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

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

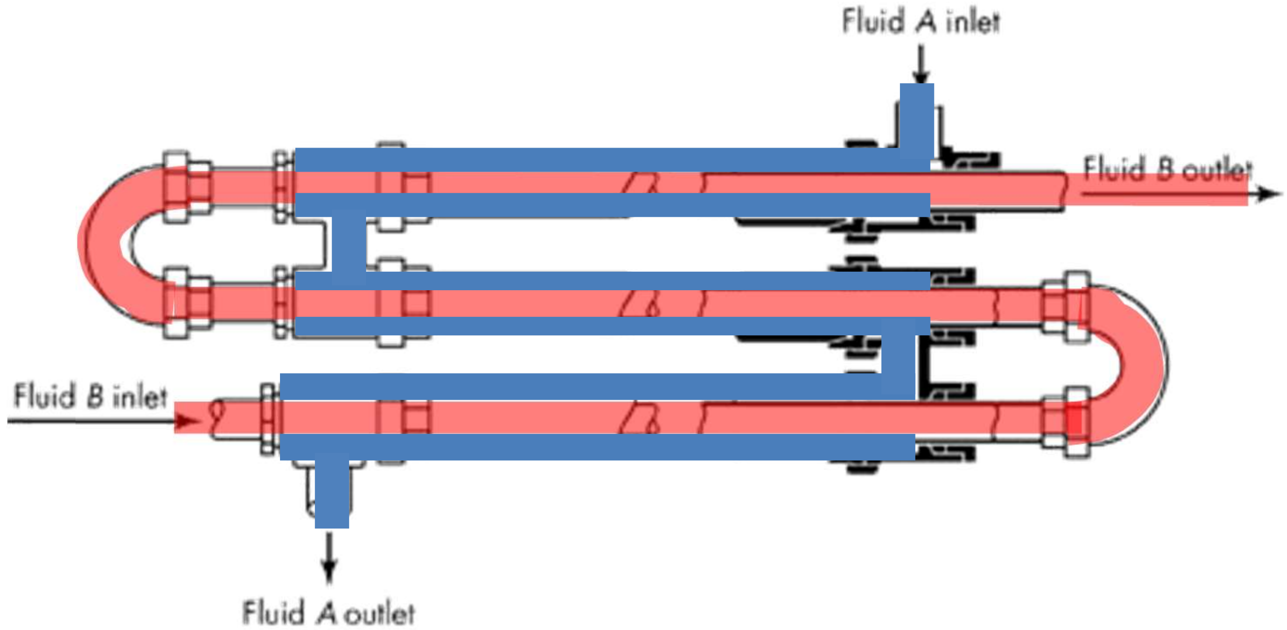
ΧΡ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

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

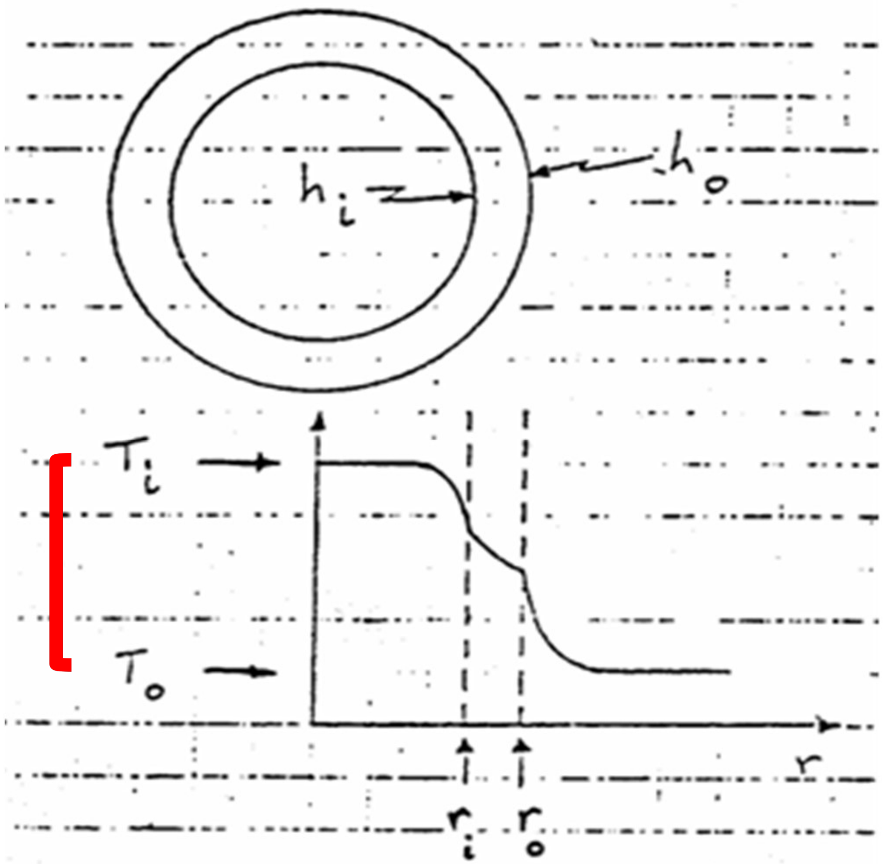
ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ
Εναλλάκτης Τύπου Διπλού Αυλού



- Τυπικές διαστάσεις:
  - εσωτερικός σωλήνας 1¼ in
  - εξωτερικός σωλήνας 2½ in
- Για $A \lesssim 10 - 12\ \mathrm{m}^2$

ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ , U

Τοίχωμα Αυλού



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

$\Delta T = T_i - T_o$

$A_o = 2\pi r_o L$

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

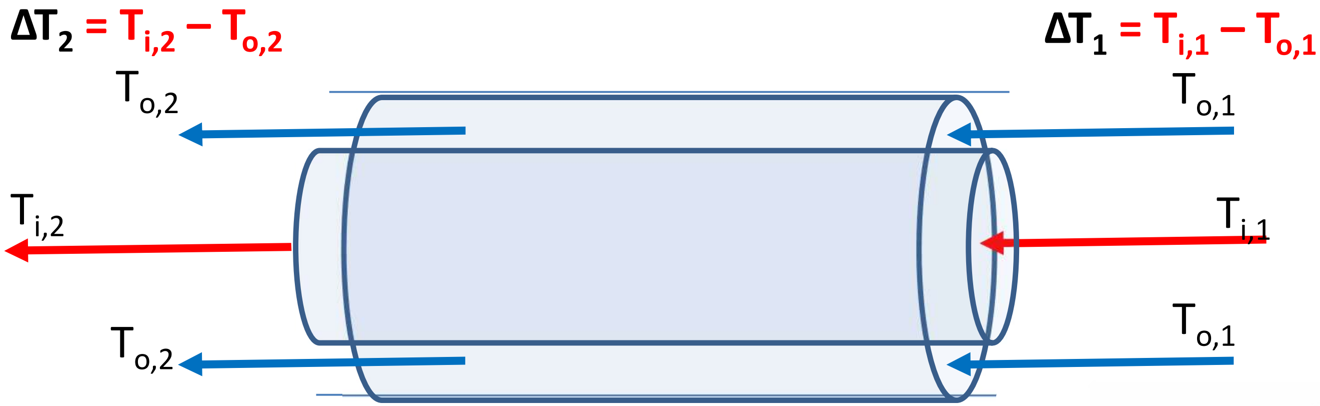
$A_i = 2\pi r_i L$

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

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

ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ , U

ΔT η οδηγούσα δύναμη



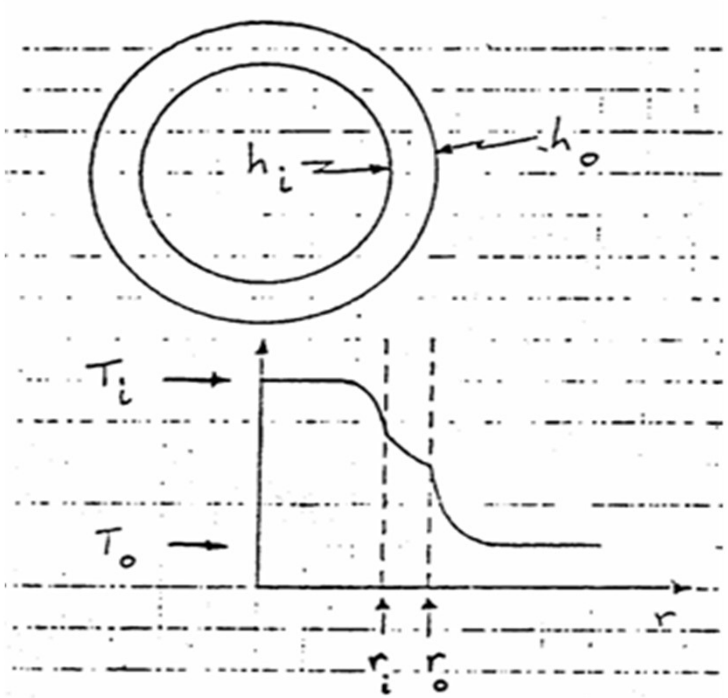
$Q = A_o U_o (\Delta T)_{lm} = A_i U_i (\Delta T)_{lm}$

