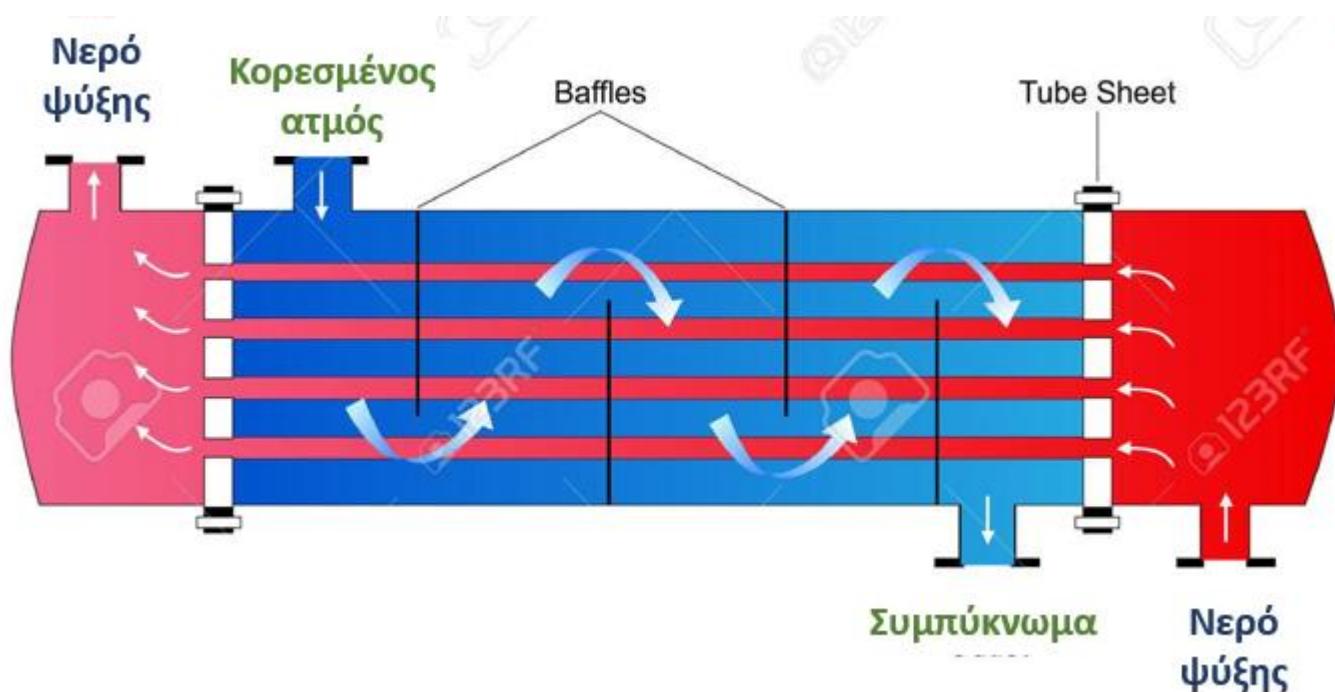


*Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας κατά τη συμπύκνωση*

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

- Συμπυκνωτές αποστακτικών στηλών
- Εναλλάκτες κλιματιστικών μονάδων
- Συμπυκνωτές κενού σε ΑΗΣ
- Συσκευές που λειτουργούν με ατμό θέρμανσης

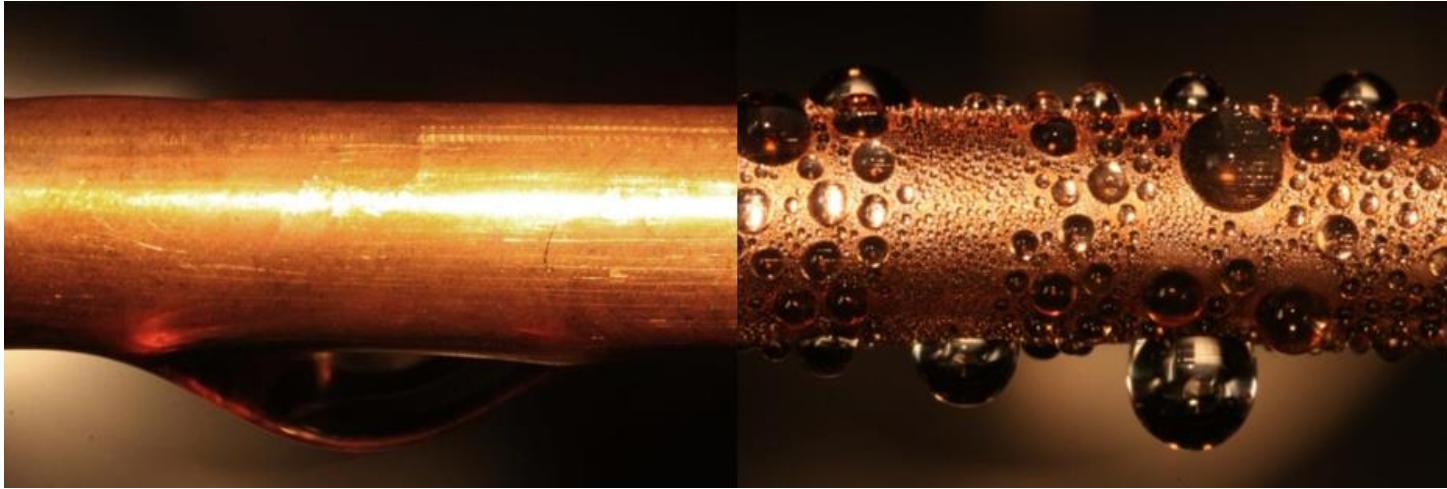


$$Q = UA (T_o - T_i), \quad \frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x}{k_w} + \frac{1}{h_o}$$

$$h_o = ?$$

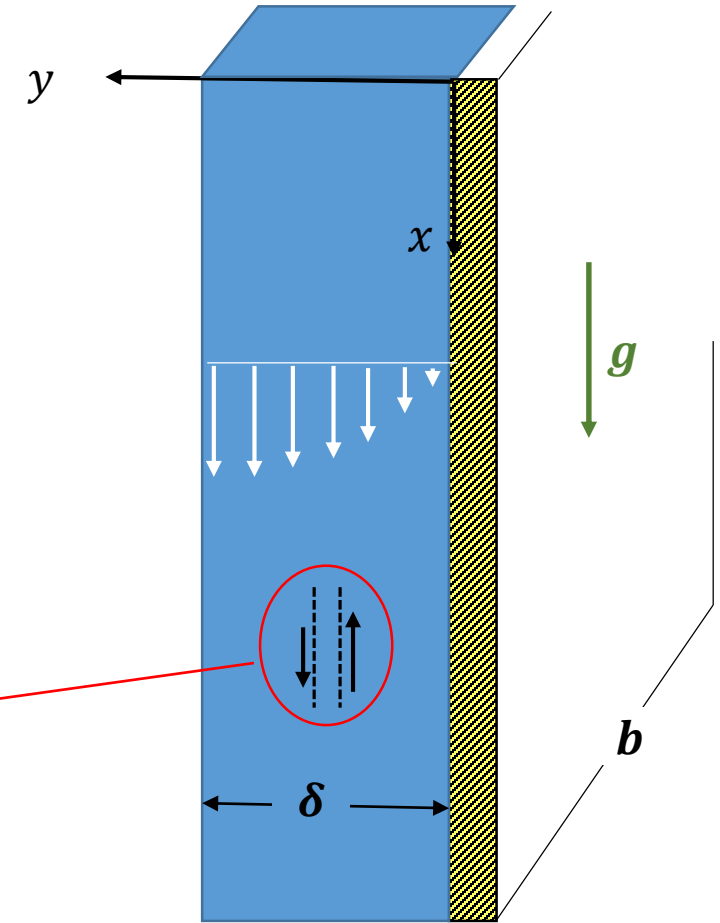
Από ποιες μεταβλητές/φαινόμενα εξαρτάται ο συντελεστής μεταφοράς κατά τη συμπύκνωση;

# Συμπύκνωση (και ροή) υγρού υμένα



Συμπύκνωση υμένα

Συμπύκνωση σταγόνων

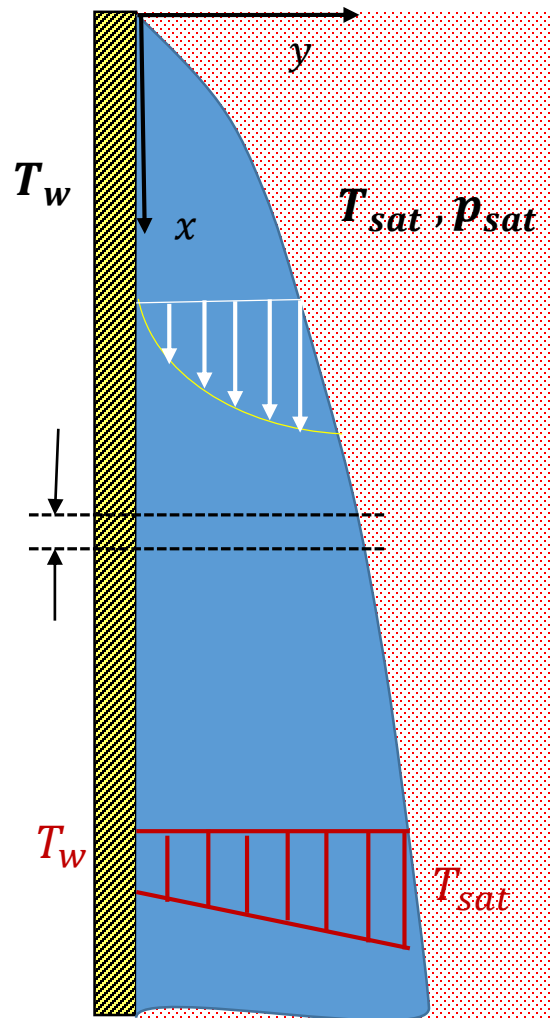


Ισοζύγιο ορμής:  $\mu \frac{d^2 u}{dy^2} + (\rho_l - \rho_g)g = 0$  (Ισορροπία ιξωδών και βαρυτικών δυνάμεων)

$$u(y) = \frac{(\rho_l - \rho_g)g\delta^2}{\mu_l} \left( \frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \frac{y^2}{\delta^2} \right) \Rightarrow m = b\Gamma = \int_0^\delta \rho_l u(y) b dy \Rightarrow$$

$$\Gamma = \frac{m}{b} = \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_g) g \delta^3}{3 \mu_l}$$

# Το Βασικό Θερμικό Ισοζύγιο



Γιατί αυξάνεται το πάχος του υγρού υμένα προς τα κάτω (στην κατεύθυνση της βαρύτητας);

$$dm = dQ/\lambda, \quad \lambda \equiv h_{lg}$$

Προσέγγιση ψευδο-μόνιμης ροής (ως προς  $x$ ):

$$\Gamma(x) = \frac{m(x)}{b} = \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_g)g\delta(x)^3}{3\mu_l}$$

Συνοριακές συνθήκες θερμοκρασίας στα άκρα του υγρού υμένα

$$\frac{k_l}{\delta}(T_{sat} - T_w)(b dx) = \lambda b d\Gamma = \lambda b \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_g)g\delta^2}{\mu_l} d\delta \Rightarrow \delta^3 d\delta = \left[ \frac{\mu_l(T_{sat} - T_w)}{\lambda\rho_l(\rho_l - \rho_g)g} \right] dx$$

$$\Rightarrow \delta(x) = \left[ \frac{4k_l\mu_l(T_{sat} - T_w)x}{\lambda\rho_l(\rho_l - \rho_g)g} \right]^{1/4}, \quad h(x) = \frac{k_l}{\delta(x)}$$

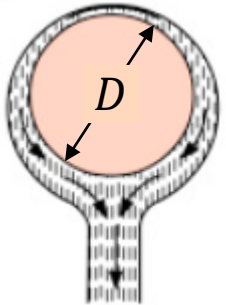
$$\bar{h}_L = \frac{1}{L} \int_0^L h(x) dx = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{k_l}{\delta(x)} dx = 0,943 \left[ \frac{k_l^3 \lambda \rho_l (\rho_l - \rho_g) g}{\mu_l L (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4}$$

# Συντελεστής συμπύκνωσης συναρτήσει $Nu$ και $Re$

## Κατακόρυφος αυλός

$$\bar{h}_L = 0,943 \left[ \frac{k_l^3 \lambda \rho_l (\rho_l - \rho_g) g}{\mu_l L (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4}$$

## Οριζόντιος αυλός



$$\bar{h}_D = 0,725 \left[ \frac{k_l^3 \lambda \rho_l (\rho_l - \rho_g) g}{\mu_l D (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4}$$

$$\frac{\bar{h}_D}{\bar{h}_L} = \frac{0,725}{0,943} \left( \frac{L}{D} \right)^{1/4} > 1$$

## Εναλλακτική διατύπωση για κατακόρυφο και οριζόντιο αυλό

Συνολική φόρτιση αυλού ανά μονάδα εύρους:

- Κατακόρυφος αυλός:  $G' = W / \pi D$   $G' = \Gamma(L)$
- Οριζόντιος αυλός:  $G' = W / L$   $G' = \Gamma(D)$

$$Q = \bar{h} (\pi D L) (T_{sat} - T_w) = W \lambda$$

$$\frac{\bar{h}}{k_l} \left( \frac{\mu_l^2}{\rho_l (\rho_l - \rho_g) g} \right)^{1/3} = 1,5 \left( \frac{4G'}{\mu_l} \right)^{-1/3}$$

$$Re = \frac{4G'}{\mu_l}$$

$$Nu = \frac{\bar{h}}{k_l} \left( \frac{\mu_l^2}{\rho_l (\rho_l - \rho_g) g} \right)^{1/3} \approx \frac{\bar{h}}{k_l} \left( \frac{\nu_l^2}{g} \right)^{1/3} = \frac{\bar{h} l_{cond}}{k_l}$$

## Υπόψυκτο συμπύκνωμα

$$\lambda' = \lambda + 0,68 c_{p,l}(T_{sat} - T_w) = \lambda (1 + 0,68 Ja), \quad Ja = c_{p,l}(T_{sat} - T_w)/\lambda$$

## Κυματισμοί και τύρβη

← Laminar

← Laminar wavy

← Turbulent

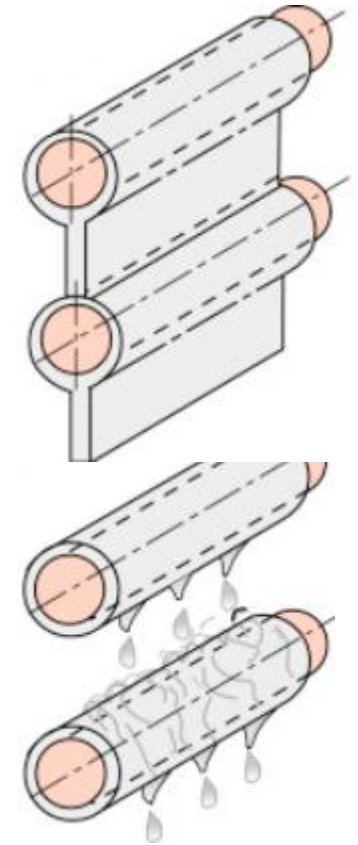
$$Nu = \frac{\bar{h}}{k_l} \left( \frac{\mu_l^2}{\rho_l(\rho_l - \rho_g)g} \right)^{1/3} = 1,5 \left( \frac{4G'}{\mu_l} \right)^{-1/3} = 1,5 Re^{-1/3}, \quad Re \leq 30$$

$$Nu = \frac{Re}{1,08 Re^{1,22} - 5,2}, \quad 30 \leq Re \leq 1800$$

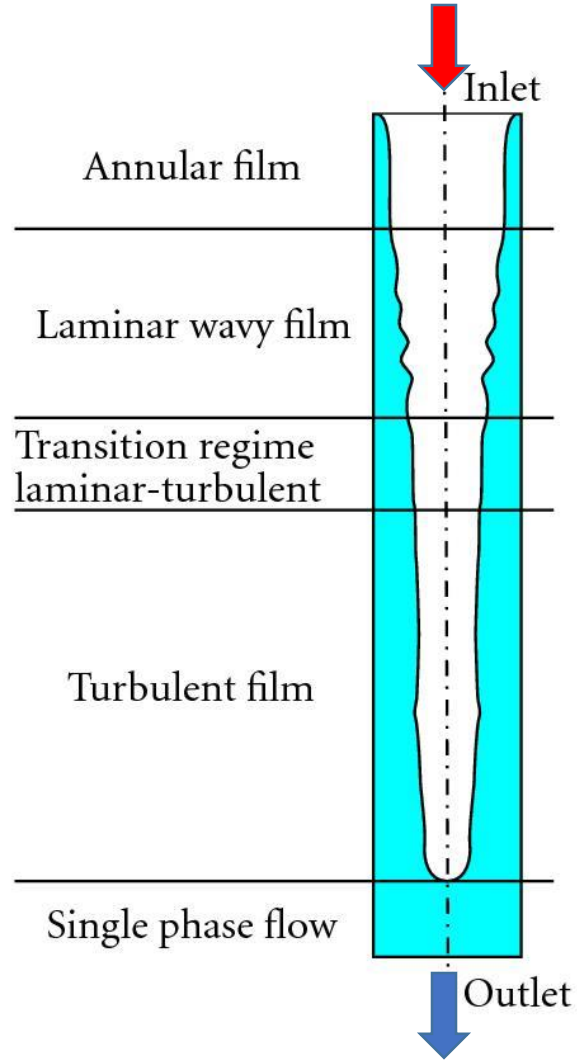
$$Nu = \frac{Re}{8750 + 58 Pr^{-0,5}(Re^{0,75} - 253)}, \quad Re \geq 1800$$

## Συστοιχία αυλών

$$\bar{h} = \bar{h}_1 N_s^{-1/6}$$



# Συμπύκνωση στο εσωτερικό αυλού

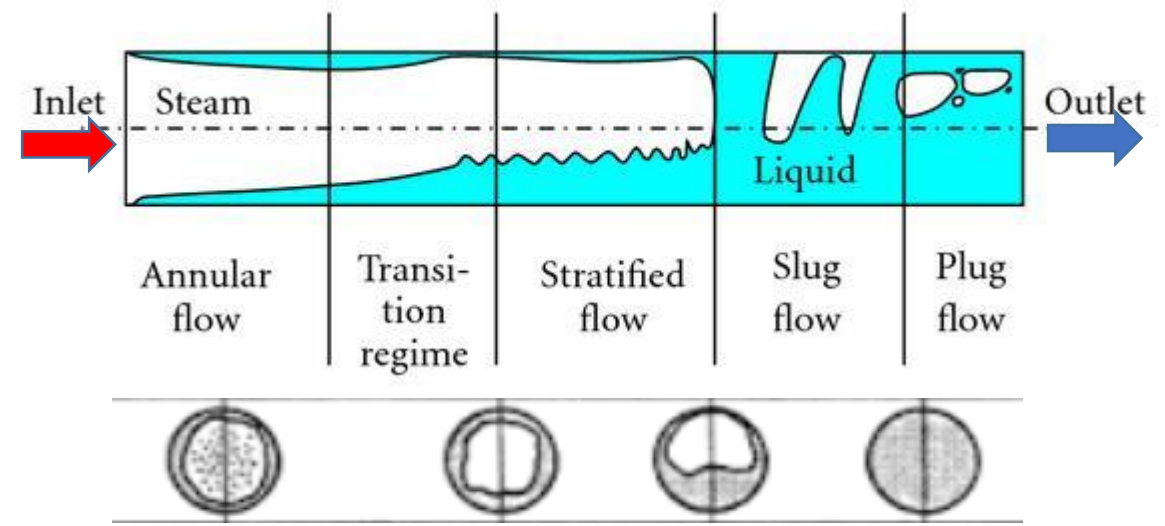


## Επίδραση διάτμησης

$$\bar{h} = (h_{gr}^2 + h_{shear}^2)^{1/2} \quad \frac{h_{shear}}{h_{sl}} = 1,26 \left( \frac{1}{X_{tt}} \right)^{0,78}$$

