

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 ακάθαρτο πετρέλαιο έρχεται από τη δεξαμενή αποθηκείσεως 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 1/4 in, μήκος αυλού 16 ft, βήμα χωρισμάτων 5 in.

Είναι ο εναλλάκτης αυτός κατάλληλος για χρήση στην προκειμένη περίπτωση;

Λύση

Αρχίζουμε κάνοντας ένα πίνακα με τα δεδομένα μας.

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

Εναλλάκτης: Τύπος 1-4

$$D_k = 21 \frac{1}{4} \text{ in} = 0.5398 \text{ m} \quad , \quad N_\sigma = 158 \quad , \quad N_\delta = 4$$

$$d_0 = 1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m} \quad , \quad d_i = \overset{\text{Πιν. 3.3}}{\downarrow} = 0.810 \text{ in} = 0.02057 \text{ m}$$

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

* API=βαθμός API (American Petroleum Institute). Ισχύει $\rho_{60^\circ \text{F}} = \rho_{\text{νερο}, 60^\circ \text{F}} \frac{141.5}{131.5 + ^\circ \text{API}}$

$$B_{\sigma} = 1 \frac{1}{4} \text{ in} = 0.03175 \text{ m}$$

$$B_{\chi} = 5 \text{ in} = 0.127 \text{ m}$$

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

$$A_{\kappa} = \frac{(36) \downarrow 0.5398(0.03175 - 0.0254)0.127}{0.03175} = 13.71 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$N_{\chi} + 1 = \frac{(84) \downarrow 4.877}{0.127} = 38.4 \rightarrow N_{\chi} + 1 = 39$$

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

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

Χωρίσματα με κόψιμο 25%

Ισοζύγιο Ενέργειας:

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

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

Αλλά, $c_{p,\theta} =$; $c_{p,\psi} =$;

Για $T_{\theta,m} = \frac{1}{2}(T_{\theta,\epsilon\iota\sigma} + T_{\theta,\epsilon\xi}) = \frac{1}{2}(200 + 93) = 146.5^{\circ} \text{ C}$ παίρνουμε από το διάγραμμα

τιμών c_p υδρογονανθράκων (βλ. κατωτέρω) την τιμή:

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

Μη γνωρίζοντας την $T_{\psi,εξ}$ θέτουμε $T_{\psi,m}^{(0)} = T_{\psi,εισ} = 37^{\circ}\text{C}$ οπότε από το διάγραμμα παίρνουμε:

$$c_{p,\psi}^{(0)} = 0.475 \text{ Btu} / \ell \text{ b}_m^{\circ}\text{F} = 1989 \text{ J} / \text{kg}^{\circ}\text{K}$$

Ετσι,

$$T_{\psi,εξ}^{(0)} = 37 + \frac{5.514 \times 2554}{19.06 \times 1989} (200 - 93) = 76.75^{\circ}\text{C}$$

Τώρα,

$$T_{\psi,m} = \frac{1}{2} (T_{\psi,εισ} + T_{\psi,εξ}^{(0)}) = \frac{1}{2} (37 + 76.75) = 56.9^{\circ}\text{C}$$

$$\rightarrow c_{p,\psi} = 0.490 \text{ Btu} / \ell \text{ b}_m^{\circ}\text{F} = 2052 \text{ J} / \text{kg}^{\circ}\text{K}$$

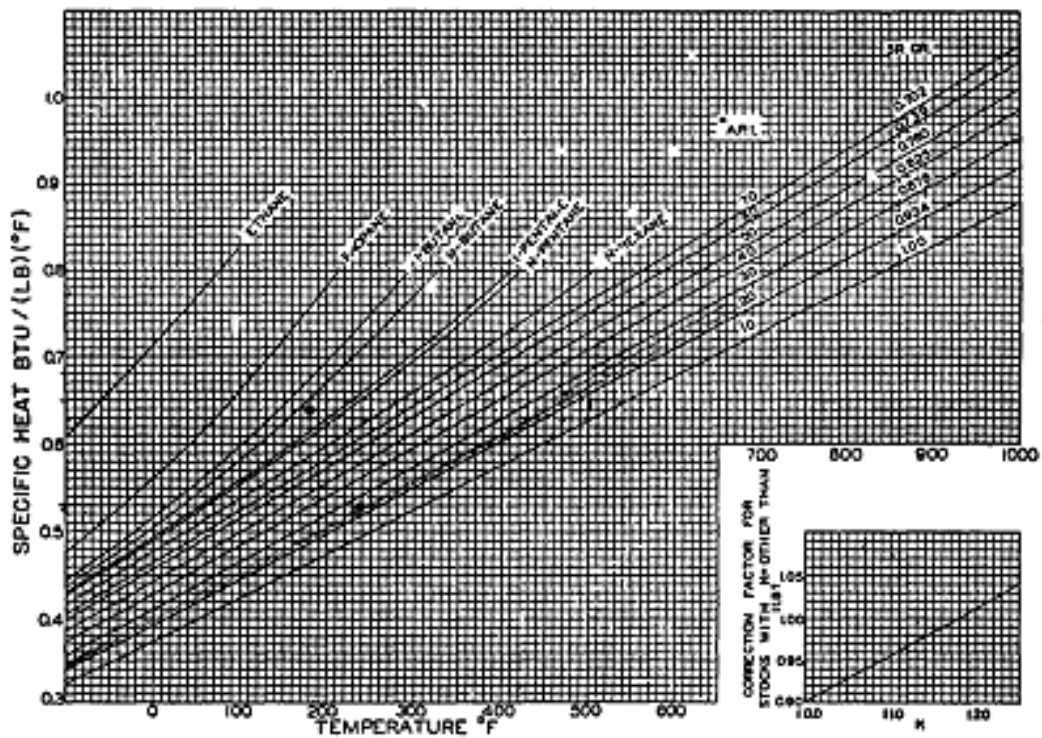


Fig. 4. Specific heats of hydrocarbon liquids. [Holcomb and Brown, Ind. Eng. Chem., 34, 505 (1942).]
† K = characterization factor.

Σχήμα 4.43 Ειδικές θερμότητες υδρογονανθράκων. $K = T_B^{1/3} / s$, όπου T_B = μέσο σημείο βρασμού, $^{\circ}\text{R}$, και s = ειδική βαρύτητα σε $60^{\circ}\text{F} / 60^{\circ}\text{F}$. (Πηγή Kern).

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

Εχουμε τώρα και τις τέσσερις θερμοκρασίες στα στόμια του εναλλάκτη. Πρέπει τώρα ν' αποφασίσουμε πιο υγρό θα διοχετευθεί μέσω του κελύφους και πιο μέσω των σωλήνων.

Ας δοκιμάσουμε την εκλογή: ακάθαρμο πετρέλαιο μέσω κελύφους, κεροζίνη μέσω σωλήνων.

Δοκιμαστικός Υπολογισμός Πτώσεων Πίεσεως

Πλευρά Κελύφους	Πλευρά Σωλήνων
<p>Για μέση θερμοκρασία 57°C και ειδικό βάρος 34°API παίρνουμε από πίνακες με $\mu_{\psi,b}=3.6 \text{ cp} = 3.6 \text{ mPa.s}$</p> $G_{\kappa} = \frac{\overset{(35)}{\downarrow} \dot{m}_{\kappa}}{A_{\kappa}} = \frac{19.06}{13.71 \times 10^{-3}} = 1390 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $Re_{\kappa} = \frac{\overset{(39)}{\downarrow} D_e D_{\kappa}}{\mu_{\psi,b}} = \frac{25.13 \times 10^{-3} \times 1390}{3.6 \times 10^{-3}} = 9703$ <p>Από πίνακες, για 57°C, 34°API $\rho_{\psi} = 830 \text{ kg/m}^3 = \rho_{\kappa}$</p> <p>Θα υποθέσουμε $\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_{\kappa}^{0.14} = 1$</p> <p>$Re_{\kappa} = 9703 \xrightarrow{\text{Σχ. 42}} f_{\kappa} = 0.31$</p> <p>Εξισ. (83) \rightarrow</p> $(\Delta p)_{\kappa} = 39 \times 0.31 \times \frac{0.5398}{25.13 \times 10^{-3}} \frac{830}{2} \times \left(\frac{1390}{830}\right)^2 \times 1 \text{ Pa}$ $= 300.5 \times 10^3 \text{ Pa} = 300.5 \text{ kPa}$ $= 3.06 \text{ atm} = 0.65 \text{ atm}$	<p>Για μέση θερμοκρασία 146.5°C και ειδικό βάρος 42°API παίρνουμε από πίνακες με $\mu_{\theta,b}=0.40 \text{ cp} = 0.40 \text{ mPa.s}$.</p> <p>Ο υπολογισμός του $(\Delta p)_{\sigma}$ δεν χρειάζεται, αφού</p> $(\Delta p)_{\kappa} = 3.06 \text{ atm} \gg 0.65 \text{ atm}$

Βλέπουμε, δηλαδή, ότι αν προσπαθήσουμε να διοχετεύσουμε το ακάθαρμο πετρέλαιο μέσω του κελύφους παίρνουμε απαγορευτικά μεγάλη πτώση πίεσεως. Εξάλλου, η

εκλογή αυτή θα απαιτούσε πιο συχνό και δύσκολο καθαρισμό του εξωτερικού των αυλών.

Εκλογή: κεροζίνη μέσω κελύφους, ακάθατο πετρέλαιο μέσω σωλήνων.

Υπολογισμός Πτώσεων Πίεσης

Πλευρά Κελύφους	Πλευρά Σωλήνων
<p>Για μέση θερμοκρασία 146.5°C και ειδικό βάρος 42°API παίρνουμε από πίνακες</p> $\mu_b = 0.40 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $\rho_\kappa = 730 \text{ kg/m}^3$ $G_\kappa = \frac{\dot{m}_\kappa}{A_\kappa} = \frac{5.514}{13.71 \times 10^{-3}} = 402.2 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $Re_\kappa = \frac{D_e G_\kappa}{\mu_b} = \frac{25.13 \times 10^{-3} \times 402.2}{0.40 \times 10^{-3}}$ $= 25720$ $\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_\kappa^{0.14} \cong 1$ $Re_\kappa = 25720 \xrightarrow{\text{Σχ. 4.2}} f_\kappa = 0.26$ $\downarrow^{(39)}$ $(\Delta p)_\kappa = 39 \times 0.26 \times \frac{0.5398}{25.13 \times 10^{-3}} \frac{730}{2}$ $\times \left(\frac{402.2}{730}\right)^2 \times 1 \text{ Pa}$ $\Rightarrow (\Delta p)_\kappa = 24.13 \text{ kPa} = 0.246 \text{ atm}$ $(\Delta p)_\kappa = 0.246 \text{ atm} < 0.65 \text{ atm}$	<p>Για μέση θερμοκρασία 57°C και ειδικό βάρος 34°API παίρνουμε από πίνακες</p> $\mu_b = 3.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $\rho_\sigma = 830 \text{ kg/m}^3$ $\downarrow^{(87)}$ $G_\sigma = \frac{\dot{m}_\sigma}{A_\sigma} = \frac{19.06}{13.13 \times 10^{-3}} = 1452 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $Re_\sigma = \frac{d_i G_\sigma}{\mu_b} = \frac{0.02057 \times 1452}{3.6 \times 10^{-3}} = 8297$ $\frac{e}{d_i} = 0.00006 \text{ (εφελκυσμένος σωλήνας)}$ $f(8297, 6 \times 10^{-5}) = 0.031$ $\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_\sigma^{0.14} \cong 1$ $\downarrow^{(84)}$ $(\Delta p)_\sigma = 4 \times 0.031 \times \frac{4.877}{0.02057} \frac{830}{2}$ $\times \left(\frac{1452}{830}\right)^2 \times 1 \text{ Pa}$ $= 37.34 \times 10^3 \text{ Pa} = 37.34 \text{ kPa} = 0.38 \text{ latm}$ $\downarrow^{(85)}$ $(\Delta p)_{\sigma\tau} = 2 \times 4 \times 830 \times \left(\frac{1452}{830}\right)^2$ $= 20.32 \times 10^3 \text{ Pa} = 20.32 \text{ kPa} = 0.207 \text{ atm}$ $(\Delta p)_{\sigma,\text{ολ}} = (\Delta p)_\sigma + (\Delta p)_{\sigma\tau}$ $= 0.381 + 0.207 = 0.588 \text{ atm}$

$$(\Delta p)_{\sigma, \text{ολ}} = 0.588 \text{ atm} < 0.65 \text{ atm}$$

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

Υπολογισμός Εναλλάκτη

Εχουμε:

$$T_1 = 200^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 93^\circ\text{C}$$

$$t_1 = 37^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 75.5^\circ\text{C}$$

$$(1) \quad (\Delta T)_{\ell m} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} = \frac{(200 - 75.5) - (93 - 37)}{\ln \frac{(200 - 75.5)}{(93 - 37)}} = 85.76$$

$$(2) \quad \left. \begin{aligned} R &= \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{200 - 93}{75.5 - 37} = 2.78 \\ S &= \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{75.5 - 37}{200 - 37} = 0.236 \end{aligned} \right\} \xrightarrow{\text{Εξ. (82)}} F_T = 0.895$$

$$(3) \quad (\Delta T)_\phi = (\Delta T)_{\ell m} F_T = 85.76 \times 0.895 = 76.8^\circ\text{C}$$