$\Delta T_1 = T_{i,1} - T_{o,1}$

$\Delta T_2 = T_{i,2} - T_{o,2}$

$$(\Delta T)_{\ell m} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ell n\left(\dfrac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$A_o = 2\pi r_o L$



ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ , U

Συντελεστή Ρυπάνσεως

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

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

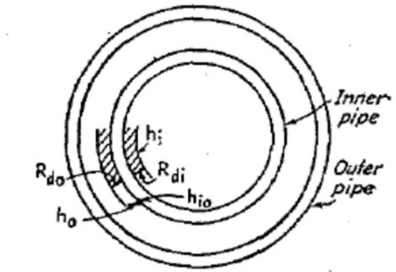


Fig. 6.4. Location of fouling factors and heat-transfer coefficients.

D. Q. KERN

Process Heat Transfer

U= ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

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

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

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

$$R_{\rho} = R_{\rho,\varepsilon\sigma} + R_{\rho,\varepsilon\xi} \qquad Q = A_o U_{\sigma\chi} (\Delta T)_{lm}$$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h_{lm}

Μεταφορά θερμότητας με Συναγωγή μέσα σε Αυλούς

i) Στρωτή Ροή, Re_b <2100

Εξίσωση των Sieder and Tate (1936)

$$Re_b < 2100$$

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

Convective heat transfer, h

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

Conductive heat transfer, k/D

Ορισμοί

Re= [ρ U D]/μ = [G D]/μ =αδρανειακές δυνάμεις/ιξώδεις δυνάμεις

Pr_b= ν/α, ν= μ/ρ, κινηματικό ιξώδες,

α= κ/(ρ c_p), συντελεστής θερμικής διαχύσεως

Pr_b= $\dfrac{c_p \mu_b}{k_b}$ **= Διαχυτότητα ορμής/ θερμική διαχυτότητα**

Wilhelm Nusselt
Engineer, (1882-1957

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h

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

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

k_b= συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού στη θερμοκρασία μίξεως T_b

Re_b= = αριθμός *Reynolds* στην T_b

Pr_b= = αριθμός *Prandtl* στην T_b

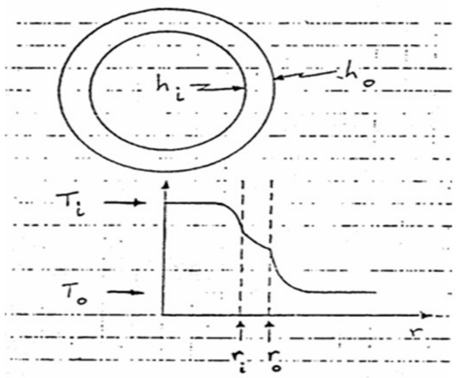
$G = = \rho<v>=$ μαζική ταχύτητα του ρευστού

μ_b= ιξώδες του ρευστού στην T_b

μ_w= ιξώδες του ρευστού στη θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος T_w

m‘= μαζική παροχή του ρευστού

c_p= ειδική θερμότητα του ρευστού



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

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h_{lm}

i) Στρωτή Ροή, Re_b <2100

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

$$j_H = \boxed{1.86 \left(Re_b \frac{D}{L}\right)^{1/3}}$$

Re_b<2100, $Re_b Pr_b$ (L/D) > 10

Έντονα τυρβώδης ροή, Sieder and Tate, 1936

Για L/D > 10, για Re_b > 20000

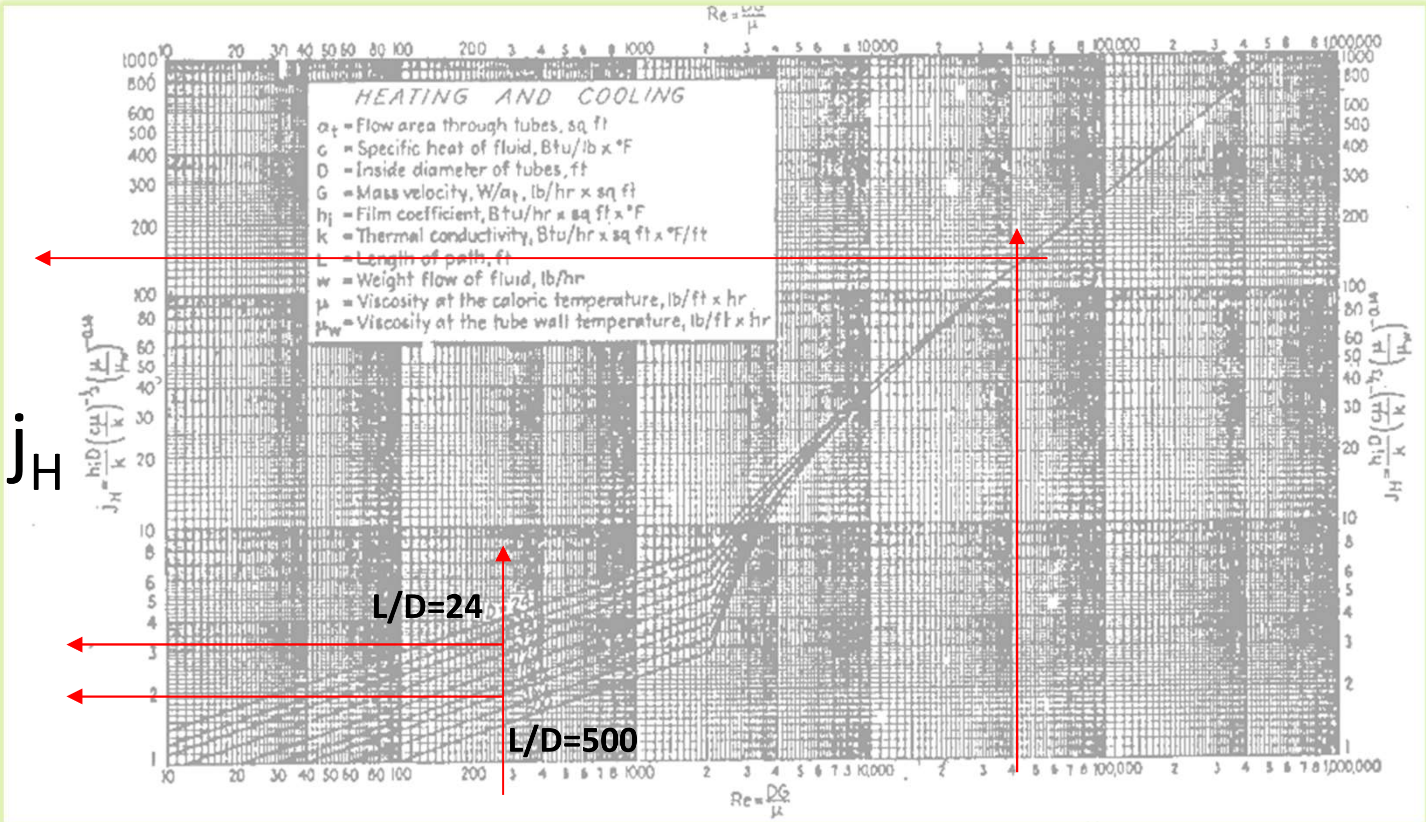
$$Nu_{\ell m} = \frac{\boxed{h_{\ell m}} D}{k_b} = \boxed{0.026\, Re_b^{0.8}} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