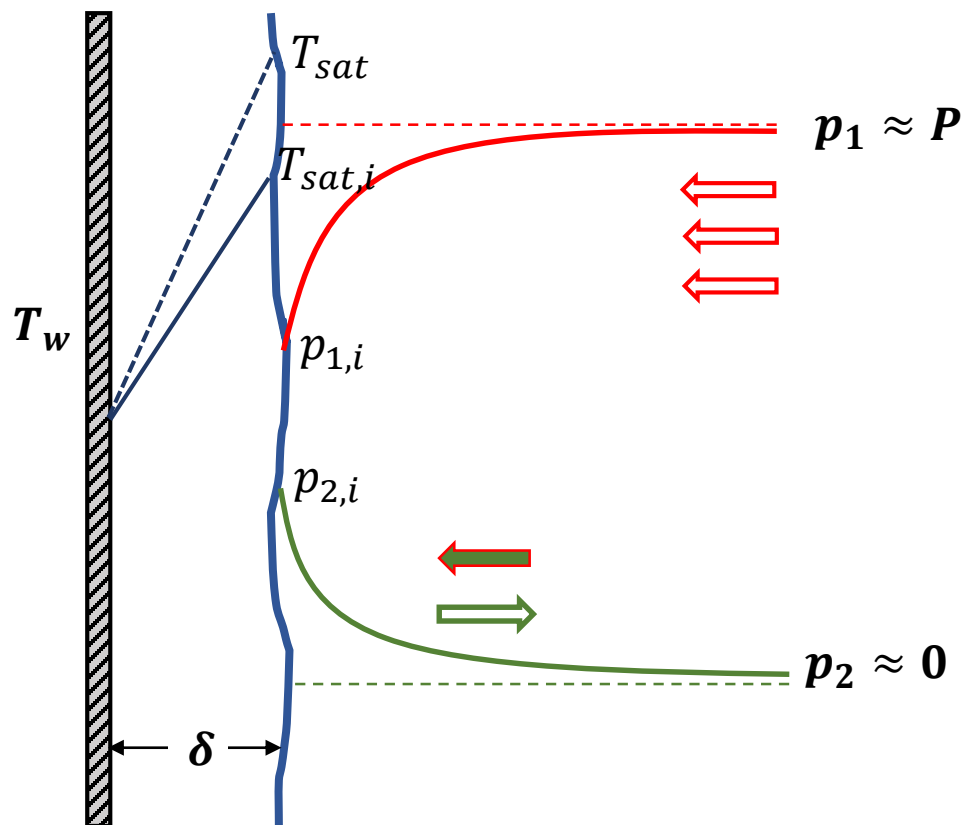
## Επίδραση συσσώρευσης σε οριζόντιο αυλό

$$G' = \frac{(W/N_t)}{(L/2)} = \frac{2W}{N_t L}$$



# Ατμός και μη-συμπυκνώσιμα αέρια (NCG)

Μικρή συγκέντρωση αέρα στον ατμό συσσωρεύεται στη διεπιφάνεια με το συμπύκνωμα και σχηματίζει μονωτικό στρώμα



## Ισορροπία υγρού αέρα - συμπυκνώματος

$$p_{H_2O} = y_{H_2O}P = p_{sat}(T_{sat})$$

(1):  $H_2O$  , (2):  $NCG$

$$p_1 = y_1P = p_{sat}(T_{sat})$$

$$p_{1,i} = y_{1,i}P = p_{sat}(T_{sat,i})$$

$$P = p_1 + p_2 = p_{1,i} + p_{2,i}$$

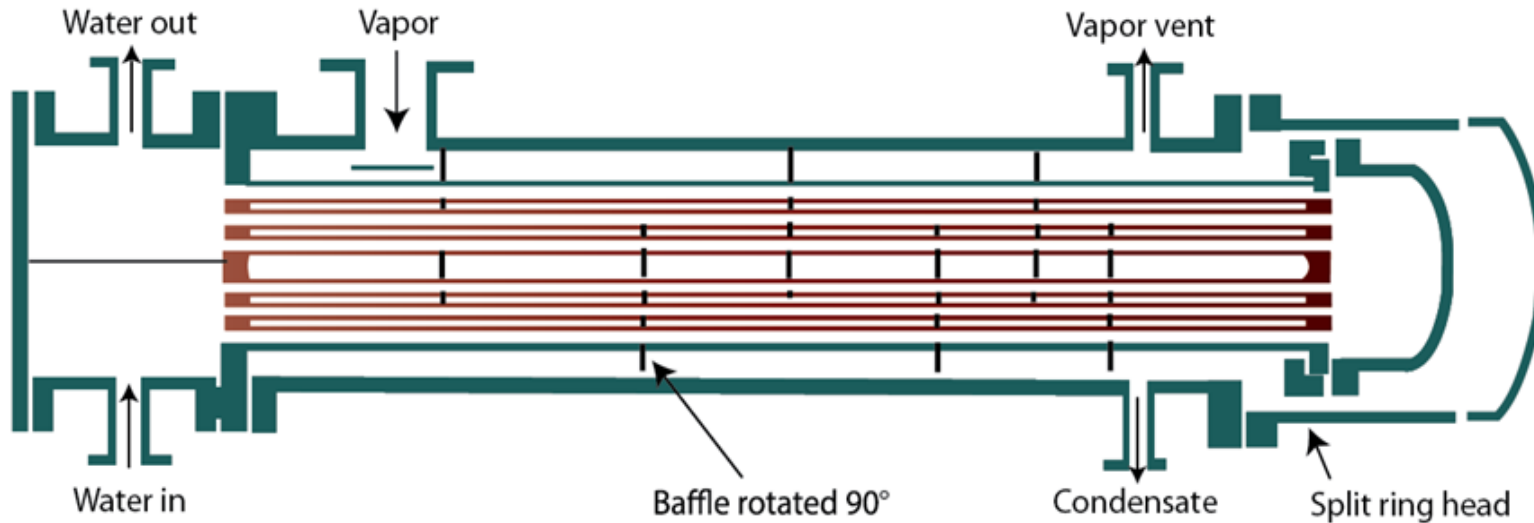
$$\frac{Q}{A} = \frac{k_l}{\delta} (T_{sat,i} - T_w)$$

$$\frac{m_1}{A} = \frac{PM_1}{RT} k_g \ln \left( \frac{p_{2,i}}{p_2} \right)$$

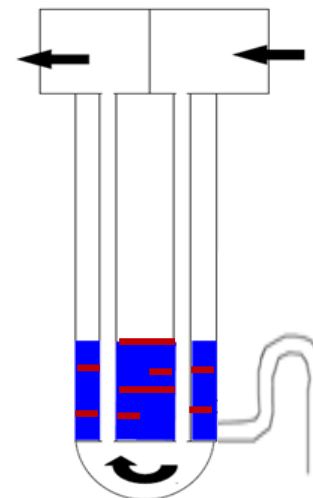
$$Q = m_1 \lambda \Rightarrow T_{sat,i}$$



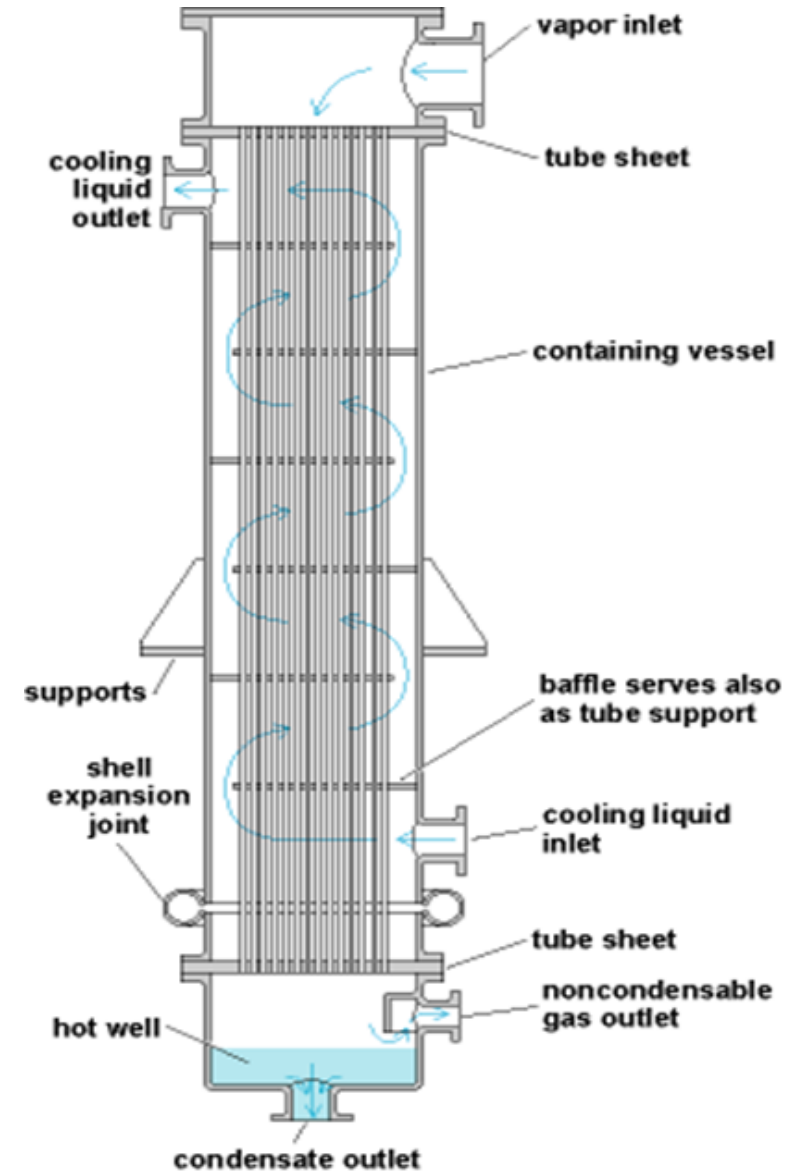
## Οριζόντιος συμπυκνωτής κελύφους



- Προστασία αυλών από τον ατμό στην είσοδο
- Διάκενο ανακλαστήρων δεξιά/αριστερά (όχι πάνω/κάτω)
- Ανακλαστήρες σε ανομοιόμορφες αποστάσεις
- Πρόβλεψη διαφυγής μη-συμπυκνώσιμων αερίων

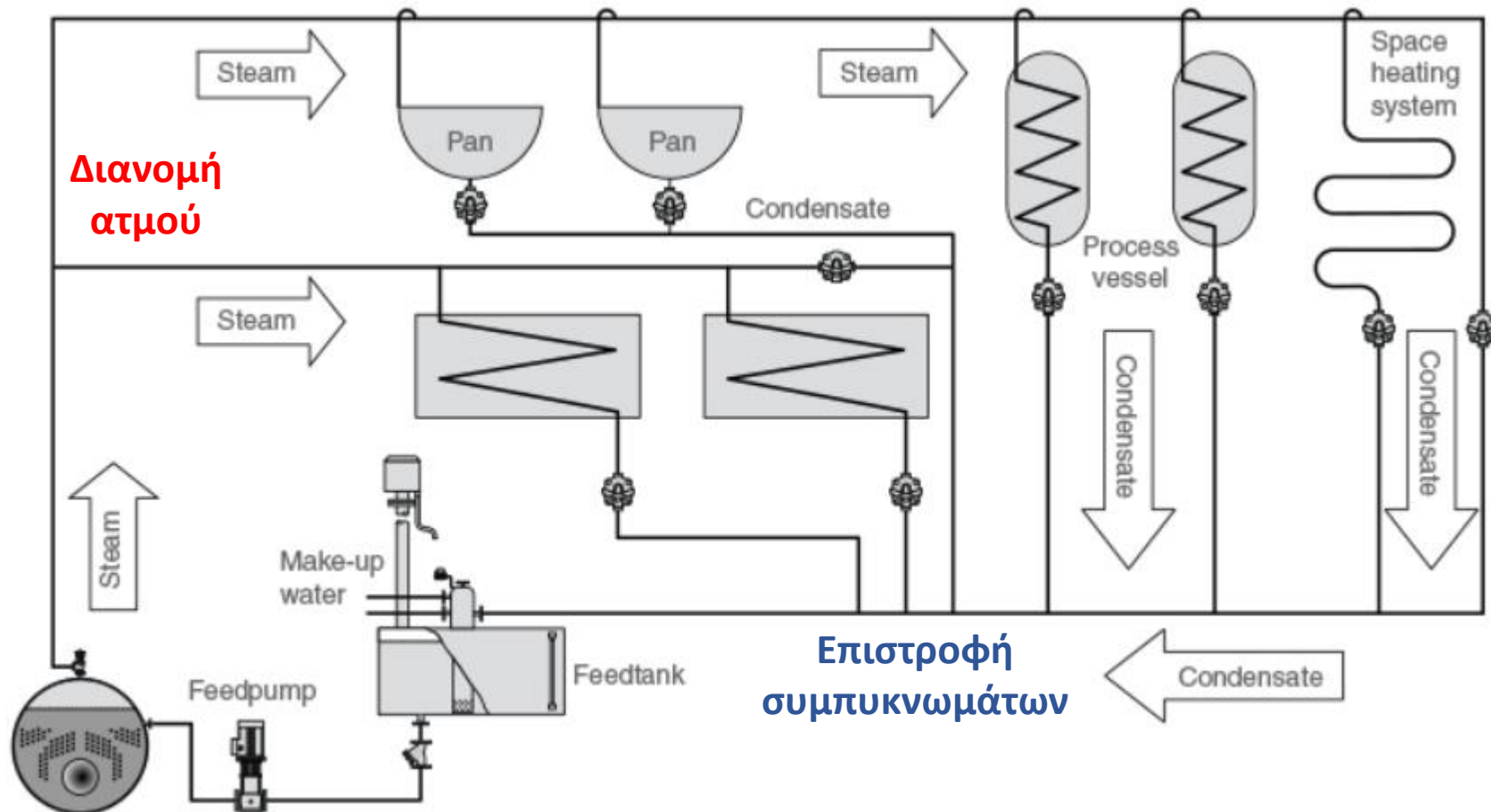


## Κατακόρυφος συμπυκνωτής αυλών



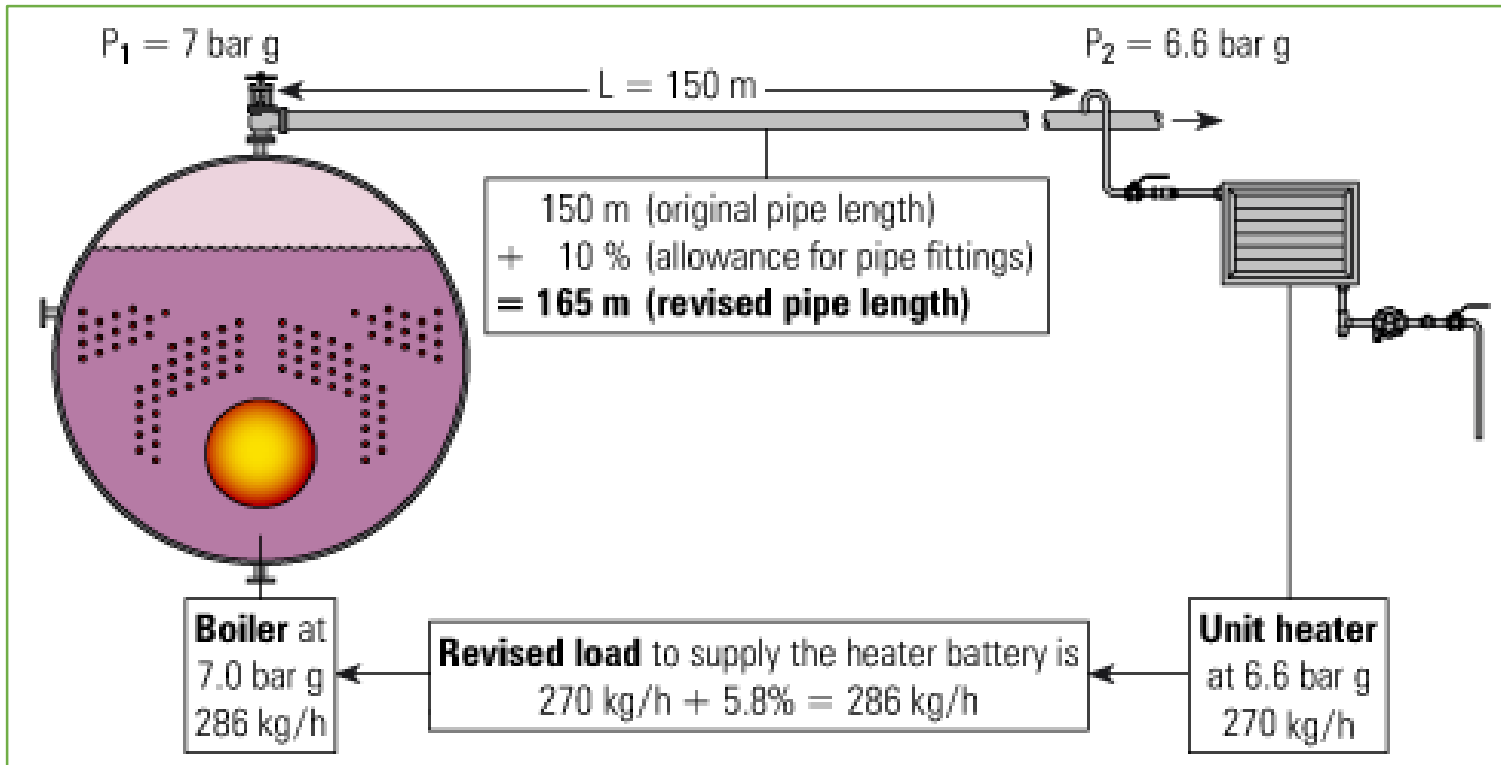
*Διαχείριση ατμού θέρμανσης*

<https://spiraxsarco.com/learn-about-steam>



## Βασικά θέματα

- Διάμετρος αγωγών δικτύου
- Θερμικές απώλειες-θερμομονώσεις
- Διαχείριση συμπυκνωμάτων
- Μειωτές πίεσης στις συσκευές



## ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΥΠΕΡΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

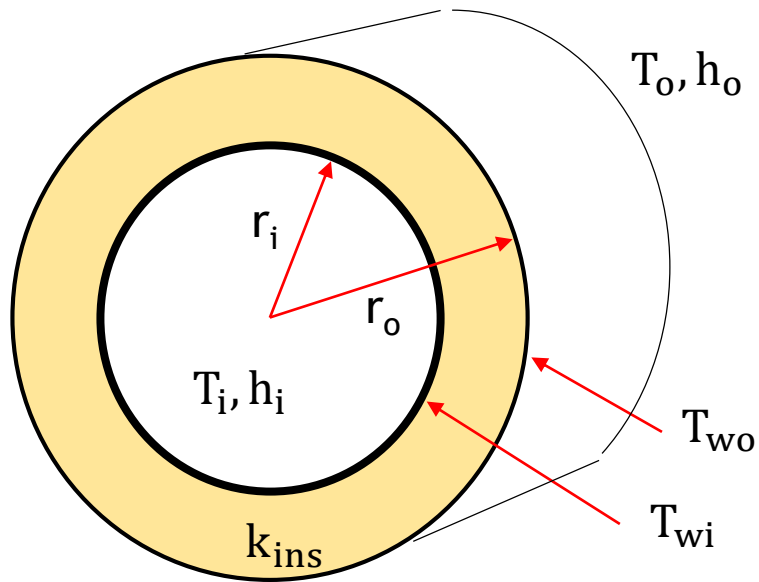
- Αυξημένο κόστος προμήθειας και εγκατάστασης σωληνώσεων και εξαρτημάτων
- Υψηλότερες θερμικές απώλειες και αυξημένος όγκος συμπυκνωμάτων (ατμοπαγίδες)

## ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΥΠΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

- Μεγάλη πτώση πίεσης
- Υποβαθμισμένος ατμός στο σημείο χρήσης
- Αύξηση μηχανικής διάβρωσης, υδραυλικών πληγμάτων και θορύβου

## ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΑΤΜΟΥ

Κορεσμένος ατμός:  $u_{st} = 10 - 40 \text{ m/s}$     Υπέρθερμος ατμός:  $u_{st} = 20 - 60 \text{ m/s}$



$$\begin{aligned}
 Q &= h_i A_i (T_i - T_{wi}) \\
 &= k_{ins} \frac{A_o}{r_o \ln(r_o/r_i)} (T_{wi} - T_{wo}) \quad \swarrow \text{Αντιστάσεις παράλληλα} \\
 &= h_o A_o (T_{wo} - T_o) + \varepsilon \sigma A_o (T_{wo}^4 - T_o^4) = h'_o A_o (T_{wo} - T_o)
 \end{aligned}$$

$$Q = UA_o (T_i - T_o), \quad \frac{1}{U} = \frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{r_o \ln(r_o/r_i)}{k_{ins}} + \frac{1}{h'_o}$$

