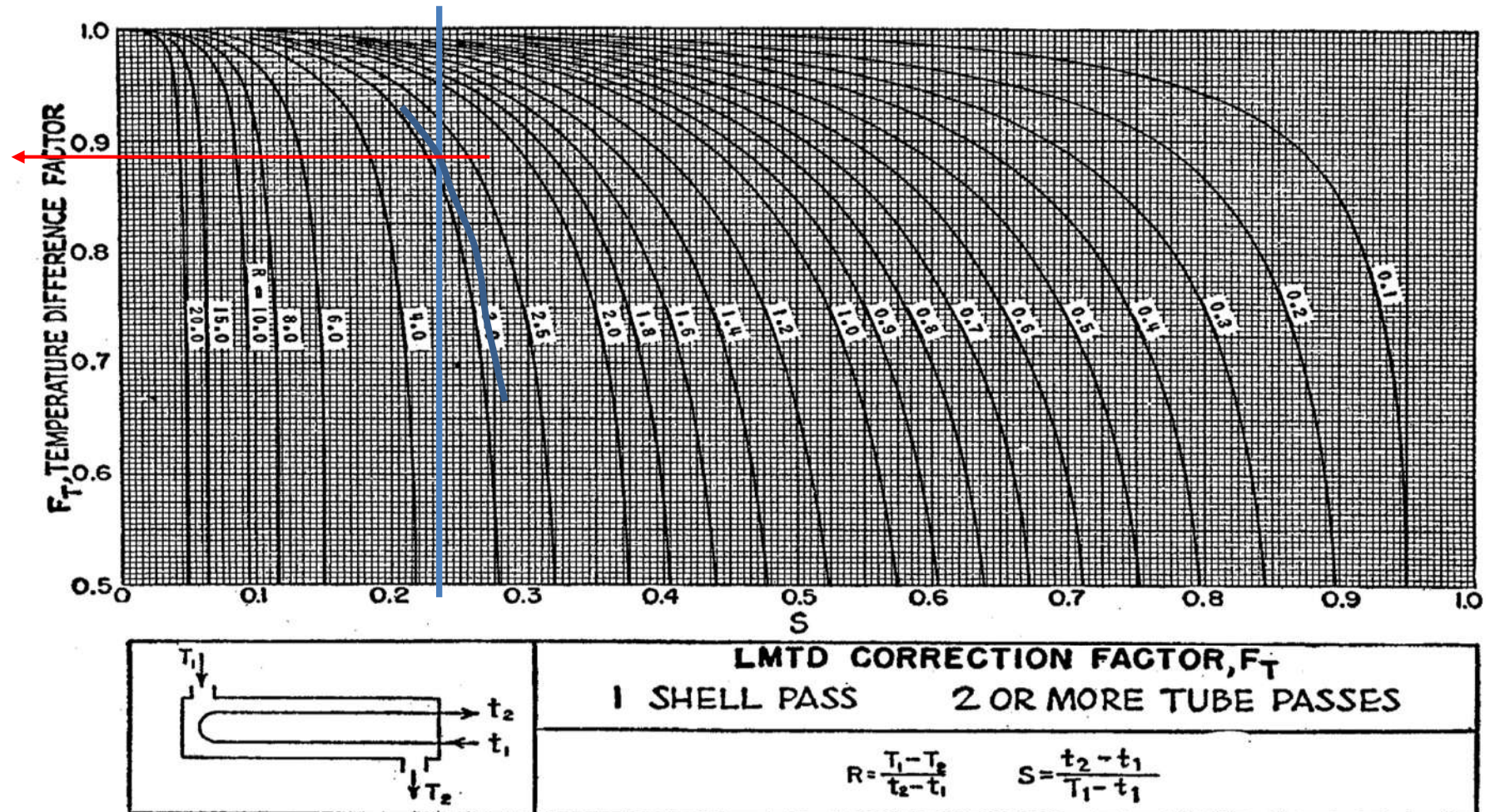


FIG. 18. LMTD correction factors for 1-2 exchangers. (Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association, 2d ed., New York, 1949.)