Συντελεστή –j του Colburn για μεταφορά θερμότητας, j_H

$$j_H = \boxed{0.026\, Re_b^{0.8}}$$

Re_b>20000, (L/D) > 10

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h



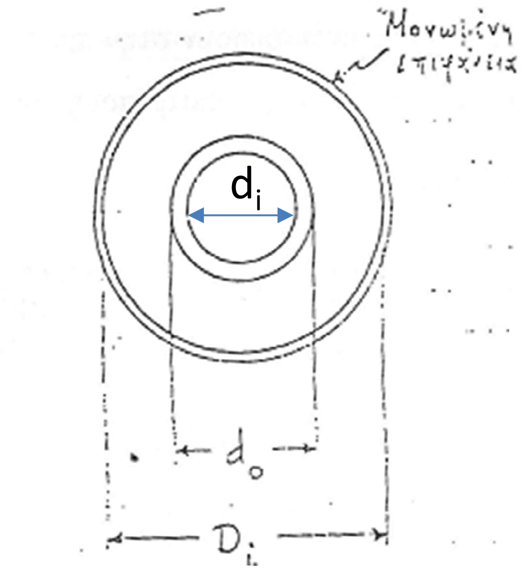
$$Re_b = \frac{GD}{\mu_b}$$

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

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, h

Μεταφορά Θερμότητας με Συναγωγή μέσα σε Αγωγούς Δακτυλιοειδούς Διατομής

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



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

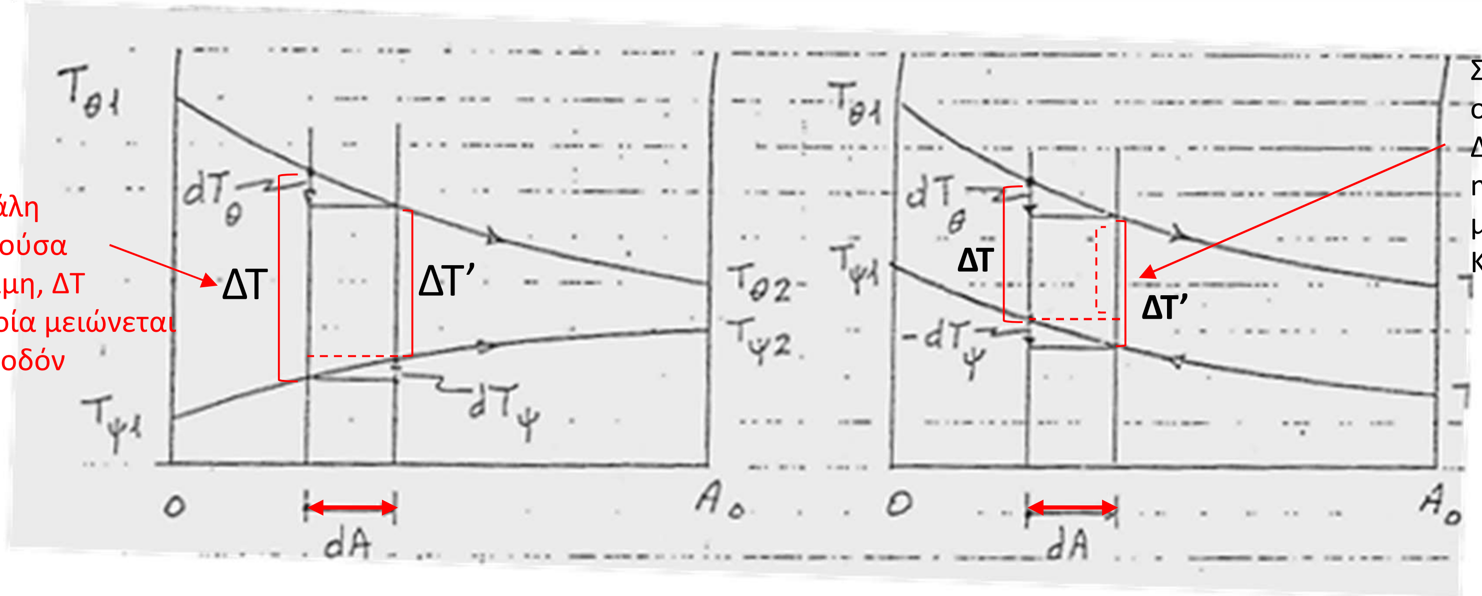
$$D_e = 4\frac{\frac{\pi}{4}\left(D_i^2 - d_0^2\right)}{\pi d_0} = \frac{D_i^2 - d_0^2}{d_0}$$

Η *υδραυλική διάμετρο D_υ* ορίζεται ως

$$D_\upsilon = 4\frac{\frac{\pi}{4}\left(D_i^2 - d_0^2\right)}{\pi(D_i + d_0)} = D_i - d_0$$

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ- Εναλλάκτης τύπου Διπλού Αυλού

Ανάλυση. Η Λογαριθμική Μέση Διαφορά Θερμοκρασίας



Αλλαγές θερμοκρασίας κατά μήκος διαφορικού τμήματος (dA) του εναλλάκτη σε περίπτωση ομορροής και σε περίπτωση αντιρροής

$$dQ = \dot{m}_\psi c_{p,\psi} dT_\psi$$

$$-dQ = \dot{m}_\theta c_{p,\theta} dT_\theta$$

Λύνοντας τις Εξισ. ως προς dT_θ και dT_ψ και αφαιρώντας παίρνουμε

dΔΤ=ΔΤ-ΔΤ'

$$d\Delta T = d(T_\theta - T_\psi) = dT_\theta - dT_\psi = -\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right) dQ$$

$$\int_{\Delta T_1}^{\Delta T_2} d\Delta T = -\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right)\int_0^Q dQ$$

$$\Delta T_1 - \Delta T_2 = \left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right) Q$$

$$\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right) = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{Q}$$

$dQ=U_0(T_\theta-T_\psi)dA=\underline{U_0\Delta T\, dA}$

$$dQ = -\frac{d\Delta T}{\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right)} = \underline{U_0 \Delta T dA}$$

$$-\frac{d\Delta T}{\Delta T} = U_0\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right) dA$$

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ- Εναλλάκτης τύπου Διπλού Αυλού Ανάλυση. Η Λογαριθμική Μέση Διαφορά Θερμοκρασίας

$$dQ = \dot{m}_\psi c_{p,\psi} dT_\psi$$

$$-dQ = \dot{m}_\theta c_{p,\theta} dT_\theta$$

$$d\Delta T = d(T_\theta - T_\psi) = dT_\theta - dT_\psi = -\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right) dQ$$

$$\int_{\Delta T_1}^{\Delta T_2} d\Delta T = -\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right)\int_0^Q dQ$$

$$\Delta T_1 - \Delta T_2 = \left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right) Q$$

$$\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right) = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{Q}$$

dQ=U$_0$(T$_\theta$-T$_\psi$)dA=U$_0$ΔT dA

$$dQ = -\frac{d\Delta T}{\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right)} = U_0 \Delta T dA$$

$$-\frac{d\Delta T}{\Delta T} = U_0\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right) dA$$

$$\ell n \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = U_0\left(\frac{1}{\dot{m}_\theta c_{p,\theta}} + \frac{1}{\dot{m}_\psi c_{p,\psi}}\right) A_0$$

$$Q = U_0 A_0 \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ell n\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Ορίζουμε τη *λογαριθμική μέση θερμοκρασία* $\Delta T_{\ell m}$ ως

$$(\Delta T)_{\ell m} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ell n\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

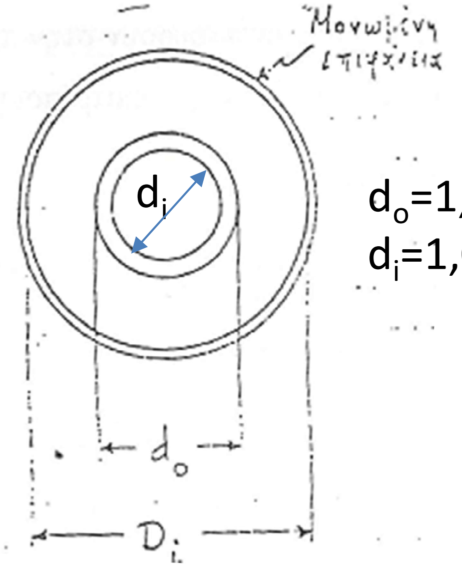
$$Q = U_0 A_0 (\Delta T)_{\ell m}$$

Ισχύει και για ομορρόη και για αντιρροή

Άσκηση 10.1

Μεθυλική αλκοόλη ψύχεται στον εσωτερικό αυλό ενός εναλλάκτη διπλού σωλήνα, με νερό που ρέει στον μανδύα. Ο εσωτερικός σωλήνας είναι 1” sch. 40. με $k = 45\ \mathrm{W/m°C}$. Να υπολογίσετε τον ολικό συντελεστή από τους μερικούς συντελεστές με βάση την την εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα.