## Σχηματισμός συμπυκνωμάτων

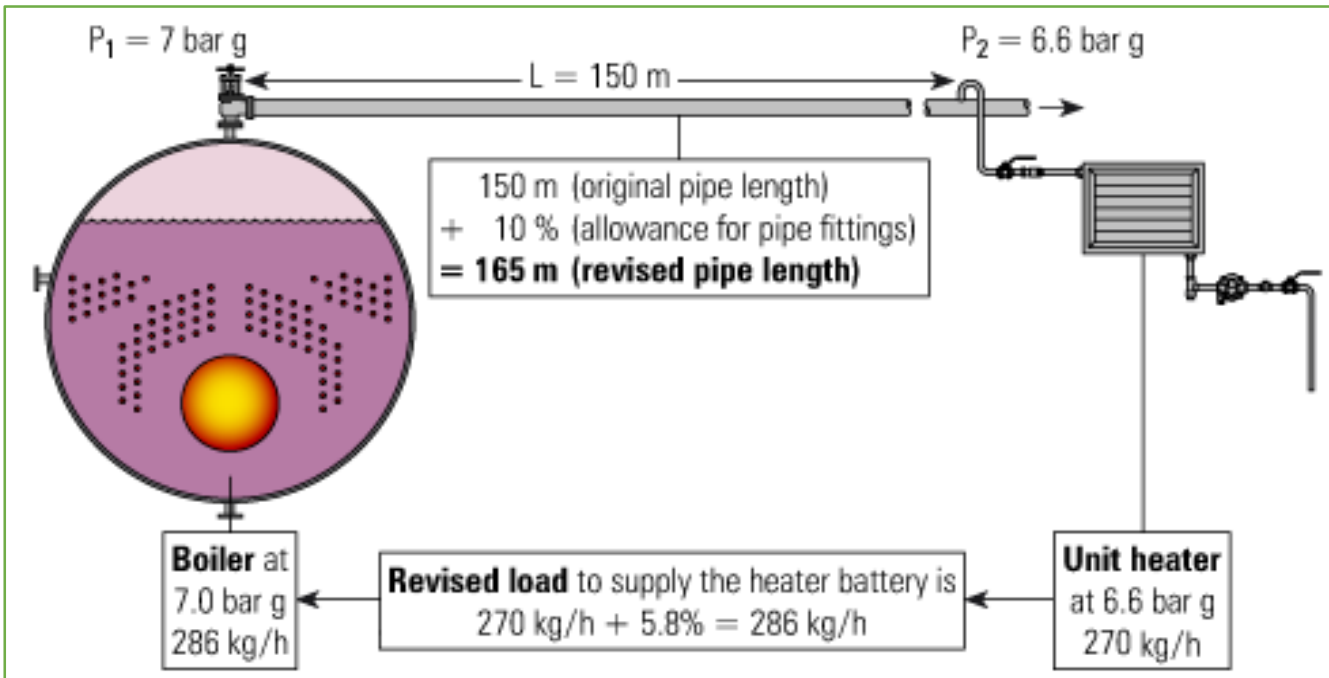
- Κορεσμένος ατμός:  $\dot{m}_{cond} = Q/\lambda$
- Εμπειρικός κανόνας:  $Q = 0,1Q_{bare}$

$$h_o = \frac{k_{air}}{2r_o} (Nu_{\varepsilon\xi}^4 + Nu_{\varphi\upsilon\sigma}^4)^{1/4} \quad \leftarrow \text{Συνδυασμός φυσικής/εξαναγκασμένης συναγωγής}$$

$$Nu_{\varphi\upsilon\sigma} = \left[ 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2$$

$$Ra_D = Gr_D Pr = \frac{g\beta(T_{wo} - T_o)D^3}{\nu^2} \frac{\nu}{\alpha} = \frac{g\beta(T_{wo} - T_o)D^3}{\nu \alpha}$$

**Παράδειγμα:** Επιλέξτε κατάλληλη διάμετρο για το παρακάτω δίκτυο κορεσμένου ατμού πίεσης 8 bar



$$u = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi \rho u}} = 0,035 \text{ m}$$

$$\frac{1}{\sqrt{4f}} = -2 \log_{10} \left[ \left( \frac{\varepsilon}{3.7d} \right)^{1.11} + \frac{2,51}{Re \sqrt{4f}} \right]$$

[https://checalc.com/fluid\\_flow\\_single\\_phase.html](https://checalc.com/fluid_flow_single_phase.html)

Carbon Steel (Slightly Corroded)	0.05-0.15
Carbon Steel (Moderately Corroded)	0.15-1

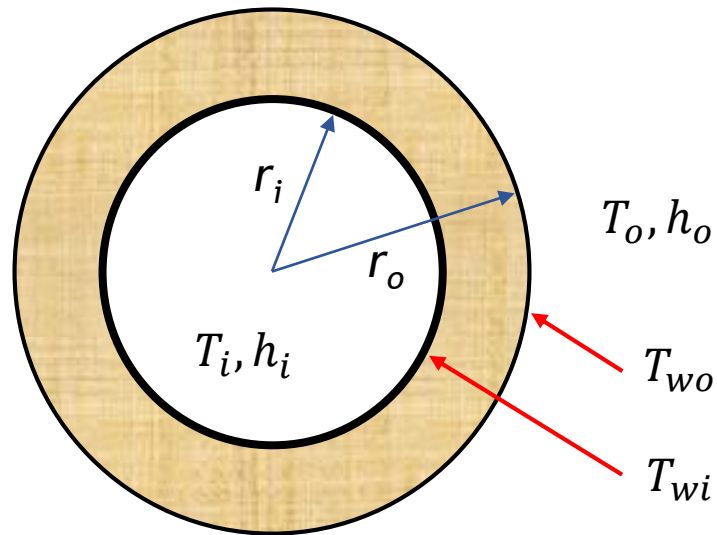
$$\rho = 4,16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu = 1,466 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Εσωτ. Διάμ. d [=]mm	u [=]m/s	Re	4f (ε=0,5 mm)	ΔP [=]bar	4f (ε=0,1 mm)	ΔP [=]bar
38,10 (1,5"/80)	16,75	181111	0,0419	1,06	0,0260	0,66
49,25 (2,0"/80)	10,02	140106	0,0385	0,27	0,0247	0,17

# Θερμομόνωση αγωγού - Κόστος κύκλου ζωής

Κόστος κύκλου ζωής οριζόντιου αγωγού 100 m,  $d_i=3$  in και  $T_i=175^\circ\text{C}$ , με μόνωση fiberglass ( $T_o=20^\circ\text{C}$ ,  $u_o=3,5$  m/s)



$$\frac{Q}{A_o} = \frac{k}{r_o \ln(r_o/r_i)} (T_{wi} - T_{wo}) = h_o(T_{wo} - T_o) + \sigma \epsilon (T_{wo}^4 - T_o^4)$$

$$h_o = 1,68(T_{wo} - T_o)^{0,25} \sqrt{\frac{u + 0,35\text{m/s}}{0,35\text{m/s}}}$$

$$\text{LCC} = C_{\text{pur}} + C_{\text{op}}F = C_{\text{pur}} + (QNC_{\text{th}})F$$

*Παρούσα αξία μελλοντικών χρημάτων*

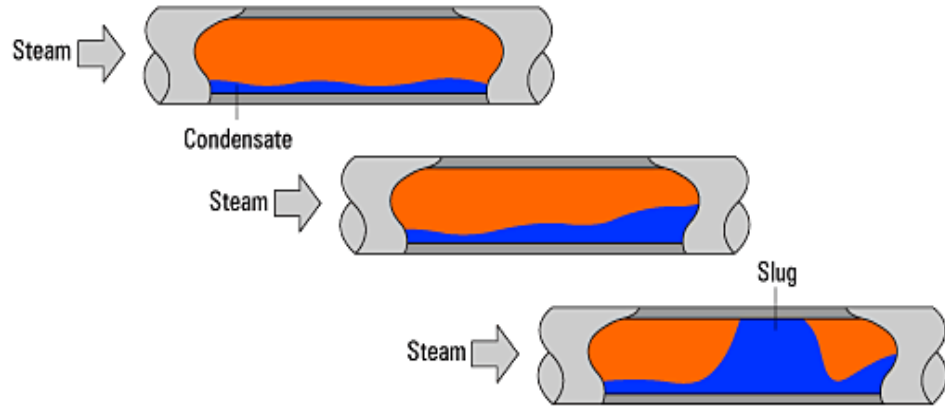
$$F = Y + Y^2 + Y^3 + \dots + Y^T = Y[(1 - Y^T)/(1 - Y)], \quad Y = [(1 + e)/(1 + i)]$$

$C_{th} = 0,06 \text{ €/kWh}$   
 $N = 8400 \text{ h/y}$   
 $T = 15 \text{ έτη}$   
 $i = 5\% \text{ επιτόκιο}$   
 $e = 0\% \text{ πληθωρισμός}$

⇒

	Γυμνός	0,5''	1''	1,5''	2''	2,5''	3''
Κόστος προμήθειας, κ€	0	8,25	9,60	10,95	12,45	13,65	14,70
Θερμορορή, kW	138,8	15,9	9,6	7,0	5,8	5,0	4,5
Ετήσιο κόστος λειτουργίας, κ€	69,96	8,01	4,84	3,53	2,92	2,52	2,27
<b>Life-Cycle Cost, κ€</b>	<b>755,5</b>	<b>92,1</b>	<b>57,1</b>	<b>45,4</b>	<b>39,9</b>	<b>36,3</b>	<b>39,2</b>

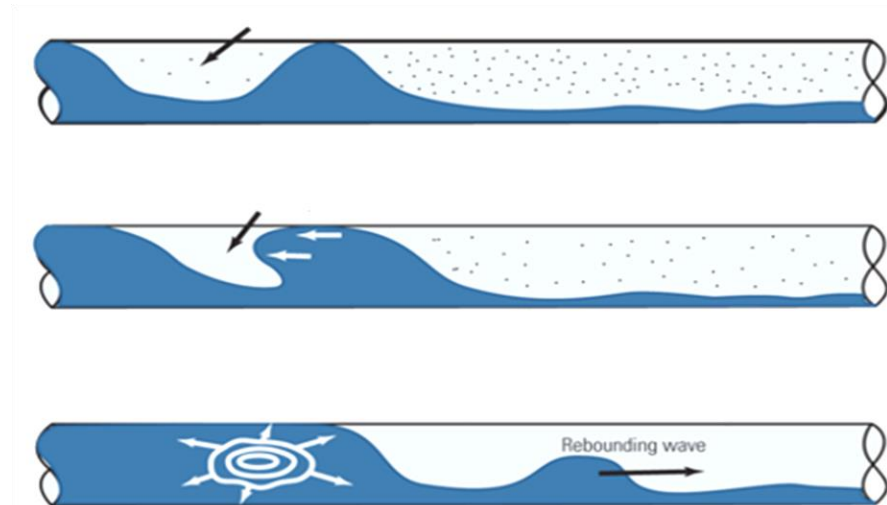
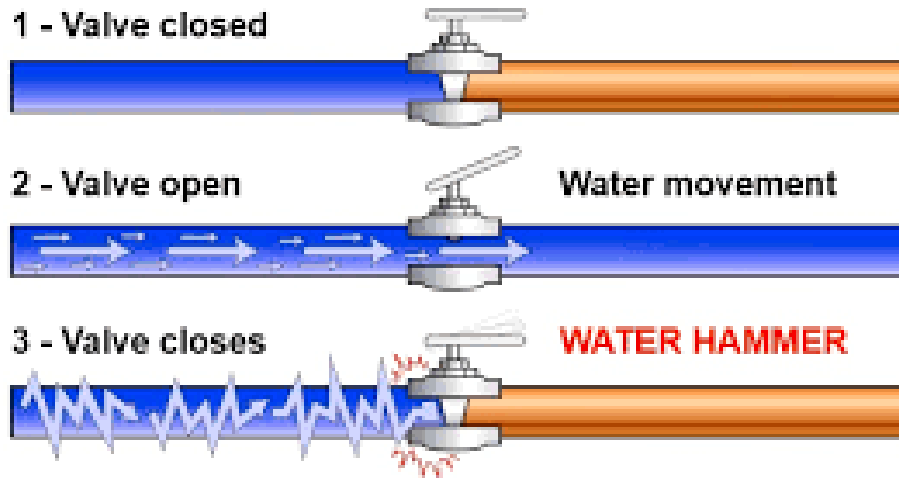
# Συμπυκνώματα-υδραυλικό πλήγμα



## Συνέπειες

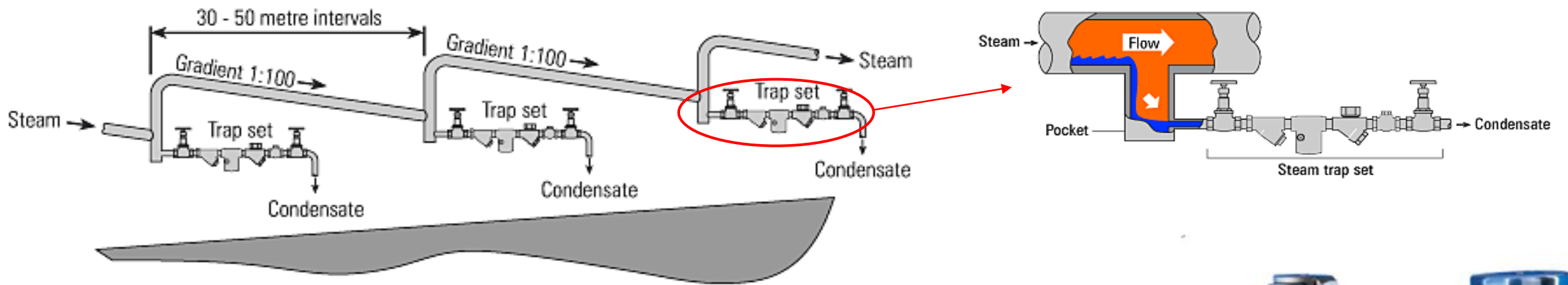
- Θόρυβος και τραντάγματα σωληνώσεων
- Βλάβες και πρόωρη φθορά αγωγών και εξαρτημάτων (πχ βάνες ελέγχου)
- Αστοχία και απελευθέρωση «ζωντανού» ατμού

