

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

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΧΡ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

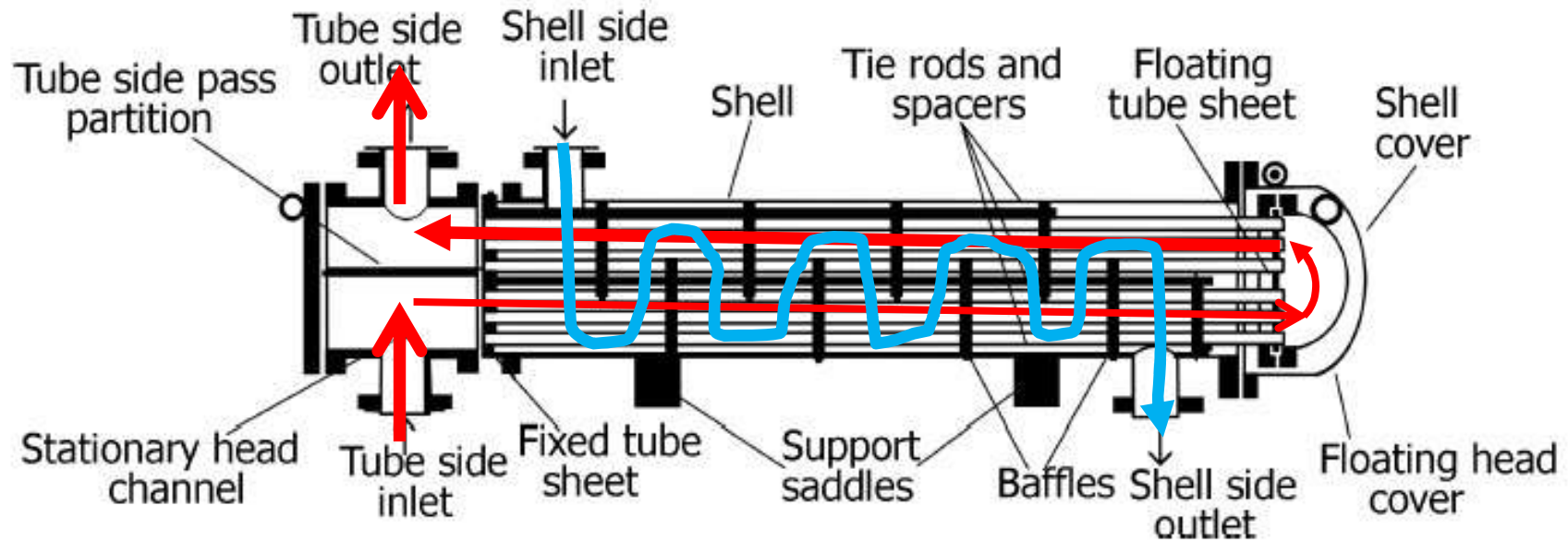


ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εναλλάκτες Κελύφους-Αυλών με Υψηλή Απόδοση

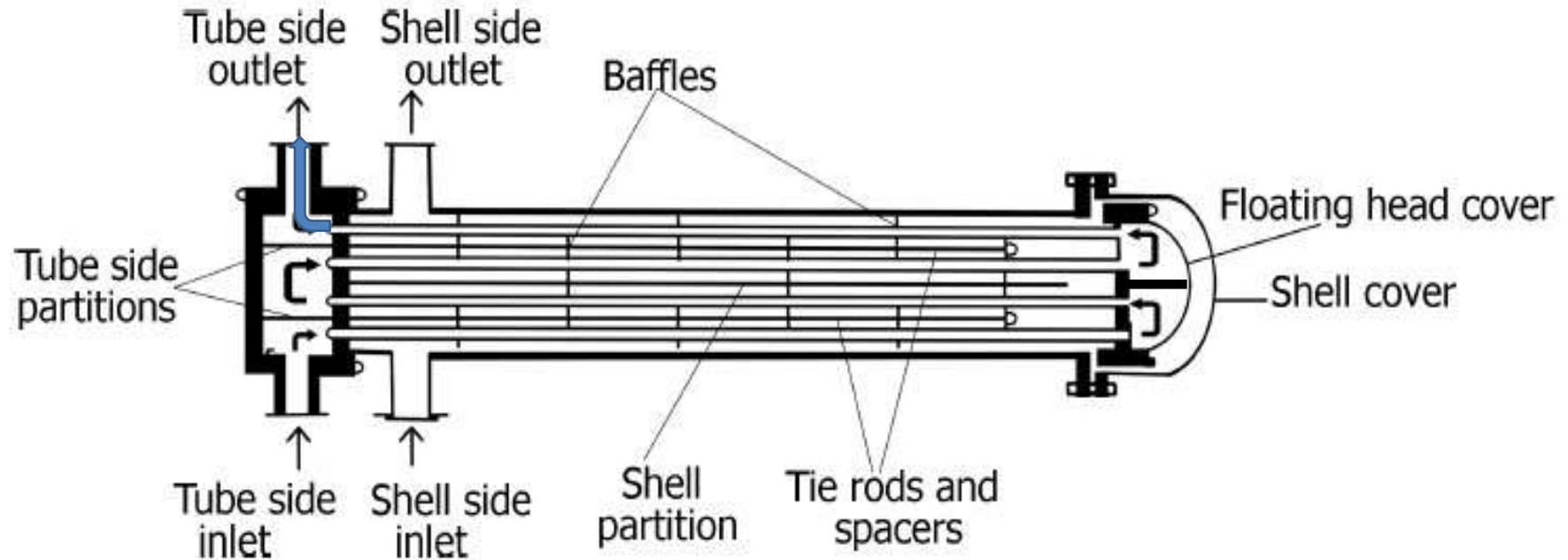
- Εναλλάκτες τύπου 1-2, 1-4 κλπ λειτουργούν κατά το ήμισυ με «ομορροή» και γι αυτό δίνουν σχετικά μικρή ανάκτηση θερμότητας
- Εναλλάκτες υψηλότερης αποδόσεως επιτυγχάνονται με ειδικές διαρρυθμίσεις της ροής στο κέλυφος.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ Εναλλάκτης Τύπου κελύφους αυλών



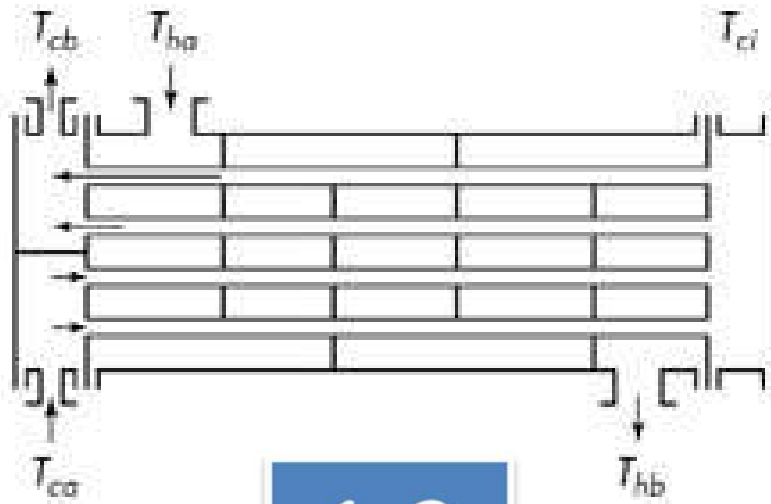
Εναλλάκτης κελύφους-αυλών τύπου **1-2**. Ο τύπος αυτός λειτουργεί **εν μέρει κατ' αντιρροή και εν μέρει κατ' ομορροή**.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ Εναλλάκτης Τύπου κελύφους αυλών

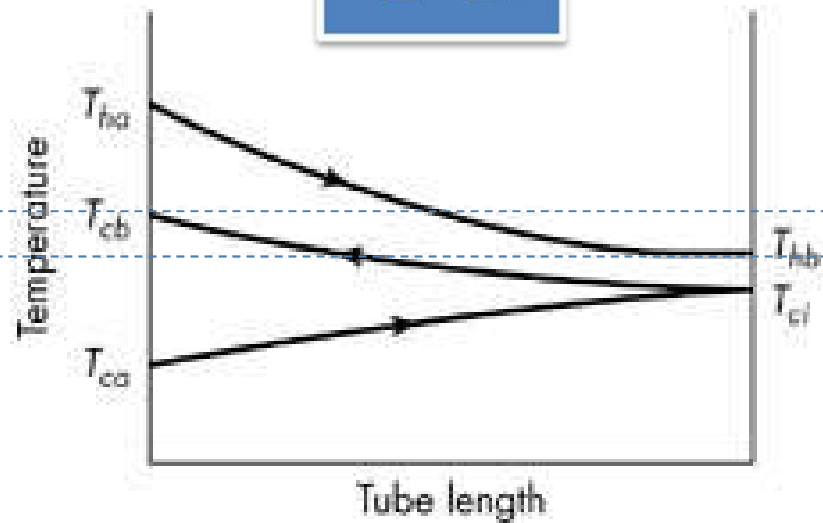


Εναλλάκτης κελύφους-αυλών τύπου **2-4** (δύο περάσματα στο κέλυφος, τέσσερα περάσματα στους αυλούς) με ολισθαίνον τοίχωμα στηρίξεως.

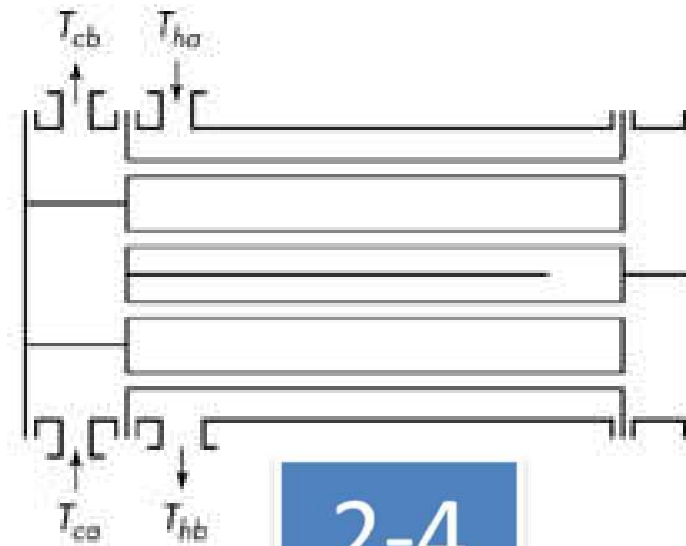
Εναλλάκτες πολλαπλών διαδρομών



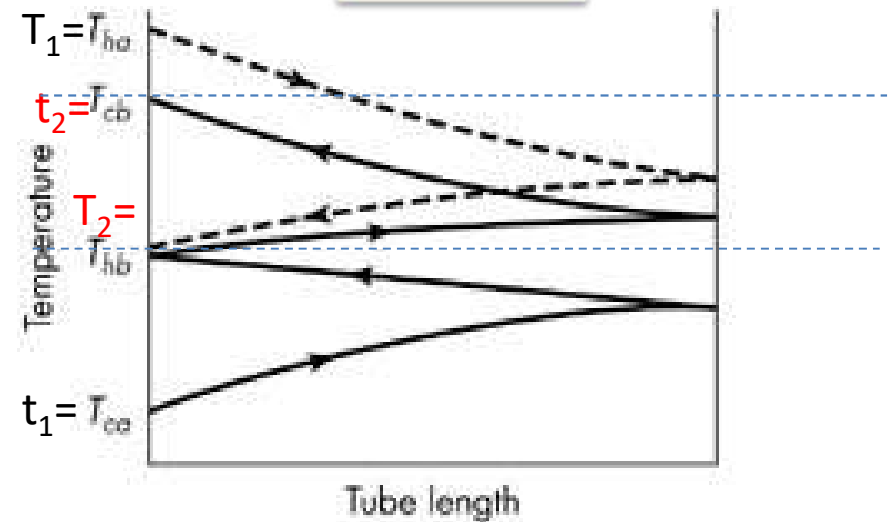
1-2



(a)



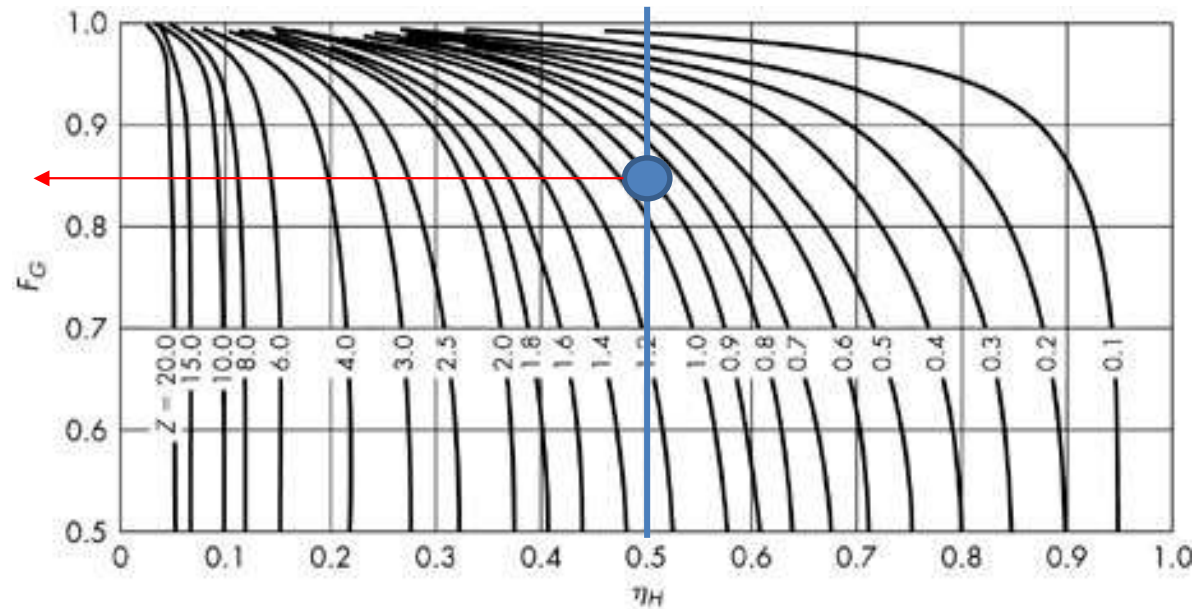
2-4



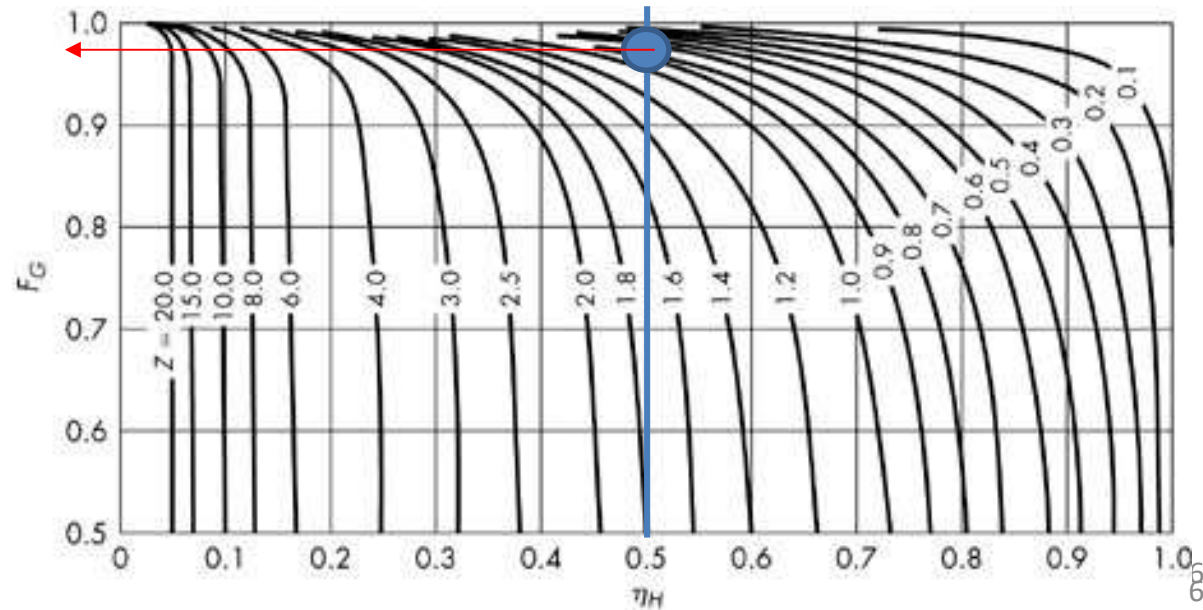
(b)

Διόρθωση της LMTD

1-2



2-4



Αλλαγή διαρρύθμισης της ροής, περίπτωση $t_2 > T_2$

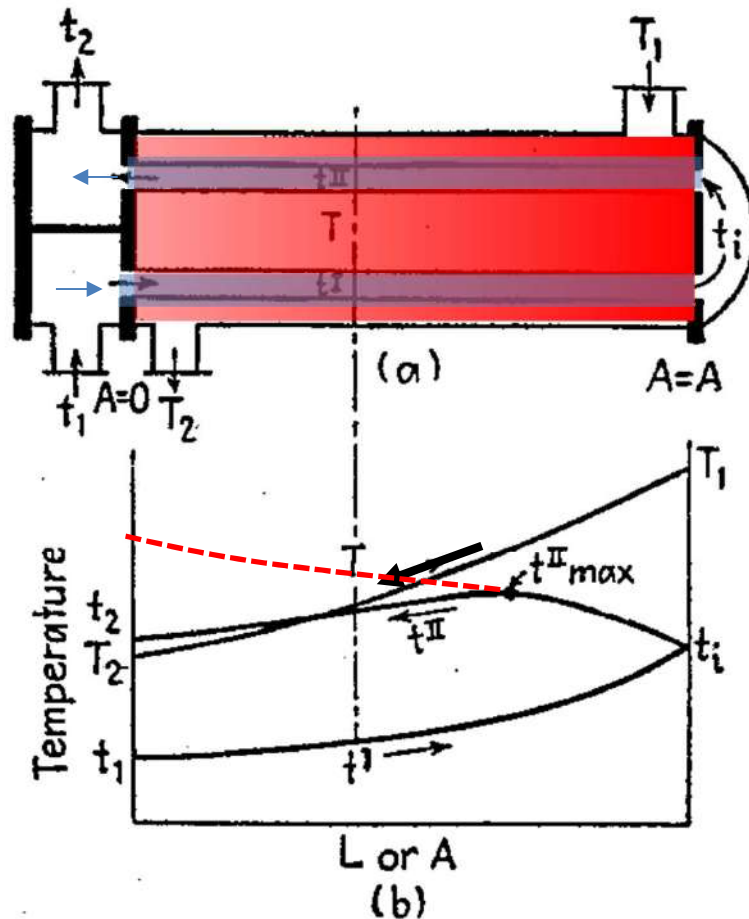


FIG. 7.21. Temperature relations in a 1-2 exchanger with conventional nozzle arrangement.