Πλευρά Κελύφους	Πλευρά Σωλήνων
(4) Επιφάνεια Ροής A_κ $A_\kappa = \overset{(36)}{13.71} \times 10^{-3} \text{ m}^2$	(4) Επιφάνεια Ροής A_σ $A_\sigma = \overset{(87)}{13.13} \times 10^{-3} \text{ m}^2$
(5) Μαζική ταχύτητα G_κ $G_\kappa = \frac{\dot{m}_\kappa}{A_\kappa} = 402.2 \text{ kg/m}^2\text{s}$	(5) Μαζική ταχύτητα G_σ $G_\sigma = \frac{\dot{m}_\sigma}{A_\sigma} = 1452 \text{ kg/m}^2\text{s}$
(6) Αριθμός Reynolds $Re_\kappa = 25270$	(6) Αριθμός Reynolds $Re_\sigma = 8297$
(7) $j_H =$; $j_H = 95 \quad (\text{Εξισ. (37)})$	(7) $j_H =$; $j_H = 31 \quad (\text{Σχ. 3.14})$

(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:

$$k = 0.132 \text{ W/m}^0\text{K}$$

$$c_{p,\kappa} = 2554 \text{ J/kg}^0\text{K}$$

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

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

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

$$\text{Υποθέτοντας} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_\sigma^{0.14} = 1:$$

$$\begin{aligned} h_0 &= 95 \times \frac{0.132}{25.13 \times 10^{-3}} \times 1.98 \times 1 \\ &= 988 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K} \end{aligned}$$

(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:

$$k = 0.133 \text{ W/m}^0\text{K}$$

$$c_{p,\sigma} = 2052 \text{ J/kg}^0\text{K}$$

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

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

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

$$\text{Υποθέτοντας} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)_\sigma^{0.14} = 1:$$

$$\begin{aligned} h_i &= 31 \times \frac{0.133}{20.57 \times 10^{-3}} \times 3.81 \\ &= 764 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K} \end{aligned}$$

(9) $U_0 =$;

$$k_\sigma = k_{\chi\alpha\lambda\upsilon\beta\alpha} = 50 \text{ W/m}^0\text{K} \quad (\text{πίνακες})$$

$$U_0^{(40)} = \frac{2}{25.4 \times 10^{-3}} \left(\frac{2}{20.57 \times 10^{-3} \times 764} + \frac{\ell_n \frac{25.4}{20.57}}{50} + \frac{2}{25.4 \times 10^{-3} \times 988} \right)^{-1}$$

$$= 78.74(0.1273 + 0.0042 + 0.0797)^{-1} = 373 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K}$$

$$U_0 = 373 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K}$$

(10) Πραγματικό $R_p =$;

$$\text{Εξ. (42)} \Rightarrow U_{\sigma\chi} = \frac{Q}{A_0(\Delta T_\phi)}$$

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

$$\Rightarrow U_{\sigma\chi} = \frac{1.507 \times 10^6}{(61.49 \times 76.8)} = 319 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Ο διαθέσιμος συντελεστής ρυπάνσεως είναι

$$R_\rho = \frac{1}{U_{\sigma\chi}} - \frac{1}{U_0} = \frac{1}{319} - \frac{1}{373} = 4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{K/W}$$

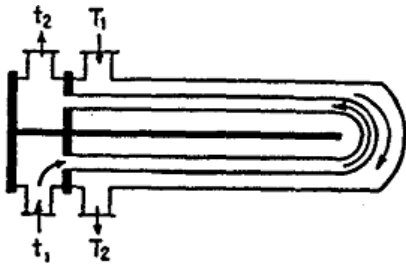
Βλέπουμε ότι ο διαθέσιμος συντελεστής ρυπάνσεως είναι μικρότερος του απαιτούμενου, δηλ. $5.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{K/W}$, για να εξασφαλίσουμε καθαρισμό σε λογικά χρονικά διαστήματα. Ο εναλλάκτης αυτός είναι περιθωριακά κατάλληλος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με *πολύ*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

Η αγορά ενός πιο κατάλληλου εναλλάκτη πρέπει να θεωρηθεί σοβαρά.

4.5-5 Εναλλάκτες Κελύφους-Αυλών με Υψηλή Απόδοση

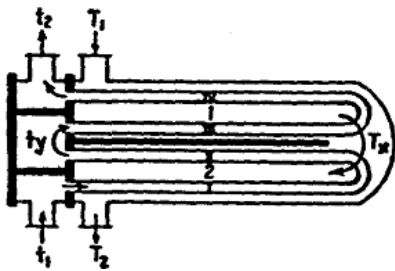
Εναλλάκτες τύπου 1-2, 1-4 κλπ λειτουργούν κατά το ήμισυ με «ομορορή» και γι αυτό δίνουν σχετικά μικρή ανάκτηση θερμότητας. Ο όρος ομορορή τίθεται σε εισαγωγικά γιατί η ροή στο κέλυφος γίνεται εγκάρσια προς τους αυλούς και όχι παράλληλα. Όταν η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρεύματος t_2 είναι μεγαλύτερη 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 1-2k 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 «αντιρορή».

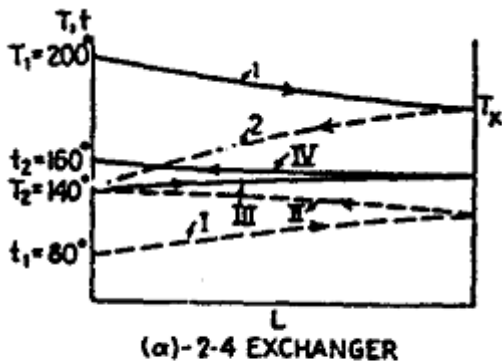


Σχήμα 4.45 Εναλλάκτης τύπου 2-2, με καθαρή «αντιρροή»

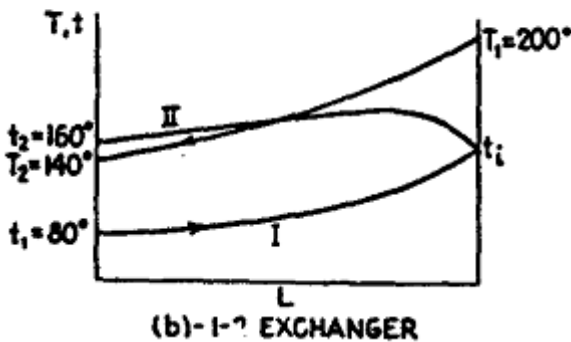
Ενας διαδεδομένος τύπος εναλλάκτης υψηλής αποδόσεως είναι ο 2-4, Σχήμα 4.46. Μολονότι η ροή στον εναλλάκτη 2-4 είναι μισή κατ' αντιρροή και μισή κατ' ομορροή, ο εναλλάκτης αυτός δίνει αυξημένη ανάκτηση θερμότητας, ακόμα και όταν έχουμε μεγάλη διασταύρωση θερμοκρασιών, λόγω της πιο ευνοϊκής κατανομής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



Σχήμα 4.46 Διαρρύθμιση ροών σε εναλλάκτη 2-4. Η ροή αλλάζει από «αντιρροή» σε «ομορροή» σε «ομορροή» σε «αντιρροή».

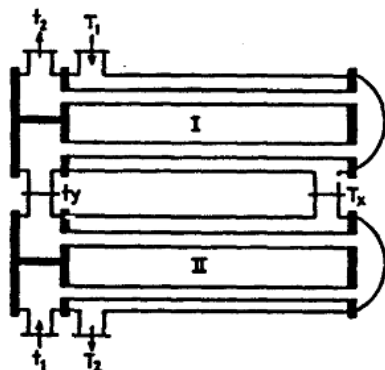


Σχήμα 4.47 Κατανομή θερμοκρασιών σε εναλλάκτες τύπων 2-4 και 1-2 για μία περίπτωση με μεγάλη διασταύρωση θερμοκρασιών, δηλαδή $t_2 - T_2 = 160^\circ\text{F} - 140^\circ\text{F} = 20^\circ\text{F}$. Η διαφορά θερμοκρασίας στον 2-4 είναι σαφώς ευνοϊκότερη.



Ο Συντελεστής Διαφοράς Θερμοκρασίας F_T για Εναλλάκτες 2-4

Αν υποθέσουμε ότι το επίμηκες χώρισμα του κελύφους είναι στεγανό και αδιαβατικό, τότε ο εναλλάκτης 2-4 μπορεί να θεωρηθεί ως δύο εναλλάκτες τύπου 1-2 συνδεδεμένος όπως στο Σχήμα 4.48. Η υπόθεση ότι το επίμηκες χώρισμα είναι αδιαβατικό δεν είναι εντελώς αληθινή και μπορεί να οδηγήσει σε λάθη της τάξεως του 10% ή 15% αν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο τμημάτων του κελύφους είναι μεγάλη.



Σχήμα 4.48 Δύο εν σειρά εναλλάκτες 1-2 προσεγγίζουν τη λειτουργία ενός εναλλάκτη 2-4.

Θα καλέσουμε T_x τη θερμοκρασία του ρευστού του κελύφους στο σημείο που αλλάζει διεύθυνση μετά το πρώτο πέρασμα του κελύφους και t_y τη θερμοκρασία του ρευστού των αυλών αμέσως μετά το δεύτερο πέρασμα. Θεωρώντας τον 2-4 ως δύο εναλλάκτες 1-2, τους οποίους συμβολίζουμε με I και II (Σχήμα 47), και κάνοντας τα ισοζύγια ενέργειας για τους δύο εναλλάκτες παίρνουμε

$$I. \quad \dot{m}_\kappa c_{p,\kappa} (T_1 - T_x) = \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma} (t_2 - t_y) \quad (89)$$

$$II. \quad \dot{m}_\kappa c_{p,\kappa} (T_x - T_2) = \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma} (t_y - t_1) \quad (90)$$

Το θερμικό φορτίο των δύο εναλλακτών 1-2 δεν είναι το ίδιο, εν γένει. Εφαρμόζοντας την Εξισ. (78) στον κάθε εναλλάκτη χωριστά λαμβάνουμε

$$\frac{U_0^I A_0^I}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}^I} = \frac{1}{\sqrt{R_I^2 + 1}} \ell_n \frac{2 - S_I (R_I + 1 - \sqrt{R_I^2 + 1})}{2 - S_I (R_I + 1 + \sqrt{R_I^2 + 1})} \quad (91)$$

$$\frac{U_0^{II} A_0^{II}}{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}^{II}} = \frac{1}{\sqrt{R_{II}^2 + 1}} \ell_n \frac{2 - S_{II} (R_{II} + 1 - \sqrt{R_{II}^2 + 1})}{2 - S_{II} (R_{II} + 1 + \sqrt{R_{II}^2 + 1})} \quad (92)$$

$$\text{Οπου } R_I = \frac{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}^I}{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}^I} \quad R_{II} = \frac{\dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}^{II}}{\dot{m}_\kappa c_{p,\kappa}^{II}} \quad (93)$$

$$S_I = \frac{t_2 - t_y}{T_1 - t_y} \quad S_{II} = \frac{t_y - t_1}{T_x - t_1} \quad (94)$$

Θέτοντας

$$U_0^I = U_0^{II} = U_0 \quad , \quad c_{p,\sigma}^I = c_{p,\sigma}^{II} \quad , \quad c_{p,\kappa}^I = c_{p,\kappa}^{II} \quad (95)$$

$$A_0^I = A_0^{II} = \frac{1}{2} A_0 \quad (96)$$

απαλείφοντας τις ενδιάμεσες θερμοκρασίες T_x και t_y από τις Εξισ. (89)-(94) και χρησιμοποιώντας τους ορισμούς των R και S παίρνουμε

$$F_T = \frac{\left[\frac{\sqrt{R^2 + 1}}{2(R-1)} \right] \ln \frac{(1-S)}{(1-RS)}}{\ln \frac{\left(\frac{2}{S} \right) - 1 - R + \left(\frac{2}{S} \right) \sqrt{(1-S)(1-RS)} + \sqrt{R^2 + 1}}{\left(\frac{2}{S} \right) - 1 - R + \left(\frac{2}{S} \right) \sqrt{(1-S)(1-RS)} - \sqrt{R^2 + 1}}} \quad (97)$$

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

Η λεπτομερής απόδειξη αφήνεται στον σπουδαστή ως άσκηση. Η Εξισ. (97) δίνεται υπό μορφή διαγράμματος στο Σχήμα 4.49.