1’’ sch 40, OD=d_o=1,32in= 3,353 10^{-2} m, ID=d_i=1,049 in= 2,665 10^{-2} m



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

d_o=1,32in= 3,353 10^{-2} m, **r_o=1,676 10^{-2} m**
d_i=1,049 in= 2,665 10^{-2} m, **r_i=1,332 10^{-2} m**

Δεδομένα	W /m°C
Αλκοόλη h_i	1020
Νερό h_o	1700
Εσωτερικές επικαθήσεις h_{di}	5680
Εξωτερικές επικαθήσεις h_{do}	2840

$$U_o = \frac{1}{(1,676\ 10^{-2})}\left\{\frac{1}{(1,332\ 10^{-2})(1020)} + \frac{1}{45}\ln\left(\frac{1,676\ 10^{-2}}{1,332\ 10^{-2}}\right) + \frac{1}{(1,676\ 10^{-2})(1700)}\right\}^{-1} = \frac{1}{(1,676\ 10^{-2})}\{0,073603 + 0,035098 + 0,005105\}^{-1} =$$
$$\frac{1}{(1,676\ 10^{-2})}\{0,113806\}^{-1} = \frac{1}{(1,676\ 10^{-2})}\{8,787) = \mathbf{524,2786\ Watt\ m^{-2\,o}K^{-1}}$$

Πίνακας 4.2
Χαρακτηριστικά
Χαλύβδινων
Σωλήνων, IPS
(=Iron Pipe Size)

Nominal pipe size, IPS, in.	OD, in.	Schedule No.	ID, in	Flow area per pipe, in.^{2}	Surface per lin ft, ft.^{2}/ft		Weight per lin ft, lb steel
					Outside	Inside	
1/8	0.405	40* 80+	0.269 0.215	0.058 0.036	0.106	0.070 0.056	0.25 0.32
1/4	0.540	40* 80+	0.364 0.302	0.104 0.072	0.141	0.095 0.079	0.43 0.54
3/8	0.675	40* 80+	0.493 0.423	0.192 0.141	0.177	0.129 0.111	0.57 0.74
1/2	0.840	40* 80+	0.622 0.546	0.304 0.235	0.220	0.163 0.143	0.85 1.09
3/4	1.05	40* 80+	0.824 0.742	0.534 0.432	0.275	0.216 0.194	1.13 1.48
1	**1.32**	**40*** **80+**	**1.049** **0.957**	0.864 0.718	0.344	0.274 0.250	1.68 2.17
1 ¼	1.66	40* 80+	1.380 1.278	1.50 1.28	0.435	0.362 0.335	2.28 3.00
1 ½	1.90	40* 80+	1.610 1.500	2.04 1.76	0.498	0.422 0.393	2.72 3.64
2	2.38	40* 80+	2.067 1.939	3.35 2.95	0.622	0.542 0.508	3.66 5.03
2 ½	2.88	40* 80+	2.469 2.323	4.79 4.23	0.753	0.647 0.609	5.80 7.67
3	3.50	40* 80+	3.068 2.900	7.38 6.61	0.917	0.804 0.760	7.58 10.3

Ρόλος επικαθήσεων

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

Δεδομένα	W /m²°C
Αλκοόλη h_i	1020
Νερό h_o	1700
Εσωτερικές επικαθήσεις $h_{di} = R_{p,\varepsilon\sigma}$	5680
Εξωτερικές επικαθήσεις $h_{do} = R_{p,\varepsilon\sigma}$	2840

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

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

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

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

$$U\sigma\chi = \frac{524{,}27}{(1+(524{,}27) * (0{,}000574))} = \frac{524{,}27}{1{,}3} = \mathbf{403\ Watt\ m^{-2}\,K^{-1}}$$

$$U_o = \mathbf{524{,}27\ Watt\ m^{-2}\ K^{-1}}$$

$$\mathbf{R_{p,\varepsilon\xi}} = \frac{1}{h_{do}} \mathbf{= 1/2840 = 0{,}000352\ m^2\ {}^oC/W}$$

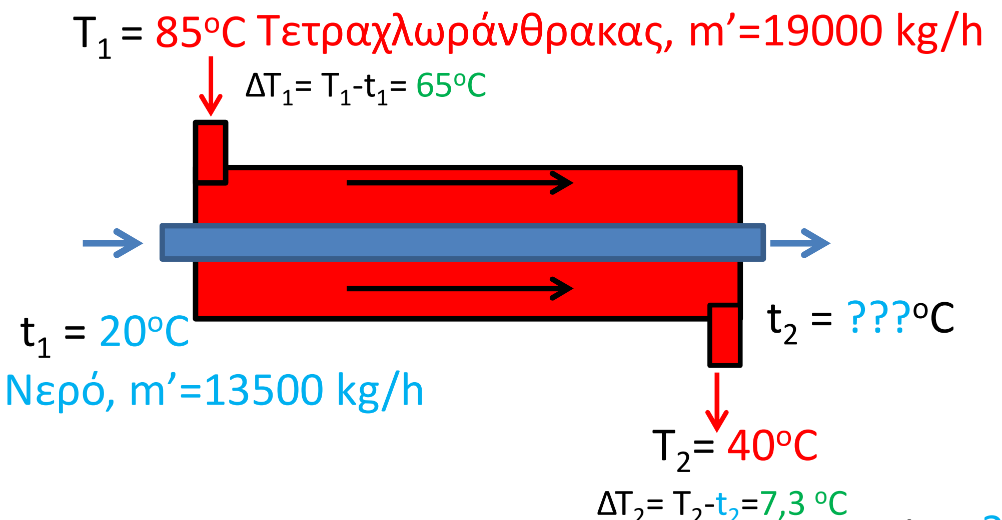
$$\mathbf{R_{p,\varepsilon\sigma}} = \frac{1}{h_{di}} \frac{D_o}{D_i}$$

$$R_{p,\varepsilon\sigma} = \frac{1}{h_{di}} \frac{d_0}{d_i} = \frac{1}{5680} \frac{3{,}353\ 10^{-2}}{2{,}665\ 10^{-2}} = 0{,}000222\mathrm{m^2\ {}^oC/W}$$

$$\mathbf{R_p = R_{p,\varepsilon\sigma} + R_{p,\varepsilon\xi}} = 0{,}000574\ \mathbf{m^2\ K/W}$$