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

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

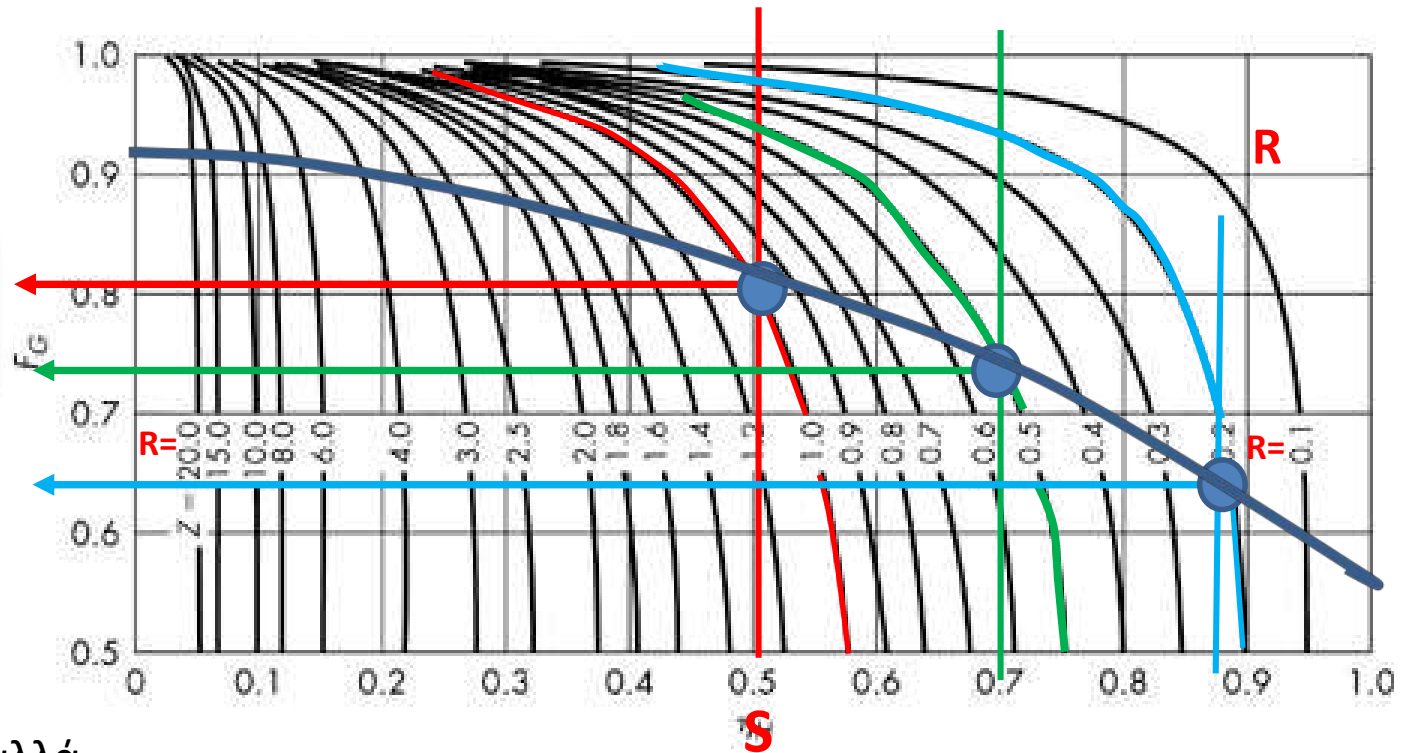
Εναλλάκτης τύπου 1-2 με συμβατική διαρρύθμιση στομίων. Περίπτωση όπου $t_2 > T_2$.

Σε όλους του τύπους εναλλακτών που λειτουργούν εν μέρει κατ' αντιρροή και εν μέρει κατ' ομορροή η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρευστού δεν μπορεί να πλησιάσει πολύ τη θερμοκρασία εισόδου του θερμού. Καλούμε τη διαφορά $(T_2 - t_2)$ **προσέγγιση θερμοκρασιών**. Αν, τώρα, $t_2 > T_2$, καλούμε τη διαφορά $(t_2 - T_2)$ **διασταύρωση θερμοκρασιών**. Τέλος, καλούμε τις διαφορές $(T_1 - T_2)$ και $(t_2 - t_1)$ αλλαγές θερμοκρασιών.

Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ F_T ΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ΑΠΟΤΟΜΑ ΚΑΙ ΠΑΙΡΝΕΙ ΑΠΑΡΑΔΕΚΤΑ ΧΑΜΗΛΕΣ ΤΙΜΕΣ

Αλλαγή διαρρύθμισης της ροής, περίπτωση $t_2 > T_2$

1-2



t_2 μεγαλώνει αλλά
ακόμη $t_2 < T_2$

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

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

T_1 και t_1 δεδομένα και σταθερά.

Αν το t_2 αυξηθεί τότε το R θα μειωθεί και το S θα αυξηθεί,
άρα και το F_T θα μειωθεί.

Μπορεί το t_2 να γίνει T_1 ?

Όταν οι τιμές των S και R αντιστοιχούν στο τμήμα της καμπύλης που είναι σχεδόν παράλληλο προς τον άξονα του F_T είναι καλύτερα αν χρησιμοποιεί κανείς κατευθείαν την Εξισ. (82)

Αλλαγή διαρρύθμισης της ροής, περίπτωση $t_2 > T_2$

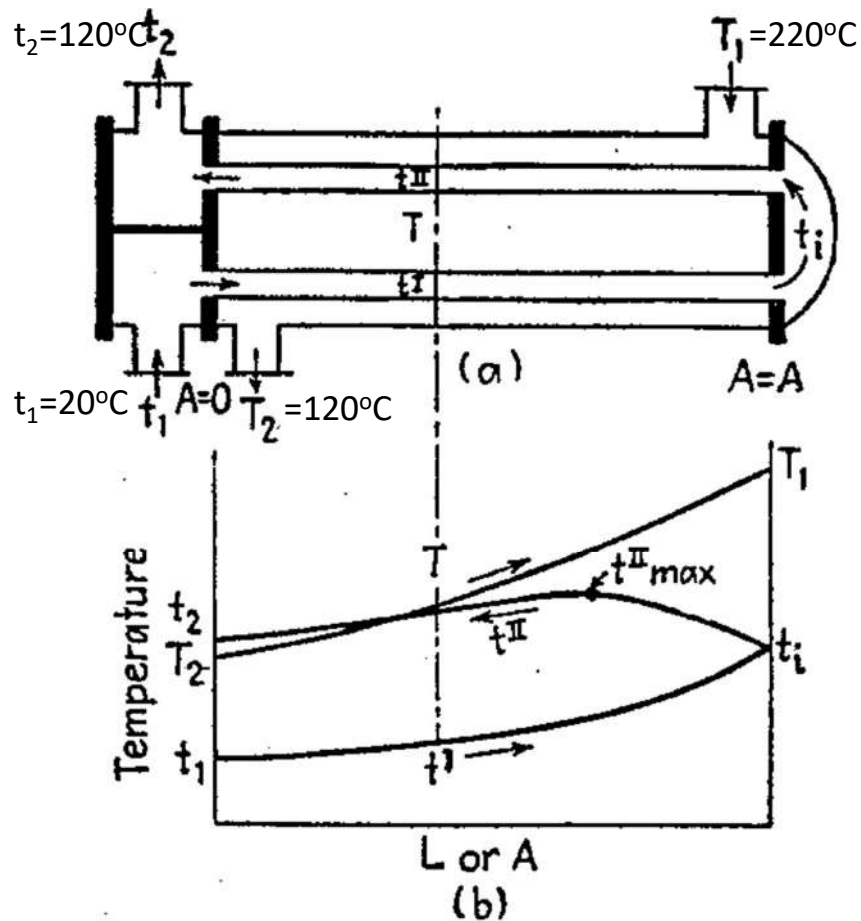
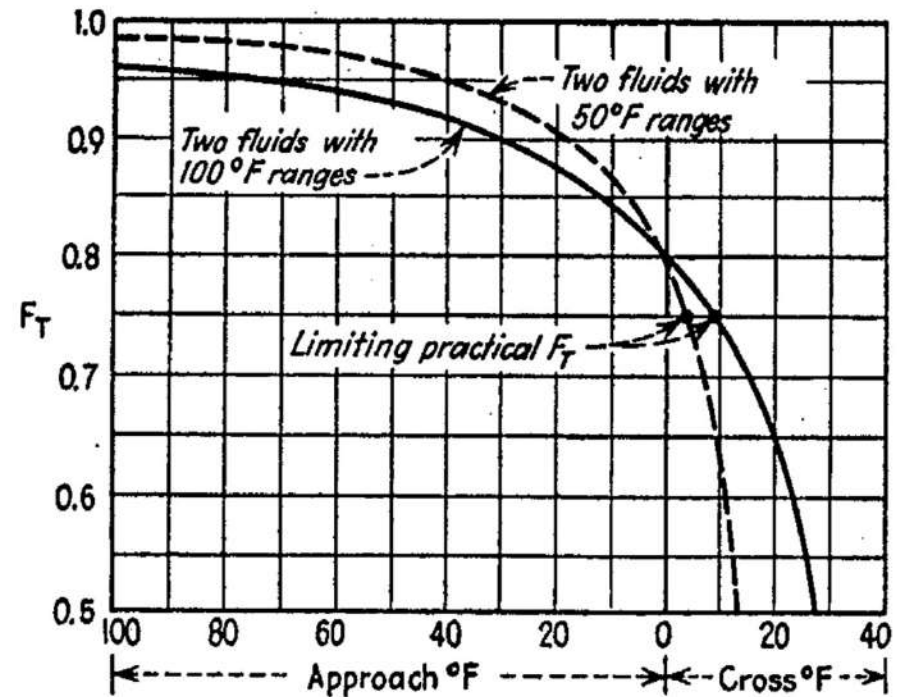
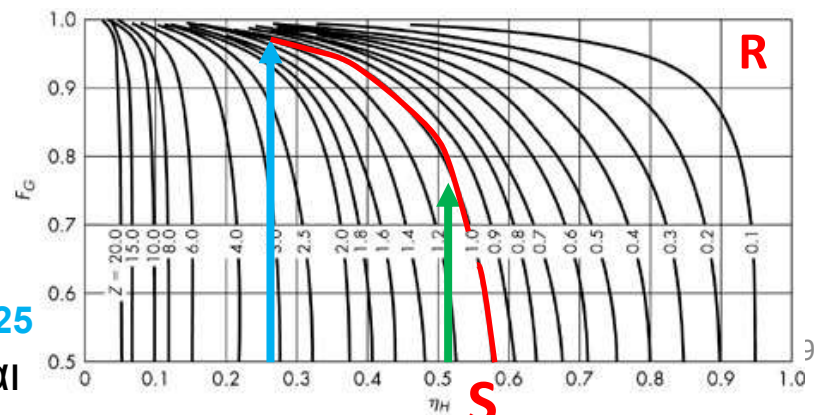


FIG. 7.21. Temperature relations in a 1-2 exchanger with conventional nozzle arrangement.

Είτε $T_1 - T_2 = t_2 - t_1 = 100^\circ\text{F}$, $R=1$, $S=100/(220-20)=0.5$
 είτε $T_1 - T_2 = t_2 - t_1 = 50^\circ\text{F}$, $R=1$, $S=50/(220-20)=0.25$
 Μικρότερα ποσά θερμότητας εναλλάσσονται



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



Αλλαγή διαρρύθμισης της ροής, περίπτωση $t_2 > T_2$

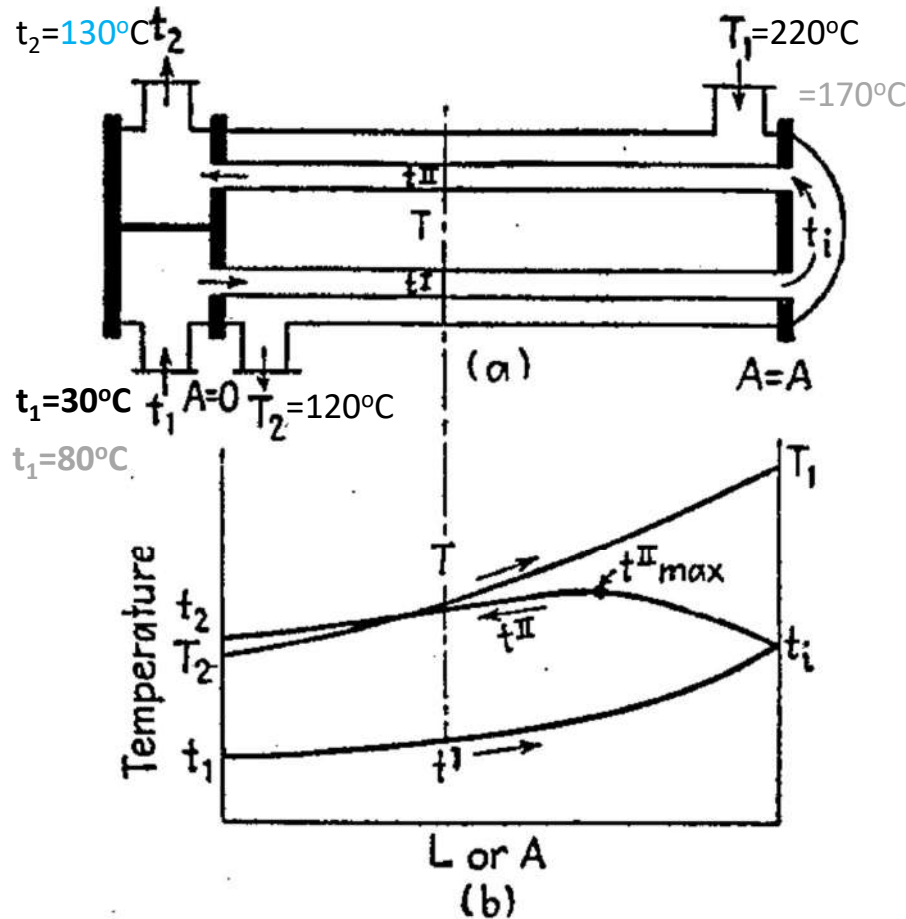
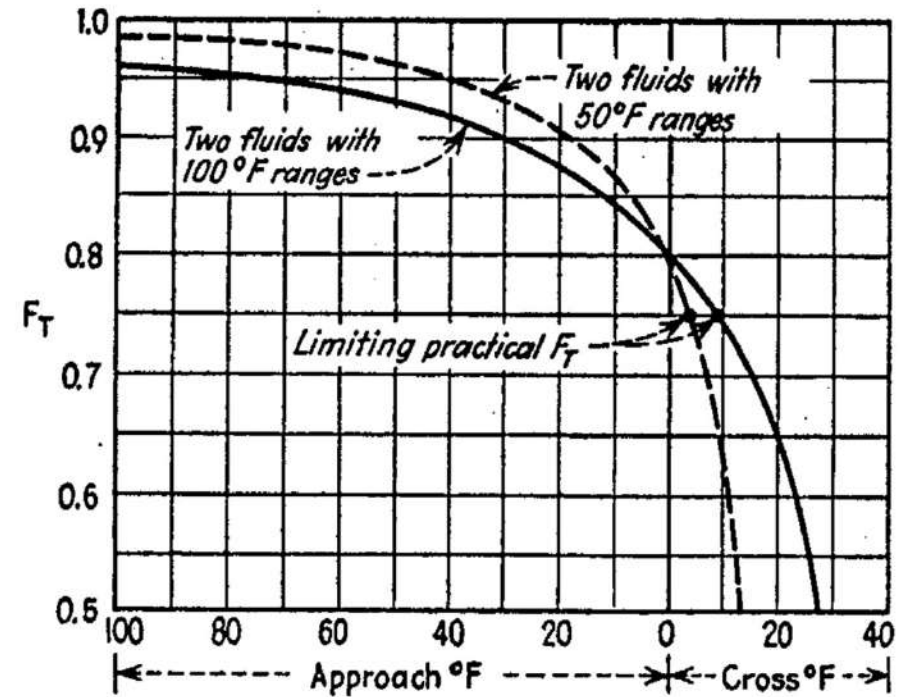


FIG. 7.21. Temperature relations in a 1-2 exchanger with conventional nozzle arrangement.