Ο εναλλάκτης F_T χρησιμοποιείται στην Εξισ. (42):

$$Q = U_{\sigma\chi} A_0 (\Delta T)_{lm} F_T \quad (42')$$

Η καλύτερη απόδοση του εναλλάκτη 2-4 σε σύγκριση με τον 1-2 φαίνεται στο Σχήμα 4.50. Για να είναι η σύγκριση βάσιμη, οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου είναι οι ίδιες και για τους δύο εναλλάκτες. Τα πλεονεκτήματα του τύπου 2-4 για μεγάλες διασταυρώσεις θερμοκρασίας είναι φανερά.

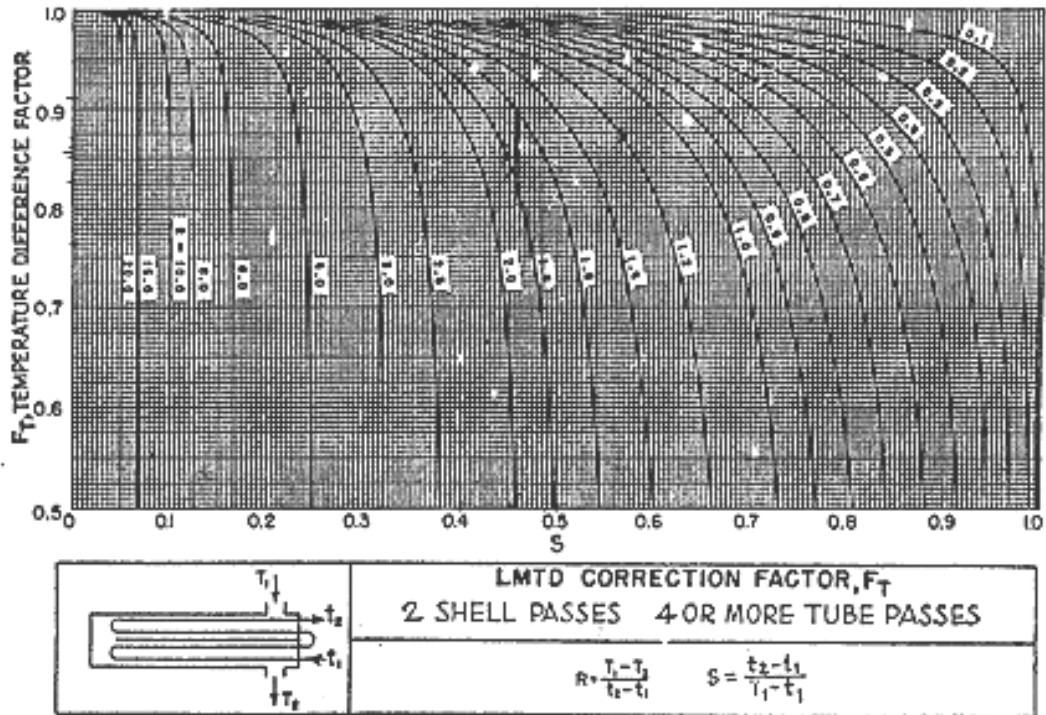
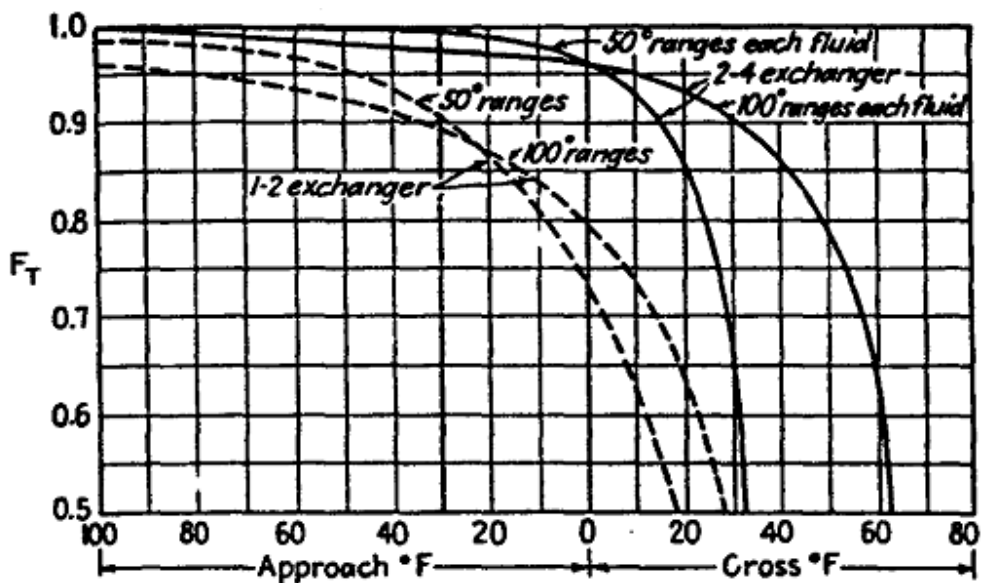


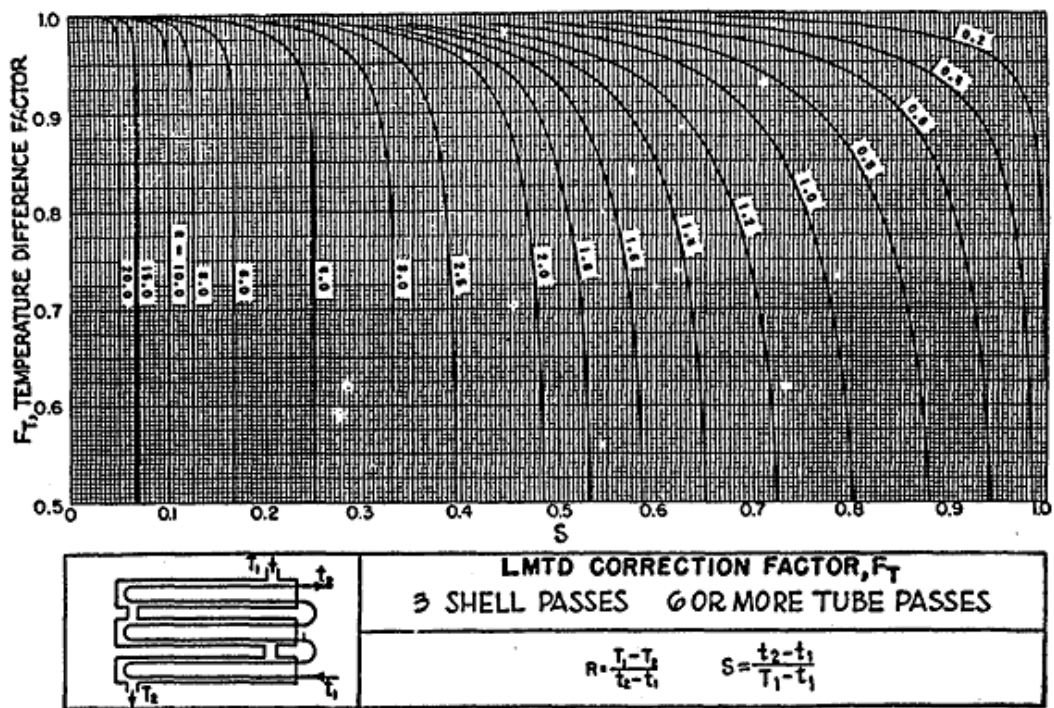
Fig. 10. LMTD correction factors for 2-4 exchangers. (Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association 2d ed., New York, 1945.)

Σχήμα 4.49 Συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας για εναλλάκτη 2-4. (Πηγή: Kern).

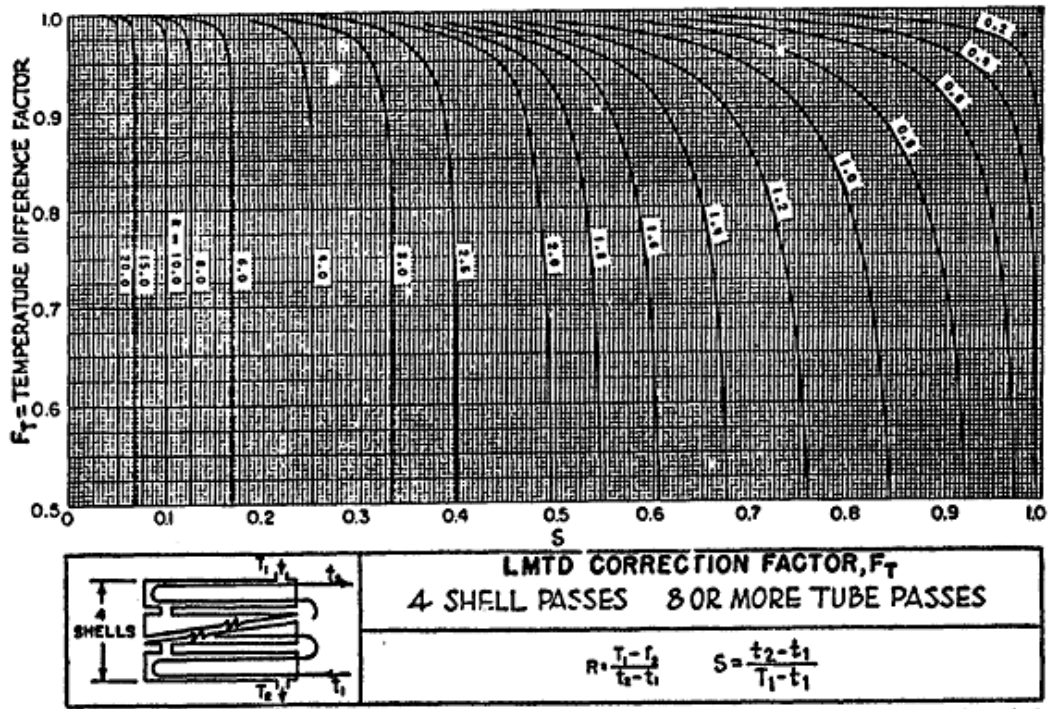


Σχήμα 4.50 Εξάρτηση του συντελεστή διαφοράς θερμοκρασίας F_T από την προσέγγιση θερμοκρασιών ($T_2 - t_2$), ή από τη διασταύρωση θερμοκρασιών ($t_2 - T_2$) για δύο ρευστά με ίσες αλλαγές θερμοκρασιών (50°F ή 180°F). Οι πρακτικές τιμές του F_T είναι $F_T > 0.85$. Ο τύπος 2-4 είναι σημαντικά πιο αποδοτικός από τον 1-2, ιδιαίτερα για μεγάλες διασταυρώσεις θερμοκρασίας. (Πηγή: Kern).

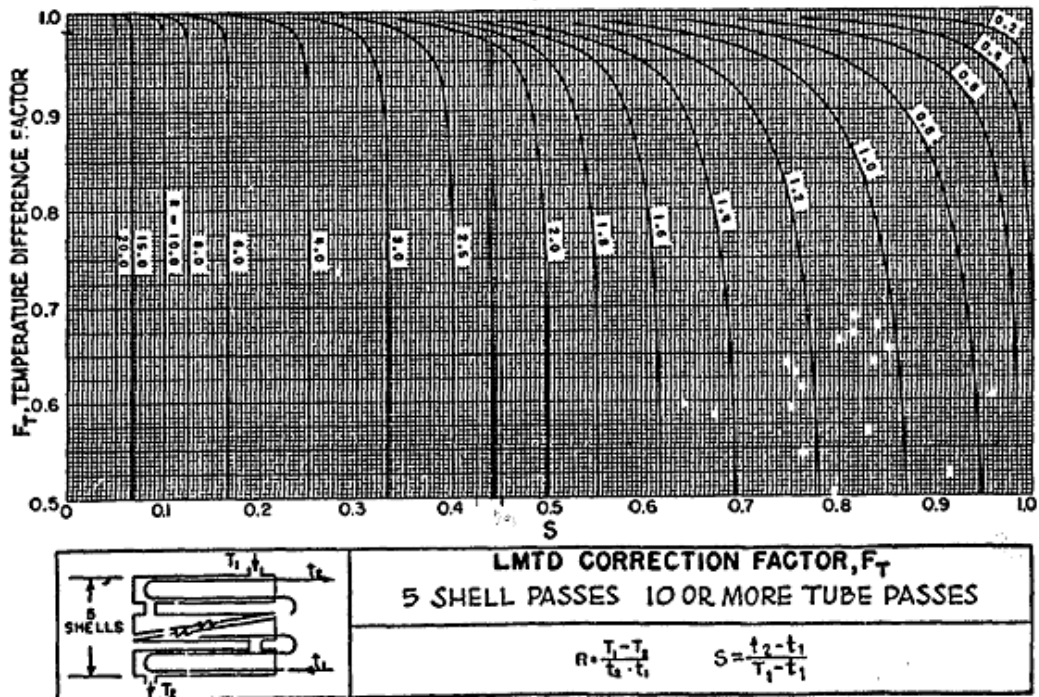
Εν γένει, όσο πιο πολλά περάσματα γίνονται μέσα στο κέλυφος ενός εναλλάκτη τόσο πιο μεγάλη είναι η διασταύρωση θερμοκρασιών για την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για μηχανικούς λόγους δεν είναι πρακτικό να κατασκευάζουμε κελύφη με περισσότερα από δύο περάσματα. Για μεγαλύτερες διασταυρώσεις θερμοκρασιών από αυτές που είναι δυνατές με εναλλάκτες 2-4 μπορούμε να επιτύχουμε συνδέοντας εν σειρά τρεις εναλλάκτες 1-2 (τύπος 3-6), ή δύο εναλλάκτες 2-4 (τύπος 4-8), κλπ. Ο συντελεστής F_T για εναλλάκτες 3-6, 4-8, 5-10 και 6-12 δίνονται στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.51, 4.52, 4.53 και 4.54, αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση, το διάγραμμα ισχύει και για περισσότερα περάσματα αυλών (π.χ. $3 \times (1-2) \cong 3-6$, $3 \times (1-4) \cong 3-12$, $3 \times (1-6) \cong 3-18$, ή $2 \times (2-4) \cong 4-8$, $2 \times (2-8) \cong 4-16$, κλπ).