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Πλευρά Κελύφους

(4) Επιφάνεια Ροής A_{κ}

$$A_{\kappa} = 13.71 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

(5) Μαζική ταχύτητα G_{κ}

$$G_{\kappa} = \frac{\dot{m}_{\kappa}}{A_{\kappa}} = 402.2 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

(6) Αριθμός Reynolds

$$Re_{\kappa} = 25270$$

$$j_H = 0.36 Re_{\kappa}^{0.55}$$

(7) $j_H =$; $j_H = 95$ (Εξισ. (37))

$$(8) h_0 =$$
; $h_0 = j_H \frac{k}{D_e} \left(\frac{c_{p,\kappa} \mu_b}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$

Για μέση θερμοκρασία 146.5°C και 42° API παίρνουμε από πίνακες:

$$k = 0.132 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}, c_{p,\kappa} = 2554 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$$

$$\mu_b = 0.40 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$Pr_b = \frac{c_{p,\kappa} \mu_b}{k} = \frac{2554 \times 0.40 \times 10^{-3}}{0.132} = 7.74$$

$$(Pr_b)^{1/3} = 1.98$$

$$\text{Υποθέτοντας } \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_{\sigma} = 1:$$

$$h_0 = 95 \times \frac{0.132}{25.13 \times 10^{-3}} \times 1.98 \times 1$$

$$= 988 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

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

Πλευρά Σωλήνων

(4) Επιφάνεια Ροής A_{σ}

$$A_{\sigma} = 13.13 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

(5) Μαζική ταχύτητα G_{σ}

$$G_{\sigma} = \frac{\dot{m}_{\sigma}}{A_{\sigma}} = 1452 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

(6) Αριθμός Reynolds

$$Re_{\sigma} = 8297$$

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

(7) $j_H =$; $j_H = 31$ (Σχ. 3.14)

$$(7) h_i =$$
; $h_i = j_H \frac{k}{d_i} \left(\frac{c_{p,\sigma} \mu_b}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$

Για μέση θερμοκρασία 57°C και 34° API παίρνουμε από πίνακες:

$$k = 0.133 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}, c_{p,\sigma} = 2052 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$$

$$\mu_b = 3.6 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$Pr_b = \frac{c_{p,\sigma} \mu_b}{k} = \frac{2052 \times 3.6 \times 10^{-3}}{0.133} = 55.54$$

$$(Pr_b)^{1/3} = 3.81$$

$$\text{Υποθέτοντας } \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_{\sigma} = 1:$$

$$h_i = 31 \times \frac{0.133}{20.57 \times 10^{-3}} \times 3.81 = 764 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

(Κηροζίνη με μέση θερμοκρασία $146.5^{\circ}\text{C}=296^{\circ}\text{F}$ και ειδικό βάρος 42°API και ακάθαρο πετρέλαιο $57^{\circ}\text{C}=135^{\circ}\text{F}$ και ειδικό βάρος 34°API)