## Μονοφασικό και διφασικό πλήγμα





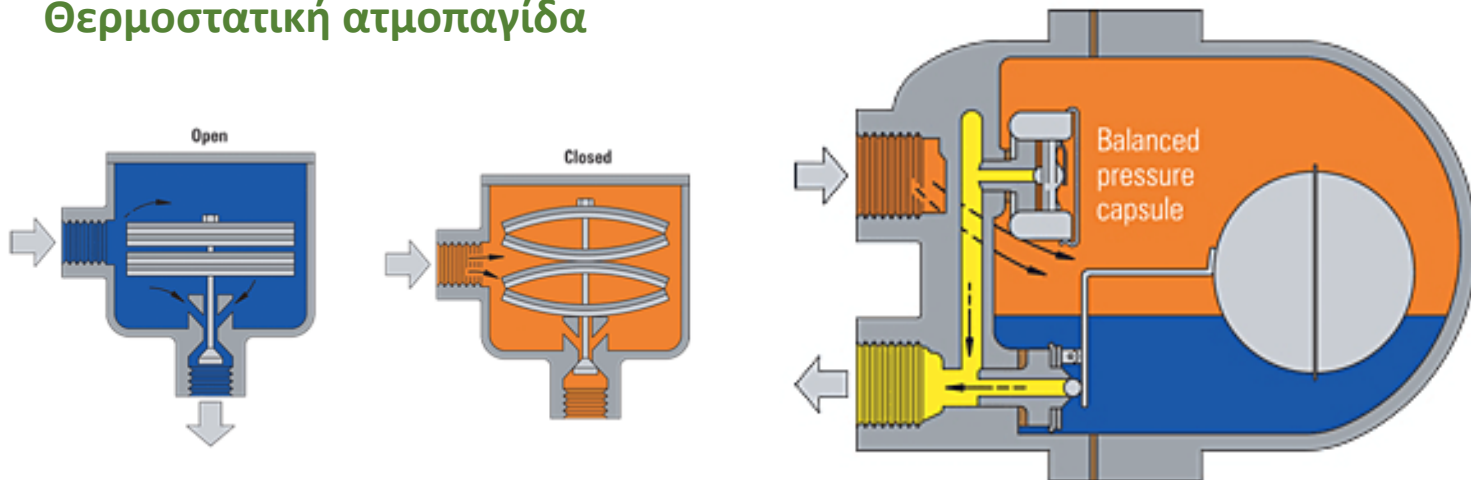
# Απομάκρυνση συμπυκνωμάτων-ατμοπαγίδες



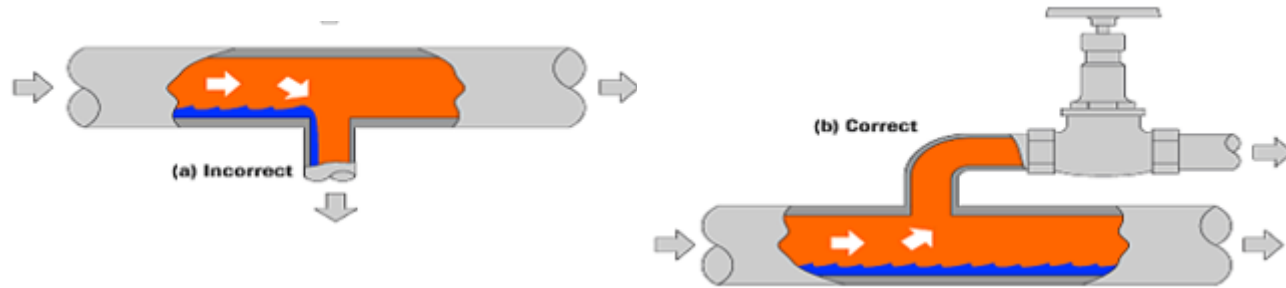
## Μηχανική ατμοπαγίδα



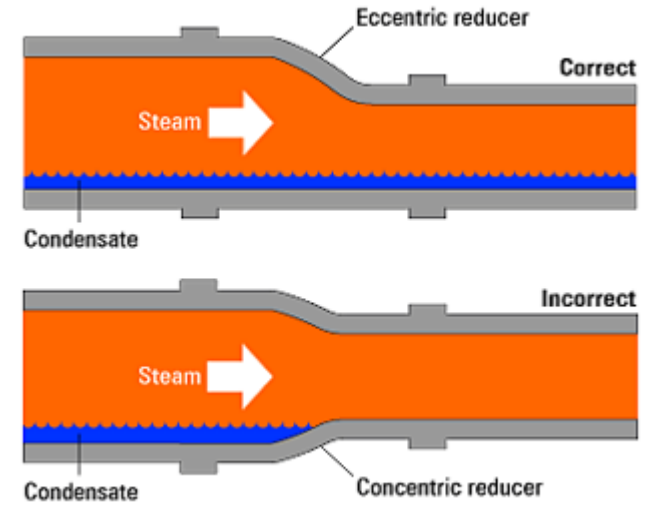
## Θερμοστατική ατμοπαγίδα



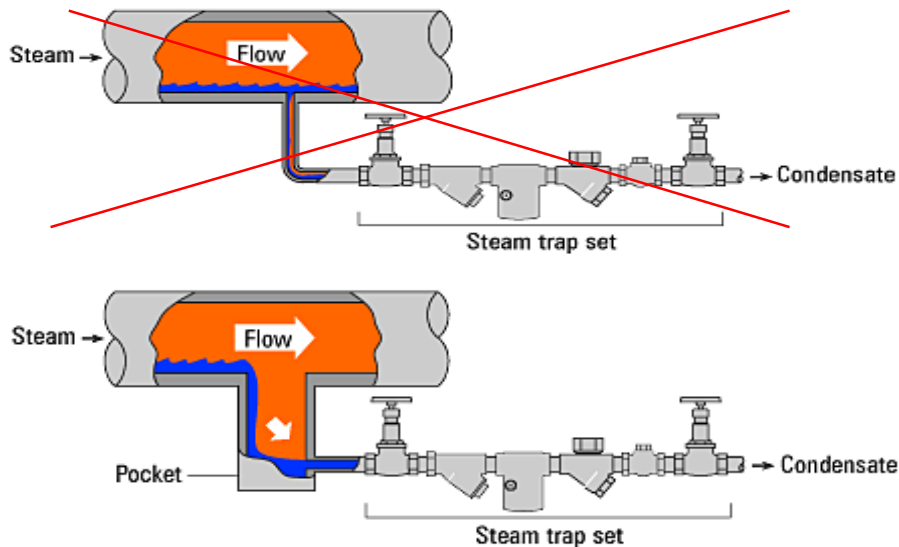
## Απόληψη ατμού



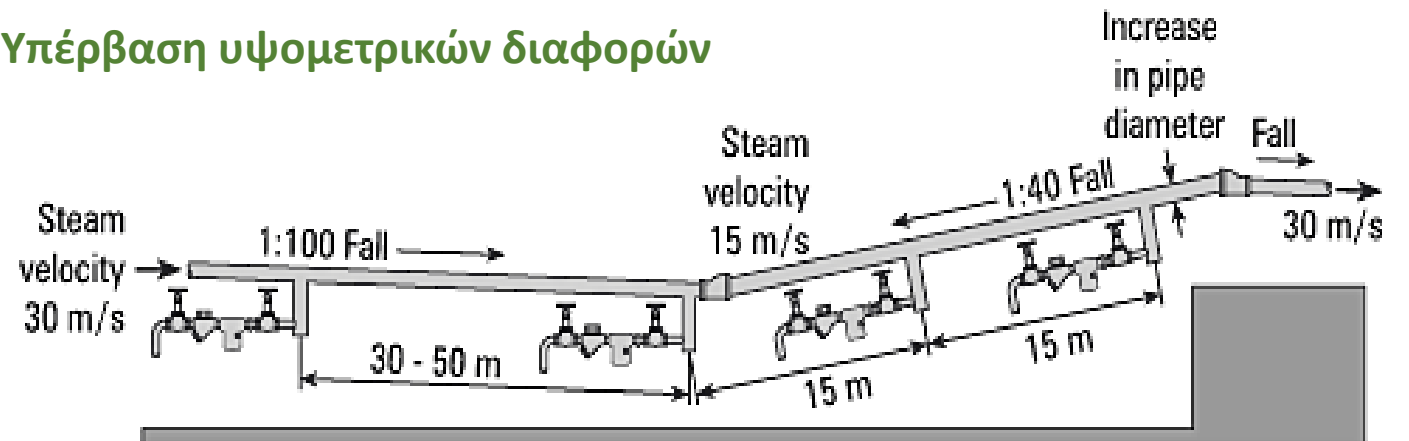
## Συστολές



## Διαμόρφωση συλλέκτη



## Υπέρβαση υψομετρικών διαφορών



# Πίεση διανομής και πίεση λειτουργίας συσκευών

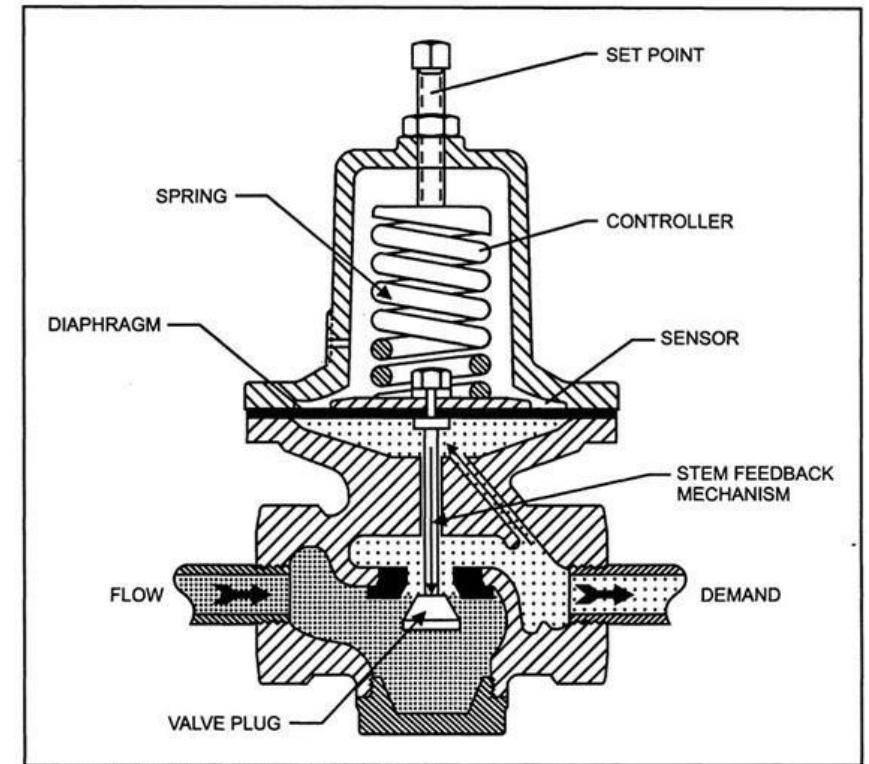
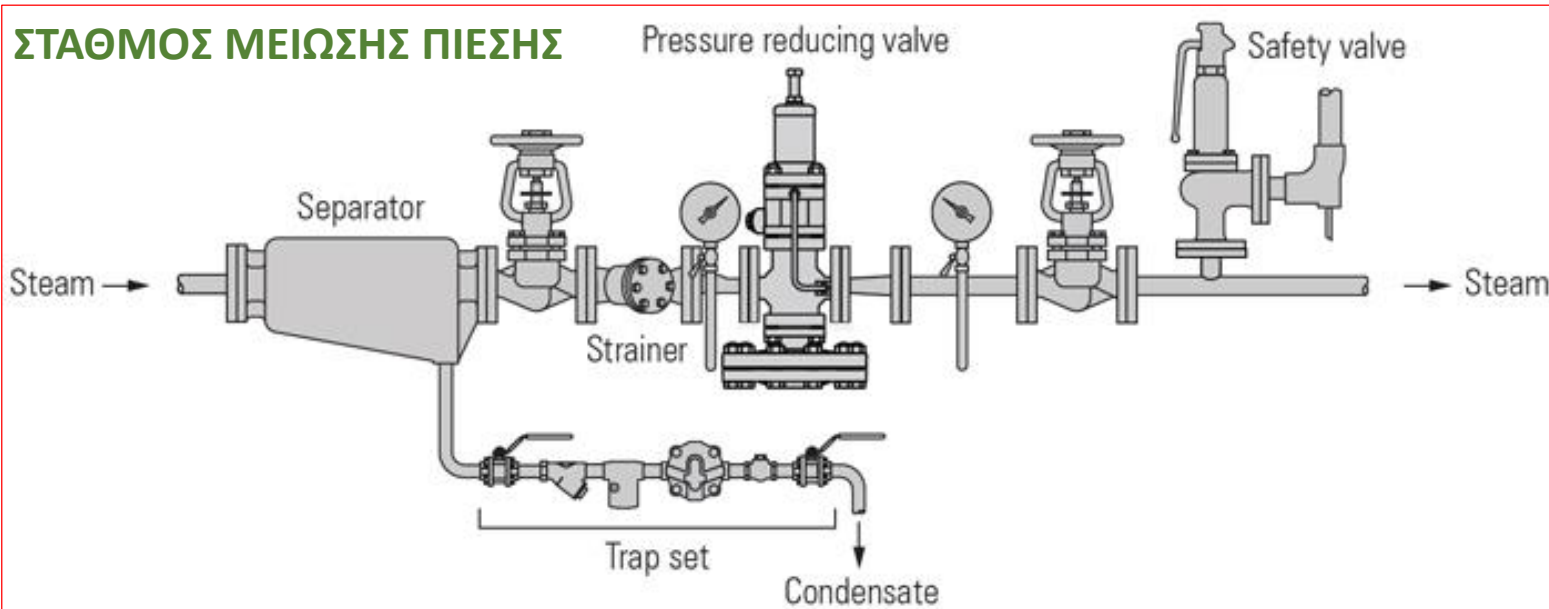
## ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ/ΔΙΑΝΟΜΗΣ

- Υψηλότερη θερμοχωρητικότητα του λέβητα και καλύτερη απόκριση σε αυξομειώσεις φορτίου
- Μικρότερες διάμετροι κεντρικού συστήματος διανομής και μέγεθος βαλβίδων, ατμοπαγίδων
- Ευχερής μεταφορά σε μεγαλύτερες αποστάσεις

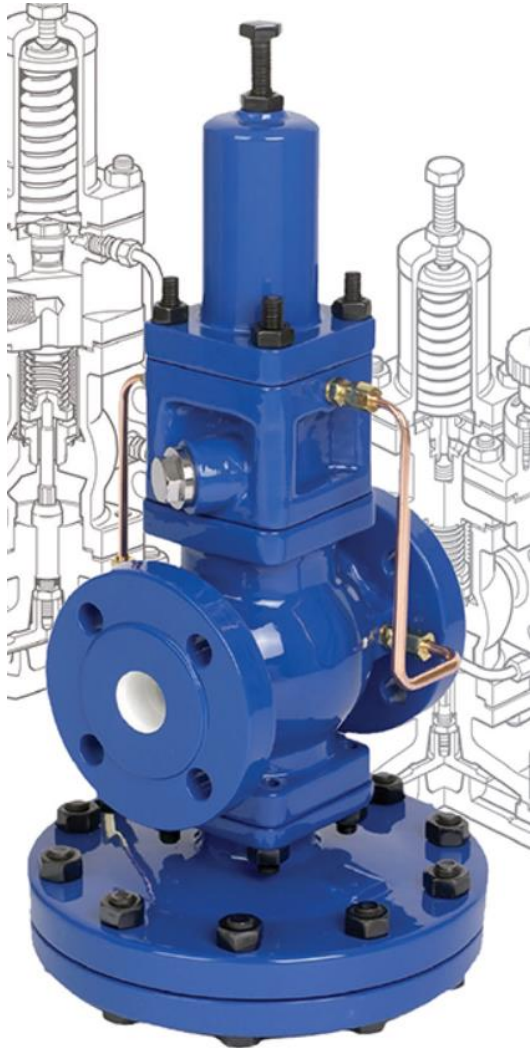
## ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ

- Μέγιστη επιτρεπτή πίεση
- Ατμός θέρμανσης κοντά στον κορεσμό
- Έλεγχος θερμοκρασίας μέσω ελέγχου της πίεσης,  $p_{\text{sat}} = f(T_{\text{sat}})$

## Απλός μειωτής πίεσης (offset αναλογικού ελέγχου)

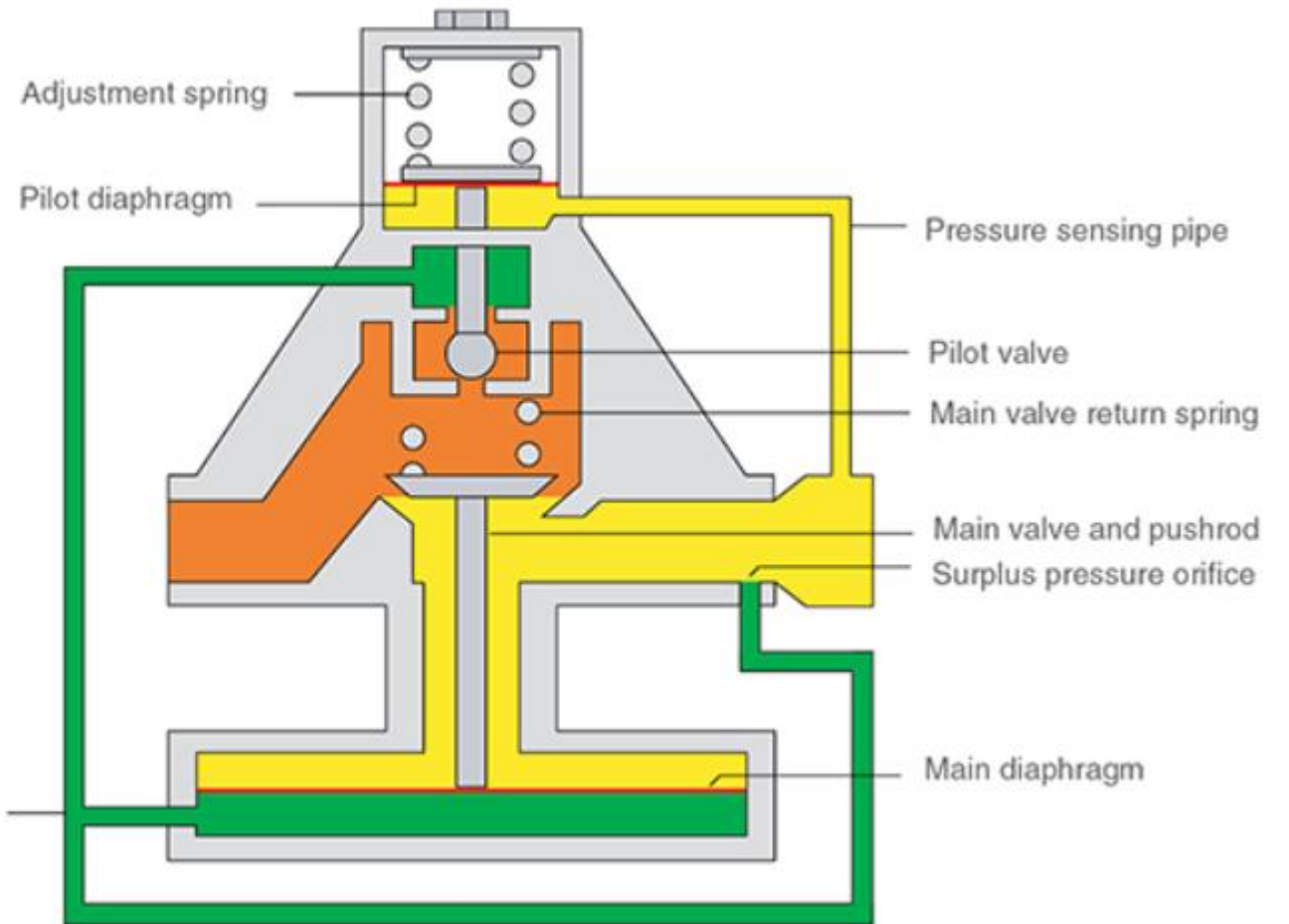


# Μειωτής πίεσης με πιλοτική βαλβίδα



- High pressure
- Low pressure
- Control pressure

Pilot pressure directed to underside of diaphragm by control pipe



# Θερμαντήρες ατμού με έλεγχο θερμοκρασίας

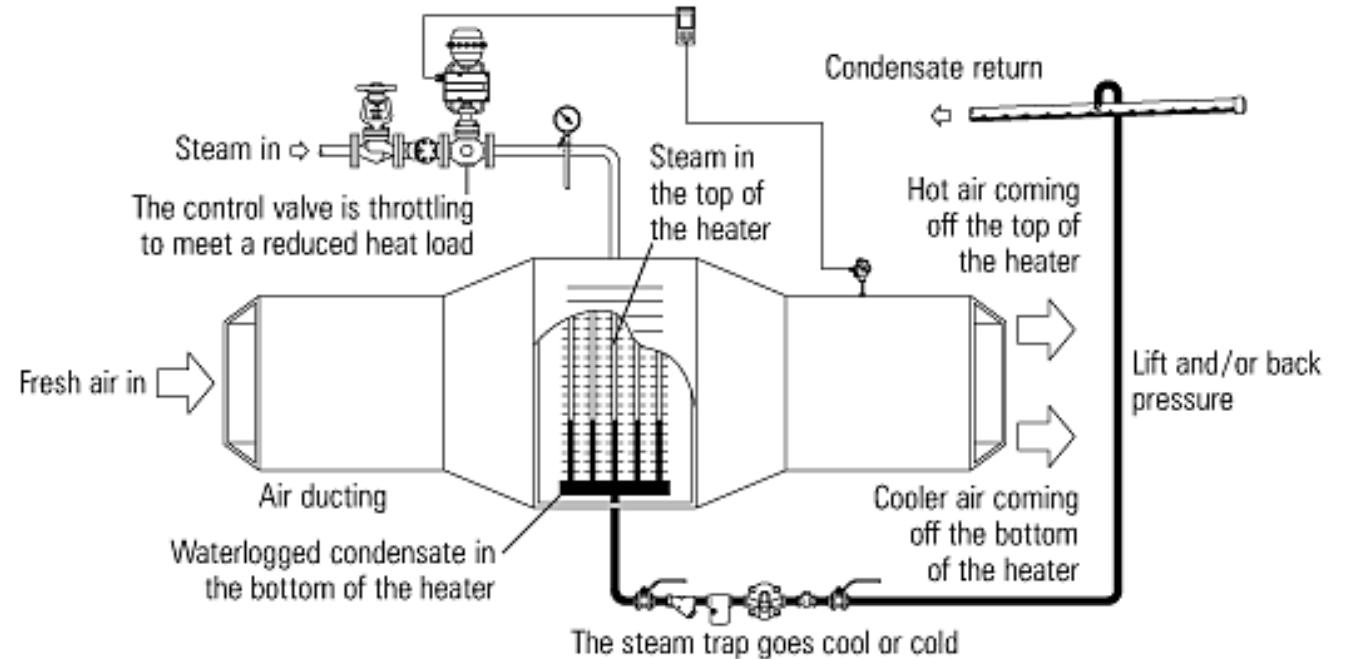
Η πλημμύριση θερμαντήρα με συμπύκνωμα (waterlogging) προκαλείται από μείωση φορτίου και αντίστοιχη μείωση της πίεσης ατμού κάτω από την πίεση επιστροφής του δικτύου συμπυκνωμάτων

## ΣΥΜΠΤΩΜΑΤΑ

- Χλιαρή ή ψυχρή ατμοπαγίδα
- Βάνα ελέγχου που «ψάχνεται»
- Αυξομείωση θερμοκρασίας ή/και θερμοκρασιακή στρωμάτωση ρεύματος εξόδου
- Αυξημένη διάβρωση (το κρύο νερό διαλύει  $O_2$ ,  $CO_2$ )
- Διαρροές/αστοχία εναλλάκτη (θερμικές τάσεις)

## ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ

- Εξασφάλιση τουλάχιστον ατμοσφαιρικής πίεσης στο χώρο ατμού και απομάκρυνση συμπυκνώματος με βαρύτητα μέσω μηχανικής ατμοπαγίδας (και vacuum breaker)
- Εγκατάσταση συνδυασμένης ατμοπαγίδας-αντλίας συμπυκνώματος
- Διατήρηση σταθερής πίεσης ατμού (υψηλότερης της πίεσης επιστροφής συμπυκνωμάτων) και έλεγχος λειτουργίας με αυξομείωση της παροχής εισόδου





# Προδιαγραφή εναλλάκτη και ατμοπαγίδας εξατμιστήρα

**Παράδειγμα:** Εναλλάκτης θέρμανσης 1 kg/s νερού από 10°C (ή υψηλότερη) σε 80°C προδιαγράφεται να λειτουργεί με ατμό 4 bar g και ελάχιστο θερμικό φορτίο ίσο με 60% του κανονικού. Η γραμμή επιστροφής συμπυκνωμάτων είναι υπερυψωμένη κατά 5 m από την έξοδο του εναλλάκτη και καταλήγει σε αεριζόμενο δοχείο συλλογής. Δύο προμηθευτές προσφέρουν εναλλάκτες (A) 2m<sup>2</sup>/2500 W/m<sup>2</sup>°C και (B) 1,2 m<sup>2</sup>/2500 W/m<sup>2</sup>°C αντίστοιχα. Εξετάστε τυχόν προβλήματα πλημμύρισης και επιλέξτε ατμοπαγίδα.

**ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ (A)**  $Q = m_w C_{p,w} (T_{w,o} - T_{w,i}) = 293 \text{ kW}$

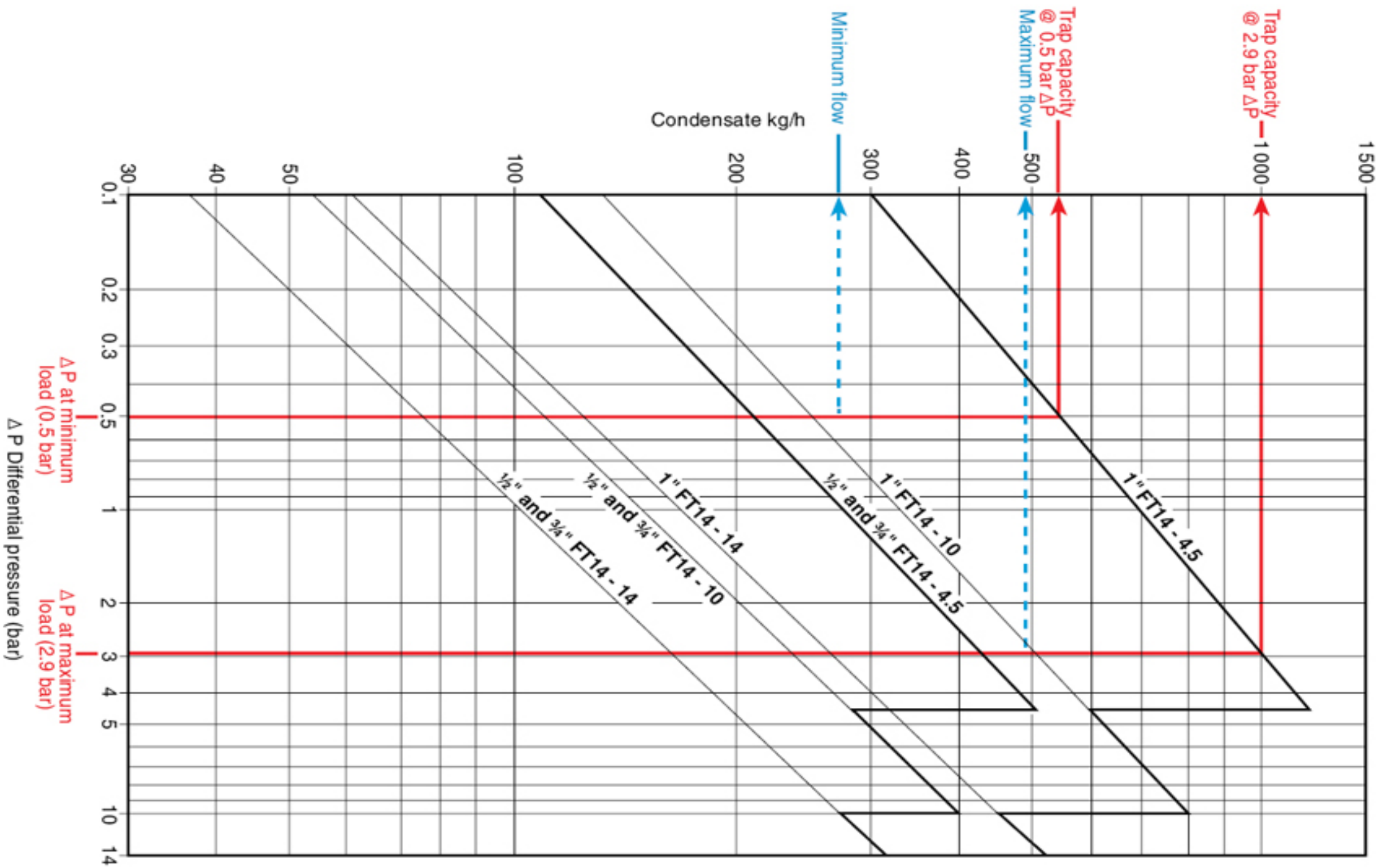
$$Q = UA(\Delta T)_{LM} \Rightarrow (\Delta T)_{LM} = 58,6^\circ C = \frac{(T_{w,o} - T_{w,i})}{\ln\left(\frac{T_s - T_{w,i}}{T_s - T_{w,o}}\right)} \Rightarrow T_s = 110^\circ C \Rightarrow P = 0,44 \text{ bar g}$$

**πλημμύριση**  
**Αναγκαστική χρήση ατμοπαγίδας-αντλίας**

**ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ (B)**  $(\Delta T)_{LM} = 97,7^\circ C \Rightarrow T_s = 147^\circ C \Rightarrow P = 3,4 \text{ bar g}$ ,  $m_s = \frac{293 \text{ kW} \cdot 3600 \text{ s/h}}{2123 \text{ kJ/kg}} = 497 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ,  $\Delta P = 2,9 \text{ bar}$

**Ατμοπαγίδα με φλοτέρ**

$Q_{\varepsilon\lambda} = 0,6 Q (T_{w,i} = 38^\circ C) \Rightarrow T_s = 120^\circ C \Rightarrow P = 1,0 \text{ bar g}$ ,  $m_s = 288 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ,  $\Delta P = 0,5 \text{ bar}$



*Βρασμός*



# Κατηγοριοποίηση φαινομένων Βρασμού



## Κίνηση του υγρού

- Στάσιμος βρασμός (pool boiling)
- Βρασμός ροής (flow boiling)

## Μηχανισμός αλλαγής φάσης

- Εξάτμιση
- Βρασμός πυρήνων (nucleate boiling)
- Βρασμός υμένα (film boiling)

## Σφαιρική φυσαλίδα (εξίσωση Young-Laplace)

$$p_B - p_{sat} = \frac{2\sigma}{r}$$

Δυσκολία  
ομογενούς βρασμού

$$T = 100^\circ C, \sigma = 0,059 \text{ N/m}$$

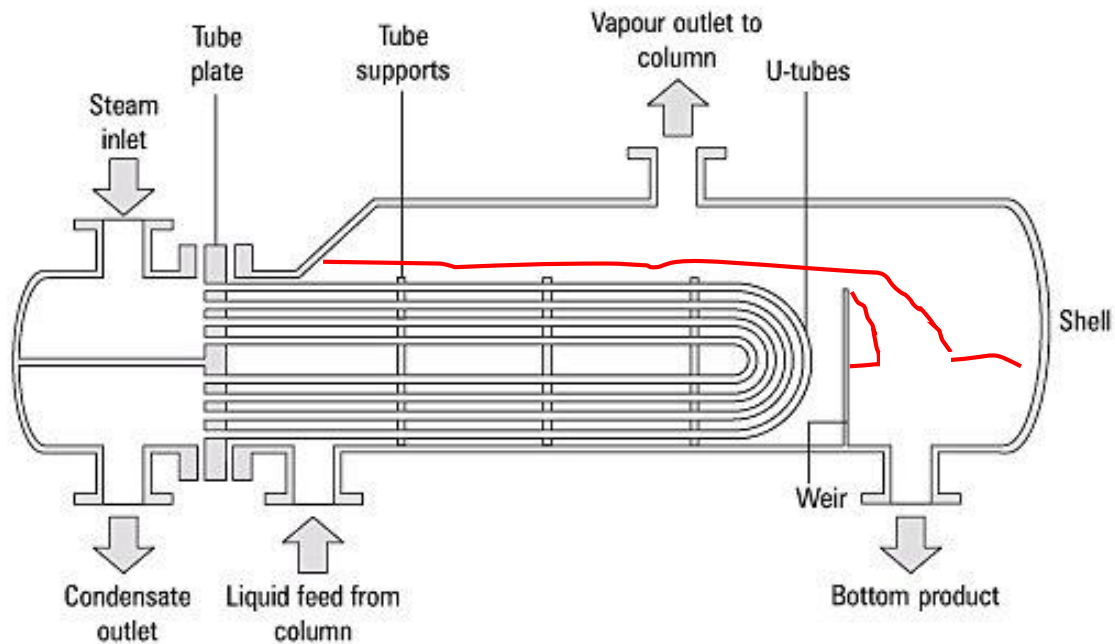
$$r = 10 \mu m \Rightarrow \Delta p = 0,12 \text{ bar}, T_{sat} = 102,8^\circ C$$

$$r = 1 \mu m \Rightarrow \Delta p = 1,2 \text{ bar}, T_{sat} = 123,3^\circ C \leftarrow 1,4 \times 10^{11} \text{ μόρια}$$

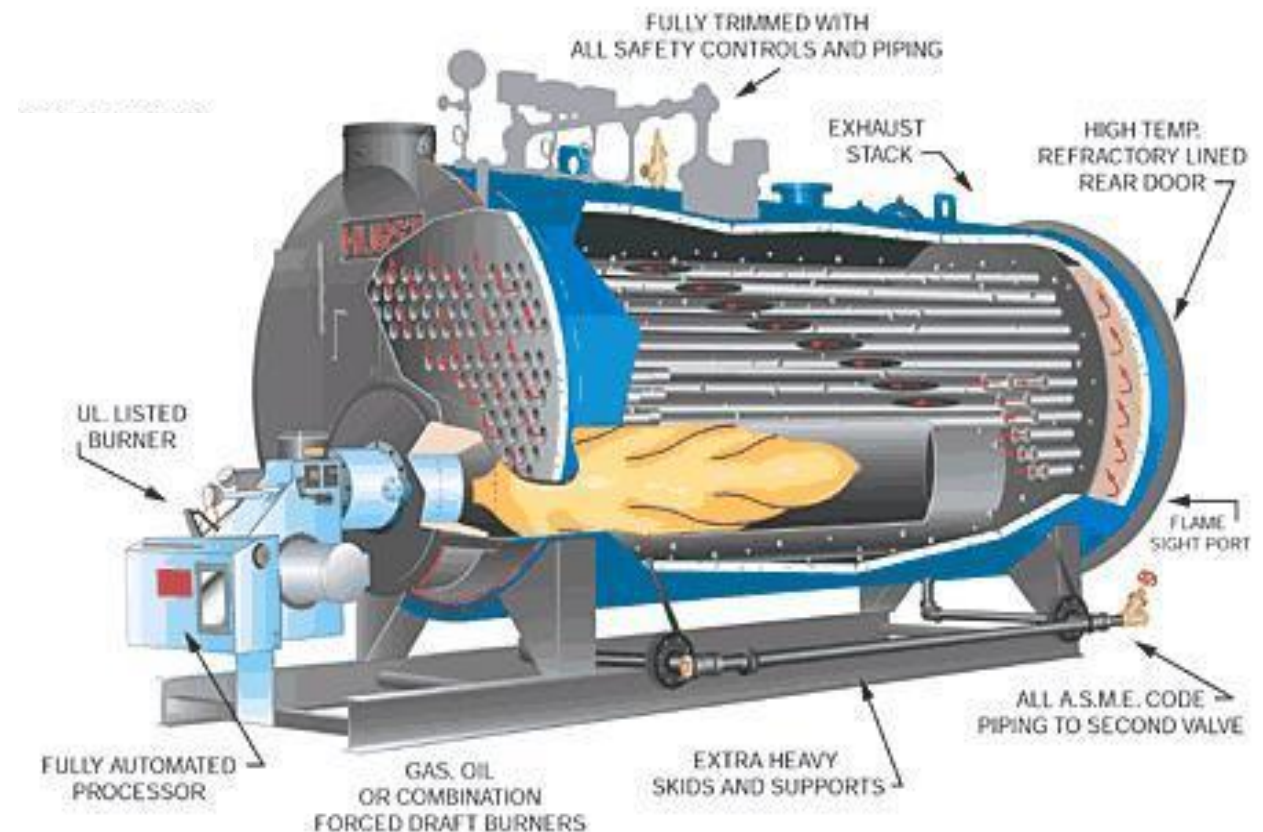
<https://www.youtube.com/watch?v=0xcxumccf8Q>

<https://www.youtube.com/watch?v=GA9MBdePwmo&t=2s>

## Αναβραστήρας/εξατμιστήρας τύπου λέβητα (kettle reboiler-flooded evaporator)

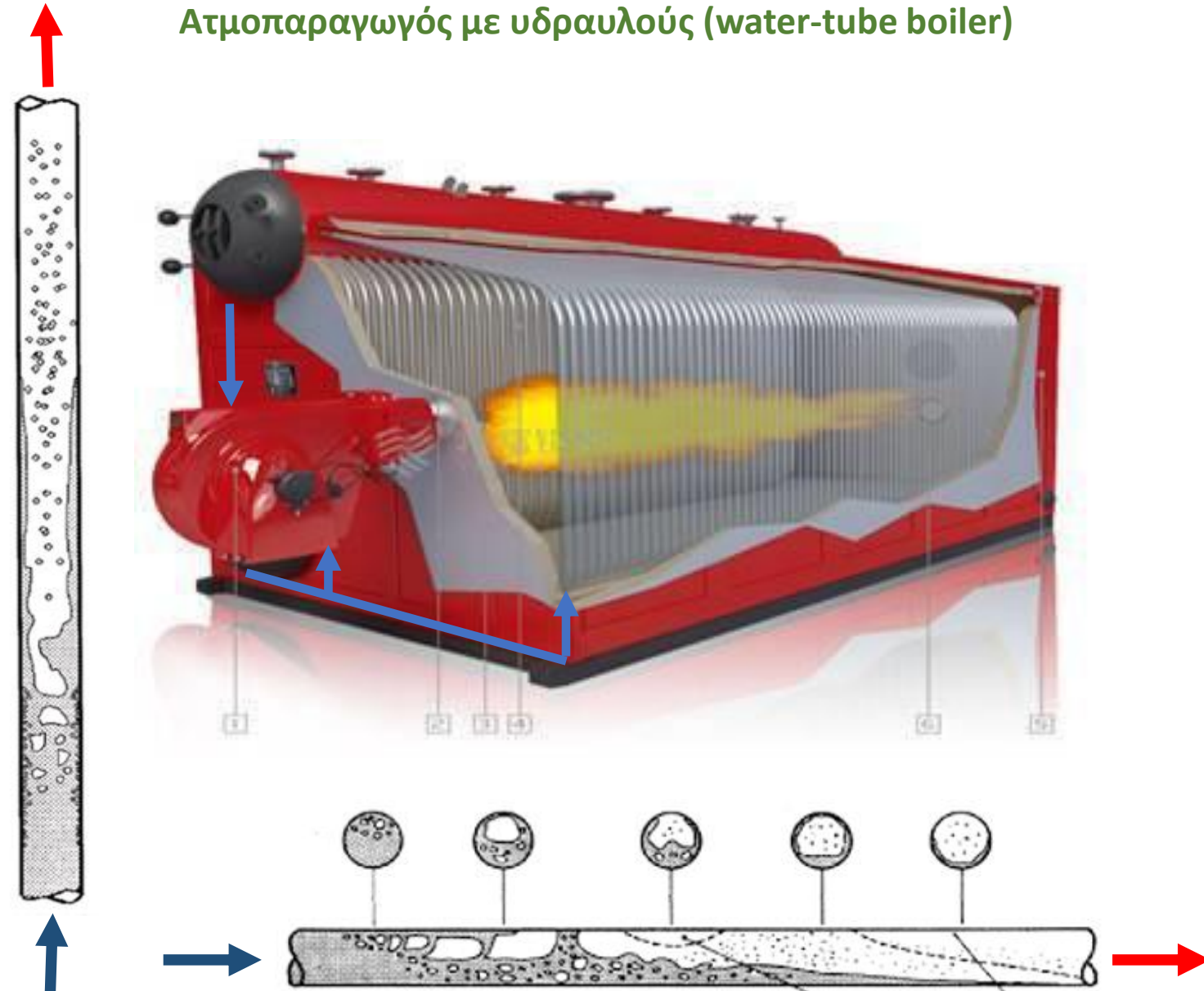


## Ατμοπαραγωγός με φλογωσλήνα (shell boiler)

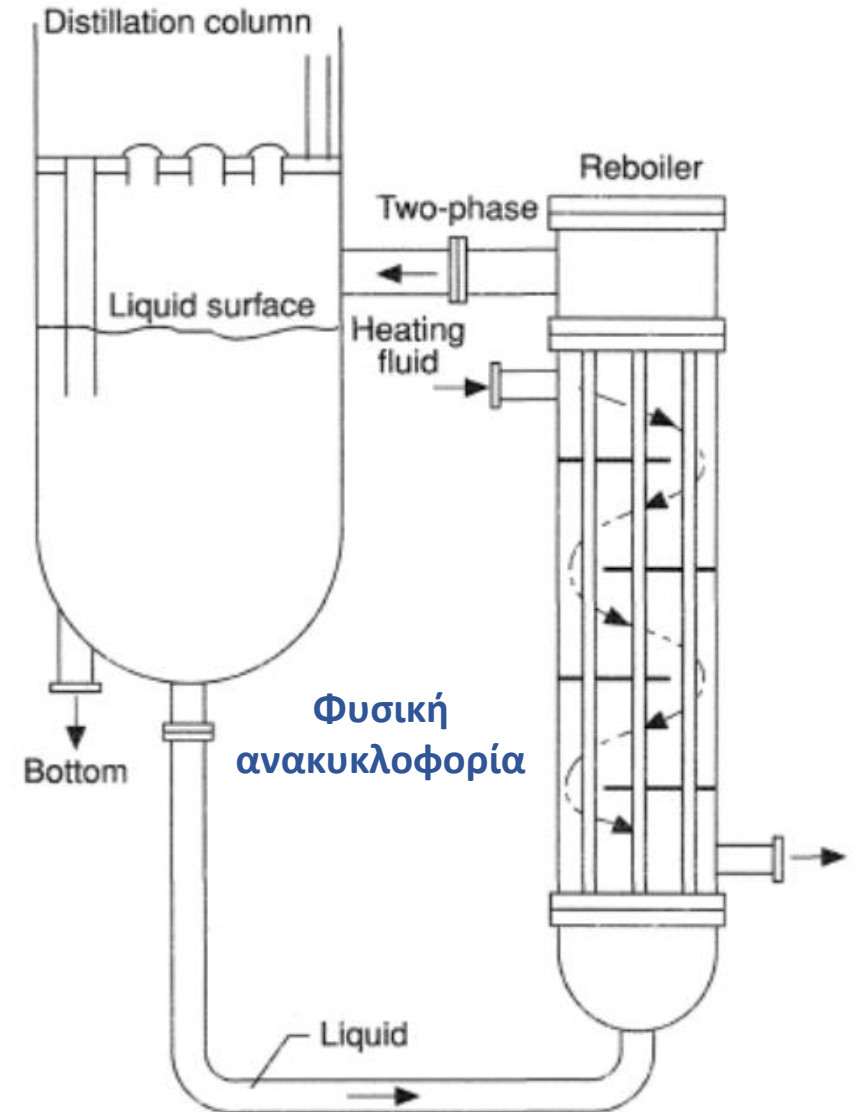


# Εφαρμογές Βρασμού ροής

Ατμοπαραγωγός με υδραυλούς (water-tube boiler)

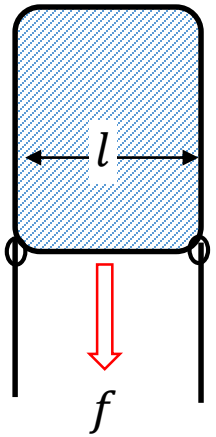


Αναβραστήρας τύπου θερμοσίφωνα (thermosyphon reboiler)



# Επιφανειακή τάση-τριχοειδής πίεση

## Ορισμός επιφανειακής τάσης

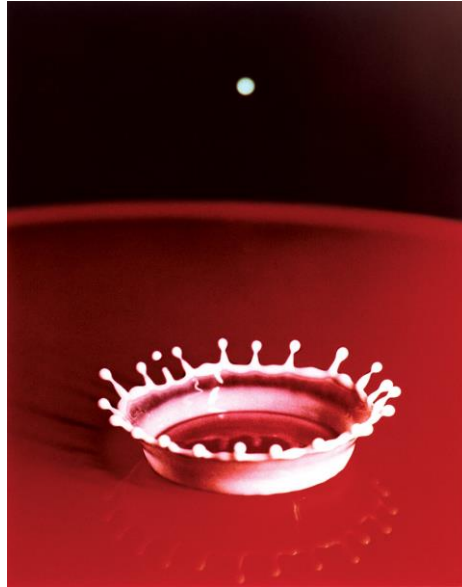


$$f = \gamma \cdot 2l \Rightarrow \gamma = \frac{f}{2l}$$

$$\delta W_s = f dx = (\gamma \cdot 2l) dx$$

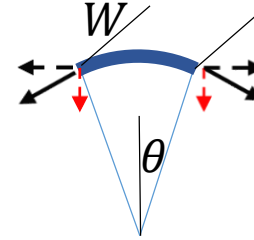
$$= \gamma dA \Rightarrow \gamma = \frac{\delta W_s}{\delta A}$$

$\gamma$  : ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας



## Σφαιρική σταγόνα ή φυσαλίδα

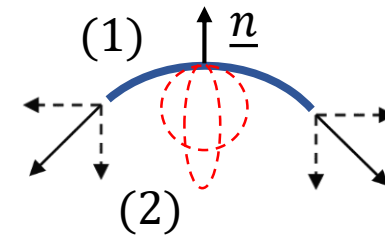
$$P_{in} - P_{out} = \frac{2\gamma}{R}$$