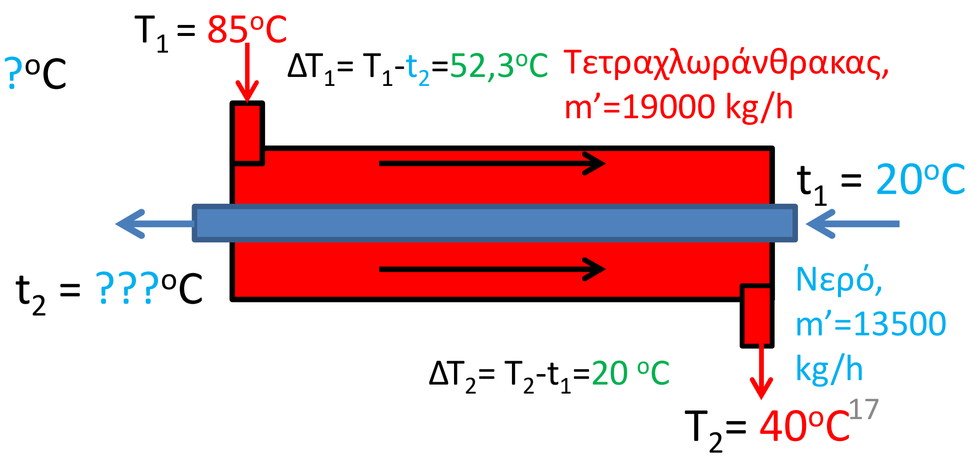
Άσκηση 10.2

Τετραχλωράνθρακας που ρέει με ρυθμό 19000 kg/h πρόκειται να ψυχθεί από τους 85 στους 40°C χρησιμοποιώντας νερό θερμοκρασίας 20°C που ρέει με ρυθμό 13500 kg/h. Ο συντελεστής υμένα για τον τετραχλωράνθρακα στο *εξωτερικό των σωλήνων* είναι $h_o=1700\ \frac{W}{m^2{}^\circ C}$. Η αντίσταση του τοιχώματος είναι αμελητέα. Ο συντελεστής υμένα στην πλευρά του νερού είναι $h_i=11000\ \frac{W}{m^2{}^\circ C}$ συμπεριλαμβανομένων και των επικαθήσεων. Ποια είναι η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας που απαιτείται αν χρησιμοποιηθεί εναλλάκτης που λειτουργεί α) κατ’ αντιρροή και β) κατ’ ομορροή.



Ο συντελεστής υμένα για τον τετραχλωράνθρακα στο εξωτερικό των σωλήνων είναι $h_o=1700\ \frac{W}{m^2{}^\circ C}$

Ο συντελεστής υμένα στην πλευρά του νερού είναι $h_i= 11000\ \frac{W}{m^2{}^\circ C}$ συμπεριλαμβανομένων και των επικαθήσεων



Άσκηση 10.2

- Για το $\mathrm{CCl_4}$ $c_p = 0.837\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{g°C}}$ $\qquad \dot{m} = \frac{19000\cdot 100}{3600} = 5277.8\ \mathrm{g/s}$

$$Q_{\mathrm{CCl_4}} = \dot{m} c_p \Delta T = 5277.8 \cdot 0.837\,(85-40) = 198.788\ \mathrm{kW}$$

- Για το $\mathrm{H_2O}$ $c_p = 4.1868\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{g°C}}$ $\qquad \dot{m} = \frac{11000\cdot 1000}{3600} = 3750\ \mathrm{g/s}$

- Η θερμότητα διατηρείται οπότε: $Q_{\mathrm{CCl_4}} = Q_{\mathrm{H_2O}}$

$$T_c = 20°\mathrm{C} + \frac{Q_{\mathrm{CCl_4}}}{\dot{m} c_p} = 20 + \frac{198788}{(3750 \cdot 4.1868)} = 32.7°\mathrm{C} = \boldsymbol{t_2}$$

$$\boldsymbol{Q_\Theta} = \dot{m}_\theta\, c_{p,\theta}\, \Delta \mathrm{T}_\theta = \boldsymbol{Q_\psi} = \dot{m}_\psi\, c_{p,\psi}\, \Delta \mathrm{T}_\psi = \dot{m}_\psi\, c_{p,\psi}\,(t_2 - t_1)$$

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{h_o}+\frac{1}{h_i}=\frac{1}{1700}+\frac{1}{11000}\Longrightarrow U=1473\,\frac{W}{m^2{}^\circ\mathrm{C}}$$

(αγνοήσαμε την αγωγή μέσω των τοιχωμάτων του σωλήνα)

A) κατ αντιρροή:

$$\Delta T_1=85-32.7=52.3^\circ\mathrm{C}$$

$$\Delta T_2=40-20=20^\circ\mathrm{C}$$

$$\overline{\Delta T_L}=(52.3-20)/\ln(52.3/20)=33.6^\circ\mathrm{C}$$

$$A=\frac{Q}{U\overline{\Delta T_L}}=\frac{198788}{1473\cdot 33.6}=4.02\ \mathrm{m}^2$$

B) κατ ομορροή:

$$\Delta T_1=85-20=65^\circ\mathrm{C}$$

$$\Delta T_2=40-32.7=7.3^\circ\mathrm{C}$$

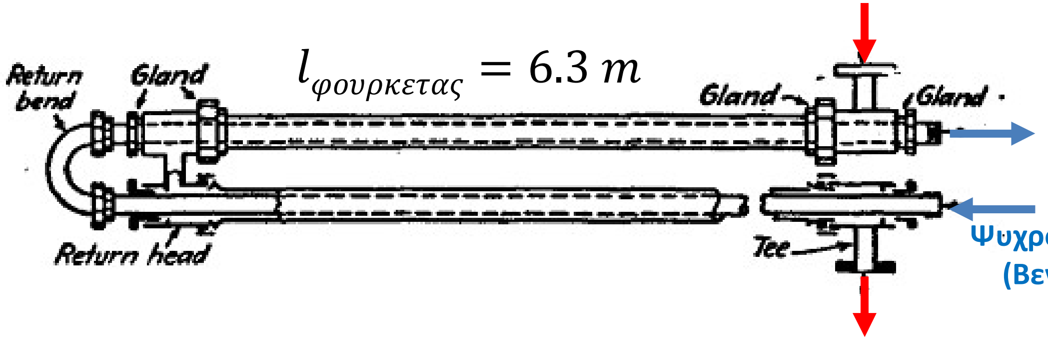
$$\overline{\Delta T_L}=(65-7.3)/\ln(65/7.3)=26.3^\circ\mathrm{C}$$

$A=\frac{Q}{U\overline{\Delta T_L}}=\frac{198788}{1473\cdot 2\ \ .3}=5.13\ \mathrm{m}^2$ > $A_{αντιρροής}$

Παράδειγμα 4ε/Σημειώσεις ΑΧΠ, σελ. 147C

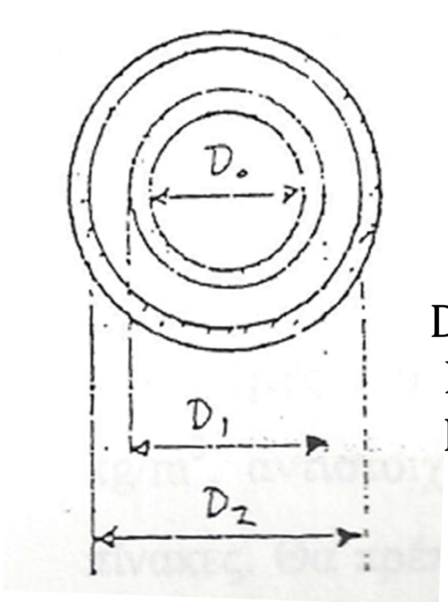
Θέλουμε να θερμάνουμε ένα ρεύμα ψυχρού **βενζολίου**, που έχει μαζική παροχή $\dot{m}_{\psi} = 4455 \frac{kg}{hr} (= 1.238\ kg/s)$ από 27°C σε 50°C. Προς τούτο θα χρησιμοποιήσουμε ένα ρεύμα θερμού **τολουολίου** αρχικής θερμοκρασίας 72°C, ψύχοντάς το σε 38°C. Οι πυκνότητες του βενζολίου και τολουολίου σε 20°C είναι ρ_{ψ}=880 kg/m³ και ρ_{θ}=870 kg/m³, αντίστοιχα. Οι άλλες ιδιότητες των ρευστών αυτών μπορούν να βρεθούν σε πίνακες. Θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας **ένα συντελεστή ρυπάνσεως 0.0002 m²°K/W για *κάθε* ρεύμα.** Η επιτρεπτή πτώση πίεσης σε κάθε ρεύμα είναι 0.75 atm (=73.55 kPa). Διαθέτουμε αρκετές «φουρκέτες» μήκους 6.3 m και με ονομαστικές διαμέτρου D_2=2 in (πραγματική τιμή 2.067 in = 52.5 mm), $D_1 = 1\frac{1}{4}$ in (δηλ. 1.66 in=42.2 mm), ενώ D_0=1.38 in = 35.05 mm. **Πόσες φουρκέτες χρειαζόμαστε**; (Προφανώς, χρειαζόμαστε αντιρροή.)