APPENDIX OF CALCULATION DATA

803

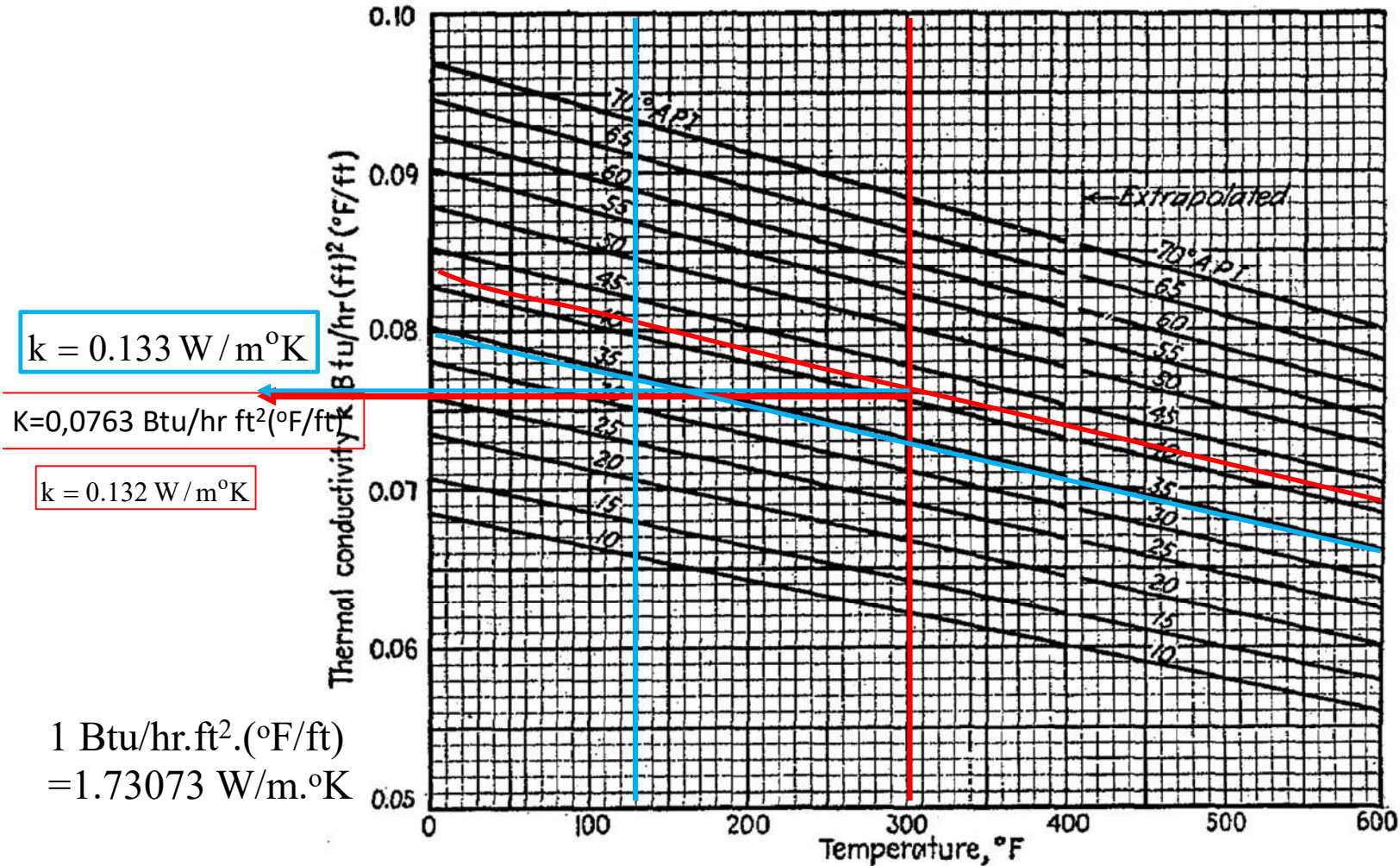


FIG. 1. Thermal conductivities of hydrocarbon liquids. (Adapted from Natl. Bur. Standards Misc. Pub. 97.)