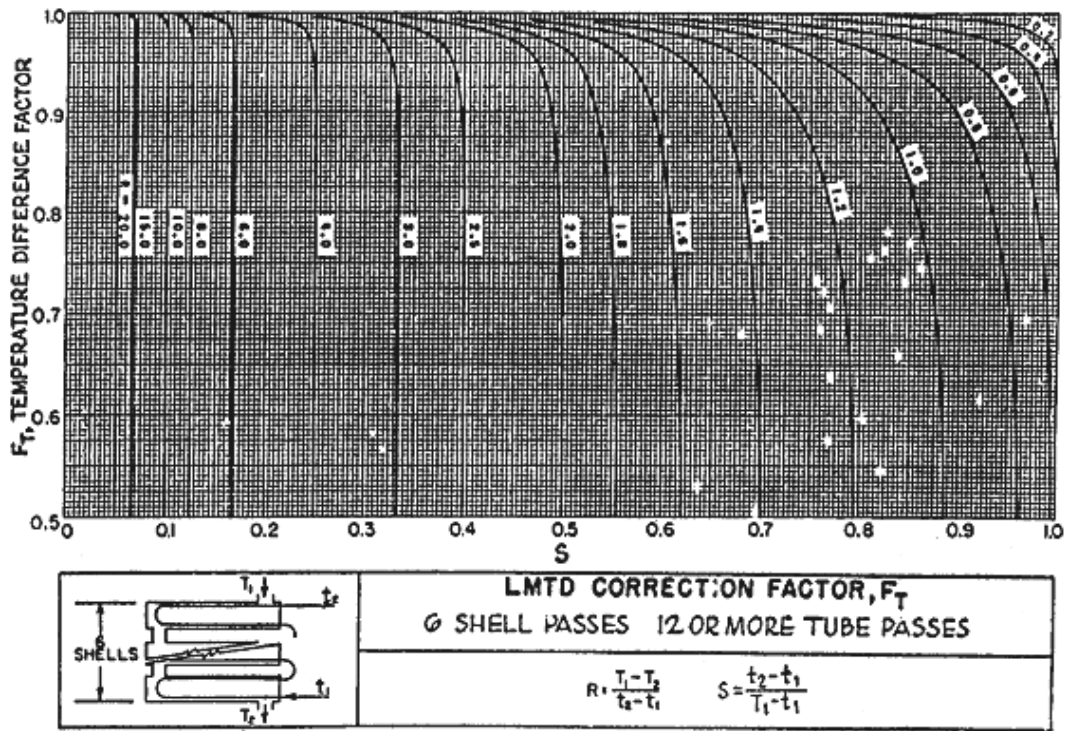
Σχήμα 4.51 Συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας για εναλλάκτες τύπου 3-6. Ισχύει και για περισσότερα περάσματα αυλών. (Πηγή: Kern).



Σχήμα 4.52 Συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας για εναλλάκτες τύπου 4-8. Ισχύει και για περισσότερα περάσματα αυλών. (Πηγή: Kern).



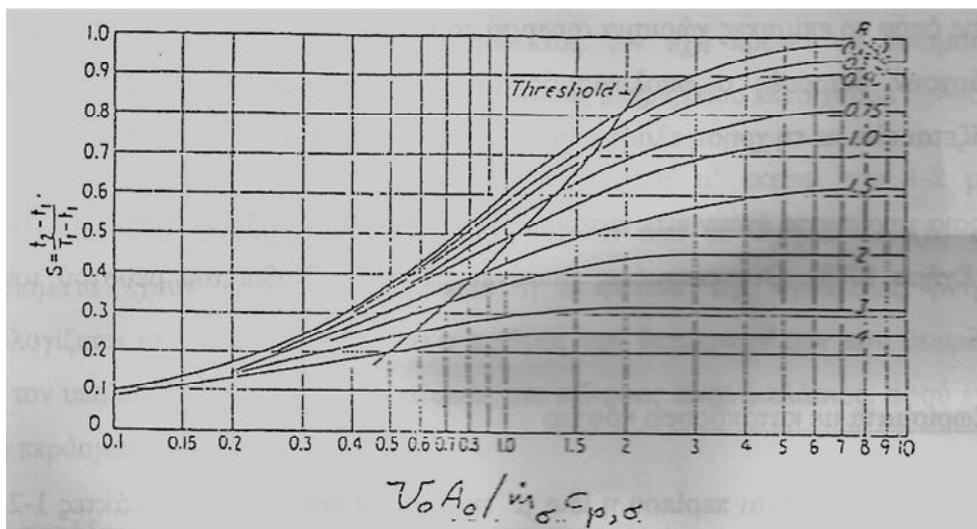
Σχήμα 4.53 Συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας για εναλλάκτες τύπου 5-10. Ισχύει και για περισσότερα περάσματα αυλών. (Πηγή: Kern).



Σχήμα 4.54 Συντελεστής διαφοράς θερμοκρασίας για εναλλάκτες τύπου 6-12. Ισχύει και για περισσότερα περάσματα αυλών. (Πηγή: Kern).

Διάγραμμα Ten Broeck για Εναλλάκτη 2-4

Το διάγραμμα Ten Broeck για εναλλάκτη 2-4 δίνεται στο Σχήμα 4.55. Το διάγραμμα αυτό μας επιτρέπει να υπολογίσουμε το t_2 για δεδομένο εναλλάκτη.

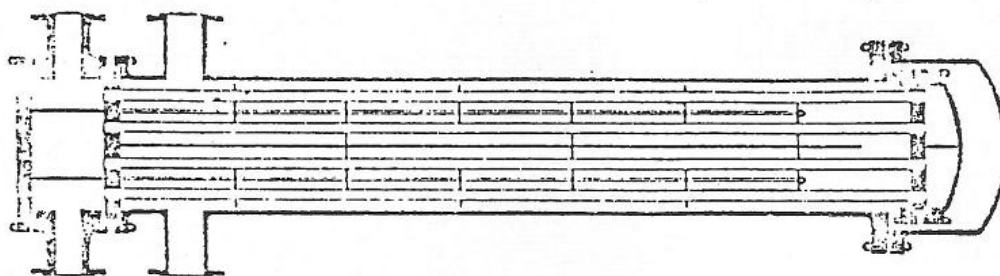


$$U_0 A_0 / \dot{m}_\sigma c_{p,\sigma}$$

Σχήμα 4.55 Διάγραμμα Ten Broeck για εναλλάκτες 2-4. (Πηγή: Kern).

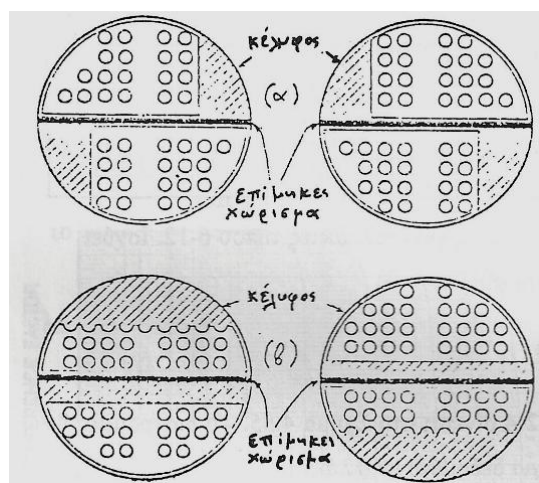
Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες για Εναλλάκτες 2-4

Ενας τυπικός εναλλάκτης 2-4 φαίνεται στο Σχήμα 4.56.



Σχήμα 4.56 Εναλλάκτης 2-4 με ολισθαίνουσα κεφαλή και μετακινήσιμο χώρισμα

Το επίμηκες χώρισμα είναι μετακινήσιμο χάρη στο ότι τα εγκάρσια χωρίσματα αποτελούνται από δύο τμήματα το καθένα, Σχήμα 4.57.



Σχήμα 4.57 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.

Οι ενώσεις όπου το επίμηκες χώρισμα συναντά το κέλυφος πρέπει να είναι στεγανές. Εάν υπάρχουν διαρροές ο υπολογισμός του F_T δεν ισχύει. Η στεγανότητα εξασφαλίζεται είτε με τη χρήση ελαστικών γεμισμάτων ή και με συγκόλληση.

Τα εγκάρσια χωρίσματα έχουν είτε κατακόρυφο κόψιμο, Σχήμα 57(α), είτε οριζόντιο κόψιμο, Σχήμα 57(β). Οι σκιασμένες επιφάνειες είναι οι δίοδοι του ρευστού του κελύφους.

(α) 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). Ετσι (δες και Εξισ. (36)]

$$A_{\kappa} = \frac{D_{\kappa} C B_{\chi}}{2B_{\sigma}} = \frac{D_{\kappa} (B_{\sigma} - d_0) B_{\chi}}{2B_{\sigma}} \quad , \quad G_{\kappa} = \frac{\dot{m}_{\kappa}}{A_{\kappa}} \quad (97)$$

(β) 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.

Αυτά τα χωρίσματα χρησιμοποιούνται σπάνια γιατί στις περισσότερες περιπτώσεις που χρειαζόμαστε εναλλάκτες 2-4 μας χρειάζεται και μεγάλη μαζική ταχύτητα. Οπως είδαμε, τα χωρίσματα με κατακόρυφο κόψιμο δίνουν μεγαλύτερη G_{κ} .

Υπολογισμός Εναλλάκτη 2-4

Ο εναλλάκτης 2-4 χρησιμοποιείται όταν η τιμή του F_T για εναλλάκτη 1-2 είναι μικρότερη από 0.75.

Τώρα, αν η τιμή του F_T για τον εναλλάκτη 2-4 είναι μεγαλύτερη από 0.90 για μετακινήσιμο επίμηκες χώρισμα, (ή από 0.85 για οξυγονοκολλημένο επίμηκες χώρισμα), ο εναλλάκτης 2-4 είναι αποδεκτός. Αν όχι, πρέπει να δοκιμάσουμε εναλλάκτες με περισσότερα περάσματα κελύφους μέχρις ότου επιτύχουμε $F_T > 0.90$.

Ο υπολογισμός του εναλλάκτη 2-4 είναι παρόμοιος μ' εκείνο του 1-2 με τις ακόλουθες τρεις διαφορές: (i) το F_T διαβάζεται από το Σχήμα 49, (ii) αν τα χωρίσματα έχουν κατακόρυφο κόψιμο η επιφάνεια της εγκαρσίας ροής A_{κ} υπολογίζεται με την Εξισ. (97), (iii) ο αριθμός των διαμερισμάτων που θεωρούνται για τον υπολογισμό της πτώσεως πίεσεως στο κέλυφος είναι διπλάσιος, αφού έχουμε δύο περάσματα.

Ενα παράδειγμα τέτοιου υπολογισμού δίνεται κατωτέρω.

Παράδειγμα 4ζ. Υπολογισμός Εναλλάκτη 2-6

Ένα 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 m²K/W.

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 χωρίσμα είναι οξυγονοκολλημένο στο κέλυφος.