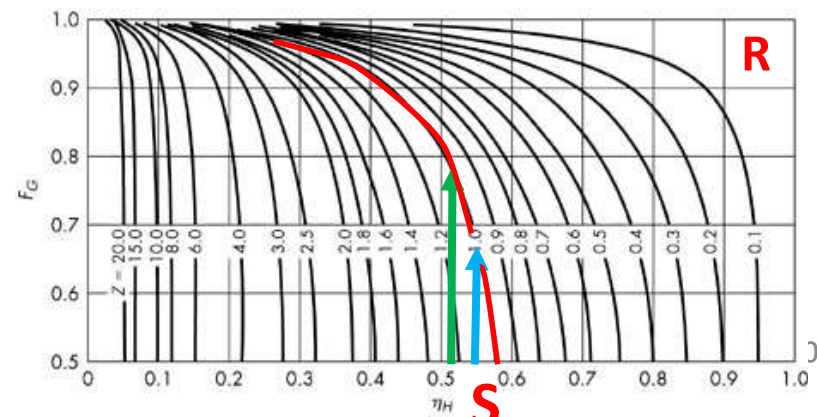
Είτε $T_1 - T_2 = t_2 - t_1 = 100^\circ\text{F}$, $R=1$, $S=100/(220-30)=0.526$

Είτε $T_1 - T_2 = t_2 - t_1 = 50^\circ\text{F}$, $R=1$, $S=50/(170-80)=0.555$

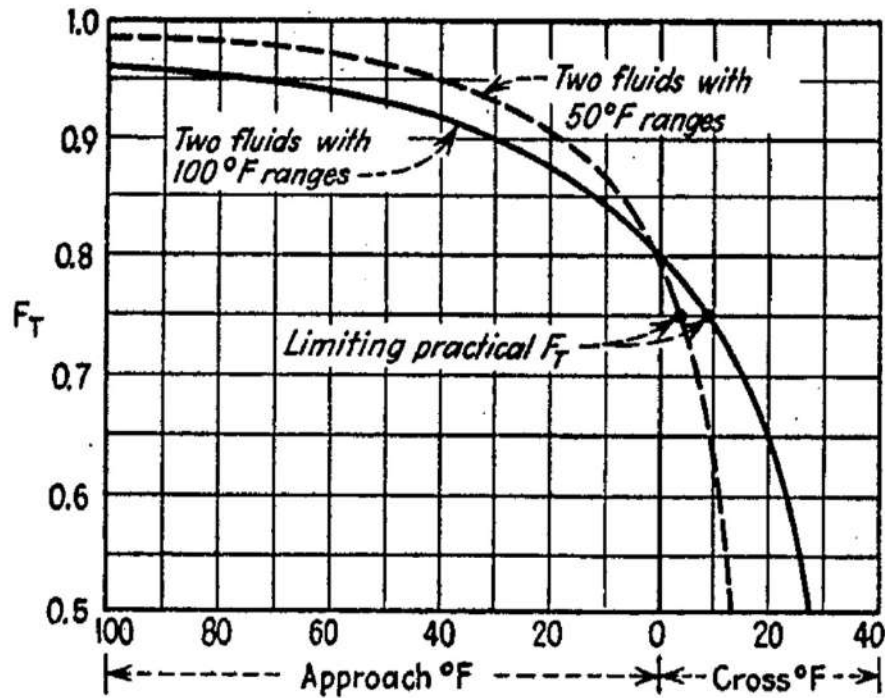
Αν T_2 αυξ, t_1 αυξ, T_1 αυξ, S αυξ, F_T μειώνεται



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



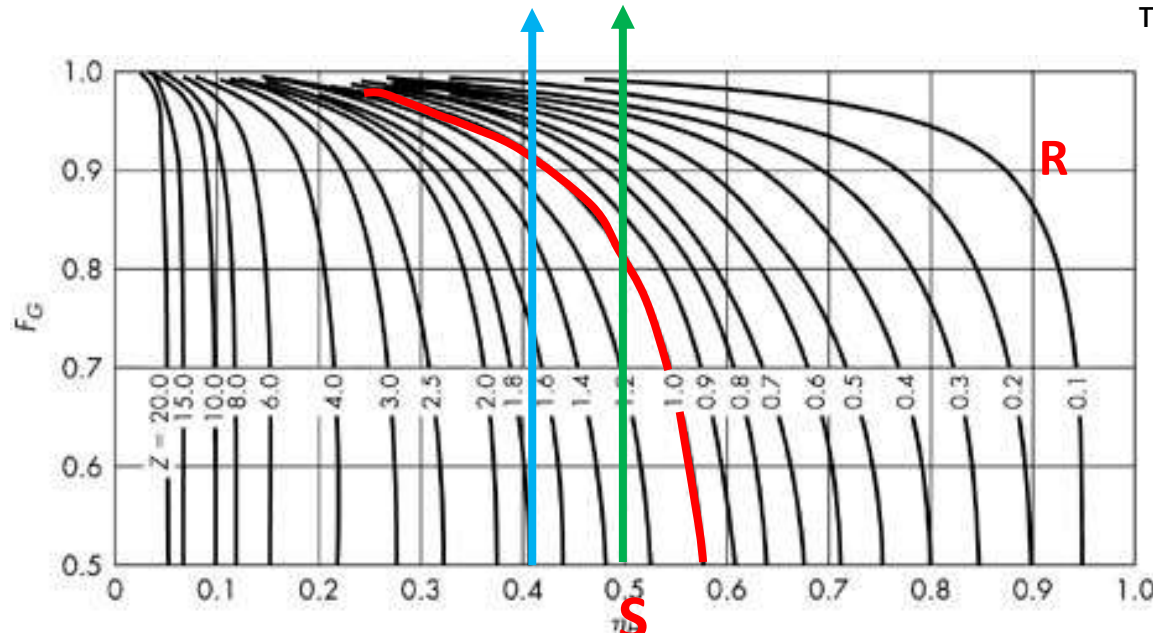
Διασταύρωση θερμοκρασιών



Εξάρτηση του F_T από την διαφορά $(T_2 - t_2)$ ή $(t_2 - T_2)$ για δύο ρεύματα με ίσες αλλαγές θερμοκρασιών

Είτε $T_1 - T_2 = t_2 - t_1 = 100^\circ\text{F}$, $R=1$, $S=100/(T_1 - t_1)$
 είτε $T_1 - T_2 = t_2 - t_1 = 50^\circ\text{F}$, $R=1$, $S=50/(T_1 - t_1)$

Εξάρτηση του συντελεστή διαφοράς θερμοκρασίας F_T από την προσέγγιση θερμοκρασιών $(T_2 - t_2)$, ή τη διασταύρωση θερμοκρασιών $(t_2 - T_2)$, για δύο ρευστά με ίσες αλλαγές θερμοκρασιών (50°F ή 100°F). Οι πρακτικές τιμές του F_T είναι $F_T > 0.75$.

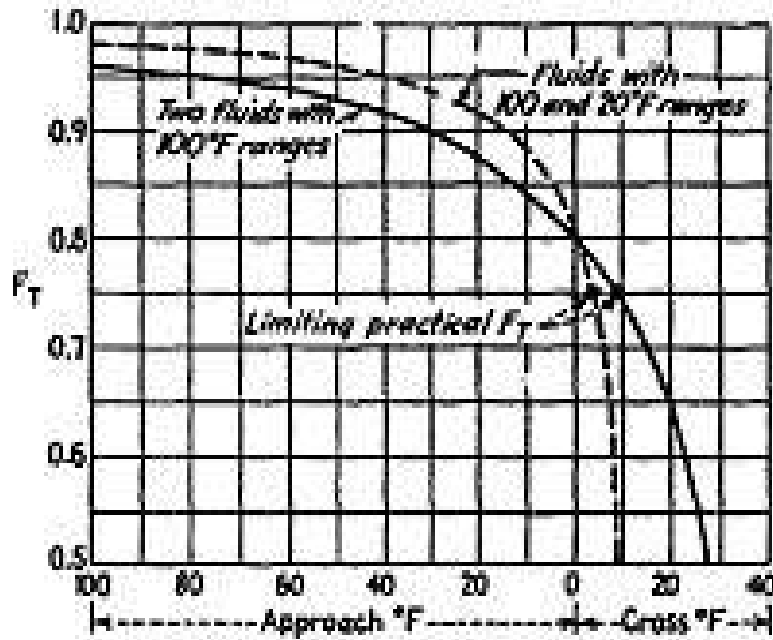


$$(\Delta T)_{\ell m} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}}$$

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

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

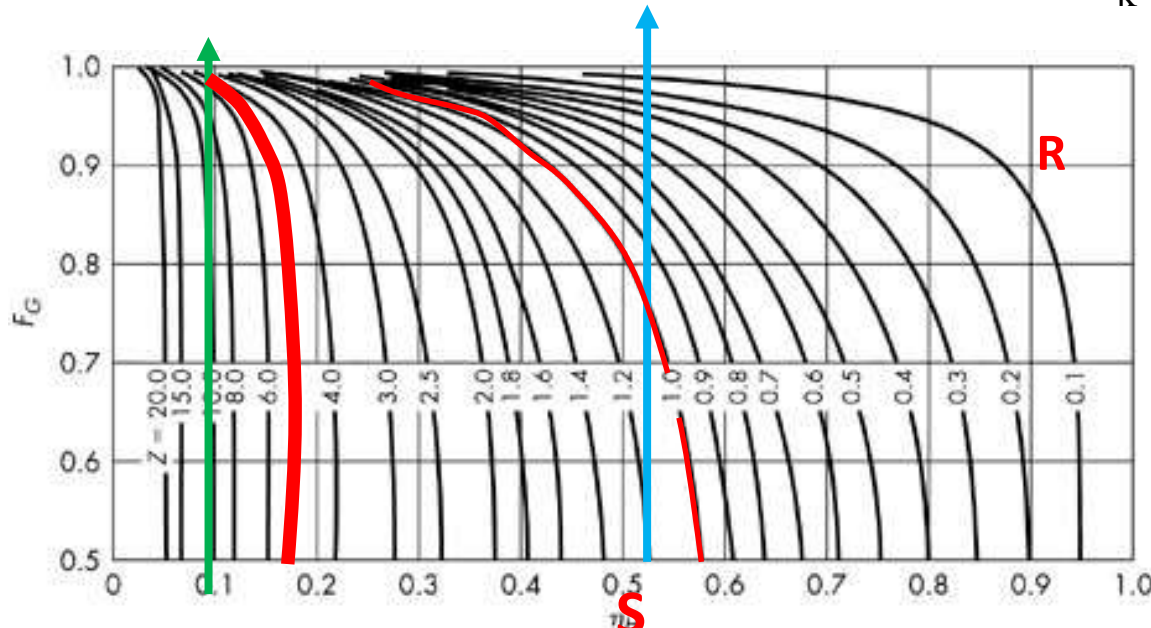
Διασταύρωση θερμοκρασιών



Ανάλογα αποτελέσματα για δύο ρεύματα με άνισες αλλαγές θερμοκρασιών ($T_1 - T_2 = 100^\circ\text{F}$, $t_2 - t_1 = 20^\circ\text{F}$)

Αν $t_2 \uparrow$ η διασταύρωση θερμοκρασιών γίνεται νωρίτερα και μένει αχρησιμοποίητο ένα μεγάλο κομμάτι του εξοπλισμού

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



$$R_1 = 100/100 = 1 \quad S_1 = 100/(T_1 - t_1)$$

$$R_2 = 100/20 = 5 \quad S_2 = 20/(T_1 - t_1)$$

Έστω $T_1 - t_1 = 200$,

$$R_1 = 1, S_1 = 0.5; R_2 = 5, S_2 = 0.1$$

$$t_2 - t_1 = 20^\circ\text{F}, T_1 - T_2 = T_1 - t_2 = 5(t_2 - t_1)$$

t_1 αυξ, S μειών

Διάγραμμα Ten Broeck για τον υπολογισμό του t_2 (ή του S)

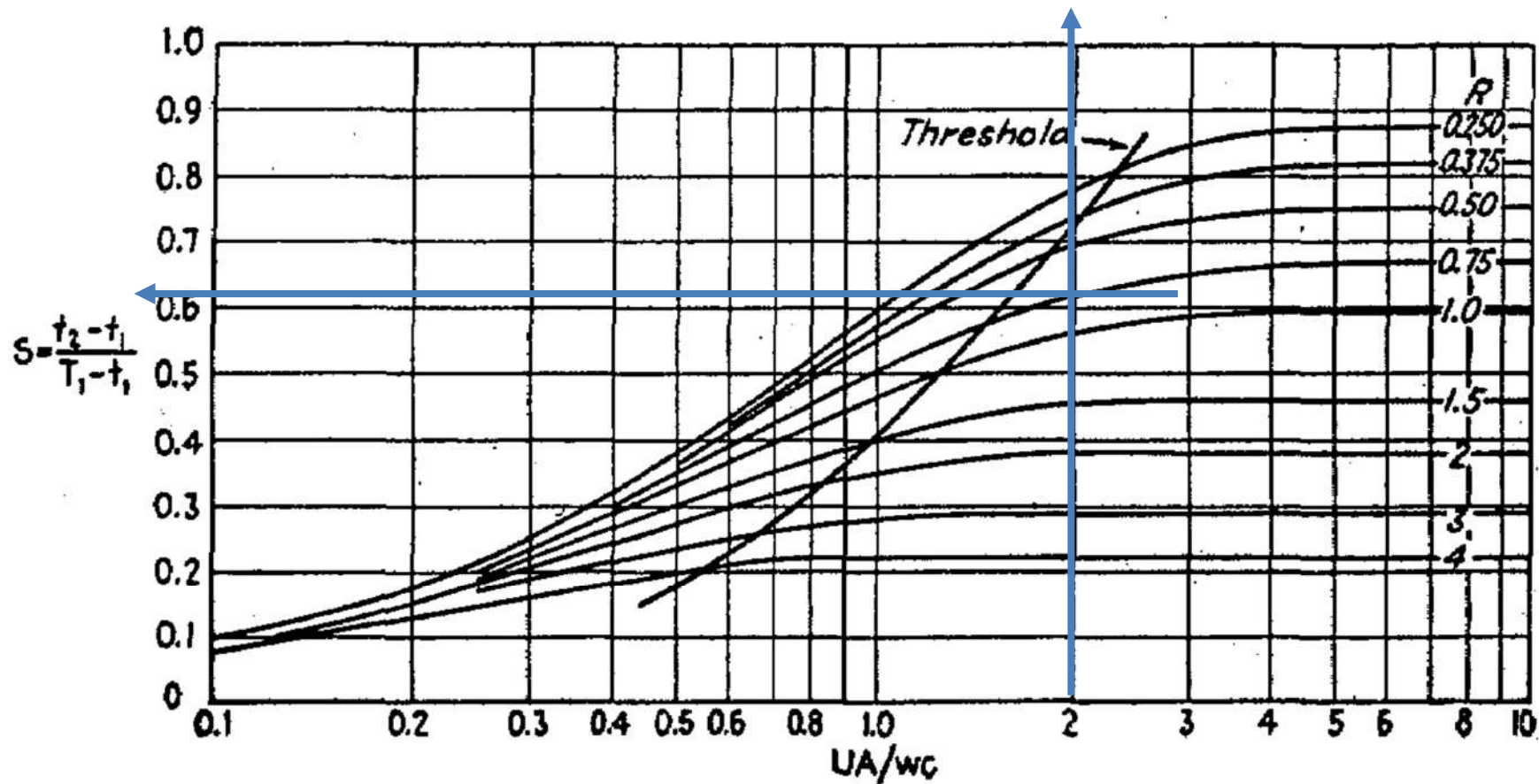


FIG. 7.25. Ten Broeck chart for determining t_2 when T_1 and t_1 are known in a 1-2 exchanger. (*Industrial & Engineering Chemistry.*)

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

$$U_o A_o / \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}$$

Διάγραμμα Ten Broeck για τον υπολογισμό του t_2 (ή του S) για εναλλάκτες τύπου 1-2, 1-4, κλπ.

Εναλλάκτες κελύφους- αυλών με ΥΨΗΛΗ απόδοση

Εναλλάκτες τύπου 1-2, 1-4 κλπ λειτουργούν κατά το **ήμισυ με «ομορροή»** και γι αυτό δίνουν σχετικά μικρή ανάκτηση θερμότητας.

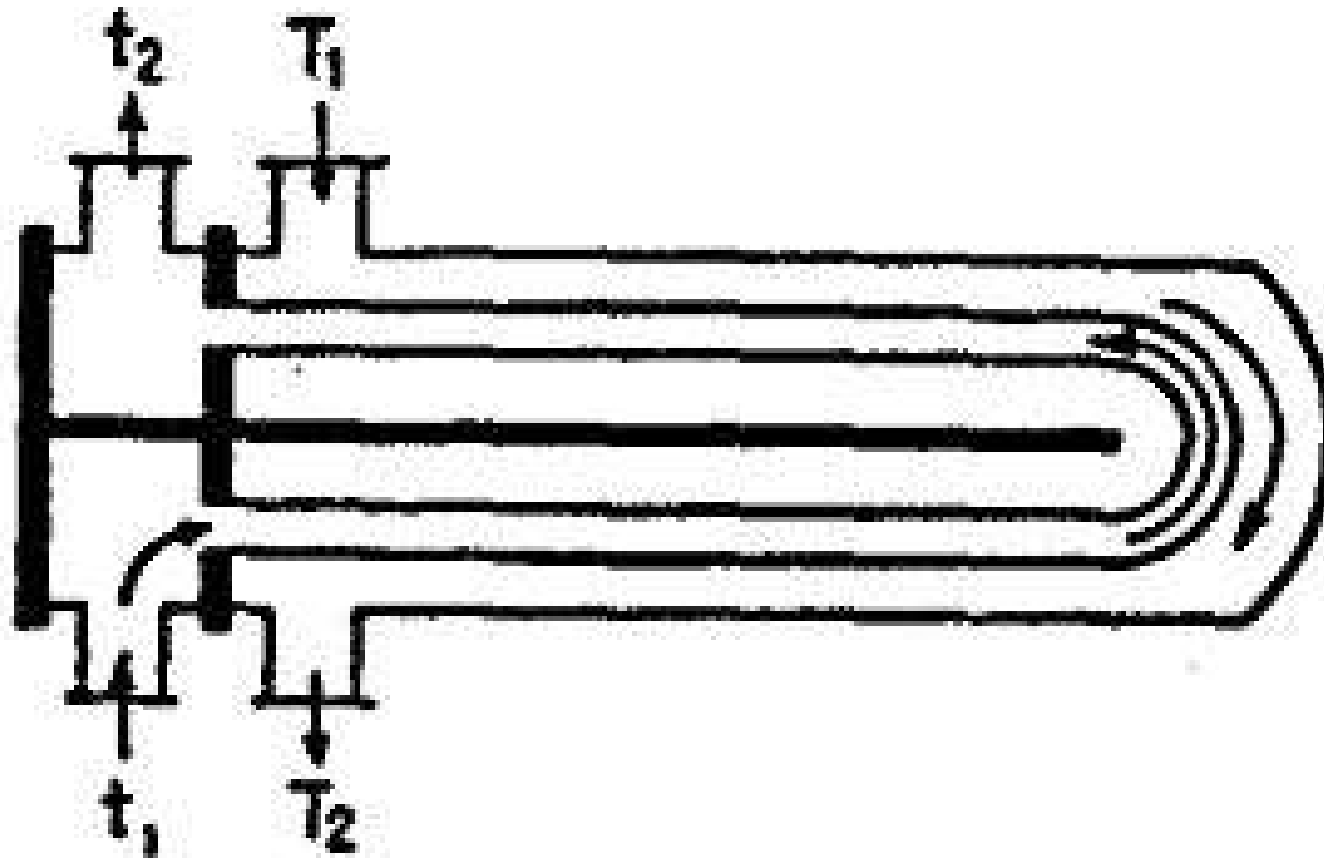
Ο όρος ομορροή τίθεται σε εισαγωγικά γιατί η ροή στο κέλυφος γίνεται εγκάρσια προς τους αυλούς και όχι παράλληλα.