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια) Πλευρά σωλήνων

$$Re_{\sigma} = 8297 \quad j_H = ?; \quad j_H = 31$$

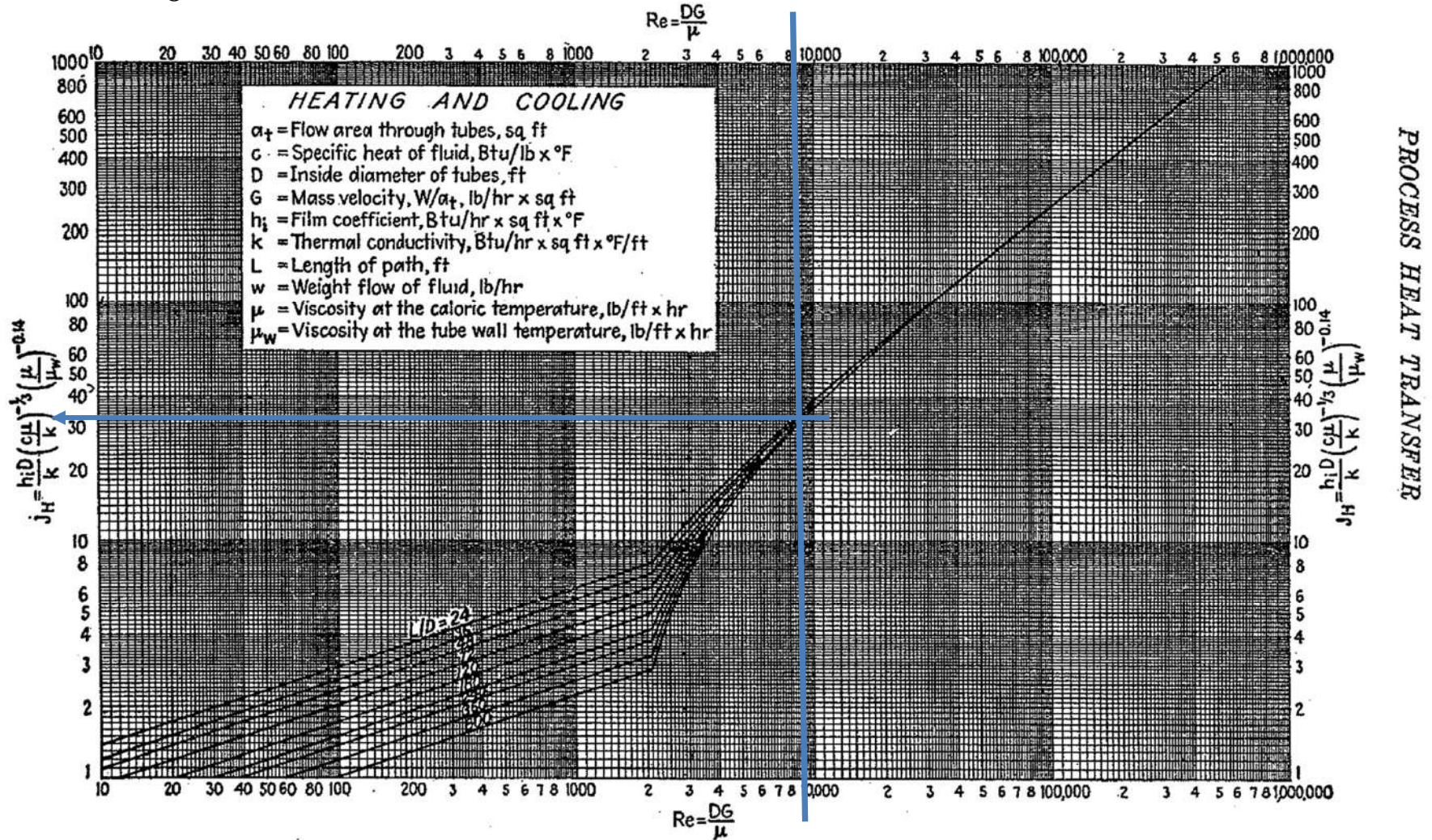


FIG. 24. Tube-side heat-transfer curve. (Adapted from Sieder and Tate.)

Παράδειγμα 4στ. Υπολογισμός Εναλλάκτη Κεροζίνης-Ακάθαρτου Πετρελαίου (συνέχεια)

Υπολογισμός του Ολικού Συντελεστή Μεταφοράς Θερμότητας, U_0 και $U_{\sigma\chi}$

$$U_0 =; \quad k_{\sigma} = k_{\text{χαλυβα}} = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_0 \stackrel{(40)}{=} \frac{2}{25.4 \times 10^{-3}} \left(\frac{2}{20.57 \times 10^{-3} \times 764} + \frac{\ln \frac{25.4}{20.57}}{50} + \frac{2}{25.4 \times 10^{-3} \times 988} \right)^{-1}$$
$$= 78.74(0.1273 + 0.0042 + 0.0797)^{-1} = 373 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K} \quad U_0 = 373 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

(10) Πραγματικό $R_p =;$

$$U_{\sigma\chi} = \frac{Q}{A_0(\Delta T_{\phi})} \quad U_{\sigma\chi} = \frac{1.507 \times 10^6}{(61.49 \times 76.8)} = 319 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Q = \dot{m}_k c_{p,k} (T_1 - T_2) = 5.514 \times 2554 \times (200 - 93) = 1.507 \times 10^6 \text{ W}$$

$$\text{Ο διαθέσιμος συντελεστής ρυπάνσεως είναι } R_p = \frac{1}{U_{\sigma\chi}} - \frac{1}{U_0} = \frac{1}{319} - \frac{1}{373} = 4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{K/W}$$

Βλέπουμε ότι ο διαθέσιμος συντελεστής ρυπάνσεως είναι μικρότερος του απαιτούμενου, δηλ. $5.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$, για να εξασφαλίσουμε καθαρισμό σε λογικά χρονικά διαστήματα. Ο εναλλάκτης αυτός είναι περιθωριακά κατάλληλος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με πολύ τακτικό καθαρισμό. Η αγορά ενός πιο κατάλληλου εναλλάκτη πρέπει να θεωρηθεί σοβαρά.