- (α) Είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί εναλλάκτης τύπου υψηλής αποδόσεως, όπως ο 2-6;
- (β) Αν ναι, είναι κατάλληλος ο διαθέσιμος εναλλάκτης;

Λύση

Αρχίζουμε κάνοντας έναν πίνακα με τα δεδομένα μας.

$$\dot{m}_\theta = 22500 \text{ kg/hr} = 6.250 \text{ kg/s} \quad \dot{m}_\psi = ;$$

$$s_\theta = 33.5 \text{ }^\circ\text{API} = 0.858 \quad s_\psi = ;$$

$$T_{\theta,\text{εισ}} = 181^\circ\text{C} \quad T_{\psi,\text{εισ}} = 32^\circ\text{C}$$

$$T_{\theta,\text{εξ}} = 38^\circ\text{C} \quad T_{\psi,\text{εξ}} = 49^\circ\text{C}$$

$$(\Delta p)_\theta \leq 0.75 \text{ atm} \quad (\Delta p)_\psi \leq 0.75 \text{ atm}$$

$$R_p = 7 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{K/W}$$

Εναλλάκτης: Τύπος 2-6

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

$$d_0 = 1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m} , \quad d_i \stackrel{\text{Πιν.4.3}}{\downarrow} = 0.760 \text{ in} = 0.0193 \text{ m}$$

$$\ell_{\sigma} = 12 \text{ ft} = 3.658 \text{ m}$$

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

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

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

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

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

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

Ισοζύγιο Ενέργειας

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

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

$$\text{Αλλά } c_{p,\theta} = ; \quad c_{p,\psi} = ;$$

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

παίρνουμε από το Σχήμα Π.4:

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

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

$$\text{Για } T_{\psi,m} = \frac{1}{2} (T_{\psi,\epsilon\iota\sigma} + T_{\psi,\epsilon\xi}) = \frac{1}{2} (32 + 49) = 40.5^\circ\text{C}$$

έχουμε

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

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

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

Διαφορά Θερμοκρασίας

$$(1) \quad (\Delta T)_{\ell m} = \frac{(181 - 49) - (38 - 32)}{\frac{(181 - 49)}{(38 - 32)}} = 40.76^\circ\text{C}$$

$$(2) \quad R = \frac{181 - 38}{49 - 32} = 8.41 \quad S = \frac{49 - 32}{181 - 32} = 0.114$$

Αναφερόμενοι στο Σχ. 38 βλέπουμε ότι αυτές οι τιμές των R και S δεν τέμνονται για εναλλάκτες τύπων 1-2k, έτσι η επιλογή εναλλάκτη υψηλής αποδόσεως, όπως ο 2-6, είναι υποχρεωτική.

Για εναλλάκτη 2-6 από το Σχ. 49 για R=8.4 και S=0.114 παίρνουμε $F_T \cong 0.93$ [από την Εξισ. (96) λαμβάνουμε την πιο ακριβή τιμή $F_T = 0.927$]. Η υψηλή τιμή του F_T υποδηλώνει ότι ο τύπος 2-6 είναι αποδεκτός.

Η φαινομένη διαφορά θερμοκρασίας είναι

$$(3) \quad (\Delta T)_\phi = (\Delta T)_{\ell m} F_T = 40.76 \times 0.927 = 37.78^\circ\text{C}.$$

Επιλογή Πλευρών για τα δύο Ρεύματα

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

Πλευρά Κελύφους (Ελαιο 33.5°API)	Πλευρά Αυλών (Νερό)
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»*	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»*
(4)	(4)
$G_{\kappa} = \frac{\dot{m}_{\kappa}}{A_{\kappa}} = \frac{6.250}{15.81 \times 10^{-3}} = 395.3 \text{ kg/m}^2\text{s}$	$G_{\sigma} = \frac{\dot{m}_{\sigma}}{A_{\sigma}} = \frac{27.440}{22.14 \times 10^{-3}} = 1239 \text{ kg/m}^2\text{s}$
(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 $T=109.5^{\circ}\text{C}$	(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 $T=40.5^{\circ}\text{C}$
$\mu_b = 0.70 \text{ cp} = 7.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	$\mu_b = 0.71 \text{ cp} = 7.1 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
(6) $\text{Re}_{\kappa} = \frac{D_e G_{\kappa}}{\mu_b} = \frac{25.13 \times 10^{-3} \times 395.3}{7 \times 10^{-4}}$	(5) $\text{Re}_{\sigma} = \frac{d_i G_{\sigma}}{\mu_b} = \frac{19.3 \times 10^{-3} \times 1239}{7.1 \times 10^{-4}}$
$= 14.2 \times 10^3$	$= 33.7 \times 10^3$
(7) $j_H = 69$ Εξισ. (37)	(6) $j_H = 109$ Εξ. (11)
(8) $h_0 = ;$	(8) $h_i = ;$
$h_0 = j_H \frac{k}{D_e} \left(\frac{c_p \mu_b}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$	
Για 109.5°C και 42°	
$k = 0.128 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ Σχ. Π.1	

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

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

$$= 2.32$$

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

Σαν πρώτη προσέγγιση θέτουμε

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

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

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)]

$$\mu_w = 1.6 \text{ cp} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

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

$$\Rightarrow h_0 = h_0^{(0)} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} = 815 \times 0.89$$

$$= 726 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$$

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

Για νερό και 40.5°C

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

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

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

$$= 1.67$$

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

(Δεν χρειάζεται διόρθωση αφού το $t_2 - t_1 = 17^\circ\text{C}$ είναι μικρό)

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

$$h_i = 5970 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K} \text{ (από μεταφορά)}$$

(9) $U_0 =$;

$$k_\sigma = k_{\chi\alpha\lambda\upsilon\beta\alpha} = 50 \text{ W/m }^\circ\text{K} \text{ (πίνακας)}$$

$$U_0^{(40)} = \frac{2}{25.4 \times 10^{-3}} \left(\frac{2}{19.3 \times 10^{-3} \times 5970} + \frac{\ln \frac{25.4}{19.3}}{50} + \frac{2}{25.4 \times 10^{-3} \times 726} \right)^{-1}$$

$$= 78.74(17.36 \times 10^{-3} + 5.49 \times 10^{-3} + 108.5 \times 10^{-3})^{-1} = 599.5 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$$

(10) $U_{\sigma\chi} =$;

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

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

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

* Για τον ορισμό και υπολογισμό της «θερμιδικής θερμοκρασίας» (“caloric temperature”) δεξ: D.Q. Kern “Process Heat Transfer”, ή “Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association”.

Πιο ακριβής υπολογισμός γίνεται βάσει των θερμιδικών θερμοκρασιών των δύο ρευμάτων.

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 Πτώσεων Πίεσης

Πλευρά Κελύφους (Ελαιο)	Πλευρά Αυλών (Νερό)
(1) Για $Re_\kappa = 14.2 \times 10^3$ έχουμε	(1) Για $Re_\sigma = 33.7 \times 10^3$ και

$$f_k = 0.44$$

Σχ. 42

(2) Αριθμός περασμάτων ανάμεσα στους αυλούς

$$= 2 \times (N_\chi + 1) = 2 \times 21 = 42$$

(3) Σε 109.5°C για 33.5°API

Σχ.Π.5
↓

$$s = 0.82 \Rightarrow \rho_k \cong 820 \text{ kg/m}^3$$

(4) Από την Εξ. (83) (με διπλάσιο $N_\chi+1$) παίρνουμε

$$(\Delta p)_k = 42 \times 0.44 \times \frac{889 \times 10^{-3}}{25.13 \times 10^{-3}}$$

$$\times \frac{820}{2} \left(\frac{395.3}{820} \right)^2 0.89^{-1}$$

$$= 70.0 \times 10^3 \text{ Pa} = 70.0 \text{ kPa}$$

$$(\Delta p)_k = 0.69 \text{ atm} < 0.75 \text{ atm}$$

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

έχουμε $f = 0.023$

(2) Αριθμός διαδρομών $N_\delta=6$

(3) Σε 40.5°C για νερό

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

$$(4) (\Delta p)_\sigma \stackrel{(84)}{=} 6 \times 0.023 \times \frac{3.658}{19.3 \times 10^{-3}} \frac{990}{2}$$

$$\times \left(\frac{1239}{990} \right)^2 \times 1$$

$$= 20.3 \times 10^3 \text{ Pa} = 20.3 \text{ kPa}$$

$$(\Delta p)_{\sigma\tau} \stackrel{(85)}{\downarrow} = 2 \times 6 \times 990 \times \left(\frac{1239}{990} \right)^2$$

$$= 18.6 \times 10^3 \text{ Pa} = 18.6 \text{ kPa}$$

$$(\Delta p)_{\sigma,\text{ολ}} \stackrel{(86)}{\downarrow} = 20.3 + 18.6 = 38.9 \text{ kPa}$$

$$= 0.39 \text{ atm} < 0.75 \text{ atm}$$

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

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

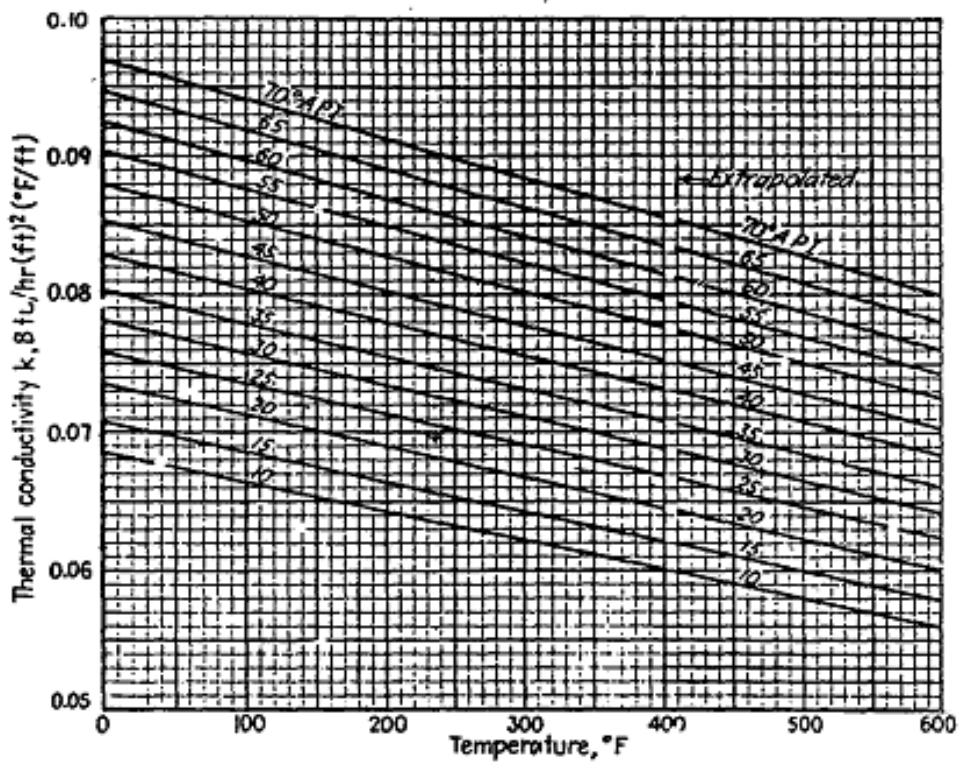


FIG. 1. Thermal conductivities of hydrocarbon liquids. (Adapted from Natl. Bur. Standards Misc. Pub. 97.)

Σχήμα Π.1. Θερμική αγωγιμότητα υγρών υδρογονανθράκων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πυκνότητας API. (Πηγή: Kern).

Σημείωση: $1 \text{ Btu/hr.ft}^2.(^{\circ}\text{F/ft})=1.73073 \text{ W/m.}^{\circ}\text{K}$

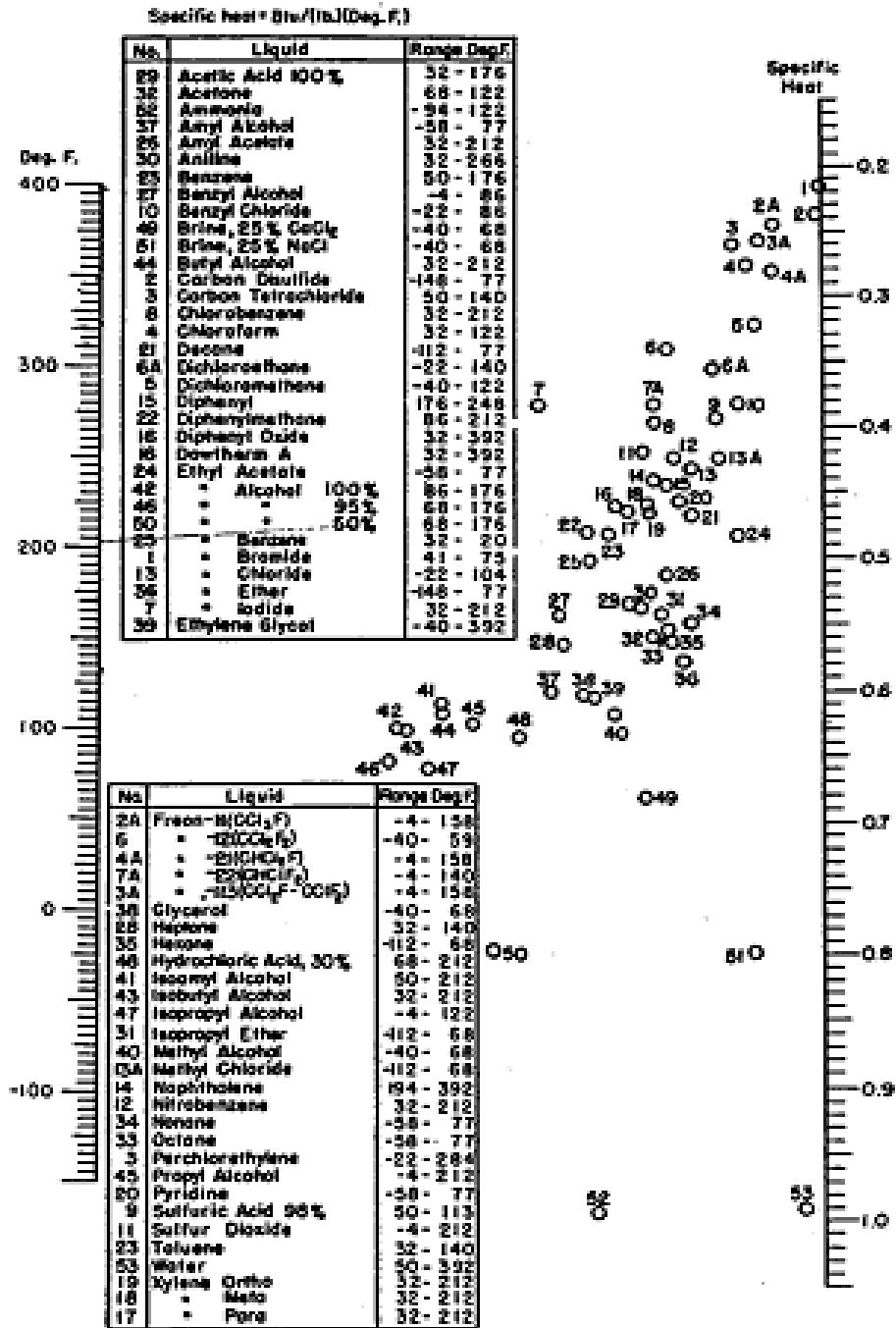


FIG. 2. Specific heats of liquids. (Chilton, Colburn, and Farnon, based mainly on data from *International Critical Tables*, Perry, "Chemical Engineers' Handbook," 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950.)