Θερμό Ρευστό (τολουόλιο)



$l_{φουρκετας} = 6.3\ m$

Ψυχρό Ρευστό (Βενζόλιο)



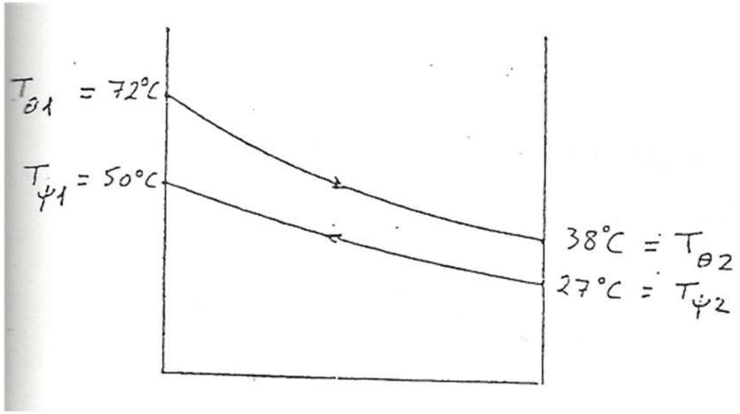
$$D_0 = 35.05\ 10^{-3} m$$
$$D_1 = 42.2\ 10^{-3} m$$
$$D_2 = 52.5\ 10^{-3} m$$

$$T_{\theta 1} = 72^o\ C, T_{\theta 2} = 38^o\ C$$
$$T_{\psi 1} = 27^o\ C, T_{\psi 2} = 50^o\ C$$
$$\dot{m}_{\psi} = 4455 \frac{kg}{hr} (= 1.238\ kg/s)$$
$$\boxed{\dot{m}_{\theta} = ?}$$

Παράδειγμα 4ε/Σημειώσεις ΑΧΠ, σελ. 147 / (Εναλλάκτης διπλού αυλού, αντιρροή)

Βήμα 1ο. Ισοζύγιο Ενέργειας (Υπολογισμοί παροχών, θερμοκρασιών, ποσού ενέργειας εναλλαγής)

$$[m_\theta, m_\psi, T_{\theta 1}, T_{\theta 2}, T_{\psi 1}, T_{\psi 2}, Q_\theta, (= Q_\psi)]$$



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

Τα $c_{p\theta}, c_{p\psi}, \mu\theta, \mu\psi, \rho\theta, \kappa\alpha\iota\ \rho\psi$ πρέπει να υπολογιστούν στις μέσες θερμοκρασίες

$$T_{\theta,\mu\varepsilon\sigma\eta} = \frac{1}{2}(72 + 38) = 55^o C$$

$$T_{\psi,\mu\varepsilon\sigma\eta} = \frac{1}{2}(50 + 27) = 38.5^o C$$

Από πίνακες: $c_{p\theta} = c_{p\theta}\big)_{55^o C} = 1840\ J/kg\ ^oK$ $\quad c_{p\psi} = c_{p\psi}\big)_{38.5^o C} = 1780\ J/kg\ ^oK$

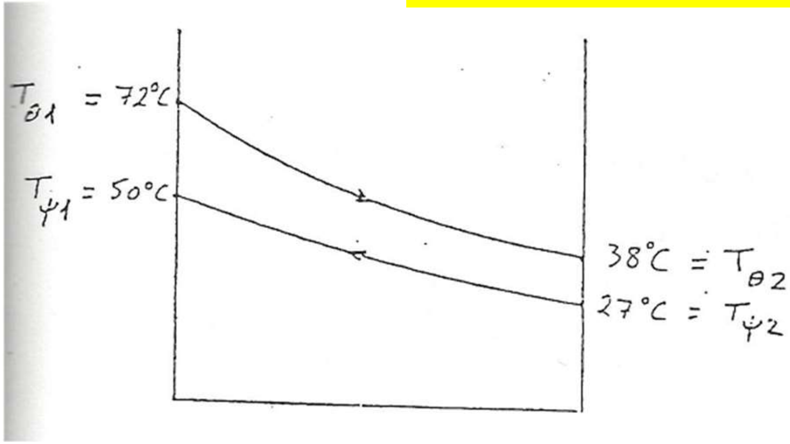
$$Q = \dot{m}_\psi c_{p\psi} (T_{\psi 1} - T_{\psi 2}) = 1.238 \times 1780 (50 - 27) = \boxed{50.66 \times 10^3\ W}$$

$$\dot{m}_\theta = \frac{Q}{c_{p\theta}(T_{\theta 1} - T_{\theta 2})} = 50.66 \times \frac{10^3}{1840(72 - 38)} = \boxed{0.8098\ kg/s} = 2915\ kg/hr$$

Παράδειγμα 4ε/Σημειώσεις ΑΧΠ, σελ. 147 / <u>(Εναλλάκτης διπλού αυλού, αντιρροή)</u>

Βήμα 2ον: Υπολογισμός Μέσης Λογαριθμικής θερμοκρασίας, ΔT_{lm}

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



$$(\Delta T)_{\ell m} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ell n \dfrac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

$$\Delta T_1 = T_{\theta 1} - T_{\psi 1} = 72 - 50 = 22\ {}^oK$$

$$\Delta T_2 = T_{\theta 2} - T_{\psi 2} = 38 - 27 = 11\ {}^oK$$

$$(\Delta T)_{\ell m} = \frac{22-11}{\ell n\left(\dfrac{22}{11}\right)} = 15.87\ {}^oK$$

<u>Θερμοκρασίες Μίξεως</u>

Και τα δύο ρευστά είναι λεπτόρευστα στο ψυχρό άκρο του εναλλάκτη (τα ιξώδη είναι μικρότερα του 1 c_p=1 mPa.s). Επιπλέον, οι διαφορές θερμοκρασίας είναι μέτριες. Έτσι, οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας $h_{\varepsilon\sigma}$ και $h_{\varepsilon\xi}$ μπορούν να υπολογισθούν από τις ιδιότητες στις αντίστοιχες μέσες θερμοκρασίες, η δε τιμή του όρου $(\mu_b/\mu_w)^{0.14}$ θα ληφθεί ως 1.0.

Παράδειγμα 4ε/Σημειώσεις ΑΧΠ, σελ. 147 / (Εναλλάκτης διπλού αυλού, αντιρροή)

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

Βήμα 3ον: Υπολογισμός συντελεστών μεταφοράς θερμότητας στο θερμό, h_θ και στο ψυχρό ρεύμα, h_ψ

$$h_\theta = j_{H\theta} \frac{k_\theta}{D_e} (Pr_b)_\theta^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_\theta^{0.14} \qquad j_H = 0.026 Re_b^{0.8} \qquad h_\psi = j_{H\psi} \frac{k_\psi}{D_0} (Pr_b)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_\psi^{0.14}$$

$$Re_\theta = 59550 \xrightarrow[\text{Tate}]{\text{Διαγραμμα Sieder}} j_H \cong 170 \qquad Re_\psi = 89940 \xrightarrow[\text{Tate}]{\text{Διαγραμμα Sieder}} j_H \cong 235$$

Θερμό Ρευστό (Τολουόλιο)	Ψυχρό Ρευστό (Βενζόλιο)
Δακτυλιοειδής Αγωγός	Εσωτερικός Αγωγός

(4) Επιφάνεια για Ροή

$$S_\theta = \frac{1}{4}\pi (D_2^2 - D_1^1)$$

$$= \frac{\pi}{4}(0.0525^2 - 0.0422^2)$$

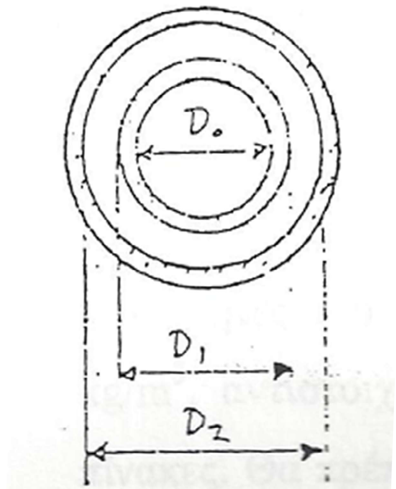
$$= 766 \times 10^{-6} \ m^2$$

$$D_e = \frac{(D_2^2 - D_1^2)}{D_1}$$

$$= \frac{(0.0525^2 - 0.0422^2)}{0.0422}$$

$$= 23.1 \times 10^{-3} \ m$$

$$S_\psi = \frac{1}{4}\pi D_0^2 = \frac{\pi}{4} 0.03505^2 = 965 \times 10^{-6} \ m^2$$