## Καμπυλότητα σε μία διάσταση

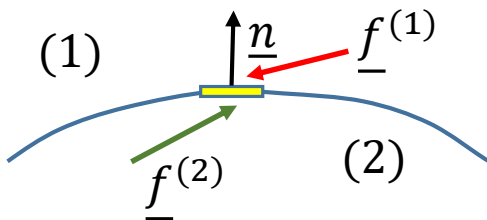
$$2(\gamma W \sin \theta) = \Delta p (W \cdot 2\theta R)$$

$$\Rightarrow \Delta p = \frac{\gamma}{R} = \kappa \gamma$$



## Μέση καμπυλότητα

$$2\kappa_m = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

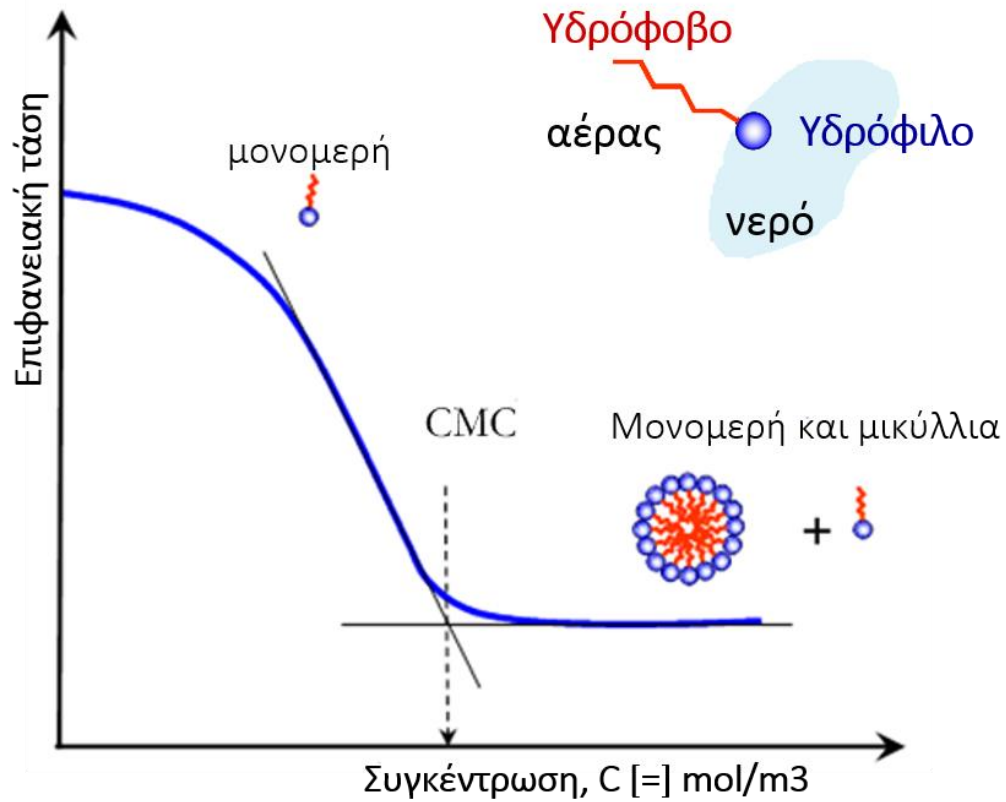


## Γενική μορφή δυναμικής συνοριακής συνθήκης

$$\underline{\underline{\sigma}}^{(1)} \cdot \underline{\underline{n}} + \underline{\underline{\sigma}}^{(2)} \cdot (-\underline{\underline{n}}) + \gamma(-2\kappa_m \underline{\underline{n}}) + \underline{\underline{\nabla}}_s \gamma = 0$$



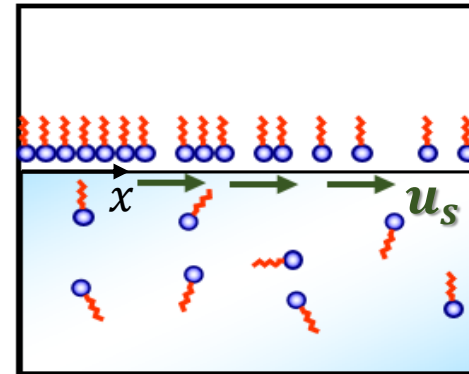
# Επιφανειοδραστικά-τάσεις Marangoni



Πηγές σχηματισμού τάσεων Marangoni

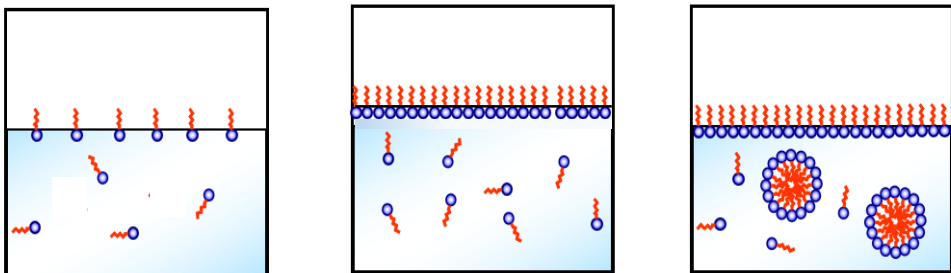
$$\gamma = \gamma(\Gamma, T) : \Gamma \uparrow \Rightarrow \gamma \downarrow \text{ or } T \uparrow \Rightarrow \gamma \downarrow$$

$$\gamma \leftarrow \xrightarrow{dx} \gamma + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial x}\right) dx = \gamma + \left(\frac{d\gamma}{d\Gamma}\right) \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial x}\right) dx$$

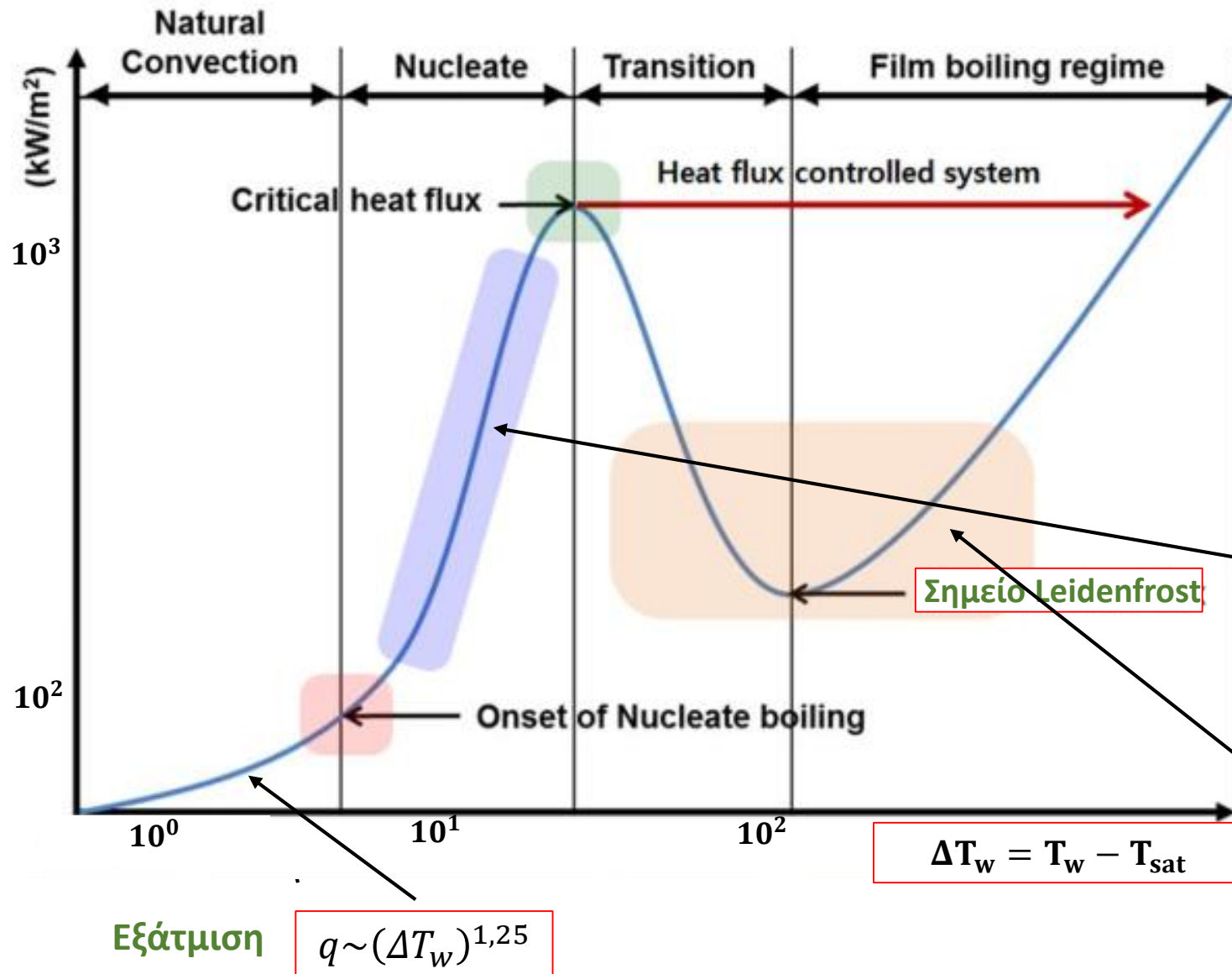


Το κρασί που δακρύζει

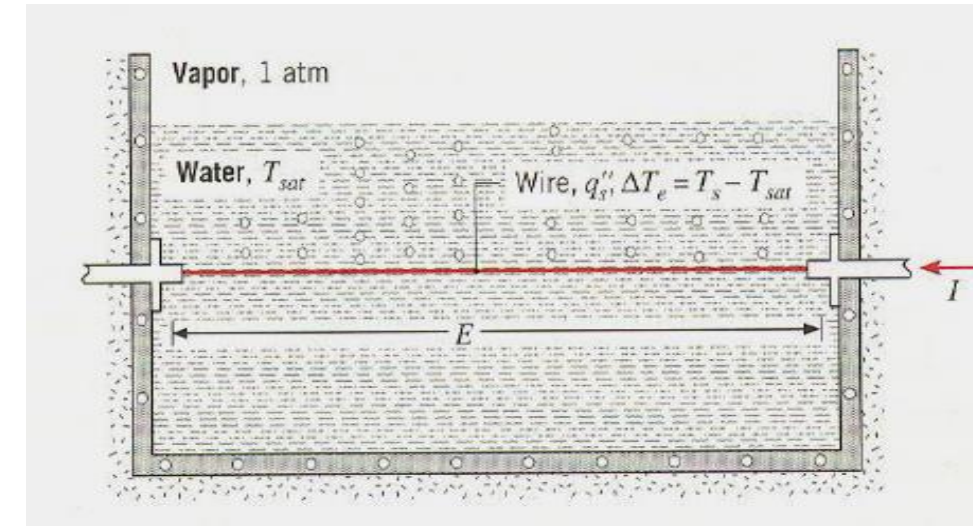
$$C_{EtOH} \uparrow \Rightarrow \gamma \downarrow$$



# Στάσιμος Βρασμός

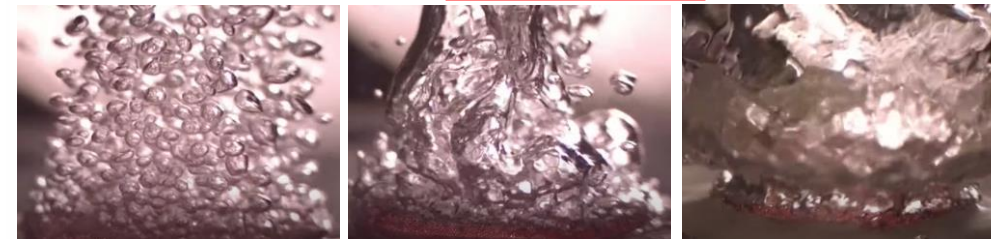


## Πείραμα Nukiyama (1934)



**Βρασμός πυρήνων**

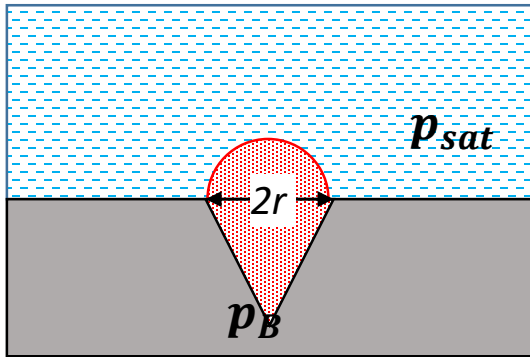
$$q \sim (\Delta T_w)^3$$



**Βρασμός υμένα**

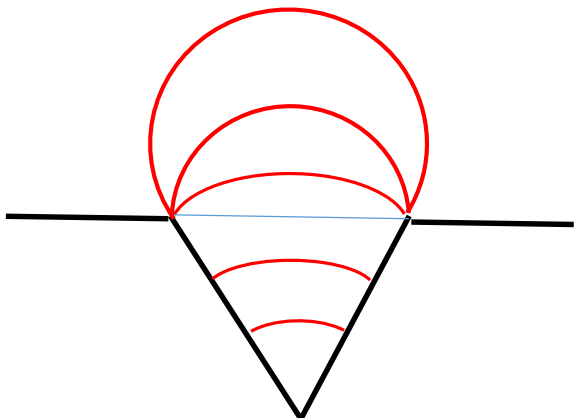


## Ελάχιστη υπερθέρμανση τοιχώματος



Σφαιρική σταγόνα ή φυσαλίδα

$$p_B - p_{sat} = \frac{2\sigma}{r}$$



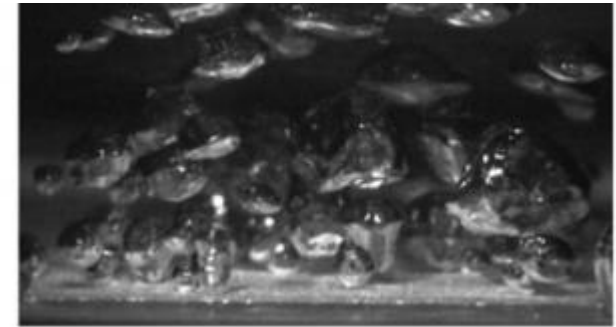
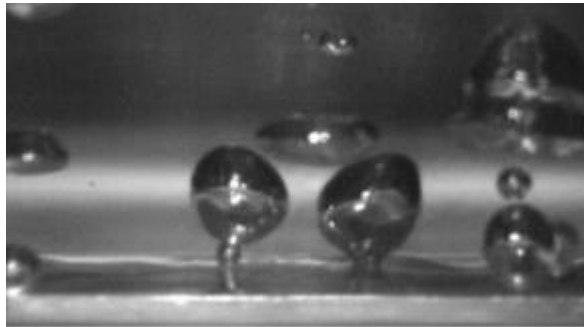
$$T_w = T_{sat} + \frac{dT_{sat}}{dp_{sat}} (p_B - p_{sat})$$

$$\frac{dT_{sat}}{dp_{sat}} = \frac{T_{sat} \Delta v^{vl}}{\Delta h^{vl}} \approx \frac{T_{sat}}{\rho_v \Delta h^{vl}}$$

$$\Delta T_{w,min} = T_w - T_{sat} = \frac{2\sigma T_{sat}}{r \rho_v \Delta h^{vl}}$$

( $r \sim 5 \mu\text{m}$ )

## Επίδραση πλήθους μικρο-εγκοπών



Επίδραση επιφανειακής τάσης (με ιοντικό επιφανειοδραστικό)

<https://www.youtube.com/watch?v=XtekyM8awWc>

# Θερμορροή Βρασμού πυρήνων

Χαρακτηριστικές κλίμακες:  $U = \frac{q}{\lambda \rho_l} \quad L = \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2}$

Τα δύο βασικά προβλήματα μεταφοράς θερμότητας

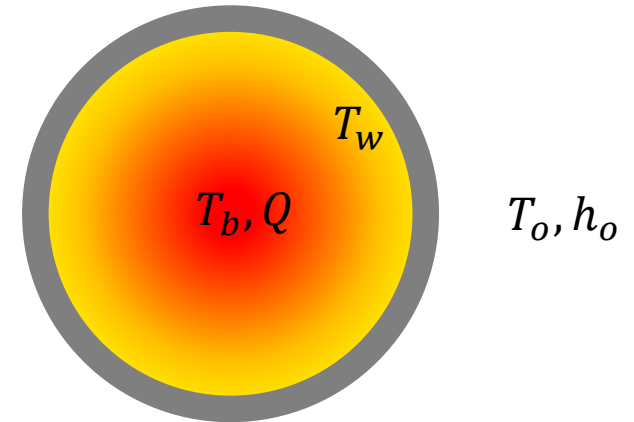
## Συσχέτιση Rosenhow

$$Nu = \frac{1}{C_{sl}} Re^{1-m} Pr^{1-n}$$

$$q = h(\Delta T_w) \sim (\Delta T_w)^3$$

$$q = \mu_l \lambda \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left( \frac{c_{p,l} \Delta T_w}{C_{sl} \lambda Pr_l^n} \right)^3$$

Νερό:  $n=1$ , Οργανικά:  $n=1,7$



**Συσκευές με θερμαντικό ρευστό**

$$Q = UA(T_b - T_o) \quad T_b \rightarrow Q$$

**Συσκευές με φλόγα**

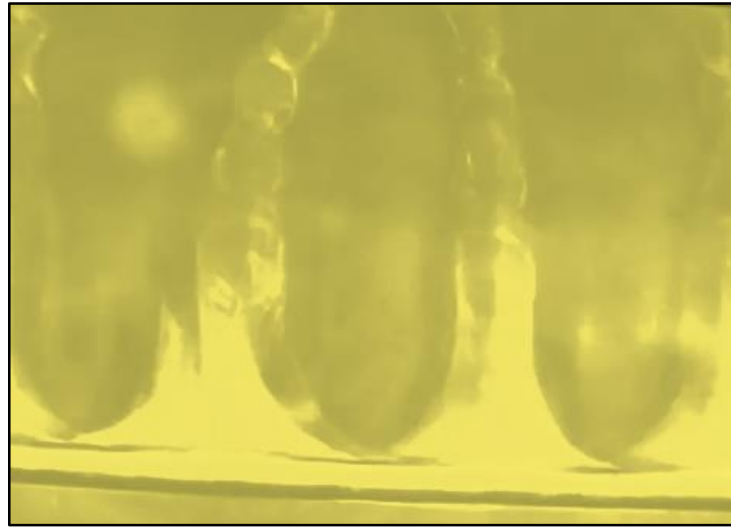
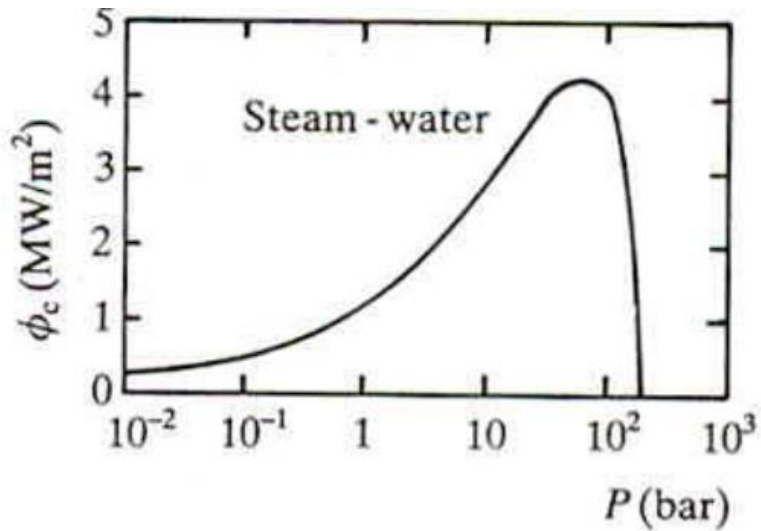
$$Q = h_o A(T_w - T_o) \quad Q \rightarrow T_w$$