Σχήμα Π.2. Ειδική θερμότητα διαφόρων υγρών. (Πηγή: Kern).

Διαδικασία: Βρες τον αριθμό που αντιστοιχεί στο υγρό που θεωρείς. Βρες το αντίστοιχο σημείο στο διάγραμμα. Βρες το σημείο που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία (°F) του υγρού στην αριστερή κλίμακα. Ενώσε με ευθεία γραμμή τα δύο τελευταία σημεία. Επέκτεινε τη γραμμή μέχρις ότου τμήσει τη δεξιά κλίμακα και διάβασε την τιμή του c_p (σε Btu/lb°F). Σημείωση: 1 Btu/lb. °F=4186.8 J/kg.°K

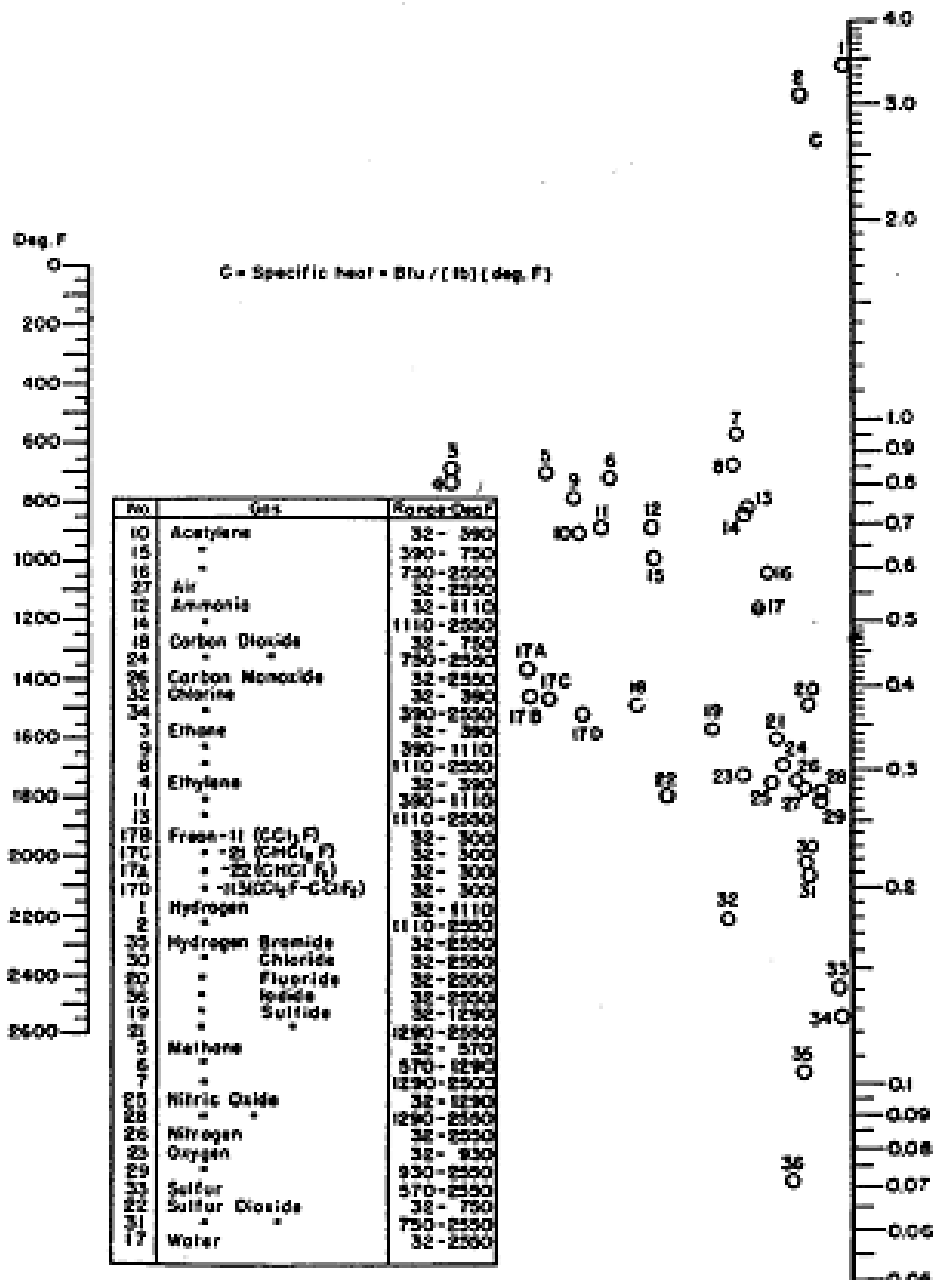


FIG. 3. Specific heats of gases at 1 atm. (Perry, "Chemical Engineers' Handbook," 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950.)

Σχήμα Π.3 Ειδική θερμότητα διαφόρων αερίων σε 1 atm. (Πηγή: Kern).

Διαδικασία: Δες Σχ. Π.2

Σημείωση: 1 Btu/lb. °F=4186.8 J/kg.°K

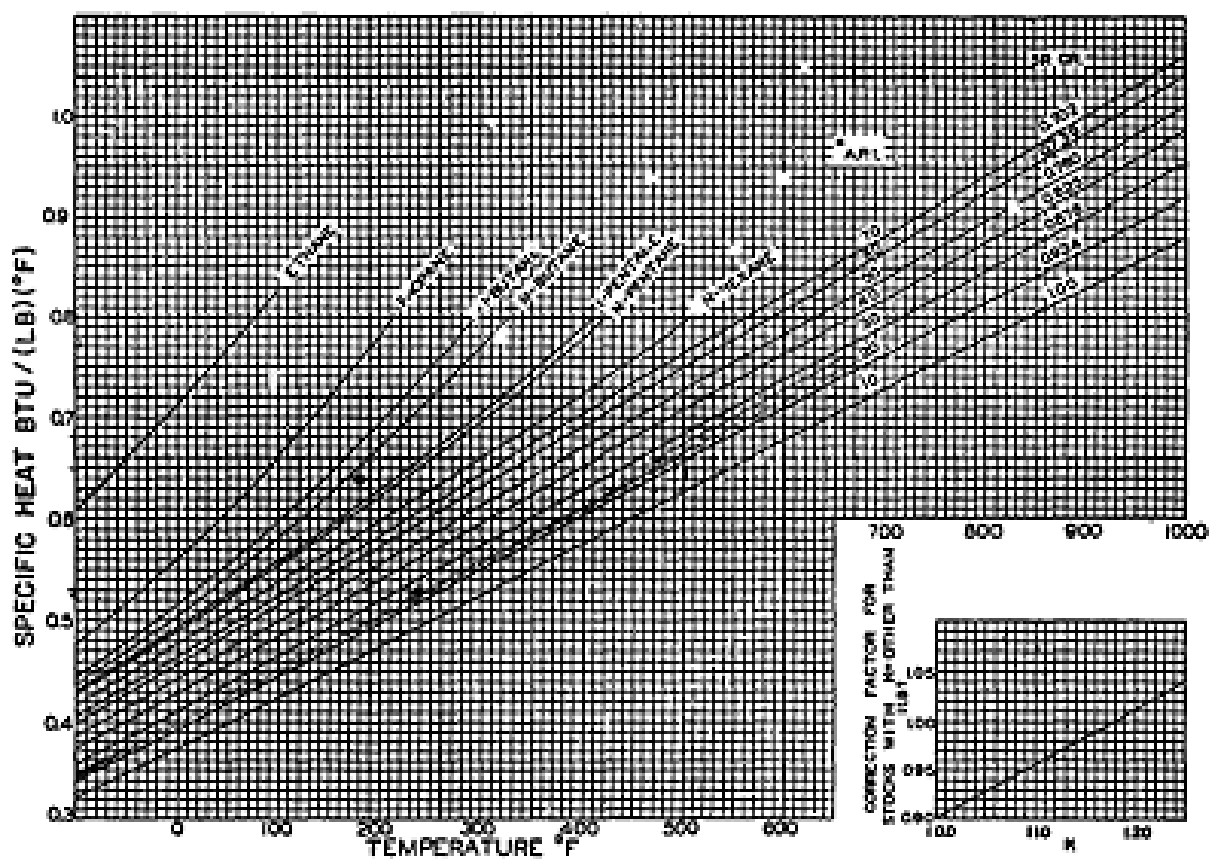


FIG. 4. Specific heats of hydrocarbon liquids. [McCormack and Brown, Ind. Eng. Chem., 34, 505 (1942).]
 † K = characterization factor.

Σχήμα Π.4 Ειδική θερμότητα υγρών υδρογονανθράκων. Ο συντελεστής διορθώσεως χρειάζεται μόνο αν $K \neq 11.8$, όπου $K = T_B^{1/3} / s$ (T_B = μέσο σημείο βρασμού σε $^{\circ}R$, s = ειδική βαρύτητα σε $60^{\circ}F/60^{\circ}F$). (Πηγή: Kern)., Σημείωση: $1 \text{ Btu/lb. } ^{\circ}F = 4186.8 \text{ J/kg. } ^{\circ}K$

Πίνακας Π.1 Ειδικές Βαρύτητες και Μοριακά Βάρη Υγρών

Compound	Mol wt.	s*	Compound	Mol. wt.	s*
Acetaldehyde	44.1	0.78	Ethyl iodide	155.9	1.93
Acetic acid, 100%	60.1	1.05	Ethyl glycol	88.1	1.04
Acetic acid, 70%		1.07	Formic acid	46.0	1.22
Acetic anhydride	102.1	1.08	Glycerol, 100%	92.1	1.26
Acetone	58.1	0.79	Glycerol, 50%		1.13
Allyl alcohol	58.1	0.86	n-Heptane	100.2	0.68
Ammonia, 100%	17.0	0.61	n-Hexane	86.1	0.66
Ammonia, 26%		0.91	Isopropyl alcohol	60.1	0.79
Amyl acetate	130.2	0.88	Mercury	200.6	13.55
Amyl alcohol	88.2	0.81	Methanol, 100%	32.5	0.79
Aniline	93.1	1.02	Methanol, 90%		0.82
Anisole	108.1	0.99	Methanol, 40%		0.94
Arsenic trichloride	181.3	2.16	Methyl acetate	74.9	0.93
Benzene	78.1	0.88	Methyl chloride	50.5	0.92
Brine, CaCl ₂ 25%		1.23	Methyl ethyl ketone	72.1	0.81
Brine, NaCl 25%		1.19	Naphthalene	128.1	1.14
Bromotoluene, ortho	171.0	1.42	Nitric acid, 95%		1.50
Bromotoluene, meta	171.0	1.41	Nitric acid, 60%		1.38
Bromotoluene, para	171.0	1.39	Nitrobenzene	123.1	1.20
n-Butane	58.1	0.60	Nitrotoluene, ortho	137.1	1.16
i-Butane	58.1	0.60	Nitrotoluene, meta	137.1	1.16
Butyl acetate	116.2	0.88	Nitrotoluene, para	137.1	1.29
n-Butyl alcohol	74.1	0.81	n-Octane	114.2	0.70
i-Butyl alcohol	74.1	0.82	Octyl alcohol	130.23	0.82
n-Butyric acid	88.1	0.96	Pentachloroethane	202.3	1.67
i-Butyric acid	88.1	0.96	n-Pentane	72.1	0.63
Carbon dioxide	44.0	1.29	Phenol	94.1	1.07
Carbon disulfide	76.1	1.26	Phosphorus tribromide	270.8	2.85
Carbon tetrachloride	153.8	1.60	Phosphorus trichloride	137.4	1.57
Chlorobenzene	112.6	1.11	Propane	44.1	0.59
Chloroform	119.4	1.49	Propionic acid	74.1	0.99
Chlorosulfonic acid	116.5	1.77	n-Propyl alcohol	60.1	0.80
Chlorotoluene, ortho	126.6	1.08	n-Propyl bromide	123.0	1.35
Chlorotoluene, meta	126.6	1.07	n-Propyl chloride	78.5	0.89
Chlorotoluene, para	126.6	1.07	n-Propyl iodide	170.0	1.75
Cresol, meta	108.1	1.03	Sodium	23.0	0.97
Cyclohexanol	100.2	0.96	Sodium hydroxide, 50%		1.53
Dibromo methane	187.9	2.09	Stannic chloride	260.5	2.23
Dichloro ethane	99.0	1.17	Sulfur dioxide	64.1	1.38
Dichloro methane	88.0	1.34	Sulfuric acid, 100%	98.1	1.83
Diethyl oxalate	146.1	1.08	Sulfuric acid, 98%		1.84
Dimethyl oxalate	118.1	1.42	Sulfuric acid, 60%		1.50
Diphenyl	154.2	0.99	Sulfuryl chloride	135.0	1.67
Dipropyl oxalate	174.1	1.02	Tetra chloroethane	167.9	1.60
Ethyl acetate	88.1	0.90	Tetra chloroethylene	165.9	1.63
Ethyl alcohol, 100%	46.1	0.79	Titanium tetrachloride	189.7	1.73
Ethyl alcohol, 95%		0.81	Toluene	92.1	0.87
Ethyl alcohol, 40%		0.94	Trichloroethylene	131.4	1.46
Ethyl benzene	106.1	0.87	Vinyl acetate	86.1	0.93
Ethyl bromide	108.9	1.43	Water	18.0	1.0
Ethyl chloride	64.5	0.92	Xylene, ortho	106.1	0.87
Ethyl ether	74.1	0.71	Xylene, meta	106.1	0.86
Ethyl formate	74.1	0.92	Xylene, para	106.1	0.86