Όταν η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρεύματος t_2 είναι μεγαλύτερη της θερμοκρασίας εξόδου του θερμού ρεύματος T_2 , δηλαδή όταν δημιουργείται διασταύρωση θερμοκρασιών, $t_2 - T_2 > 0$, ο συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας F_T μειώνεται απότομα και παίρνει απαράδεκτα χαμηλές τιμές (δες και Σχήματα 40, 41).

Σε τέτοιες περιπτώσεις οι εναλλάκτες των τύπων 1-2κ είναι ακατάλληλοι.

Εναλλάκτες υψηλότερης αποδόσεως επιτυγχάνονται με ειδικές διαρρυθμίσεις της ροής στο κέλυφος. Ο **απλούστερος** τύπος αυτού του είδους είναι ο **2-2**, δηλαδή ο εναλλάκτης με δύο περάσματα στο κέλυφος και δύο στους αυλούς, Σχήμα 4.45. Ο εναλλάκτης 2-2 μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί με «αντιρροή».

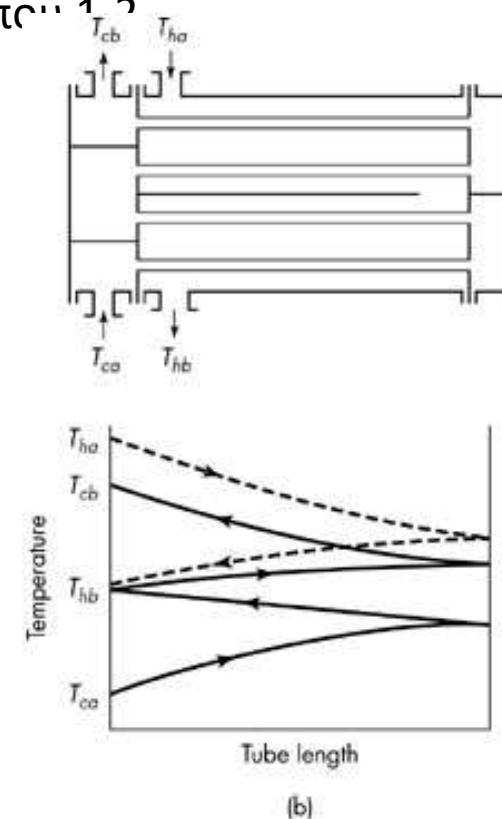
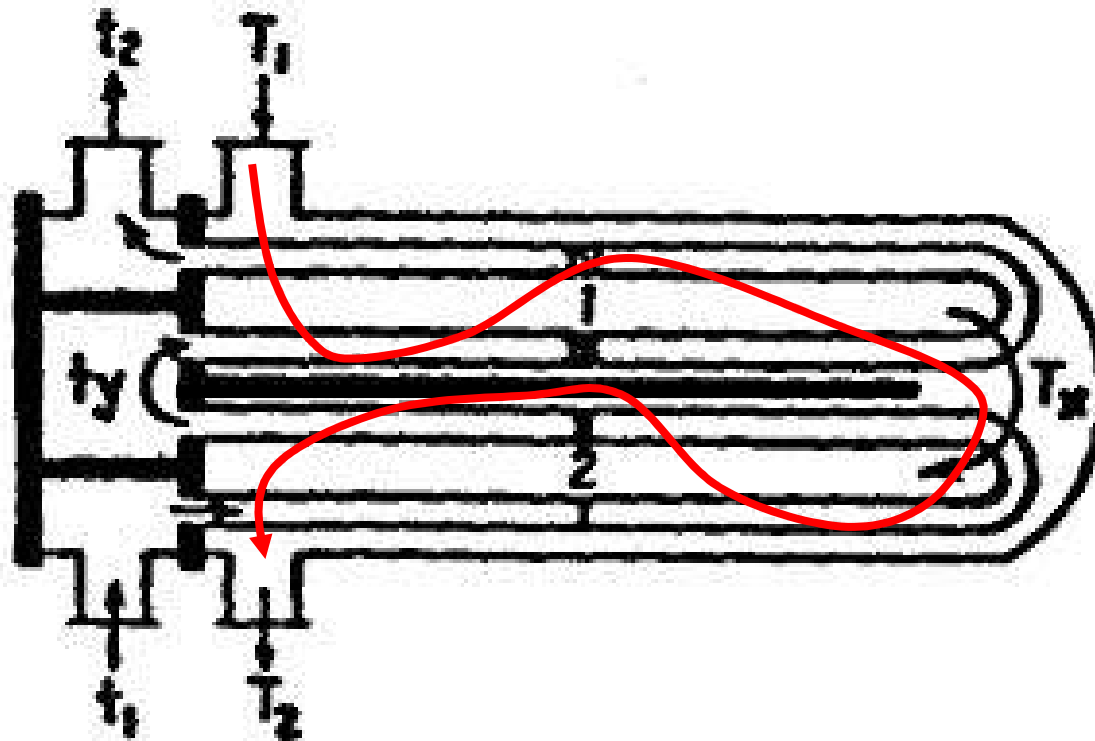
Εναλλάκτες κελύφους- αυλών με ΥΨΗΛΗ απόδοση



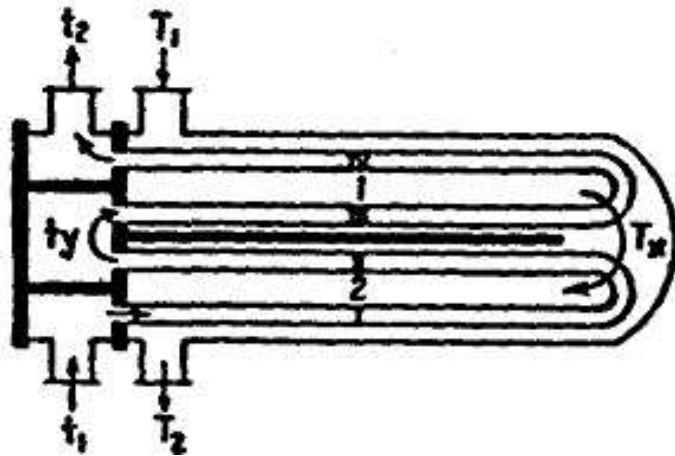
Εναλλάκτης τύπου 2-2, με καθαρή «αντιρροή», **Brilliant idea!!!**

Εναλλάκτες κελύφους- αυλών με ΥΨΗΛΗ απόδοση

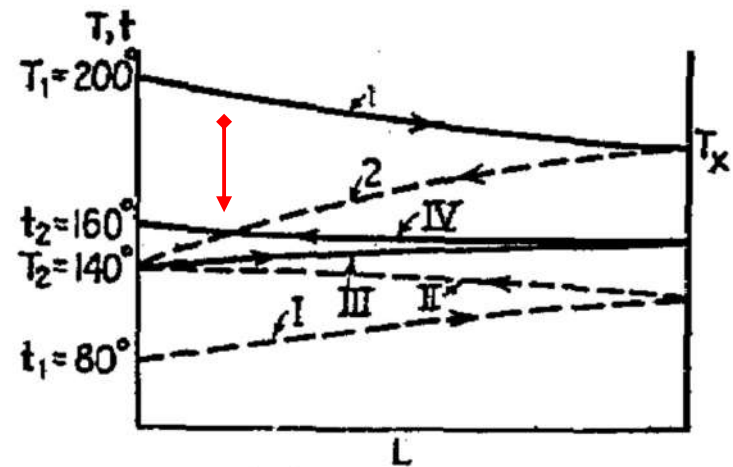
Ενας διαδεδομένος τύπος εναλλάκτη υψηλής αποδόσεως είναι ο **2-4**, Σχήμα 4.46. Μολονότι η ροή στον εναλλάκτη 2-4 είναι μισή κατ' αντιρροή και μισή κατ' ομορροή, ο εναλλάκτης αυτός **δίνει αυξημένη ανάκτηση θερμότητας, ακόμα και όταν έχουμε μεγάλη διασταύρωση θερμοκρασιών, λόγω της πιο ευνοϊκής κατανομής της διαφοράς θερμοκρασιών των δύο ρευμάτων.** Ένα παράδειγμα δίνεται στο Σχήμα 4.47 στο οποίο παραβάλλονται οι κατανομές θερμοκρασίας σε δύο εναλλάκτες, έναν τύπου 2-4 και έναν τύπου 1-2.



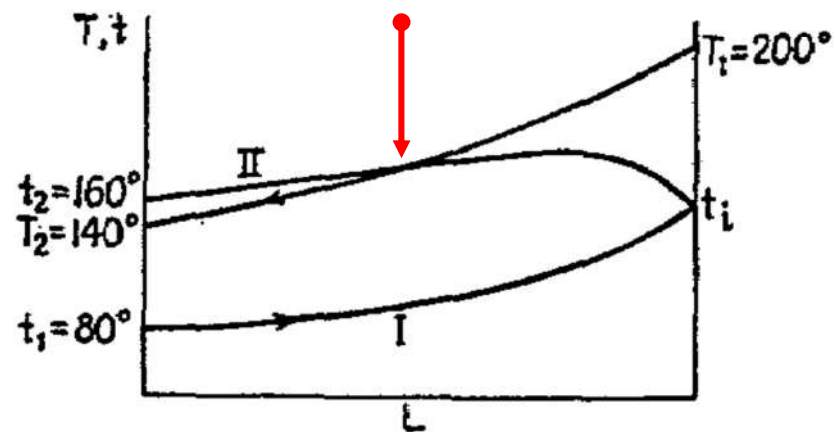
Διαρρύθμιση ροών σε εναλλάκτη 2-4. Η ροή αλλάζει από «αντιρροή» σε «ομορροή» σε «ομορροή» σε «αντιρροή».



Σχήμα 4.47 Κατανομή θερμοκρασιών σε εναλλάκτες τύπων 2-4 και 1-2 για μία περίπτωση με μεγάλη διασταύρωση θερμοκρασιών, δηλαδή $t_2 - T_2 = 160^\circ\text{F} - 140^\circ\text{F} = 20^\circ\text{F}$. Η διαφορά θερμοκρασίας στον 2-4 είναι σαφώς ευνοϊκότερη.



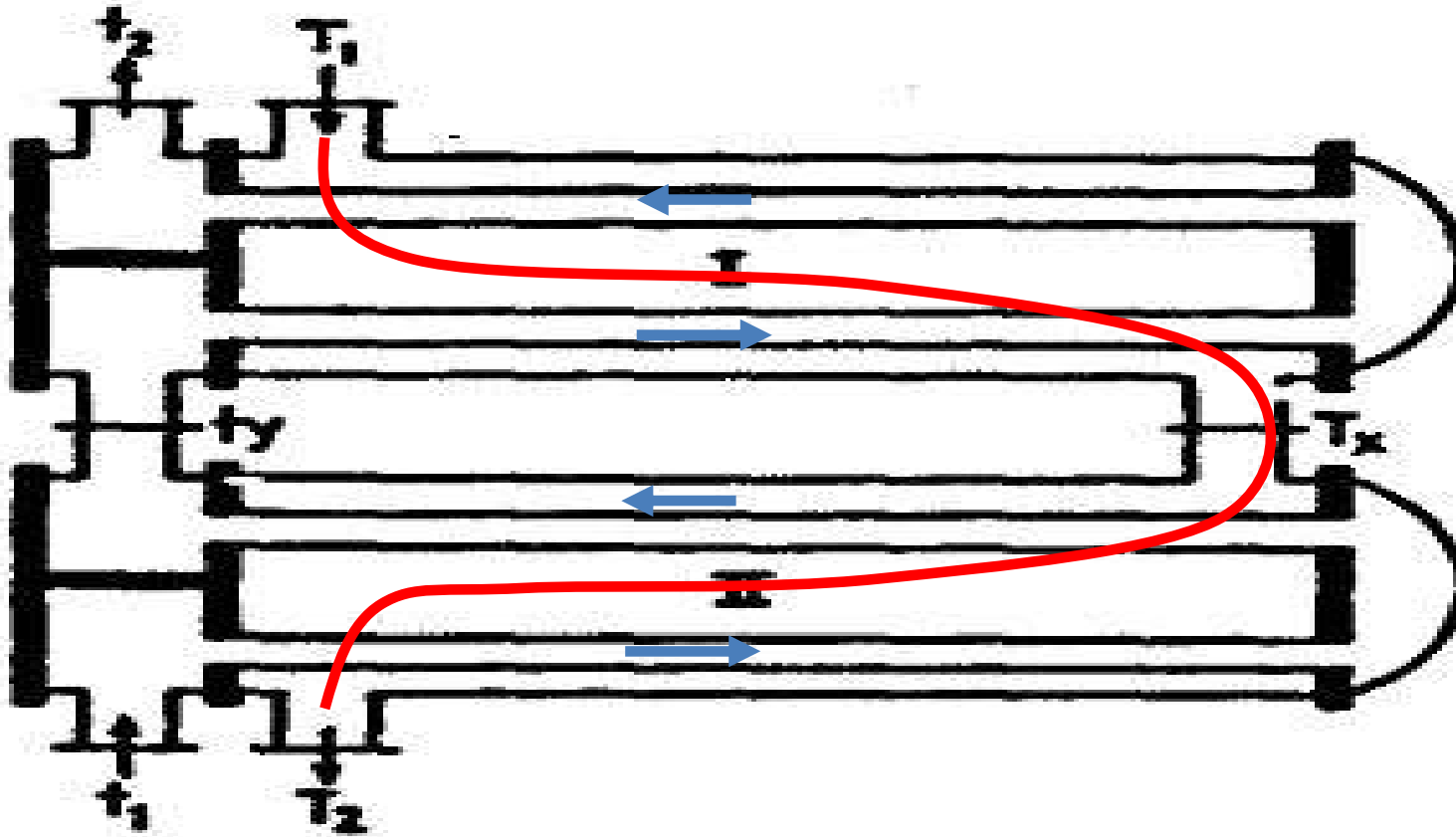
(α)-2-4 EXCHANGER



(β)-1-2 EXCHANGER

FIG. 8.2. Temperature relations in 1-2 and 2-4 exchangers.

Ο συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας F_T για
εναλλάκτες 2-4



Δύο εν σειρά εναλλάκτες 1-2 προσεγγίζουν τη λειτουργία ενός
εναλλάκτη 2-4

Ο συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας F_T για εναλλάκτες 2-4

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

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

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

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

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

Ο συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας F_T για εναλλάκτες 2-4