Fluid-Heating Surface Combination	$C_{sf}$	$n$
Water-copper (polished)	0.0130	1.0
Water-copper (scored)	0.0068	1.0
Water-stainless steel (mechanically polished)	0.0130	1.0
Water-stainless steel (ground and polished)	0.0060	1.0
Water-stainless steel (teflon pitted)	0.0058	1.0
Water-stainless steel (chemically etched)	0.0130	1.0
Water-brass	0.0060	1.0
Water-nickel	0.0060	1.0
Water-platinum	0.0130	1.0
<i>n</i> -Pentane-copper (polished)	0.0154	1.7
<i>n</i> -Pentane-chromium	0.0150	1.7
Benzene-chromium	0.1010	1.7
Ethyl alcohol-chromium	0.0027	1.7
Carbon tetrachloride-copper	0.0130	1.7
Isopropanol-copper	0.0025	1.7



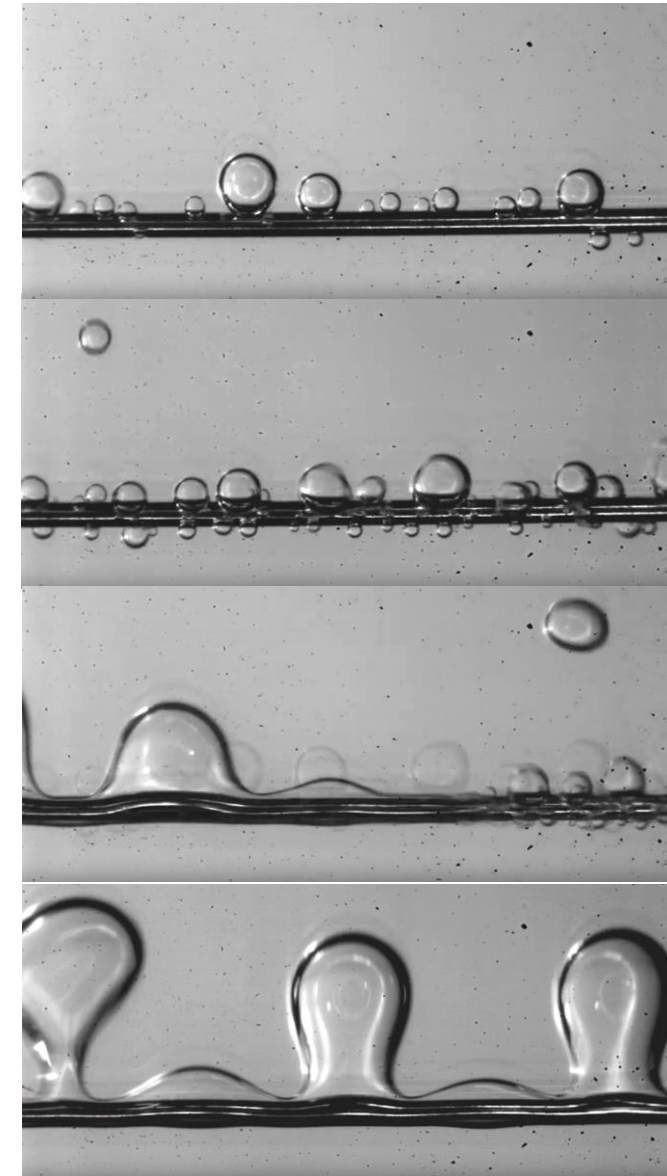
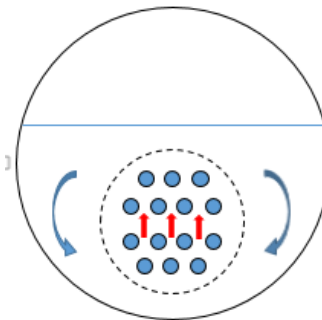
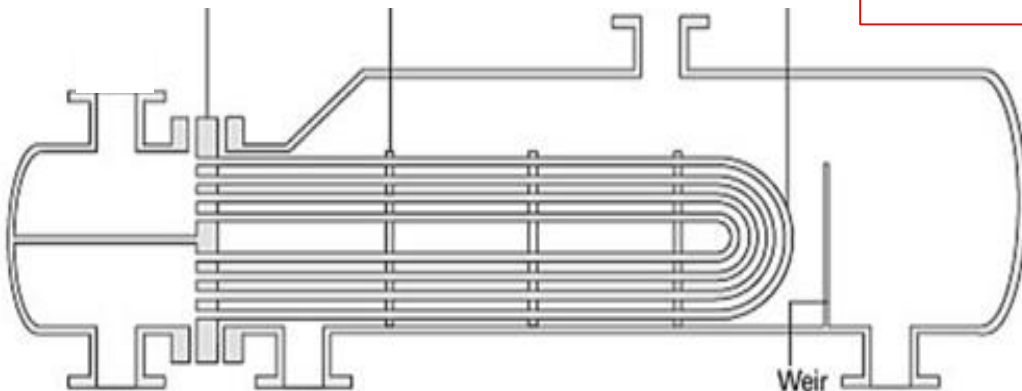
## Κρίσιμη θερμοροή-επίπεδη πλάκα

$$q_{cr} = 0,149 \lambda \rho_v^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4}$$

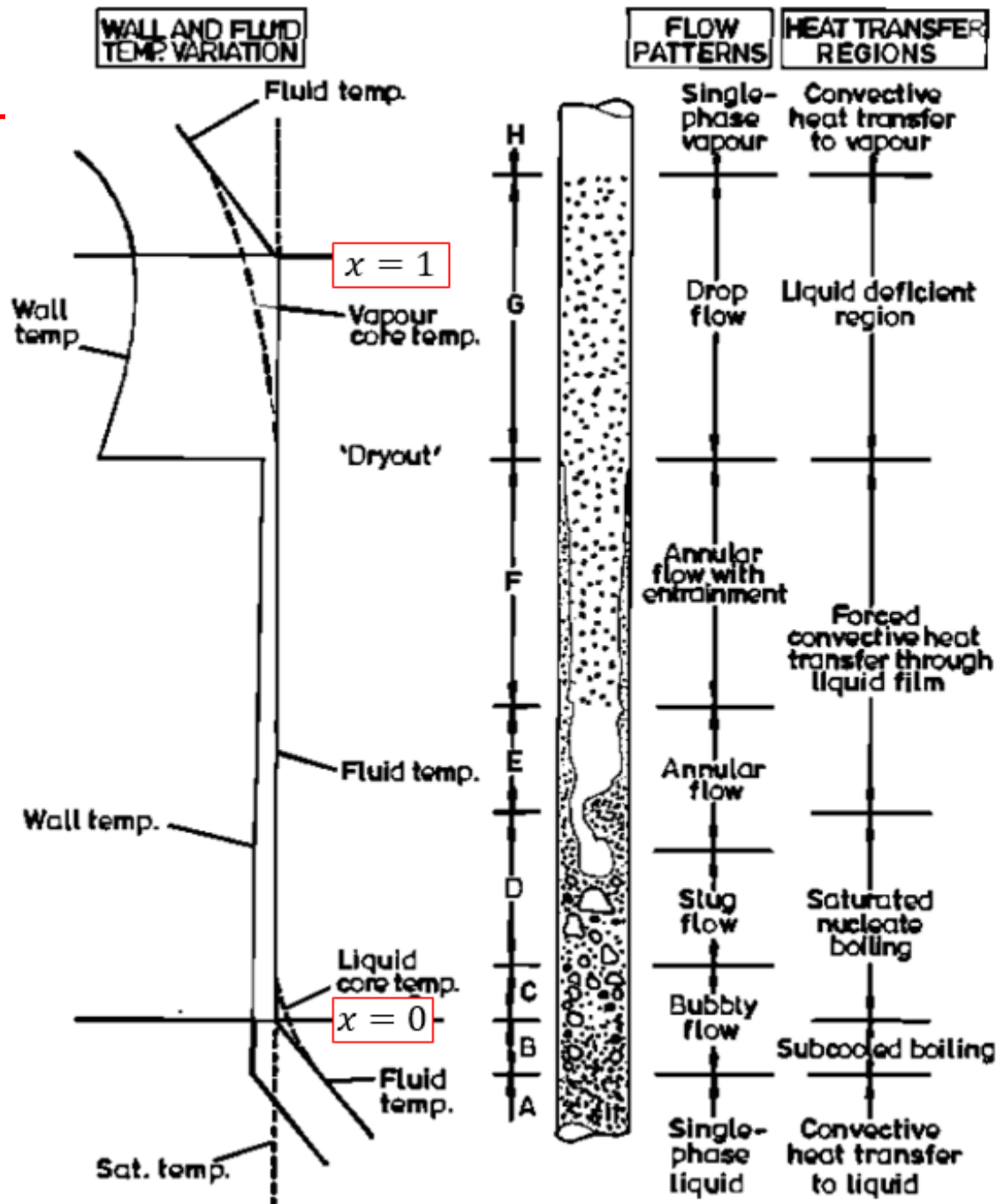


## Δέσμη οριζόντιων αυλών

$$q_{cr} = 0,44 \frac{P_T}{d} \frac{1}{\sqrt{N_T}} \lambda \rho_v^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4}$$



# Φαινομενολογία Βρασμού ροής



## Παρατηρήσεις

- Συνεχής μεταβολή της ποιότητας κατά μήκος του αυλού
- Το τοπικό καθεστώς ροής επηρεάζει τον μηχανισμό ατμοποίησης
- Κύριο φαινόμενο η μετάπτωση από βρασμό πυρήνων σε εξάτμιση (βρασμός με συναγωγή- convective boiling)

## Βρασμός με συναγωγή (εξάτμιση)

$$q = h(T_w - T_{sat}) \approx \frac{k_l}{\delta_l} (T_w - T_{sat})$$

$$\delta_l \downarrow \Rightarrow h \uparrow \Rightarrow T_w \downarrow$$

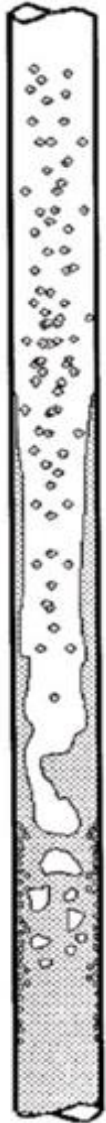
Διακοπή βρασμού πυρήνων  
όταν  $T_w - T_{sat} < \Delta T_{w,min}$

## Γενικευμένος ορισμός ποιότητας μίγματος

$$x = \frac{H - H_l^{sat}}{H_v^{sat} - H_l^{sat}} = \frac{H - H_l^{sat}}{\lambda}$$

$x < 0$  : Υπόψυκτο υγρό  
 $x > 1$  : Υπέρθερμος ατμός

# Συντελεστής μεταφοράς στο βρασμό ροής



## Συσχέτιση Chen

$$q = h(T_w - T_{sat})$$

$$h = h_{NB} + h_{CB} = Sh_{PB} + Fh_{sl}$$

$S < 1$  Συντελεστής απόσβεσης πυρηνογένεσης

$F \geq 1$  Συντελεστής διφασικής ροής

## Σχέση Foster-Zuber για στάσιμο βρασμό

$$h_{PB} = 0,00122 \frac{\Delta T_w^{0,24} \Delta p_w^{0,75} c_{p,l}^{0,45} \rho_l^{0,49} k_l^{0,79}}{\sigma^{0,5} \lambda^{0,24} \mu_l^{0,29} \rho_g^{0,24}}$$

## Υπόψυκτος βρασμός

$$q = h_{NB}(T_w - T_{sat}) + h_{sl}(T_w - T_l)$$

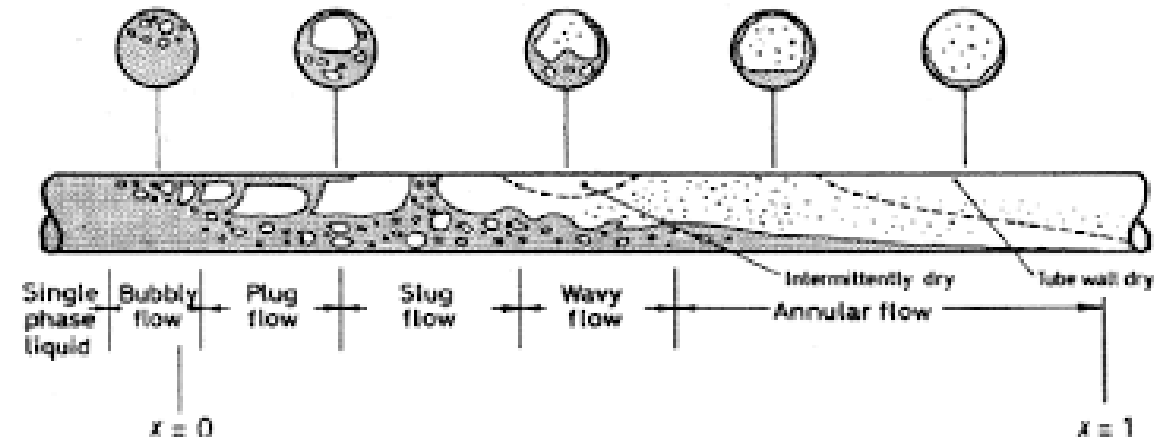
Βρασμός ροής = Πυρηνογένεση + Εξάτμιση

$$Nu_{sl} = 0,023 Re_{sl}^{0,8} Pr_l^{0,4} \quad Re_{sl} = \frac{4(1-x)W}{\pi D \mu_l}$$

$$F = \begin{cases} 2,35 (0,213 + 1/X_{tt})^{0,736} & \text{για } X_{tt} < 10 \\ 1 & \text{για } X_{tt} \geq 10 \end{cases}$$

$$S = \frac{1}{1 + 2,53 \cdot 10^{-6} (Re_{sl} F^{1,25})^{1,17}}$$

$$X_{tt}^2 = \frac{(dp/dz)_{sl}}{(dp/dz)_{sg}} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{1,8} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right) \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0,2}$$



## Ισοζύγιο ενέργειας-ομοιόμορφη θερμοροή

$$q(\pi D z) = \left( G \frac{\pi D^2}{4} \right) [x(z) - x_{in}] \lambda \Rightarrow q = \frac{GD\lambda}{4L} (x_{out} - x_{in})$$

Ισχύει και για υπόψυκτο υγρό στην είσοδο

$$\begin{aligned} q(\pi D z) &= \left( G \frac{\pi D^2}{4} \right) [x H_v^{sat} + (1 - x) H_l^{sat} - H_{l,in}] = \\ &= \left( G \frac{\pi D^2}{4} \right) [x (H_v^{sat} - H_l^{sat}) - (H_{l,in} - H_l^{sat})] = \left( G \frac{\pi D^2}{4} \right) [x(z) - x_{in}] \lambda \end{aligned}$$

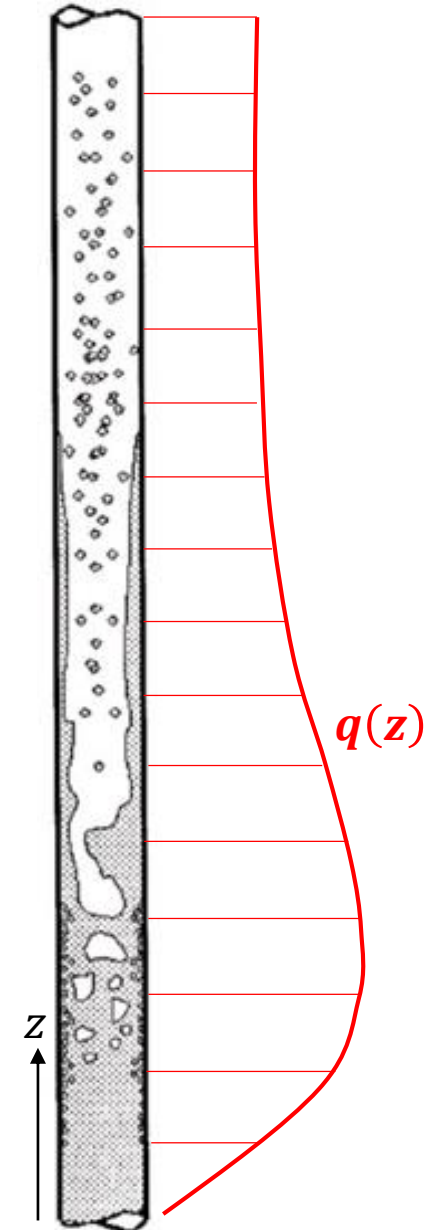
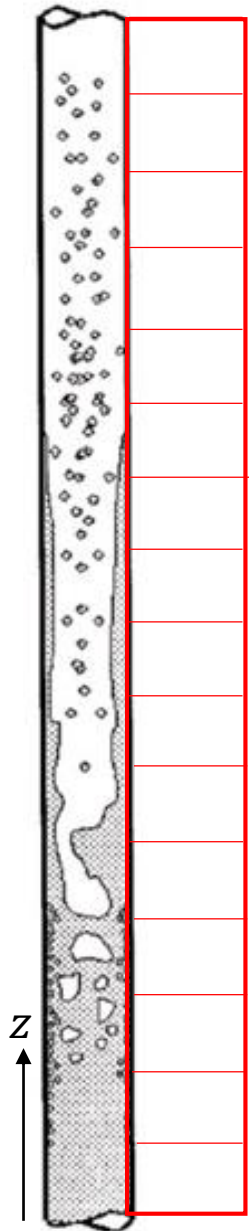
## Ισοζύγιο ενέργειας-ανομοιόμορφη θερμοροή

$$Q(z) = \int_0^z q(z) \pi D dz = \left( G \frac{\pi D^2}{4} \right) [x(z) - x_{in}] \lambda$$

$$\Rightarrow x(z) = \dots$$

$$q(z), x(z) \Rightarrow q(x)$$

**Σύγκριση:**  $q(x)$  με  $q_{cr}(x)$  (Critical Heat Flux)

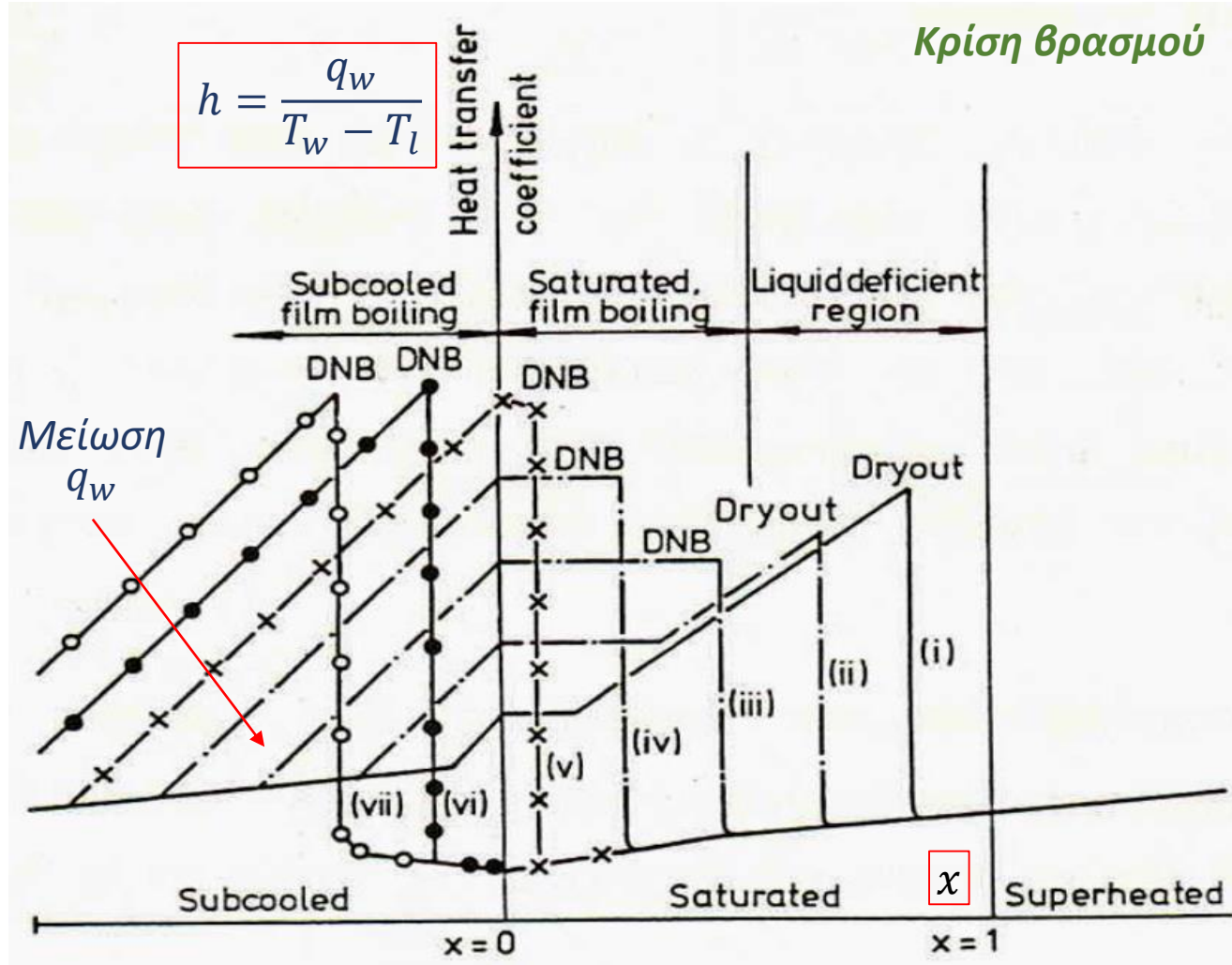




# Κρίση Βρασμού ροής-κρίσιμη θερμορροή (CHF)

Στο στάσιμο βρασμό:

$$q_{cr} = 0,149 \lambda \rho_v^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} = q_{cr}(p_{sat})$$