* σε 68°F (20°C). Αυτές οι τιμές αρκούν, χωρίς διόρθωση για τις περισσότερες εφαρμογές.

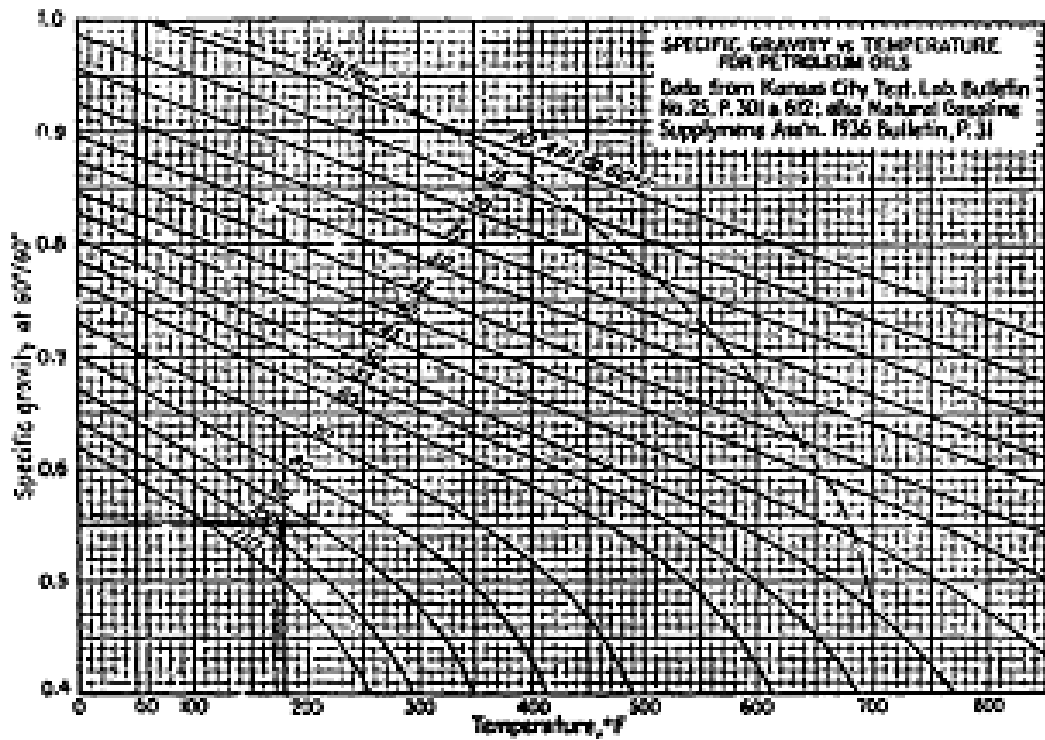


FIG. 6. Specific gravities of hydrocarbons.

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

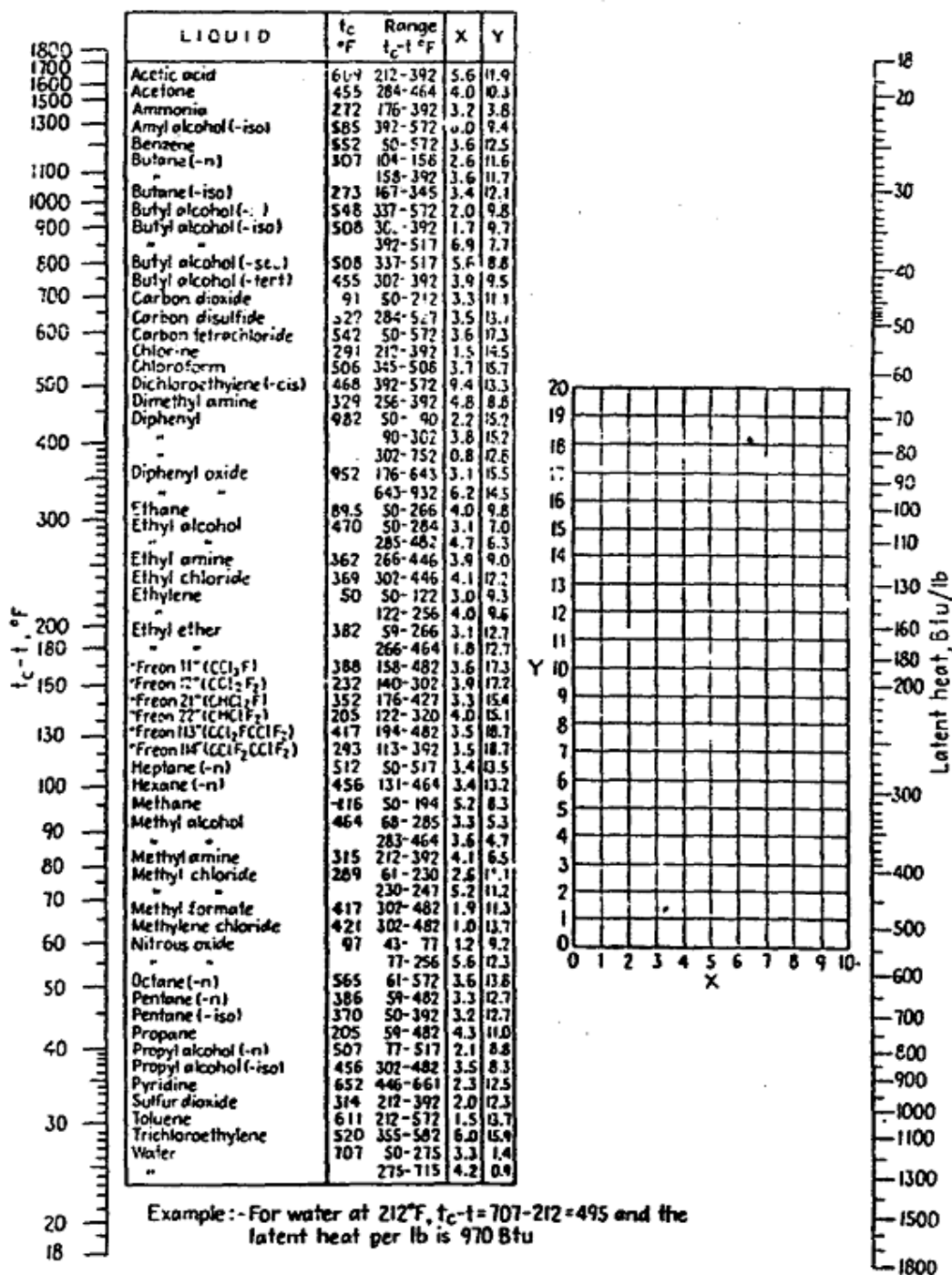


FIG. 12. Latent heats of vaporization. [Reproduced by permission of Chilton, Colburn, and Vernon, personal communication (revised) 1947.]

Σχήμα Π.7 Ιξώδες υγρών

Διαδικασία: Βρες τις συντεταγμένες X και Y του υγρού που θεωρείς στον Πίνακα Π.2 και προσδιόρισε το αντίστοιχο σημείο στο διάγραμμα. Προσδιόρισε στην αριστερή κλίμακα το σημείο που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία του υγρού. Ενώσε τα δύο

σημεία με ευθεία και προέκτεινε την γραμμή μέχρις ότου αυτή τμήσει την δεξιά κλίμακα. Διάβασε το ιξώδες σε cp ή mPa.s.

Πίνακας Π.2

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

Ιξώδη Φυτικών και Ζωϊκών Ελαίων

	Acid No.	Sp gr, 20/4°C	X	Y
Almond	2.85	0.9188	6.9	28.2
Coconut	0.01	0.9226	6.9	26.9
Cod liver		0.9138	7.7	27.7
Cottonseed	14.24	0.9187	7.0	28.0
Lard	3.39	0.9138	7.0	28.2
Linseed	3.42	0.9297	6.8	27.5
Mustard		0.9237	7.0	28.5
Neatsfoot	13.35	0.9158	6.5	28.0
Olive		0.9158	6.6	28.3
Palm kernel	9.0	0.9190	7.0	26.9
Perilla, raw	1.36	0.9297	8.1	27.2
Rapeseed	0.34	0.9114	7.0	28.8
Sardine	0.57	0.9384	7.7	27.3
Soybean	3.50	0.9228	8.3	27.5
Sperm	0.80	0.8829	7.7	26.3
Sunflower	2.76	0.9207	7.5	27.6
Whale, refined	0.73	0.9227	7.5	27.5

Ιξώδη Εμπορικών Λιπαρών Οξέων από 250 έως 400°F

	Sp gr at 300°C	X	Y
Lauric	0.792	10.1	23.1
Oleic	0.799	10.0	25.2
Palmitic	0.786	9.2	25.9
Stearic	0.789	10.5	25.5

Πίνακας Π.2 (συνέχεια)