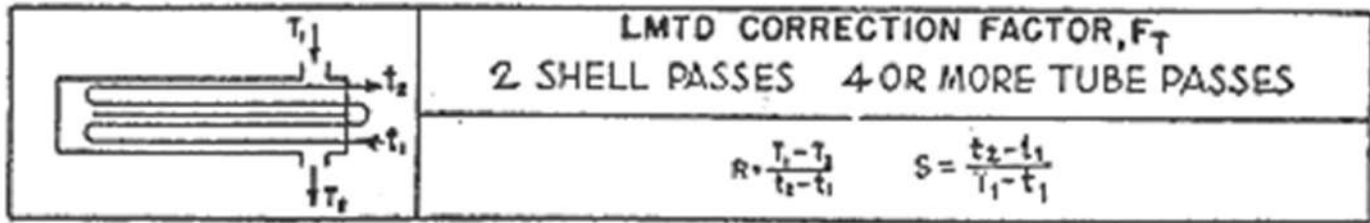
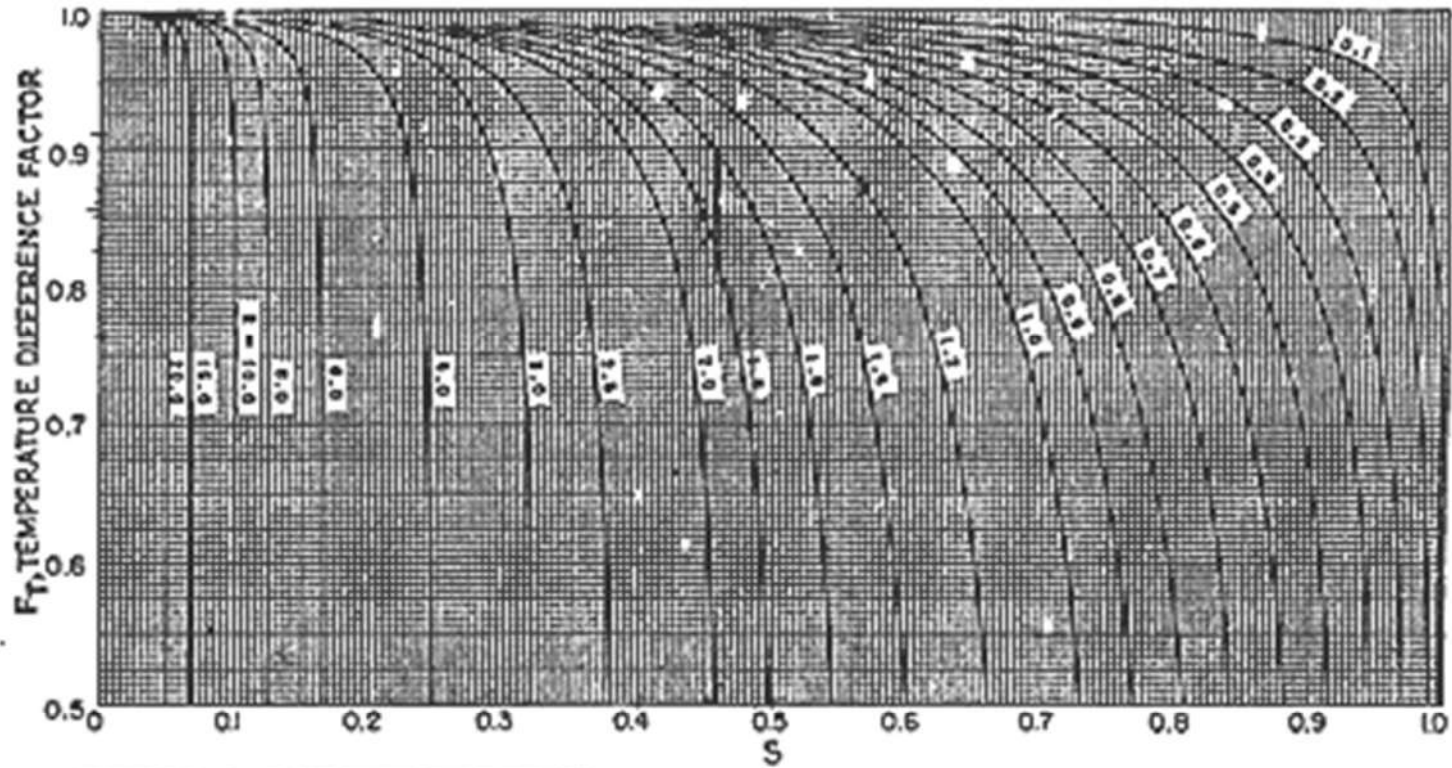
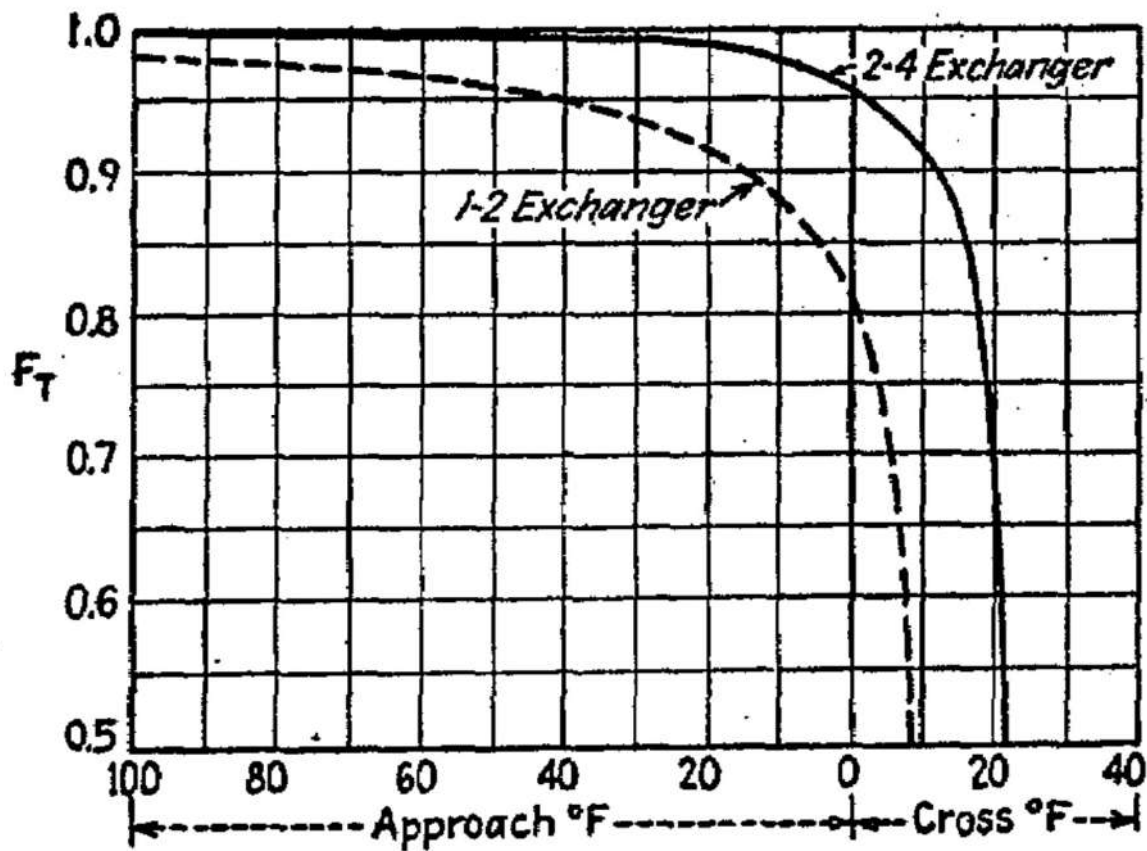
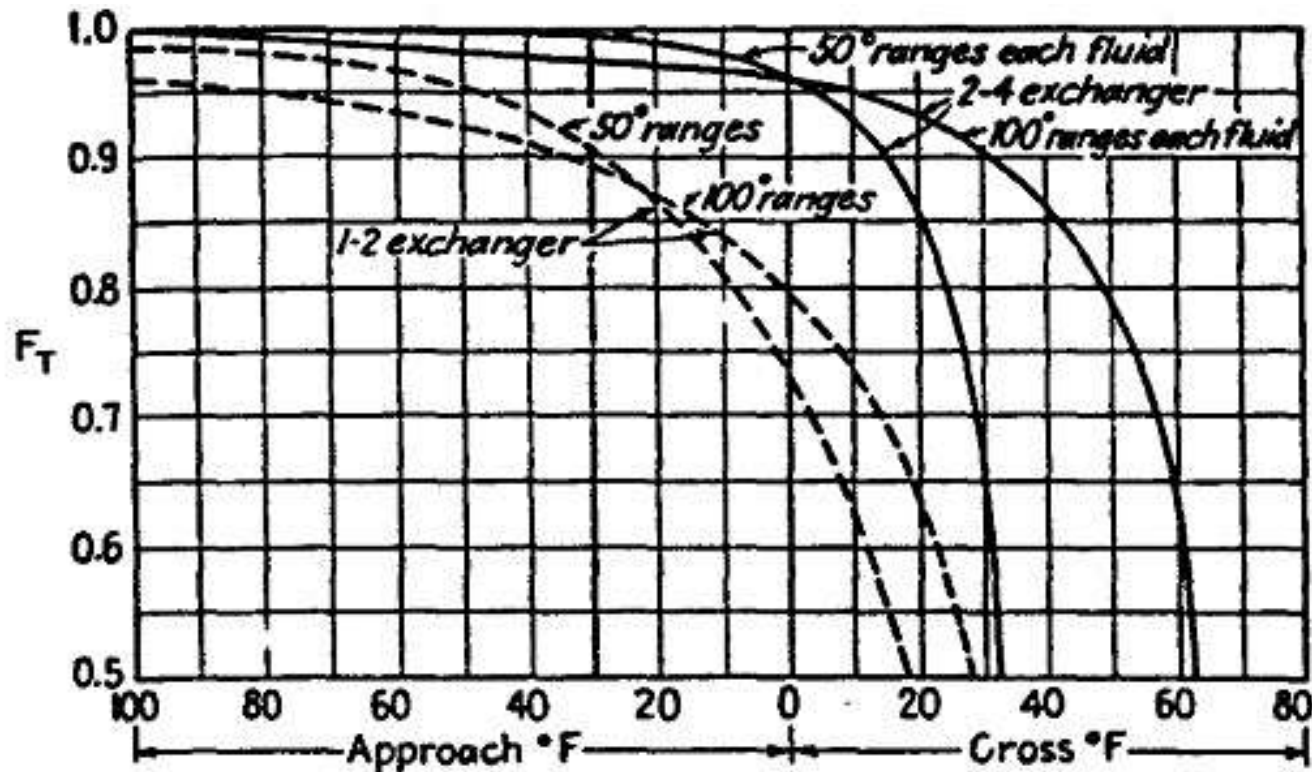


Fig. 10. LMTD correction factors for 2-4 exchangers. (Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association 2d ed., New York, 1949.)

Ο συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας F_T για εναλλάκτες 2-4

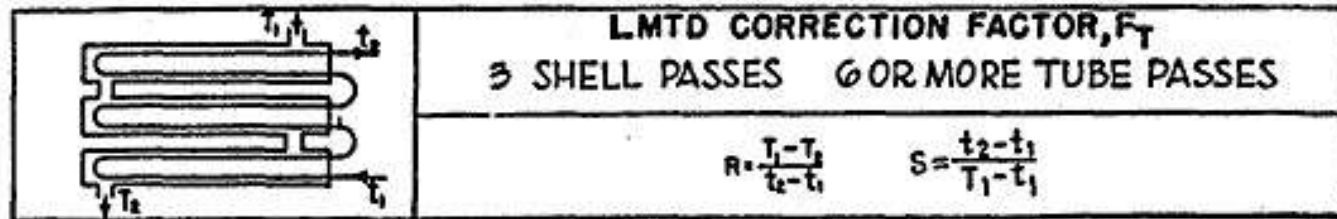
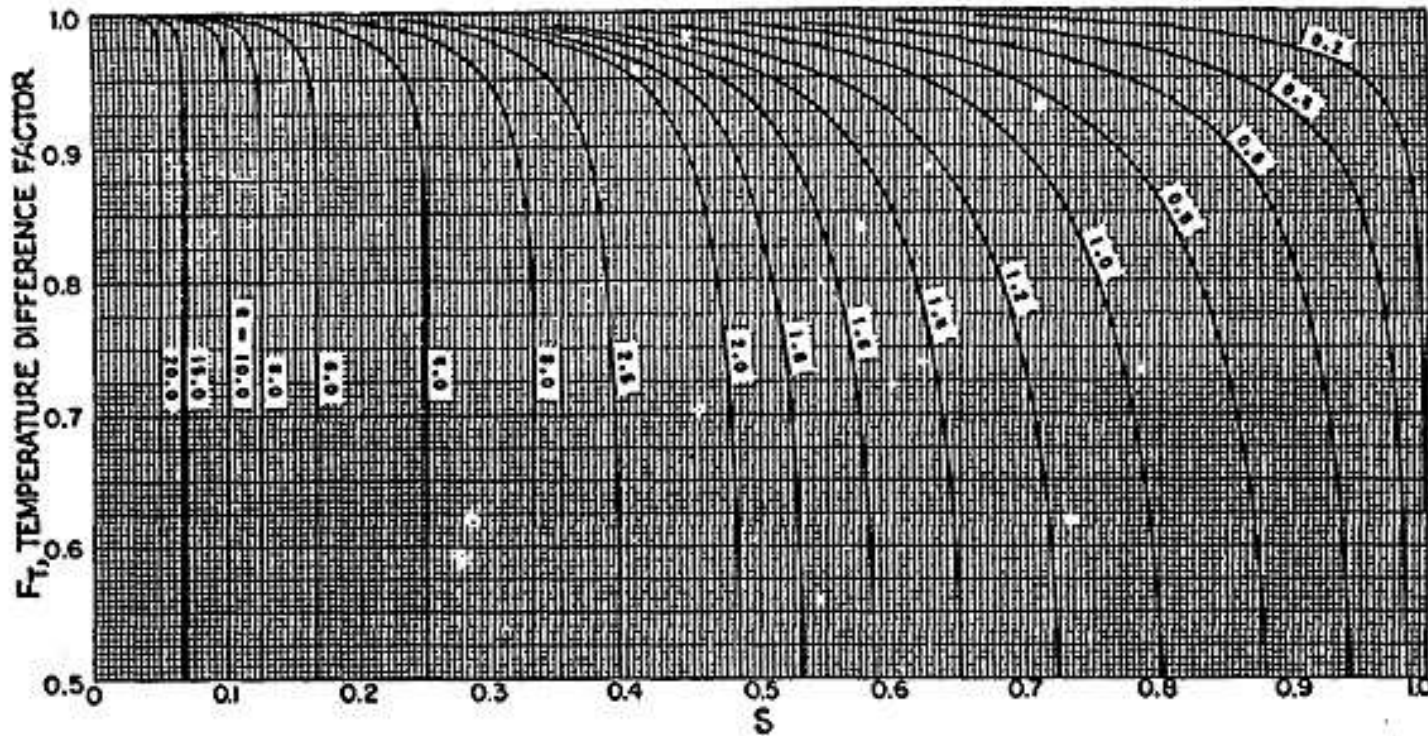


Ο συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας F_T για εναλλάκτες 2-4



Εξάρτηση του συντελεστή διαφοράς θερμοκρασίας F_T από την προσέγγιση θερμοκρασιών ($T_2 - t_2$), ή από τη διασταύρωση θερμοκρασιών ($t_2 - T_2$) για δύο ρευστά με ίσες αλλαγές θερμοκρασιών (50°F ή 180°F). Οι πρακτικές τιμές του F_T είναι $F_T > 0.85$. **Ο τύπος 2-4 είναι σημαντικά πιο αποδοτικός από τον 1-2, ιδιαίτερα για μεγάλες διασταυρώσεις θερμοκρασίας.**

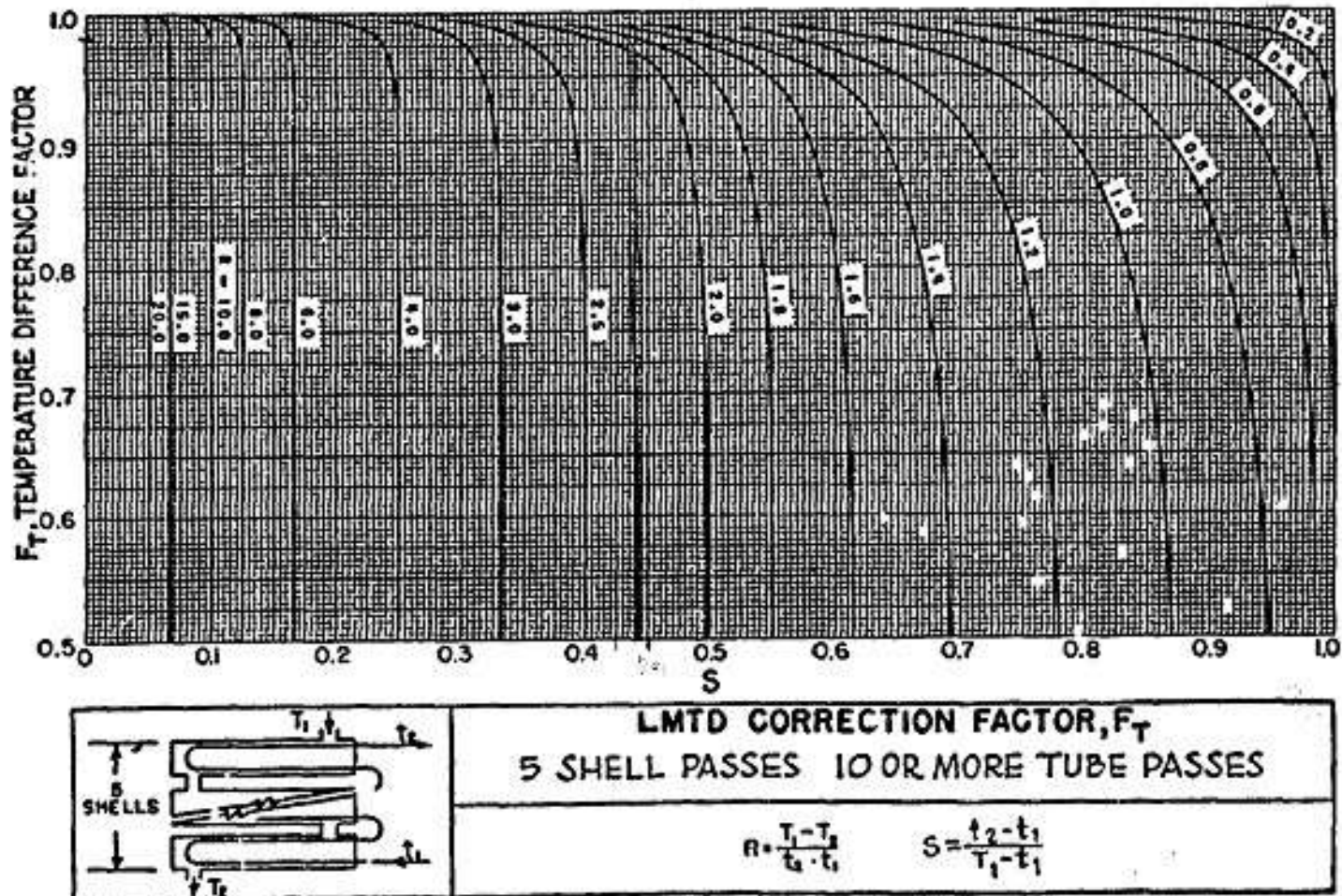
Ο συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας F_T για εναλλάκτες 3-6



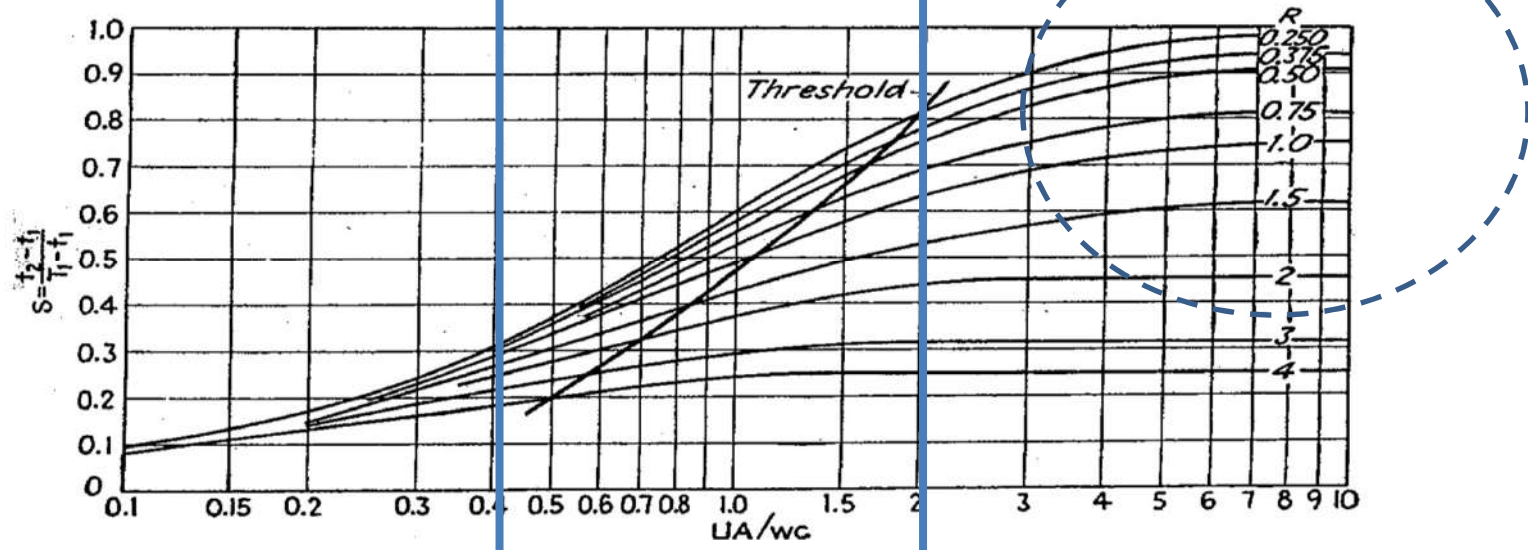
LMTD CORRECTION FACTOR, F_T
 3 SHELL PASSES 6 OR MORE TUBE PASSES

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

Ο συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας F_T για εναλλάκτες 5-10