D_0=1.38 in = 35.05 mm= 35.05 10^{-3} m

Παράδειγμα 4ε/Σημειώσεις ΑΧΠ, σελ. 147 / (Εναλλάκτης διπλού αυλού, αντιρροή)

Βήμα 3ον: Υπολογισμός συντελεστών μεταφοράς θερμότητας στο θερμό, h_θ και στο ψυχρό ρεύμα, h_ψ

Θερμό Ρευστό (Τολουόλιο)	Ψυχρό Ρευστό (Βενζόλιο)
Δακτυλιοειδής Αγωγός	Εσωτερικός Αγωγός

(5) Μαζική Ταχύτητα (=ρ V)

$$G_\theta = \frac{\dot{m}_\theta}{S_\theta} = \frac{0.8098}{766\times10^{-6}} = 1057\ kg/m^2 s$$

$$G_\psi = \frac{\dot{m}_\psi}{S_\psi} = \frac{1.238}{965\times10^{-6}} = 1283\ kg/m^2 s$$

(6) Αριθμός του Reynolds {f (G, D, μ)}

$$\mu_\theta = \mu_\theta\big)_{55^o C} \overset{\substack{\pi\iota\nu\alpha\kappa\varepsilon\varsigma \\ \downarrow}}{=} 0.41\,\text{mPa.s}$$

$$Re_\theta = (Re_b)_\theta = \frac{D_e G_\theta}{\mu_\theta} = \frac{23.1\times10^{-3}\times1057}{0.41\times10^{-3}} = 59550$$

$$\mu_\psi = \mu_\psi\big)_{38.5^o C} \overset{\substack{\pi\iota\nu\alpha\kappa\varepsilon\varsigma \\ \downarrow}}{=} 0.50\,\text{mPa.s}$$

$$Re_\psi = (Re_b)_\psi = \frac{D_0 G_\psi}{\mu_\psi} = \frac{35.05\times10^{-3}\times1283}{0.50\times10^{-3}} = 89940$$

(7) Συντελεστής j_H του Colburn

$$Re_\theta = 59550 \xrightarrow[\text{Tate}]{\substack{\Delta\iota\alpha\gamma\rho\alpha\mu\mu\alpha \\ \text{Sieder}}} j_H \cong 170$$

ή $$j_{H_\theta} = 0.026\,Re_\theta^{0.8} = 0.026\times59550^{0.8} = 172$$

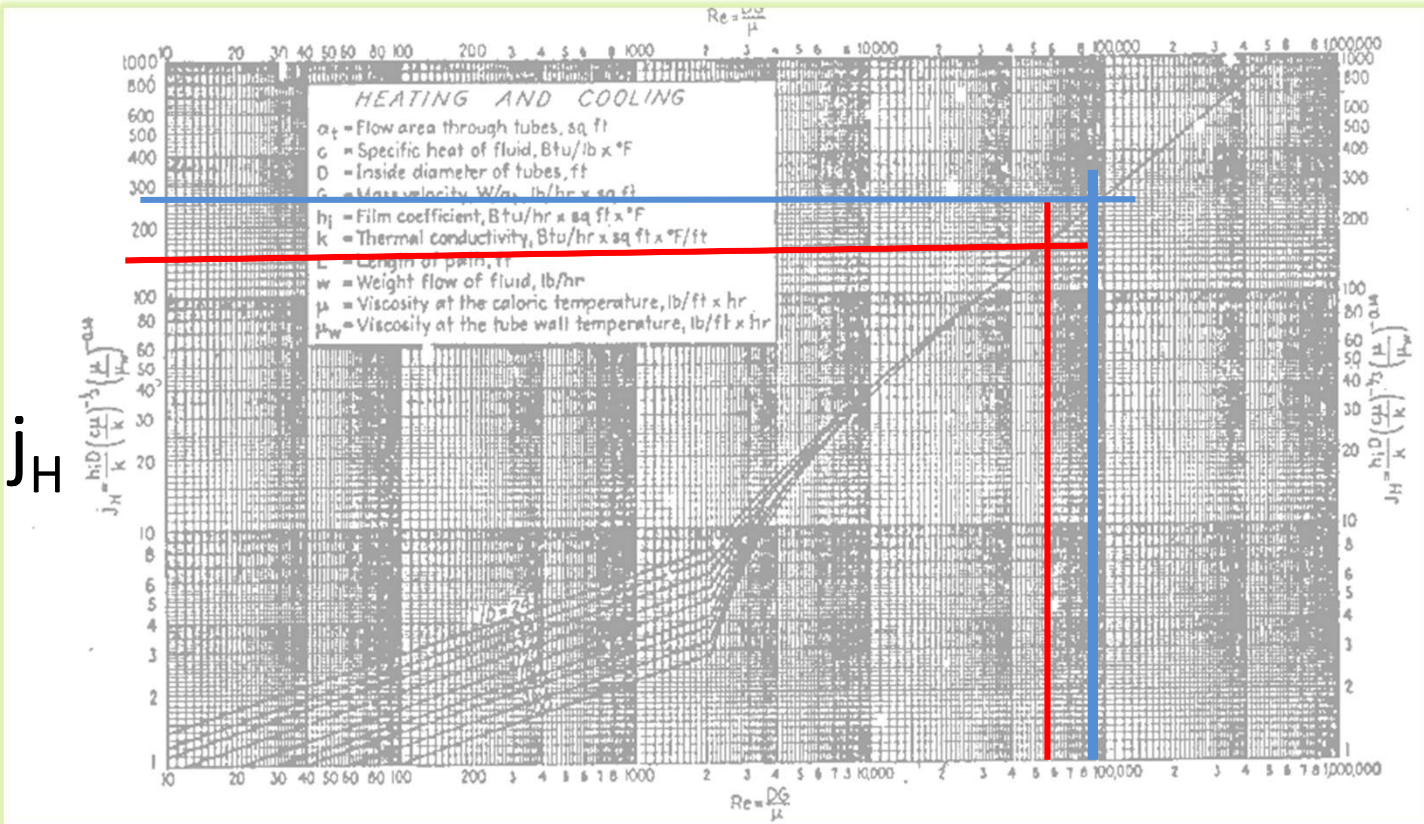
$$Re_\psi = 89940 \xrightarrow[\text{Tate}]{\substack{\Delta\iota\alpha\gamma\rho\alpha\mu\mu\alpha \\ \text{Sieder}}} j_H \cong 235$$

ή $$j_{H_\psi} = 0.026\ Re_\psi^{0.8} = 0.026\times89940^{0.8} = 239$$

Παράδειγμα 4ε/Σημειώσεις ΑΧΠ, σελ. 147 / (Εναλλάκτης διπλού αυλού, αντιρροή)

Βήμα 3ον: Υπολογισμός συντελεστών μεταφοράς θερμότητας στο θερμό, h_θ και στο ψυχρό ρεύμα, h_ψ

j_H



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

Παράδειγμα 4ε/Σημειώσεις ΑΧΠ, σελ. 147 / (Εναλλάκτης διπλού αυλού, αντιρροή)

Βήμα 3ον: Υπολογισμός συντελεστών μεταφοράς θερμότητας στο θερμό, h_θ και στο ψυχρό ρεύμα, h_ψ

Θερμό Ρευστό (Τολουόλιο)	Ψυχρό Ρευστό (Βενζόλιο)
Δακτυλιοειδής Αγωγός (De)	Εσωτερικός Αγωγός (Do)