Liquid	X	Y	Liquid	X	Y
Acetaldehyde	15.2	4.8	Freon-21	15.7	7.5
Acetic acid, 100%	12.1	14.2	Freon-22	17.2	4.7
Acetic acid, 70%	9.5	17.0	Freon-113	12.5	11.4
Acetic anhydride	12.7	12.8	Freon-114	14.6	8.3
Acetone, 100%	14.5	7.2	Glycerol, 100%	2.0	30.0
Acetone, 35%	7.9	15.0	Glycerol, 50%	6.9	19.6
Allyl alcohol	10.2	14.3	Heptane	14.1	8.4
Ammonia, 100%	12.6	2.0	Hexane	14.7	7.0
Ammonia, 26%	10.1	13.9	Hydrochloric acid, 31.5%	13.0	16.6
Amyl acetate	11.8	12.5	Isobutyl alcohol	7.1	18.0
Amyl alcohol	7.5	18.4	Isobutyric acid	12.2	14.4
Aniline	8.1	18.7	Isopropyl alcohol	8.2	16.0
Anisole	12.3	13.5	Mercury	18.4	16.4
Arsenic triehloride	13.9	14.5	Methanol, 100%	12.4	10.5
Benzene	12.5	10.9	Methanol, 90%	12.3	11.8
Brine, CaCl ₂ , 25%	6.6	15.9	Methanol, 40%	7.8	15.5
Brine, NaCl, 25%	10.2	16.6	Methyl acetate	14.2	8.2
Bromine	11.2	13.2	Methyl chloride	15.0	3.8
Bromotoluene	20.0	15.9	Methyl ethyl ketone	13.9	8.6
n-Butane	15.3	3.3	Naphthalene	7.9	18.1
Isobutane	14.5	3.7	Nitric acid, 95%	12.8	13.8
Butyl acetate	12.3	11.0	Nitric acid, 60%	10.8	17.0
Butyl alcohol	8.6	17.2	Nitrobenzene	10.6	16.2
Butyric acid	12.1	15.3	Nitrotoluene	11.0	17.0
Carbon dioxide	11.6	0.3	Octane	13.7	10.0
Carbon disulfide	16.1	7.5	Octyl alcohol	6.6	21.1
Carbon tetrachloride	12.7	13.1	Pentachloroethane	10.9	17.3
Chlorobenzene	12.3	12.4	Pentane	14.9	5.2
Chloroform	14.4	10.2	Phenol	6.9	20.8
Chlorosulfonic acid	11.2	18.1	Phosphorus tribromide	13.8	16.7
Chlorotoluene, ortho	13.0	13.3	Phosphorus trichloride	16.2	10.9
Chlorotoluene, meta	13.3	12.5	Propane	15.3	1.0
Chlorotoluene, para	13.3	12.5	Propionic acid	12.8	13.8
Cresol, meta	2.5	20.8	Propyl alcohol	9.1	16.5
Cyclohexanol	2.9	14.3	Propyl bromide	14.5	9.6
Dibromoethane	12.7	15.8	Propyl chloride	14.4	7.5
Dichloroethane	13.2	12.2	Propyl iodide	14.1	11.6
Dichloromethane	14.6	8.9	Sodium	16.4	13.9
Diethyl oxalate	11.0	16.4	Sodium hydroxide, 50%	3.2	25.8
Dimethyl oxalate	12.3	15.8	Stannic chloride	13.5	12.8
Diphenyl	12.0	18.3	Sulfur dioxide	15.2	7.1
Dipropyl oxalate	10.3	17.7	Sulfuric acid, 110%	7.2	27.4
Ethyl acetate	13.7	9.1	Sulfuric acid, 98%	7.0	24.8
Ethyl alcohol, 100%	10.5	13.8	Sulfuric acid, 60%	10.2	21.3
Ethyl alcohol, 95%	9.8	14.3	Sulfuryl chloride	15.2	12.4
Ethyl alcohol, 40%	6.5	16.6	Tetrachloroethane	11.9	15.7
Ethyl benzene	13.2	11.5	Tetrachloroethylene	14.2	12.7
Ethyl bromide	14.5	8.1	Titanium tetrachloride	14.4	12.3
Ethyl chloride	14.8	6.0	Toluene	13.7	10.4
Ethyl ether	14.5	5.3	Trichloroethylene	14.8	10.5
Ethyl formate	14.2	8.4	Turpentine	11.5	14.9
Ethyl iodide	14.7	10.3	Vinyl acetate	14.0	8.8
Ethylene glycol	6.0	23.6	Water	10.2	13.0
Formic acid	10.7	15.8	Xylene, ortho	13.5	12.1
Freon-11	14.4	9.0	Xylene, meta	13.9	10.6
Freon-12	16.8	5.6	Xylene, para	13.9	10.9

- From Perry, J.H., "Chemical Engineers' Handbook", 3rd ed. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950.

$$1\text{cp} = 1\text{mPa} \cdot \text{s} = 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$$

Σχήμα Π.8 Ιξώδες αερίων. (Πηγή: Kern).

Διαδικασία: Βρες τις συντεταγμένες X και Y του αερίου που θεωρείς στον Πίνακα Π.3 και προσδιόρισε το αντίστοιχο σημείο στο διάγραμμα. Προσδιόρισε στην αριστερή κλίμακα το σημείο που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του αερίου. Ενώσε τα δύο σημεία με ευθεία και προέκτεινε τη γραμμή μέχρις ότου αυτή τμήσει τη δεξιά κλίμακα. Διάβασε το ιξώδες σε cp ή mPa.s.

Πίνακας Π.3

Συντεταγμένες X και Y για Χρήση με το Σχ. Π.8 για τον Προσδιορισμό του Ιξώδους Διαφόρων Αερίων

Gas	X	Y
Acetic acid	7.7	14.3
Acetone	8.9	13.0
Acetylene	9.8	14.9
Air	11.0	20.0
Ammonia	8.4	16.0
Argon	10.5	22.4
Benzene	8.5	13.2
Bromine	8.9	19.2
Butene	9.2	13.7
Butylene	8.9	13.0
Carbon dioxide	9.5	18.7
Carbon disulfide	8.0	16.0
Carbon monoxide	11.0	20.0
Chlorine	9.0	18.4
Chloroform	8.9	15.7
Cyanogen	9.2	15.2
Cyclohexane	9.2	12.0
Ethane	9.1	14.5
Ethyl acetate	8.5	13.2
Ethyl alcohol	9.2	14.2
Ethyl chloride	8.5	15.6
Ethyl ether	8.9	13.0
Ethylene	9.5	15.1
Fluorine	7.3	23.8
Freon-11	10.6	15.1
Freon-12	11.1	16.0
Freon-21	10.8	15.3
Freon-22	10.1	17.0
Freon-113	11.3	14.0
Helium	10.9	20.5
Hexane	8.6	11.8
Hydrogen	11.2	12.4
3H ₂ +1N ₂	11.2	17.2
Hydrogen bromide	8.8	20.9
Hydrogen chloride	8.8	18.7
Hydrogen cyanide	9.8	14.9
Hydrogen iodide	9.0	21.3
Hydrogen sulfide	8.6	18.0
Iodine	9.0	18.4
Mercury	5.3	22.9
Methane	9.9	15.5
Methyl alcohol	8.5	15.6
Nitric oxide	10.9	20.5
Nitrogen	10.6	20.0
Nitrosyl chloride	8.0	17.6
Nitrous oxide	8.8	19.0
Oxygen	11.0	21.3
Pentane	7.0	12.8
Propane	9.7	12.9
Propyl alcohol	8.4	13.4
Propylene	9.0	13.8
Sulfur dioxide	9.6	17.0
Toluene	8.6	12.4
2,3,3-Trimethylbutane	9.5	10.5
Water	8.0	16.0
Xenon	9.3	23.0

- Πηγή: From Perry, J.H., "Chemical Engineers' Handbook", 3rd ed. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950.

4.6 Ασκήσεις

1. Υποθέστε ότι ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας U σε ένα εναλλάκτη διπλού αυλού εξαρτάται γραμμικά από τη θερμοκρασία, δηλ. $U=a(1+bt)$, όπου a , b =σταθ. και t είναι η θερμοκρασία του ρευστού στον εσωτερικό αυλό (T είναι η θερμοκρασία του ρευστού στο δακτυλιοειδή χώρο). Δείξτε ότι

$$\frac{Q}{A} = \frac{U_2 \Delta T_1 - U_1 \Delta T_2}{\ln \frac{U_2 \Delta T_1}{U_1 \Delta T_2}}$$

όπου οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στην είσοδο και έξοδο του θερμού ρευστού [Δες και Εξι. (30)].

2. Αν οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου ενός εναλλάκτη διπλού αυλού (T_1 , t_1 , T_2 , t_2) είναι δεδομένες και η τιμή του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σταθερή, προσδιορίστε μια έκφραση που να σχετίζει την επιφάνεια που χρειάζεται με αντιρροή A_{av} με την επιφάνεια που χρειάζεται με ομορροή A_{om} .
3. Βενζίνη πυκνότητας 57°API και με μαζική παροχή 4500 kg/hr ψύχεται από 67°C σε 54°C θερμαίνοντας κεροζίνη πυκνότητας 42°API από 21°C σε 38°C . Η πτώση πίεσης για κάθε ρεύμα δεν πρέπει να ξεπεράσει 70 kPa . Ο ελάχιστος ολικός συντελεστής ρυπάνσεως είναι $0.0007 \text{ m}^2\text{K/W}$. (α) Πόσες φουρκέτες τύπου $(2 \frac{1}{2} \text{ in}) \times (1 \frac{1}{4} \text{ in})$ IPS μήκους 20 ft χρειάζονται; (β) Ποιός είναι ο τελικός συντελεστής ρυπάνσεως;
4. Ορθο-ξυλένιο θερμαίνεται από 38°C σε 67°C ψύχοντας 8165 kg/hr βουτυλικής αλκοόλης από 76.5°C σε 60°C . Γι αυτή τη διεργασία διαθέτουμε πέντε φουρκέτες τύπου $(3 \text{ in}) \times (2 \text{ in})$ IPS (sch. 40) και μήκους 20 ft συνδεδεμένες σε σειρά. (α) Ποιός είναι ο διαθέσιμος ολικός συντελεστής ρυπάνσεως; (β) Ποιές είναι οι πτώσεις πίεσεως στα δύο ρεύματα;
5. 45000 kg/hr νιτροβενζολίου ψύχονται από 163°C σε 135°C από βενζόλιο που θερμαίνεται από 38°C σε 149°C . Προς τούτο διαθέτουμε φουρκέτες τύπου $(4 \text{ in}) \times (3 \text{ in})$ IPS (sch. 40) και μήκους 20 ft . Η πτώση πίεσεως κάθε ρεύματος δεν

πρέπει να υπερβεί 0.68 atm. Ο ελάχιστος ολικός συντελεστής ρυπάνσεως είναι $0.0007 \text{ m}^2\text{K/W}$. (α) Πόσες φουρκέτες χρειαζόμαστε; (β) Πόσος είναι ο τελικός συντελεστής ρυπάνσεως;

6. Σε μια νέα εγκατάσταση πρέπει να προθερμάνουμε μια παροχή 67590 kg/hr ακάθαρτου πετρελαίου πυκνότητας 34°API από 76.5°C σε 140.5°C ώστε να το τροφοδοτήσουμε στην στήλη αποστάξεως. Προς τούτο διαθέτουμε σχετικά απεριόριστη ποσότητα καυσίμου πετρελαίου (gas oil) πυκνότητας 33°API του οποίου ο αγωγός περνά κοντά από την αποστακτική στήλη. Η θερμοκρασία του καυσίμου πετρελαίου είναι 277°C. Επειδή το κόστος αντλήσεως ψυχρού καυσίμου πετρελαίου είναι απαγορευτικό (λόγω του μεγάλου ιξώδους) η θερμοκρασία του δεν πρέπει να χαμηλωθεί κάτω από $\sim 149^\circ\text{C}$. Για την διεργασία αυτή διαθέτουμε έναν εναλλάκτη τύπου 1-6 με εσωτερική διάμετρο κελύφους 25 in. Ο εναλλάκτης περιέχει 252 αυλούς εξωτερικής διαμέτρου 1 in, 13 BWG, μήκους 16 ft, διαρρυθμισμένους σε τριγωνική διάταξη με βήμα $1 \frac{1}{4}$ in. Το βήμα των χωρισμάτων είναι 5 in. Η επιτρεπόμενη πτώση πίεσης για το καύσιμο πετρέλαιο είναι 0.68 atm ενώ για το ακάθαρτο πετρέλαιο είναι 1 atm. Εάν ο εναλλάκτης καθαριστεί καλά θα είναι ικανοποιητικός, και αν ναι πόσος θα είναι ο ολικός συντελεστής ρυπάνσεως; Το ιξώδες του καυσίμου πετρελαίου είναι 0.4 cp σε 277°C και 0.7 cp σε 149°C. Το ιξώδες του ακάθαρτου πετρελαίου είναι 0.9 cp σε 140.5°C και 2.1 cp σε 76.5°C. Ενδιάμεσες τιμές μπορούν να ληφθούν με γραμμική παρεμβολή επάνω σε λογαριθμικό χαρτί. (Γιατί;).
7. 19600 kg/hr πετρελαίου αποστάγματος πυκνότητας 35° API ψύχοντας από 121°C σε 49°C χρησιμοποιώντας νερό που θερμαίνεται από 29.5°C σε 49°C. Προς τούτο διαθέτουμε εναλλάκτη 1-4 με εσωτερική διάμετρο κελύφους $19 \frac{1}{4}$ in και ο οποίος έχει 204 αυλούς εξωτερικής διαμέτρου $\frac{3}{4}$ in, 16 BWG, μήκους 16 ft και διαρρυθμισμένους σε τετραγωνική διάταξη με βήμα 1 in. Τα χωρίσματα έχουν βήμα 5 in. (α) Ποιά εκλογή δίνει την πιο ισοζυγισμένη πτώση πίεσης; (β) Ποιός είναι ο διαθέσιμος ολικός συντελεστής ρυπάνσεως; Το ιξώδες του πετρελαϊκού αποστάγματος είναι 3.1 cp σε 38°C και 1.3 cp σε 99°C. Τιμές σ' άλλες θερμοκρασίες μπορούν να ληφθούν με γραμμική παρεμβολή και προεκβολή σε λογαριθμικό χαρτί.

8. 27000 kg/hr 25% διαλυματος NaCl σε νερό ψύχονται από 65.5°C σε 37.5°C χρησιμοποιώντας νερό με θερμοκρασία εισόδου 26.5°C. Τι θερμοκρασία εξόδου του νερού μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε; Γι αυτή την εφαρμογή διαθέτουμε έναν εναλλάκτη 1-2 με εσωτερική διάμετρο κελύφους 21 ¼ in, που περιέχει 302 αυλούς εξωτερικής διαμέτρου ¾ in, 14BWG, μήκους 16 ft. Οι αυλοί είναι σε τριγωνική διάταξη με βήμα 1 in. Το βήμα των χωρισμάτων είναι 5 in. (α) Ποιές είναι οι πτώσεις πίεσης; (β) Είναι κατάλληλος ο εναλλάκτης και, αν ναι, πόσος είναι διαθέσιμος συντελεστής ρυπάνσεως;