Διάγραμμα Ten Broeck για Εναλλάκτη 2-4



Διάγραμμα Ten Broeck για Εναλλάκτη 1-2

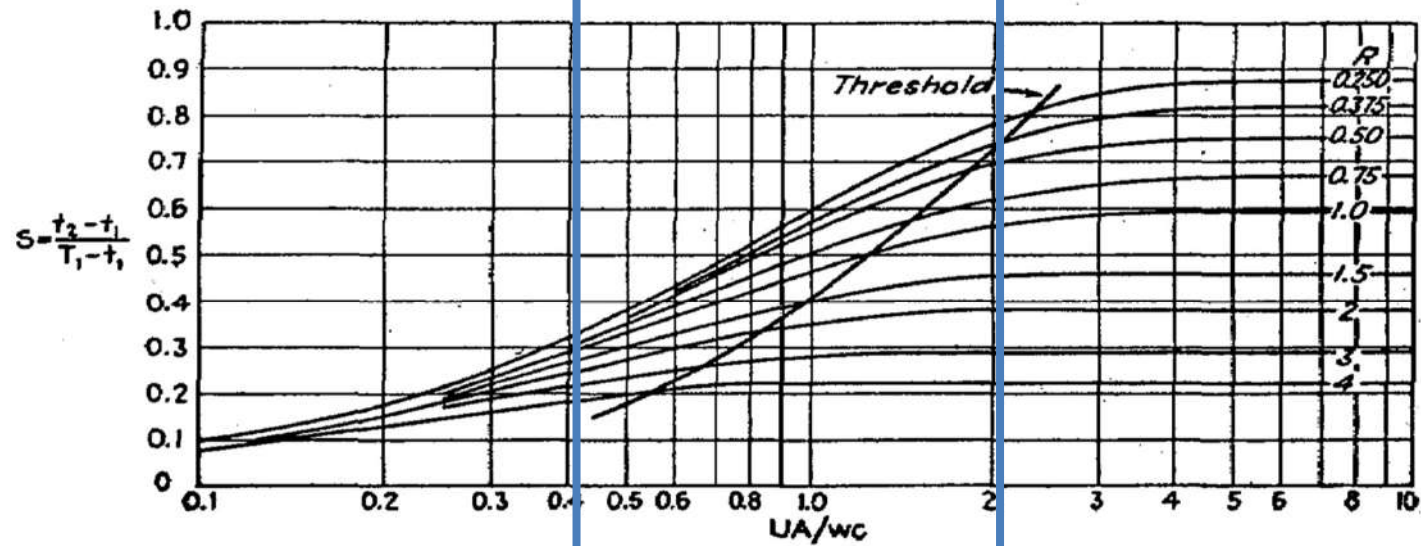
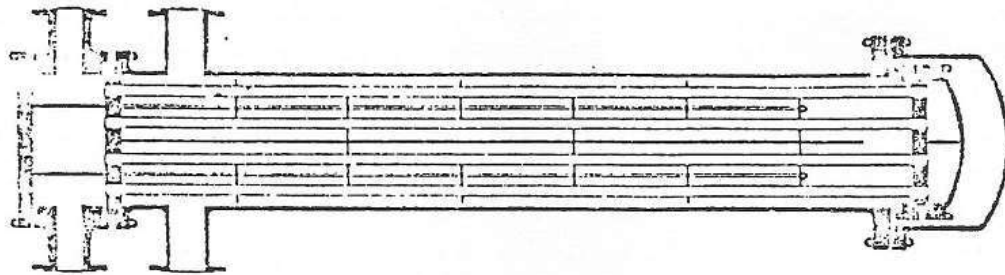
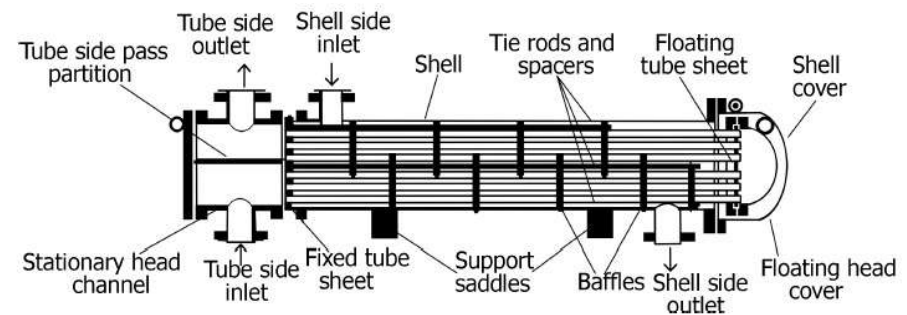
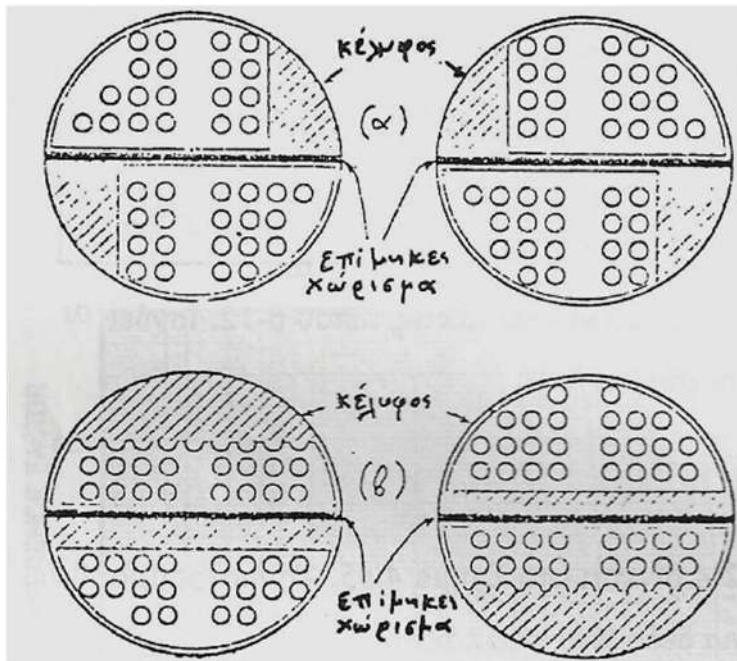


FIG. 7.25. Ten Broeck chart for determining t_2 when T_1 and t_1 are known in a 1-2 exchanger. (*Industrial & Engineering Chemistry.*)

Κατασκευαστικές λεπτομέρειες για εναλλάκτη 2-4



Εγκάρσια χωρίσματα εναλλάκτη 2-4. (α) χωρίσματα με κατακόρυφο κόψιμο. (β) χωρίσματα με οριζόντιο κόψιμο. Οι σκιασμένες επιφάνειες είναι οι δίοδοι του ρευστού του κελύφους.



Κατασκευαστικές λεπτομέρειες για εναλλάκτη 2-4

Χωρίσματα με κατακόρυφο κόψιμο

Η κατανομή της ροής είναι περίπου η ίδια μ' εκείνη που έχουμε σε εναλλάκτες 1-2, αλλά με το **μισό μόνο της επιφάνειας** για το ίδιο βήμα χωρισμάτων. Συνεπώς, για την ίδια **μαζική παροχή η μαζική ταχύτητα στον 2-4 είναι διπλάσια** εκείνης που έχουμε στον 1-2 (όλες οι άλλες διαστάσεις θεωρούνται ίδιες).

$$A_{\kappa} = \frac{D_{\kappa} C B_{\chi}}{2B_{\sigma}} = \frac{D_{\kappa} (B_{\sigma} - d_0) B_{\chi}}{2B_{\sigma}} \quad G_{\kappa} = \frac{\dot{m}_{\kappa}}{A_{\kappa}}$$

Χωρίσματα με οριζόντιο κόψιμο

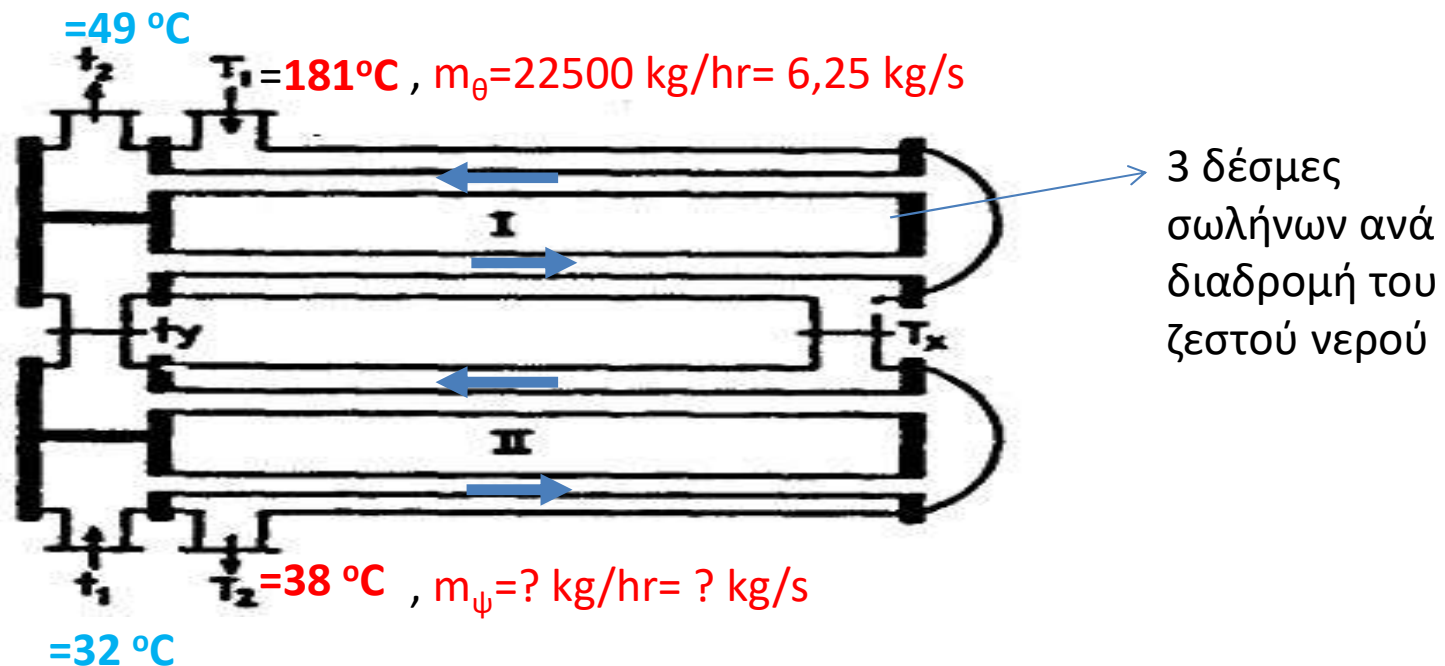
Σ' αυτή την περίπτωση τα κομμένα κλάσματα των χωρισμάτων είναι συνήθως ίσα με εκείνα σ' εναλλάκτες 1-2. Ετσι, η μαζική ταχύτητα υπολογίζεται από την Εξισ. (35) με A_{κ} που υπολογίζεται από την Εξισ. (36). Η μαζική ταχύτητα είναι ίση με εκείνη σε εναλλάκτη 1-2, αλλά το ρευστό του κελύφους διασχίζει τη μισή περίπου διαδρομή ανά χώρισμα.

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

όπου: D_{κ} =εσωτερική διάμετρος του κελύφους
 C =διάστημα μεταξύ σωλήνων
 B_{χ} = βήμα χωρισμάτων
 B_{σ} = βήμα σωλήνων

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

Ενα έλαιο πυκνότητας **33.5°API** έχει ιξώδες 1 mPa.s σε 82°C και 2 mPa.s σε 36°C. Αυτό το έλαιο παράγεται σε μία αποστακτική στήλη, από την οποία εξέρχεται με μαζική παροχή 22500 kg/hr και θερμοκρασία **181°C**. Το έλαιο αυτό πρέπει να ψυχθεί μέχρι την θερμοκρασία **38°C** για περαιτέρω επεξεργασία σε στήλη ροφήσεως. Το ψυκτικό μέσο είναι **νερό** του οποίου η θερμοκρασία ανέρχεται από **32°C σε 49°C**. Η επιτρεπόμενη πτώση πίεσεως είναι 0.75 atm για κάθε ρεύμα. Ο ολικός συντελεστής ρυπάνσεως είναι 0.0007 m²°K/W.



Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

Γι αυτή τη διεργασία θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε έναν εναλλάκτη που είναι διαθέσιμος στην αποθήκη του εργοστασίου. Ο εναλλάκτης αυτός είναι τύπου **2-6** με εσωτερική διάμετρο κελύφους 35 in, έχει 454 αυλούς με 1 in O.D., 11 BWG και μήκος 12 ft, διαρρυθμισμένους σε τετραγωνική διάταξη με βήμα 1 ¼ in. Τα εγκάρσια **χωρίσματα έχουν κατακόρυφο κόψιμο** και είναι τοποθετημένα με βήμα 7 in. Το επίμηκες χώρισμα είναι οξυγονοκολλημένο στο κέλυφος.

- α) Είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί εναλλάκτης τύπου υψηλής αποδόσεως, όπως ο 2-6; Δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ένας εναλλάκτης 1-2?
- (β) Αν ναι, είναι κατάλληλος ο διαθέσιμος εναλλάκτης;

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

Δεδομένα: **Θερμό-Έλαιο**, **Ψυχρό- Νερό**

$\dot{m}_\theta = 22500 \text{ kg/hr} = 6,25 \text{ kg/s}$	$\dot{m}_\psi = ? \text{ kg/hr} = (?) \text{ kg/s}$
$s_\theta = 33,5^\circ \text{API}$	$S_\psi = ? \text{ νερό}$
$T_{\theta, \text{εισ}} = 181^\circ \text{C}$	$T_{\psi, \text{εισ}} = 32^\circ \text{C}$
$T_{\theta, \text{εξ}} = 38^\circ \text{C}$	$T_{\psi, \text{εξ}} = 49^\circ \text{C}$
$(\Delta p)_\theta \leq 0.75 \text{ atm}$	$(\Delta p)_\psi \leq 0.75 \text{ atm}$
$R_\rho = 0.0007 \text{ m}^2 \text{K/W}$	

Εναλλάκτης: Τύπος 2-6

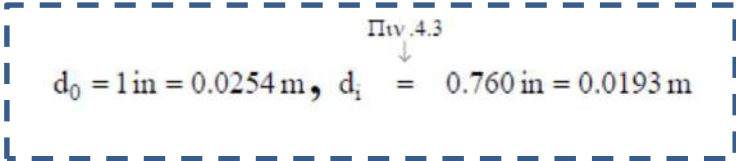
Δύο περάσματα στο κέλυφος, 6 περάσματα στους σωλήνες

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

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

1 in O.D., 11 BWG

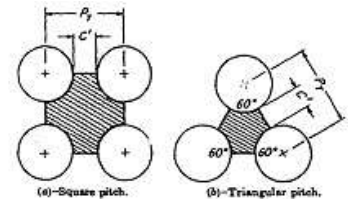


$$D_{\kappa} = 35 \text{ in} = 0.8890 \text{ m}, \quad N_{\sigma} = 454, \quad N_{\delta, \kappa} = 2, \quad N_{\delta, \sigma} = 6,$$

$$\ell_{\sigma} = 12 \text{ ft} = 3.658 \text{ m}, \quad B_{\sigma} = 1\frac{1}{4} \text{ in} = 0.03175 \text{ m}, \quad B_{\chi} = 7 \text{ in} = 0.17780 \text{ m}$$

$$D_e \stackrel{(33)}{\downarrow} = \frac{(4 \times 0.03175^2 - \pi \times 0.0254^2)}{(\pi \times 0.0254)} = 25.13 \times 10^{-3} \text{ m}$$

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



Χωρίσματα με κατακόρυφο κόψιμο

$$A_{\kappa} = \frac{D_{\kappa} C B_{\chi}}{2B_{\sigma}} = \frac{D_{\kappa} (B_{\sigma} - d_0) B_{\chi}}{2B_{\sigma}}$$

$$A_{\kappa} \stackrel{(97)}{\downarrow} = \frac{0.8890 \times (0.03175 - 0.0254) \times 0.17780}{2 \times 0.03175} = 15.81 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

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

$$N_{\chi} + 1 = \frac{3.658}{0.17780} = 20.6 \quad \rightarrow \quad N_{\chi} + 1 = 21 = \ell_{\sigma} / B_{\chi}$$

$$A_0 = N_{\sigma} \ell_{\sigma} \pi d_0 = 454 \times 3.658 \times \pi \times 0.0254 = 132.5 \text{ m}^2$$

$$A_{\sigma} \stackrel{(87)}{\downarrow} = \left(\frac{454}{6} \right) \frac{\pi}{4} 0.0193^2 = 22.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2,$$