(8) Αριθμός του Prandtl

$$c_{p\theta} = c_{p\theta}\Big)_{55^o C} = 1840\ J/kg\ ^oK$$

$$k_\theta = k_\theta\Big)_{55^o C} \overset{\substack{\pi\iota\nu\alpha\kappa\varepsilon\varsigma \\ \downarrow}}{=} 0.147\ W/m^oK$$

$$(Pr_b)_\theta = \frac{c_{p\theta}\mu_\theta}{k_\theta}$$

$$= \frac{1840 \times 0.41 \times 10^{-3}}{0.147} = 5.13$$

$$c_{p\psi} = c_{p\psi}\Big)_{38.5^o C} = 1780\ J/kg\ ^oK$$

$$k_\psi = k_\psi\Big)_{38.5^o C} \overset{\substack{\pi\iota\nu\alpha\kappa\varepsilon\varsigma \\ \downarrow}}{=} 0.157\ W/m^oK$$

$$(Pr_b)_\psi = \frac{c_{p\psi}\mu_\psi}{k_\psi}$$

$$= \frac{1780 \times 0.50 \times 10^{-3}}{0.157} = 5.65$$

9) Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας

$$h_\theta = j_{H\theta}\frac{k_\theta}{D_e}(Pr_b)_\theta^{1/3}\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_\theta^{0.14}$$

$$= 172\frac{0.147}{0.0231}(5.13)^{1/3}\,1.0$$

$$= 1888\ W/m^{2\,o}K$$

Από την Εξισ. Sieder & Tate:

$$h_\psi = j_{H\psi}\frac{k_\psi}{D_0}(Pr_b)^{1/3}\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)_\psi^{0.14} = 239\frac{0.157}{0.03505}(5.65)^{1/3}\,1.0$$

$$= 1907\ W/m^{2\,o}K$$

Διόρθωση Επιφανείας

$$h_{\psi,\varepsilon\xi} = h_\psi\frac{D_0}{D_1} = 1907\frac{35.05}{42.2} = 1584\ W/m^{2\,o}K$$

Παράδειγμα 4ε/Σημειώσεις ΑΧΠ, σελ. 147 / (Εναλλάκτης διπλού αυλού, αντιρροή)

Βήμα 4ον: Υπολογισμός ολικού συντελεστών μεταφοράς θερμότητας- Απαιτούμενη Επιφάνεια

11) Ολικός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας $U_{εξ}$

$$U_{εξ} = \left(\frac{1}{h_θ} + \frac{1}{h_{ψ,εξ}} \right)^{-1} = \frac{h_θ h_{ψ,εξ}}{h_θ + h_{ψ,εξ}} = \frac{1888 \times 1584}{1888 + 1584} = 862\, W/m^{2\,o} K$$

(12) Ολικός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας για Σχεδιασμό $U_{εξ,σχ}$

$$U_{εξ,σχ} = \frac{U_{εξ}}{1 + R_ρ U_{εξ}} \qquad R_ρ = R_{ρ,εξ} + R_{ρ,εσ}$$

$$R_ρ = 0.0002 + 0.0002 = 0.0004\, m^2\, K/W$$

$$U_{εξ,σχ} = \frac{862}{1 + 0.0004 \times 862} = \frac{862}{1 + 0.345} = 641\ \mathrm{W/m^2 \quad K}$$

(12) Απαιτούμενη Επιφάνεια

$$Q = U_{εξ,σχ} A_{εξ} (\Delta T)_{\ell m} \quad \Rightarrow \quad A_{εξ} = \frac{Q}{U_{εξ,σχ} (\Delta T)_{\ell m}} \qquad A_{εξ} = \frac{50.66 \times 10^3}{641 \times 15.87} = 4.98\, m^2$$

Απαιτούμενος Αριθμός Φουρκετών, Η εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα ανά φουρκέτα είναι $A_ϕ = 2πD_1 \ell_ϕ$ όπου $\boldsymbol{l_φ}$, το μήκος μιας φουρκέττας (μισή φουρκέτα)

$A_ϕ = 2π \times 0.0422 \times 6.3 = 1.67\, m^2$ Τώρα $\frac{A_{εξ}}{A_ϕ} = \frac{4.98}{1.67} = 2.98$ Αρα, **χρειαζόμαστε 3 φουρκέτες**.

Επειδή $3A_ϕ = 5.01\,\mathrm{m}^2 > A_{εξ}$ βλέπουμε ότι ο συντελεστής ρυπάνσεως $R_ρ$ θα είναι κάπως μεγαλύτερος από την προδιαγραφή, δηλαδή έχουμε μεγαλύτερη ασφάλεια.

Παράδειγμα 4ε/Σημειώσεις ΑΧΠ, σελ. 147 / (Εναλλάκτης διπλού αυλού, αντιρροή)

(12) **Πτώση Πιέσεως (Αμελώντας τις υψομετρικές διαφορές παίρνουμε:**

Θερμό Ρευστό (Τολουόλιο)	Ψυχρό Ρευστό (Βενζόλιο)
Δακτυλιοειδής Αγωγός	Εσωτερικός Αγωγός

$$D_\upsilon = D_2 - D_1$$ (υδραυλική διάμετρος)

$$= 0.0525 - 0.042 = 10.5\times10^{-3}\ \mathrm{m}$$

$$Re_{\upsilon,\theta} = \frac{D_\upsilon G_\theta}{\mu_\theta} = \frac{10.5\times10^{-3}\times1057}{0.041\times10^{-3}} = \mathit{27070}$$

Για λείο αγωγό $\left(\frac{e}{D_\upsilon} \cong 10^{-6}\right)$

$$f_\theta = \mathit{0.024}$$

Αμελώντας τις ελάσσονες απώλειες

$$(\Delta p)_\theta = \rho_\theta f_\theta \frac{6\ell_\phi}{D_\upsilon}\frac{1}{2} < v_\theta >^2 \qquad G_\theta = \rho_\theta < v_\theta >$$

$$(\Delta p)_\theta = f_\theta \frac{6\ell_\phi}{D_\upsilon}\frac{G_\theta^2}{2\rho_\theta} = 0.024\frac{6\times6.3}{10.5\times10^{-3}}\frac{1057^2}{2\times870}$$

$$= 55.5\times10^3\ \mathrm{Pa} = 55.5\ \mathrm{kPa}$$

$$(\Delta p)_\theta = 55.5\ \mathrm{kPa} = \mathit{0.566\ atm}$$

$Re_\psi = \mathit{89940}$ (από το 6° τμήμα του 3^ου^ βήματος)

Για λείο αγωγό $\left(\frac{e}{D_\upsilon} \cong 10^{-6}\right)$

$$f_\psi = \mathit{0.0185}$$

$$(\Delta p)_\psi = \rho_\psi f_\psi \frac{6\ell_\phi}{D_o}\frac{1}{2} < v_\psi >^2 \qquad G_\psi = \rho_\psi < v_\psi >$$

$$(\Delta p)_\psi = f_\psi \frac{6\ell_\phi}{D_o}\frac{G_\psi^2}{2\rho_\psi} = 0.0185\frac{6\times6.3}{35.05\times10^{-3}}\frac{1283^2}{2\times880}$$

$$= 18.7\times10^3\ \mathrm{Pa} = 18.7\ \mathrm{kPa}$$

$$(\Delta p)_\psi = 18.7\ \mathrm{kPa} = \mathit{0.190\ atm}$$

Παράδειγμα 4ε/ Σημειώσεις ΑΧΠ, σελ. 147 / <u>(Εναλλάκτης διπλού αυλού, αντιρροή)</u>

(12) **<u>Πτώση Πιέσεως</u> :**

Θερμό Ρευστό (Τολουόλιο) Δακτυλιοειδής Αγωγός	Ψυχρό Ρευστό (Βενζόλιο) Εσωτερικός Αγωγός
$(\Delta p)_{\theta} = 55.5\,\text{kPa} = 0.566\,atm$	$(\Delta p)_{\psi} = 18.7\,\text{kPa} = 0.190\,atm$

Η πτώση πιέσεως και στους δύο αγωγούς είναι αρκετά χαμηλότερη από την επιτρεπτή < 0.75 atm. Έχουμε περιθώριο για τις ελάσσονες απώλειες (που αγνοήσαμε) καθώς και για μια μικρή αύξηση της τραχύτητας λόγω ρυπάνσεως των επιφανειών.