Διάμετρος Σωλήνα OD, in	BWG	Πάχος τοίχου in	ID, in	Επιφάνεια Διατομής in ²	Επιφάνεια ανά 1 ft μήκους ft ²		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		

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

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

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

$$T_{\theta,m} = \frac{1}{2} (T_{\theta,\epsilon\iota\sigma} + T_{\theta,\epsilon\xi}) = \frac{1}{2} (181 + 38) = 109.5^\circ\text{C} \cong 229^\circ\text{F} \quad T_{\psi,m} = \frac{1}{2} (T_{\psi,\epsilon\iota\sigma} + T_{\psi,\epsilon\xi}) = \frac{1}{2} (32 + 49) = 40.5^\circ\text{C}$$

έλαιο πυκνότητας
33.5°API

$$c_{p,\theta} = 0.545 \text{ Btu/lb } ^\circ\text{F}$$

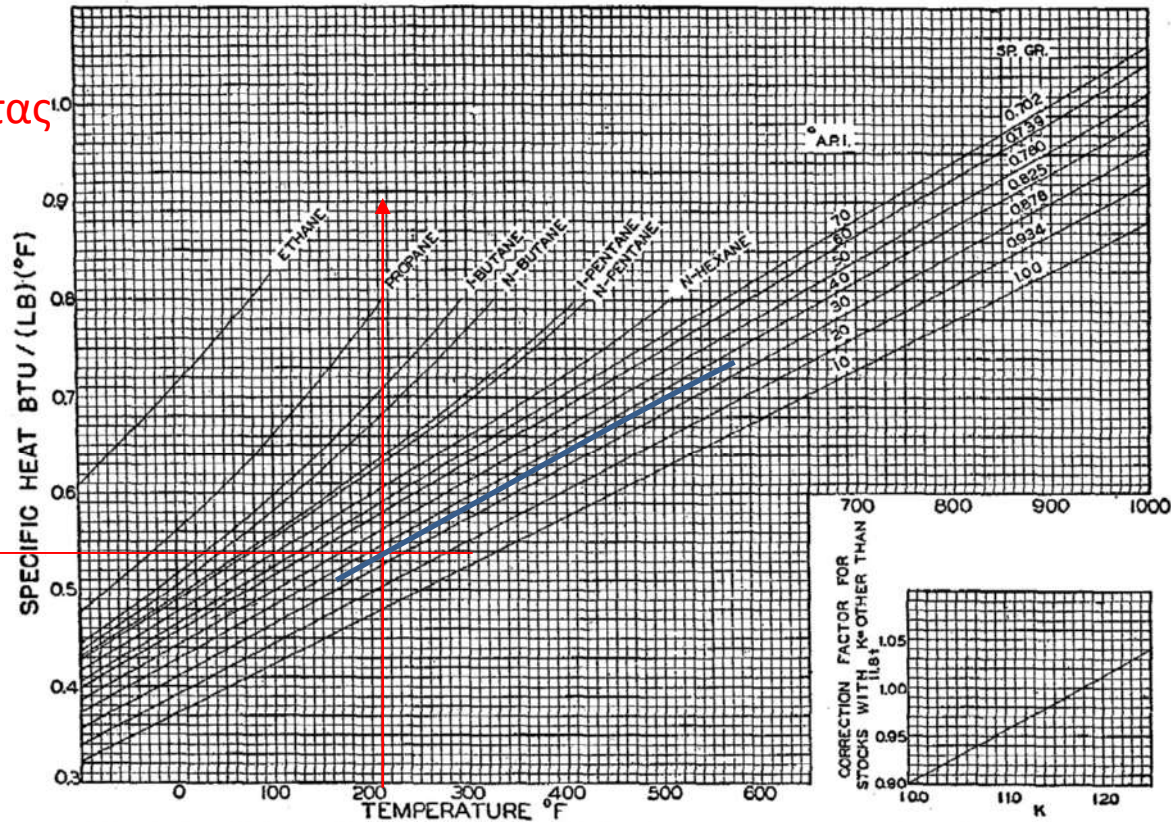


FIG. 4. Specific heats of hydrocarbon liquids. [Holcomb and Brown, *Ind. Eng. Chem.*, 34, 595 (1942).]

† K = characterization factor.

$$c_{p,\theta} = 0.545 \times 4186.8 \text{ J/kg } ^\circ\text{K} = 2282 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$$

$$c_{p,\psi} \cong 1.0 \times 4186.8 = 4187 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$$

Perry

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

Ισοζύγιο Ενέργειας (συνέχεια)

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

$$\dot{m}_\psi = 6.250 \frac{2282 (181 - 38)}{4187 (49 - 32)} = 27.440 \text{ kg/s}$$

$$Q = 6.250 \times 2282 \times (181 - 38) = 2.040 \times 10^6 \text{ W}$$

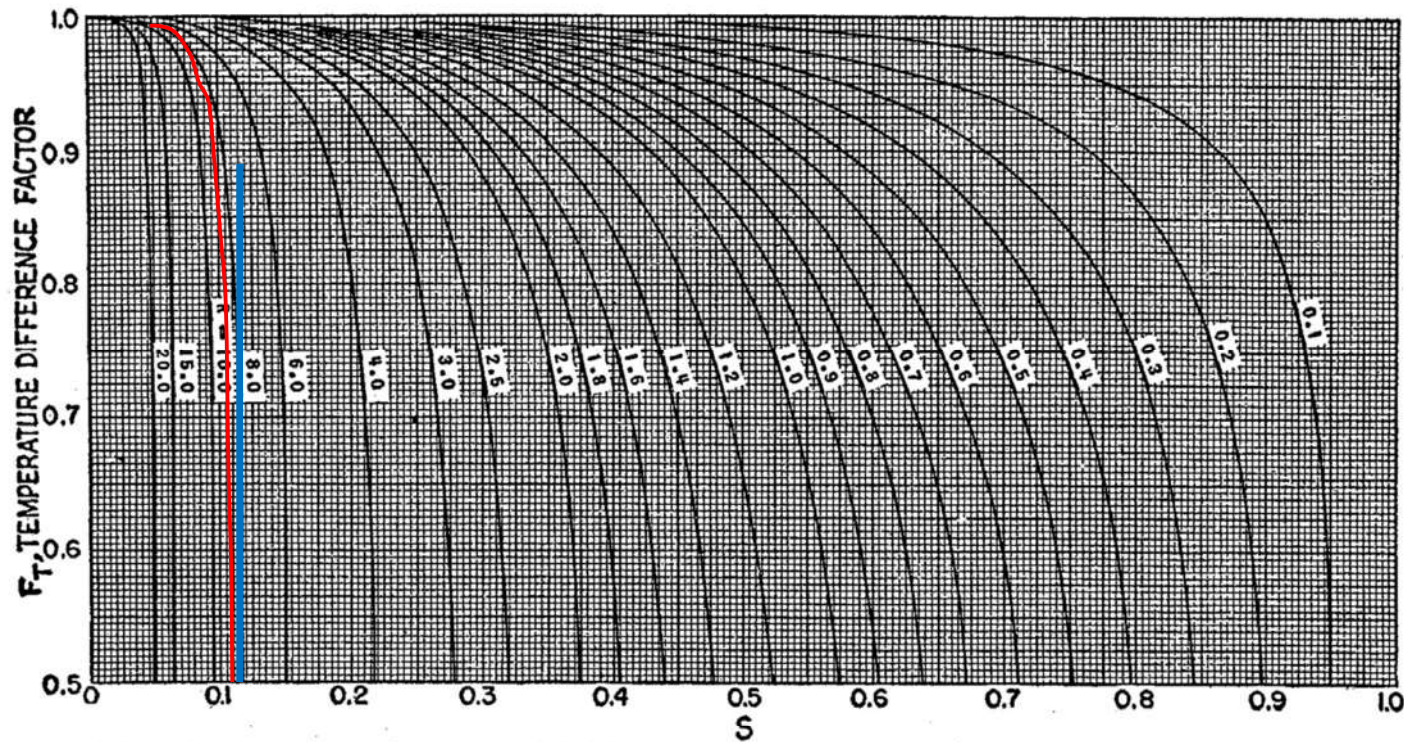
Διαφορά Θερμοκρασίας

$$(\Delta T)_{\ell m} = \frac{(181 - 49) - (38 - 32)}{\frac{(181 - 49)}{(38 - 32)}} = 40.76^\circ \text{C}$$

$$R = \frac{181 - 38}{49 - 32} = 8.41$$

$$S = \frac{49 - 32}{181 - 32} = 0.114$$

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6



828

PROCESS HEAT TRANSFER

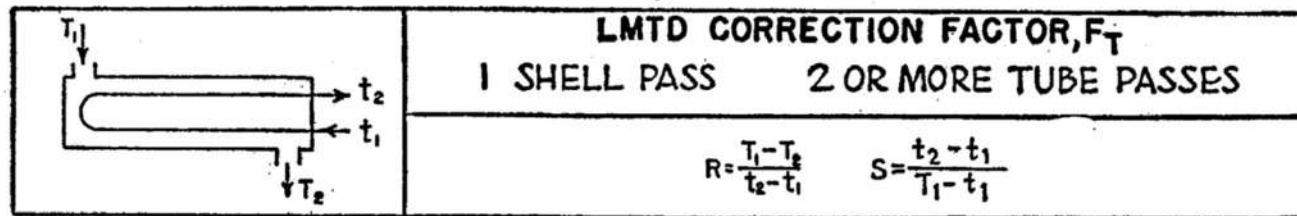
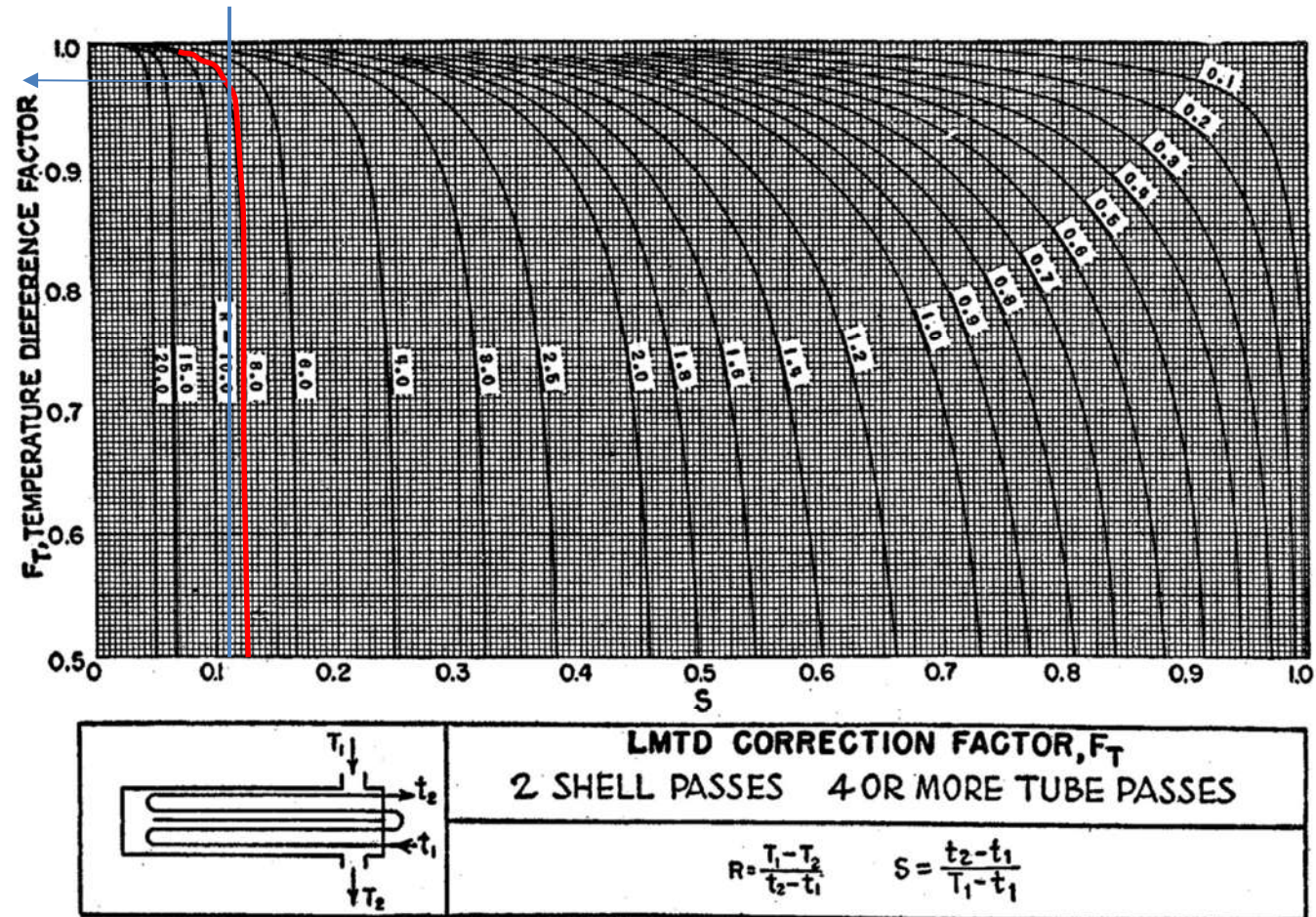


Fig. 18. LMTD correction factors for 1-2 exchangers. (Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association, 2d ed., New York, 1949.)

$$R = \frac{181 - 38}{49 - 32} = 8.41 \quad S = \frac{49 - 32}{181 - 32} = 0.114$$

... βλέπουμε ότι αυτές οι τιμές των R και S δεν τέμνονται για εναλλάκτες τύπων 1-2k

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6



APPENDIX OF CALCULATION DATA

829

FIG. 19. LMTD correction factors for 2-4 exchangers. (Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association 2d ed., New York, 1949.)

$$R = \frac{181 - 38}{49 - 32} = 8.41 \quad S = \frac{49 - 32}{181 - 32} = 0.114 \quad F_T \cong 0.93$$

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

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

$F_T = 0.927$ Η υψηλή τιμή του F_T υποδηλώνει ότι ο τύπος 2-6 είναι αποδεκτός.

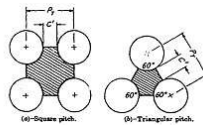
Η φαινομένη διαφορά θερμοκρασίας είναι

$$(\Delta T)_\phi = (\Delta T)_{lm} F_T = 40.76 \times 0.927 = 37.78^\circ \text{C}$$

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

Επιλογή Πλευρών για τα δύο Ρεύματα

Όταν είναι δυνατόν, προτιμούμε να διοχετεύσουμε το πιο διαβρωτικό από τα δύο ρευστά στην πλευρά των αυλών, για να αποφύγουμε τη διάβρωση του κελύφους. Στην προκειμένη περίπτωση θα διοχετεύσουμε το νερό μέσα από τους αυλούς και θα ελέγξουμε να δούμε αν η πτώση πίεσως υπερβαίνει το επιτρεπτό όριο.

Πλευρά Κελύφους (Ελαίο 33.5°API)	Πλευρά Αυλών (Νερό)
<p>Οι ιδιότητες του ελαίου υπολογίζονται στη μέση θερμοκρασία $T_{\theta,m}=109.5^{\circ}\text{C}$. Πιο ακριβής υπολογισμός γίνεται με βάση τη «θερμιδική θερμοκρασία»*</p> <p>(4)</p> $G_{\kappa} = \frac{\dot{m}_{\kappa}}{A_{\kappa}} = \frac{6.250}{15.81 \times 10^{-3}} = 395.3 \text{ kg/m}^2\text{s}$ <p>(5) Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για το ιξώδες του ελαίου σε συνδυασμό με το Σχ. Π.6 λαμβάνουμε $X=11.1$ και $Y=17.5$. Με οδηγό αυτό το σημείο παίρνουμε για $T=109.5^{\circ}\text{C}$</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $\mu_b = 0.70 \text{ cp} = 7.0 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ </div>	<p>Οι ιδιότητες του νερού υπολογίζονται στη μέση θερμοκρασία $T_{\psi,m}=40.5^{\circ}\text{C}$. Πιο ακριβής υπολογισμός γίνεται με βάση τη «θερμιδική θερμοκρασία»*</p> <div style="text-align: right; margin-bottom: 10px;">  <p>(a)-Square pitch. (b)-Triangular pitch.</p> </div> <p>(4)</p> $G_{\sigma} = \frac{\dot{m}_{\sigma}}{A_{\sigma}} = \frac{27.440}{22.14 \times 10^{-3}} = 1239 \text{ kg/m}^2\text{s}$ <p>(5) Από τον Πίνακα Π.2 έχουμε $X=10.2$ $Y=13.0$. Με οδηγό αυτό το σημείο παίρνουμε από το Σχ. Π.6 για $T=40.5^{\circ}\text{C}$</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $\mu_b = 0.71 \text{ cp} = 7.1 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$ </div>

$X=11.1$ και $Y=17.5$.
 $T=109,5^{\circ}\text{C}$

$\mu_b = 0.70 \text{ cp} = 7.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

$X=10.2$, $Y=13.0$.
 $T=40.5^{\circ}\text{C}$

$\mu_b = 0.71 \text{ cp} = 7.1 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

APPENDIX OF CALCULATION DATA

823

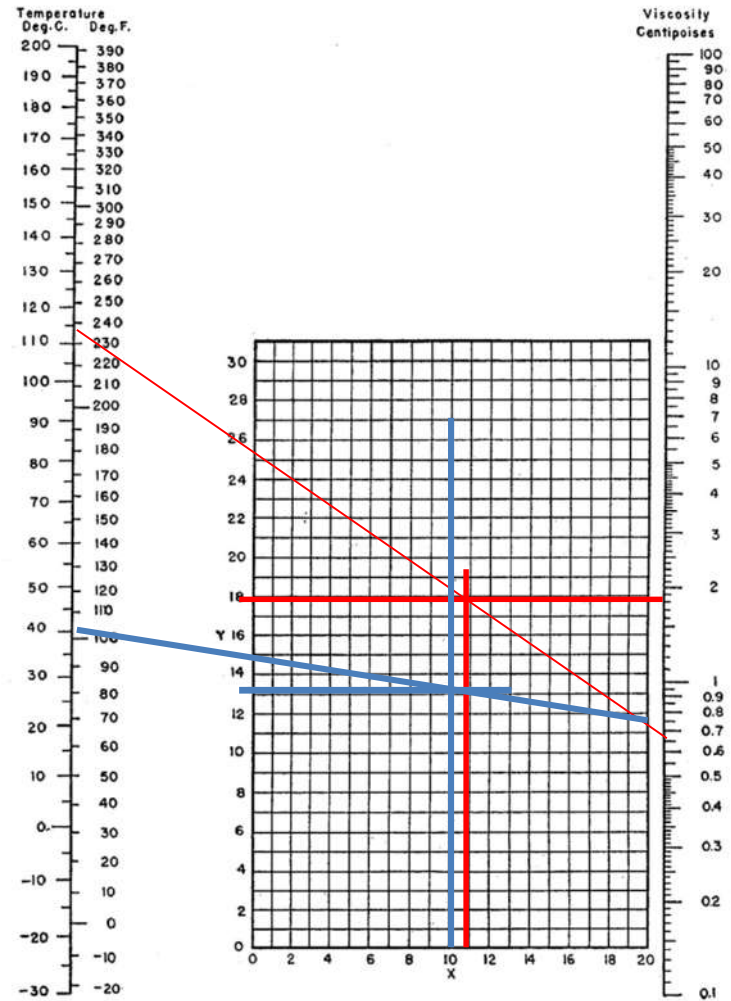


FIG. 14. Viscosities of liquids. (Perry, "Chemical Engineers' Handbook," 3d ed., McGraw Hill Book Company, Inc., New York, 1950.)

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

Πλευρά Κελύφους (Ελαιο 33.5°API)

Πλευρά Αυλών (Νερό)

$$(6) Re_{\kappa} = \frac{D_e G_{\kappa}}{\mu_b} = \frac{25.13 \times 10^{-3} \times 395.3}{7 \times 10^{-4}}$$

$$(4) Re_{\sigma} = \frac{d_i G_{\sigma}}{\mu_b} = \frac{19.3 \times 10^{-3} \times 1239}{7.1 \times 10^{-4}}$$

$$= 14.2 \times 10^3$$

$$= 33.7 \times 10^3$$

$$(7) j_H = 69 \quad \text{Εξισ. (37)}$$

$$(5) j_H = 109 \quad \text{Εξ. (11)}$$

$$j_H = 0.26 Re^{0.8}$$

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

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

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

$$(8) h_i =; h_i = j_H \frac{k}{d_i} \left(\frac{c_p \mu_b}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

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

Για 109.5°C και ~~42°~~ **33.5°API**

Για νερό και 40.5°C

$$k = 0.128 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{Σχ. Π.1}$$

$$k = 0.663 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{“Perry”}$$

$$c_{p,\kappa} = 2282 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K} \quad \text{Σχ. Π.4}$$

$$c_p = 4185 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K} \quad \text{Σχ. Π.2}$$

$$\left(\frac{c_p \mu_b}{k} \right)^{1/3} = \left(\frac{2282 \times 7.0 \times 10^{-4}}{0.128} \right)^{1/3}$$

$$\left(\frac{c_p \mu_b}{k} \right)^{1/3} = \left(\frac{4185 \times 7.1 \times 10^{-4}}{0.633} \right)^{1/3}$$

$$= 2.32$$

$$= 1.67$$

$$\left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} =; \Rightarrow \mu_w =; \Rightarrow T_w =;$$

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

Σαν πρώτη προσέγγιση θέτουμε

(Δεν χρειάζεται διόρθωση αφού το t_2

$$\left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \approx 1 \Rightarrow$$

$t_1=17^{\circ}\text{C}$ είναι μικρό)

$$\Delta T_{\theta} = 181^{\circ}\text{C} \rightarrow 38^{\circ}\text{C}$$

$$h_0^{(0)} = 69 \frac{0.128}{0.02513} 2.32 \times 1 = 815 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_i = 109 \frac{0.633}{0.0193} 1.67 \times 1 = 5970 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ιξώδες 1 mPa.s σε 82°C και 2 mPa.s σε 36°C

$$\Delta T_{\psi} = 32^{\circ}\text{C} \rightarrow 49^{\circ}\text{C}$$

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

Έλαιο με μέση θερμοκρασία $109.5^{\circ}\text{C} = 229^{\circ}\text{F}$ και ειδικό βάρος $33,5^{\circ}\text{API}$

APPENDIX OF CALCULATION DATA

803

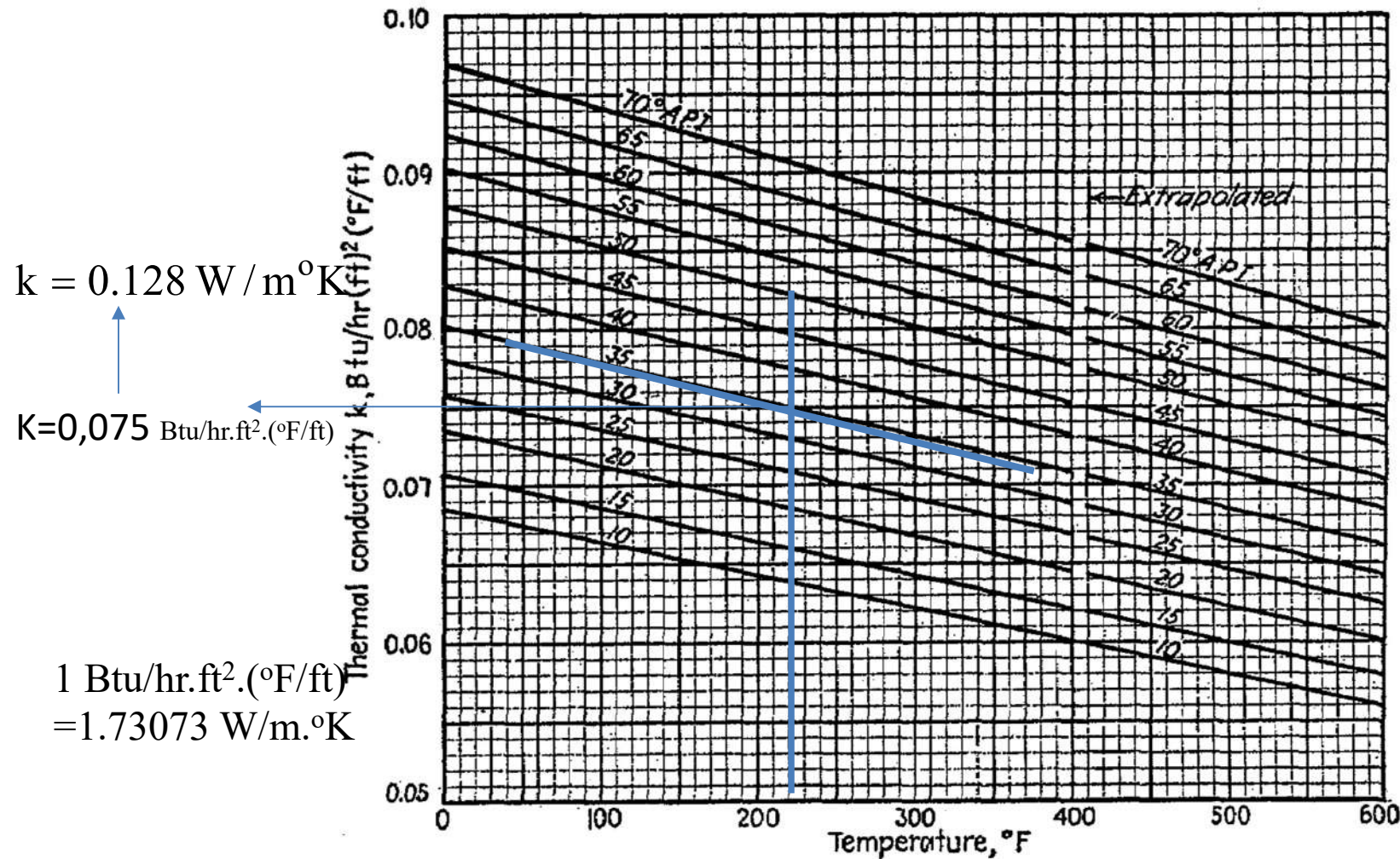


FIG. 1. Thermal conductivities of hydrocarbon liquids. (Adapted from Natl. Bur. Standards)

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

$$\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \approx 1 \quad \text{????}$$

Εκτιμούμε τη θερμοκρασία τοίχου που αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία ρεύματος

$T_{b,m} = 109.5^\circ\text{C}$ από τον τύπο

$$T_{w,m} = T_{b,m} - \frac{(T_{b,m} - t_{b,m})}{\left(1 + \frac{d_o h_0^{(0)}}{d_i h_i}\right)} = 109.5 - \frac{(109.5 - 40.5)}{\left(1 + \frac{25.4 \times 815}{19.3 \times 5970}\right)} = 51^\circ\text{C}$$

Γι αυτή τη θερμοκρασία παίρνουμε [δες και βήμα (5)] $\mu_w = 1.6 \text{ cp} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

$$\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} = \left(\frac{0.7}{1.6}\right)^{0.14} = 0.89$$

$$h_0 = h_0^{(0)} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} = 815 \times 0.89 = 726 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$$

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

Υπολογισμός ολικού συντελεστή θερμότητας

$$U_0 =; \quad k_{\sigma} = k_{\chi\alpha\lambda\upsilon\beta\alpha} = 50 \text{ W / m } ^{\circ}\text{K}$$

$$U_0 \stackrel{(40)}{=} \frac{2}{25.4 \times 10^{-3}} \left(\frac{2}{19.3 \times 10^{-3} \times 5970} + \frac{\ln \frac{25.4}{19.3}}{50} + \frac{2}{25.4 \times 10^{-3} \times 726} \right)^{-1}$$
$$= 78.74 (17.36 \times 10^{-3} + 5.49 \times 10^{-3} + 108.5 \times 10^{-3})^{-1} = 599.5 \text{ W / m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{K}$$

$$U_{\sigma\chi} =; \quad U_{\sigma\chi} = \frac{U_0}{(1 + R_f U_0)} = \left[1 + (7 \times 10^{-4} \times 599.5) \right] = 422 \text{ W / m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{K}$$

(10) Απαιτούμενη εξωτερική επιφάνεια $A_{0,\alpha\pi}$ =;

$$A_{0,\alpha\pi} = \frac{Q}{U_{\sigma\chi} (\Delta T)_{\psi}} = \frac{2.040 \times 10^6}{(422 \times 37.78)} = 128.0 \text{ m}^2$$

Εφόσον $A_{0,\alpha\pi} = 128.0 \text{ m}^2 < 132.5 \text{ m}^2 = A_0$ ο εναλλάκτης που διαθέτουμε είναι επαρκής για τη θερμική εναλλαγή που σχεδιάζουμε. Παραμένει βέβαια να δούμε αν οι πτώσεις πίεσης είναι στα επιτρεπτά όρια.

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

Υπολογισμός Πτώσεων Πίεσης

Πλευρά Κελύφους (Ελαίο)	Πλευρά Αυλών (Νερό)
(1) Για $Re_{\kappa} = 14.2 \times 10^3$ έχουμε	(1) Για $Re_{\sigma} = 33.7 \times 10^3$ και
$f_{\kappa} = 0.44$ Σχ. 42	$\frac{e}{d_i} = 0.00006$ (εφελκυσμένος σωλήνας) έχουμε $f = 0.023$
(2) Αριθμός περασμάτων ανάμεσα στους αυλούς	(2) Αριθμός διαδρομών $N_{\delta} = 6$
$= 2 \times (N_{\chi} + 1) = 2 \times 21 = 42$	(3) Σε 40.5°C για νερό, $s = 0.99 \Rightarrow \rho_{\sigma} \cong 990 \text{ kg/m}^3$
(3) Σε 109.5°C για 33.5°API , $s = 0.82$ $\Rightarrow \rho_{\kappa} \cong 820 \text{ kg/m}^3$	(4) $(\Delta p)_{\sigma} = 6 \times 0.023 \times \frac{3.658}{19.3 \times 10^{-3}} \frac{990}{2}$
(4) Από την Εξ. (83) (με διπλάσιο $N_{\chi} + 1$) παίρνουμε	$\times \left(\frac{1239}{990}\right)^2 \times 1$
$(\Delta p)_{\kappa} = 42 \times 0.44 \times \frac{889 \times 10^{-3}}{25.13 \times 10^{-3}}$	$= 20.3 \times 10^3 \text{ Pa} = 20.3 \text{ kPa}$
$\times \frac{820}{2} \left(\frac{395.3}{820}\right)^2 0.89^{-1}$	$(\Delta p)_{\sigma\tau} = 2 \times 6 \times 990 \times \left(\frac{1239}{990}\right)^2$
$= 70.0 \times 10^3 \text{ Pa} = 70.0 \text{ kPa}$	$= 18.6 \times 10^3 \text{ Pa} = 18.6 \text{ kPa}$
$(\Delta p)_{\kappa} = (N_{\chi} + 1) f_{\kappa} \frac{D_{\kappa}}{D_e} \frac{\rho_{\kappa}}{2} \left(\frac{G_{\kappa}}{\rho_{\kappa}}\right)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_{\kappa}^{-0.14}$	$(\Delta p)_{\sigma\tau} = 2 N_{\delta} \rho_{\sigma} \left(\frac{G_{\sigma}}{\rho_{\sigma}}\right)^2$
	$(\Delta p)_{\sigma, \text{ολ}} = 20.3 + 18.6 = 38.9 \text{ kPa}$

Ο εναλλάκτης 2-6 είναι κατάλληλος για την εφαρμογή που θεωρούμε.

Υπολογισμός εναλλάκτη 2-6

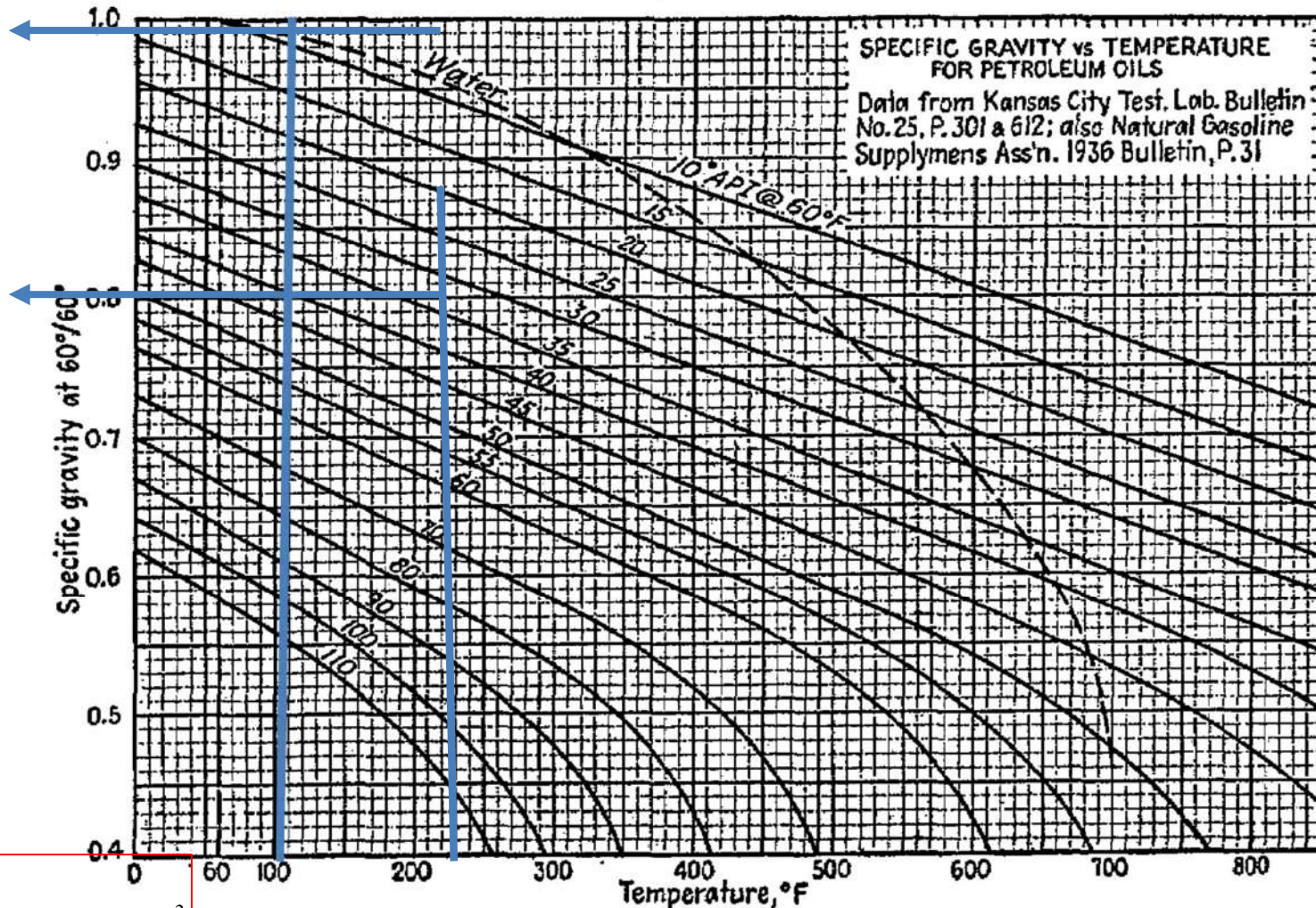
Έλαιο, ειδικού βάρους 33,5°API

$$T_{\theta,m} = \frac{1}{2} (T_{\theta,\epsilon\iota\sigma} + T_{\theta,\epsilon\xi}) = \frac{1}{2} (181 + 38) = 109.5^{\circ}\text{C} \cong 229^{\circ}\text{F}$$

Νερό, 40.5°C = 105 °F

APPENDIX OF CALCULATION DATA

809



$\Sigma\chi_{H.5}$
↓
 $s = 0.82 \Rightarrow \rho_{\kappa} \cong 820\text{kg/m}^3$

FIG. 6. Specific gravities of hydrocarbons.

$s = 0.99 \Rightarrow \rho_{\sigma} \cong 990\text{ kg/m}^3$ ⁴⁵