Στο βρασμό ροής:

**Δύο μηχανισμοί κρίσης βρασμού:**

- Σε χαμηλές ποιότητες: σχηματισμός στρώματος ατμού (DNB)
- Σε υψηλές ποιότητες: ξήρανση υγρού υμένα (Dryout)

**CHF:**  $q_{cr} = q_{cr}(p_{sat}, G, x)$

**Πίνακες κρίσιμης θερμορροής για νερό σε αγωγό με  $D=8$  mm (Groeneveld et al 2006)**

**Εξάρτηση από διάμετρο αγωγού**

$$\frac{q_{cr}(D)}{q_{cr}(8\text{mm})} = \left(\frac{8}{D}\right)^{0,5}, \quad D \leq 25 \text{ mm}$$

**Εξάρτηση από ιδιότητες ρευστού**

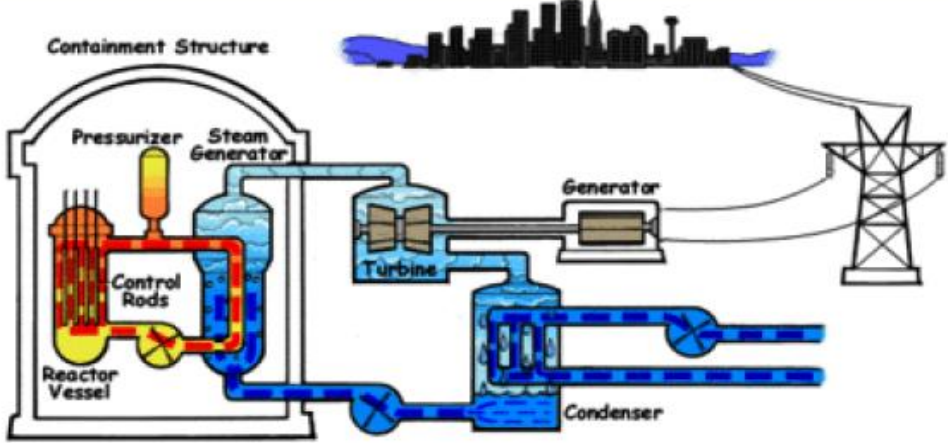
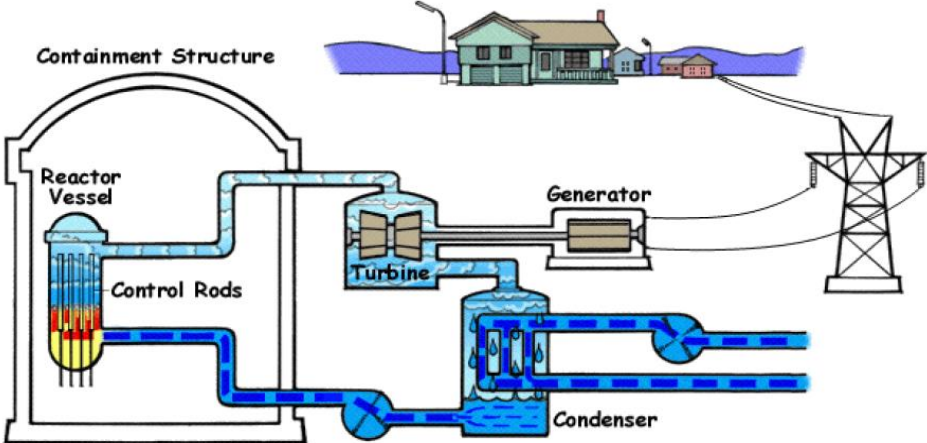
$$\frac{\rho_l}{\rho_v}, \frac{G}{\sqrt{\rho_l \sigma / D}}, \frac{q_{cr}}{G \lambda} \Rightarrow p_{sat}, G, q_{cr}$$



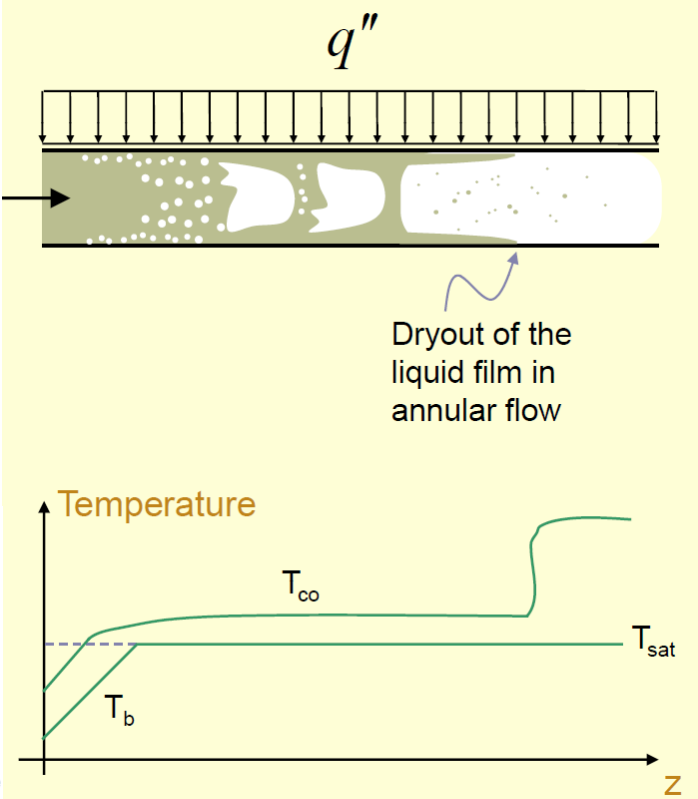
Pressure	Mass Flux	CHF [kW m <sup>-2</sup> ]																							
[kPa]	[kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	<i>CHF look-up tables Groeneveld et al (2006)</i>																							
5000	1500	14030	11668	9617	8115	7597	7296	7024	6470	5710	5375	4875	4438	4167	3795	3357	2941	2531	2290	914	592	393	200	0	
5000	2000	15633	12936	10401	8530	7889	7408	6946	6107	5170	4836	4340	3913	3599	3257	2909	2412	1979	1182	638	354	188	130	0	
5000	2500	17335	14268	11308	8887	7972	7432	6712	5661	4880	4445	4017	3662	3295	2876	2689	1915	955	651	447	195	99	51	0	
5000	3000	18794	15433	12150	9231	8180	7463	6490	5427	4718	4265	3857	3476	3104	2578	2283	1429	708	533	405	179	73	41	0	
5000	3500	19936	16374	12894	9768	8306	7477	6368	5026	4484	3984	3644	3312	2932	2394	1781	1164	910	706	513	290	103	42	0	
5000	4000	20949	17217	13569	9991	8683	7658	6295	4783	4200	3584	3367	3140	2745	2274	1402	1188	1060	922	593	320	111	44	0	
5000	4500	21962	18016	14114	10137	9063	7837	6323	4905	4130	3522	3305	3023	2672	2065	1424	1245	1128	1046	649	346	117	46	0	
5000	5000	22867	18766	14525	10880	9540	8183	6486	5030	4103	3487	3287	3017	2684	2024	1455	1329	1224	1112	695	362	124	51	0	
5000	5500	23661	19456	15309	11569	10048	8548	6741	5245	4051	3480	3299	3060	2672	2047	1628	1480	1351	1176	743	379	135	57	0	
5000	6000	24391	20103	15958	12239	10650	8921	7328	5430	4008	3507	3314	3079	2696	2057	1747	1598	1449	1240	793	405	152	67	0	
5000	6500	25098	20718	16511	12734	10892	9511	7643	5637	4183	3523	3357	3128	2771	2258	1947	1783	1549	1314	855	437	172	78	0	
5000	7000	25860	21312	16907	13189	11608	9908	7949	5781	4373	3553	3386	3182	2857	2430	2136	1893	1639	1396	926	482	197	91	0	
5000	7500	26597	21982	17360	13563	11914	10298	8281	6006	4572	3786	3444	3201	2944	2603	2250	1988	1716	1466	990	512	211	98	0	
5000	8000	27254	22428	17865	13912	12316	10851	8676	6217	4805	4010	3629	3362	3178	2817	2409	2068	1783	1533	1052	543	225	105	0	
	X→	-0.50	-0.40	-0.30	-0.20	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1	
7000	0	5445	5059	4676	4323	4139	3937	3677	3322	2696	2256	1848	1479	1243	1036	891	778	692	621	525	389	267	209	0	
7000	50	5919	5536	5191	4863	4698	4520	4306	3998	3399	2986	2624	2264	2042	1859	1712	1588	1477	1366	1151	1010	473	325	0	
7000	100	6912	6301	5871	5584	5462	5261	5095	4849	4271	3776	3499	3290	3142	3034	2906	2850	2651	2486	2123	1673	1205	768	0	
7000	300	7445	6709	6259	6020	5914	5761	5662	5495	5182	4752	4464	4070	3764	3611	3417	3250	3028	2738	2286	1994	1408	869	0	
7000	500	7842	6895	6435	6188	5996	5931	5818	5672	5408	4922	4521	4196	3989	3812	3602	3459	3221	2905	2482	1985	1547	869	0	
7000	750	9129	7841	6867	6263	6154	5998	5895	5776	5430	4987	4538	4131	3918	3709	3464	3327	3118	2770	2312	1904	1400	742	0	
7000	1000	10186	8774	7390	6532	6313	6276	6162	5864	5366	4920	4399	3935	3723	3447	3112	2884	2713	2432	2085	1767	1506	341	0	
7000	1500	11920	10072	8460	7262	6915	6647	6308	5729	5059	4561	4039	3612	3279	2991	2698	2490	2264	1991	1591	599	372	318	191	0
7000	2000	13294	11209	9172	7557	7279	6769	6187	5327	4570	4020	3552	3174	2864	2566	2353	1919	1406	793	483	267	197	134	0	
7000	2500	14680	12245	9774	7920	7382	6765	5895	4977	4178	3639	3207	2867	2552	2211	1941	1487	813	521	342	177	103	58	0	
7000	3000	15871	13214	10463	8259	7522	6778	5785	4761	3971	3366	3014	2640	2333	2111	1685	951	493	429	307	157	77	43	0	
7000	3500	16889	14072	11223	8783	7711	6972	5738	4518	3739	3127	2816	2482	2188	1798	1357	851	631	531	388	221	96	41	0	
7000	4000	17783	14824	11868	9277	8077	7118	5593	4226	3539	2855	2616	2362	2104	1710	1251	957	789	681	444	255	99	44	0	
7000	4500	18619	15498	12439	9619	8281	7208	5381	4156	3422	2650	2472	2268	2057	1647	1239	1006	867	779	487	266	102	45	0	
7000	5000	19434	16132	12870	10084	8686	7415	5486	4350	3409	2611	2486	2251	2040	1619	1279	1052	950	854	526	277	106	47	0	
7000	5500	20138	16733	13579	10563	9272	7844	6153	4649	3405	2688	2460	2325	2076	1662	1397	1217	1065	933	576	298	115	52	0	
7000	6000	20703	17309	14047	11354	9947	8657	6697	4756	3417	2725	2487	2353	2087	1697	1476	1339	1184	1018	637	327	131	60	0	
7000	6500	21284	17855	14610	11951	10355	9156	7135	4905	3437	2733	2525	2442	2241	1938	1688	1515	1303	1103	702	360	149	69	0	
7000	7000	21889	18357	15013	12260	10817	9456	7309	4949	3504	2872	2648	2499	2348	2094	1852	1615	1393	1182	771	401	170	80	0	
7000	7500	22505	18841	15385	12539	11244	9779	7455	5004	3629	3017	2792	2596	2488	2263	2039	1776	1504	1264	838	433	182	86	0	
7000	8000	23064	19305	15794	12917	11519	10059	7792	5163	3777	3222	3120	3063	2927	2605	2282	1893	1592	1345	904	463	193	91	0	



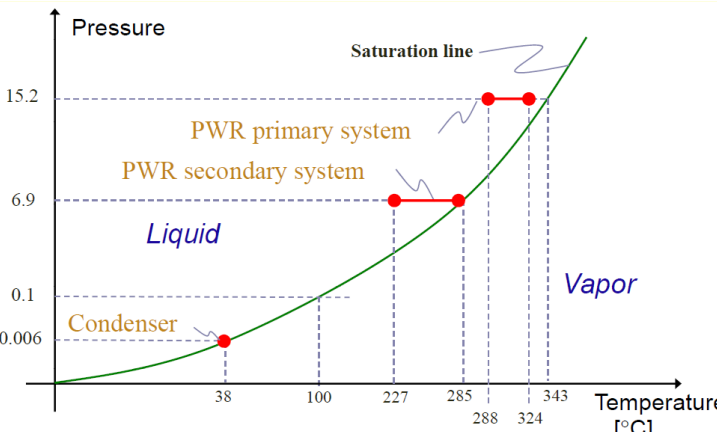
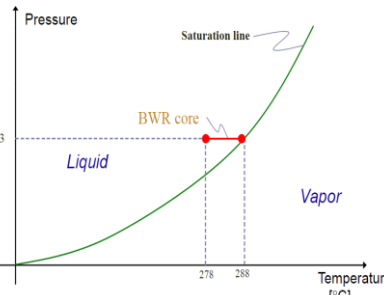
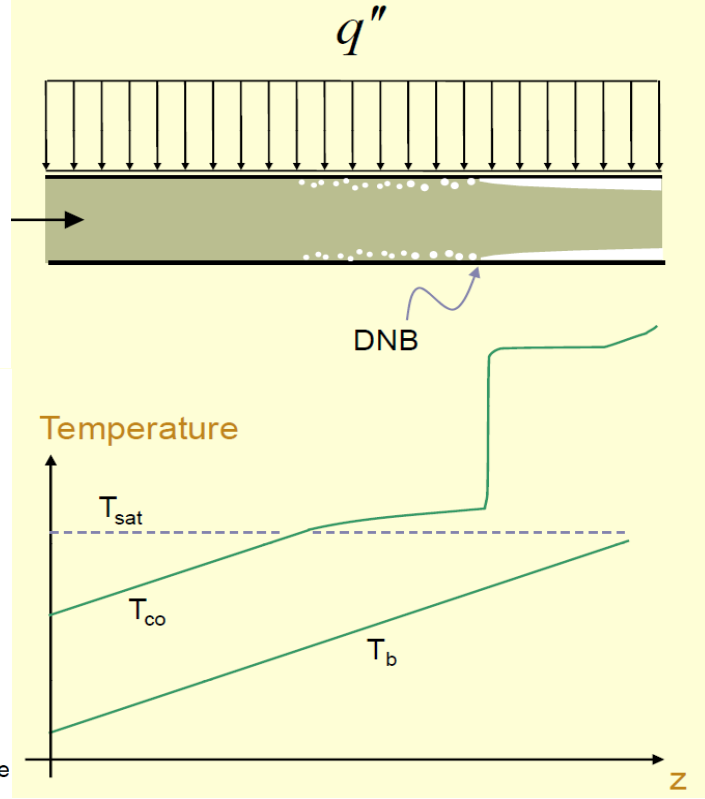
# Κρίση Βρασμού στην πυρηνική τεχνολογία



**BWR**  
Boiling  
Water  
Reactor



**PWR**  
Pressurized  
Water  
Reactor



Ο έλεγχος γίνεται τοπικά κατά μήκος του αυλού

$$q(x) \ll q_{cr}(x)$$

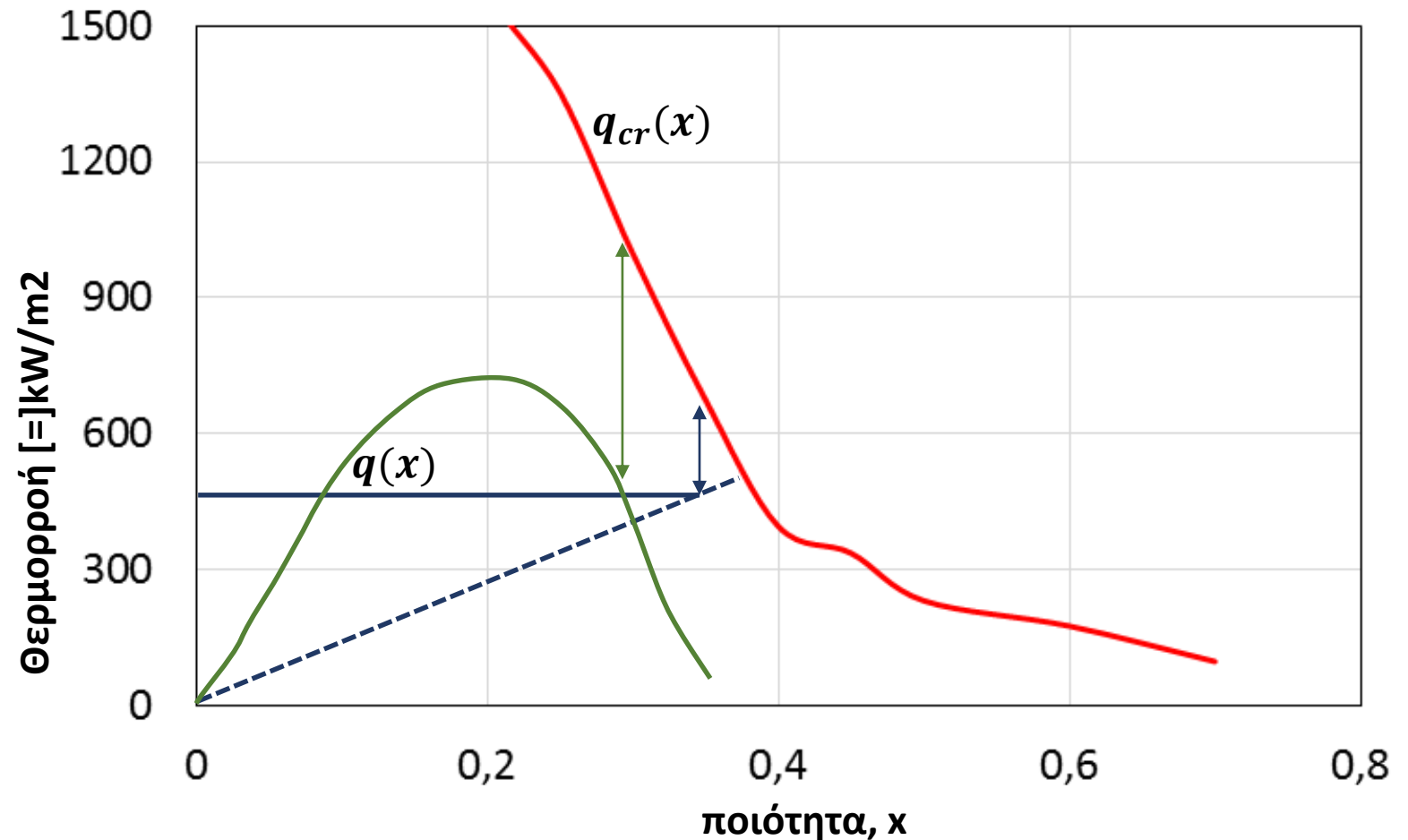
Ομοιόμορφη θερμοροή

$$q = \frac{GD\lambda}{4L} (x_{out} - x_{in}) = const$$

Ανομοιόμορφη θερμοροή

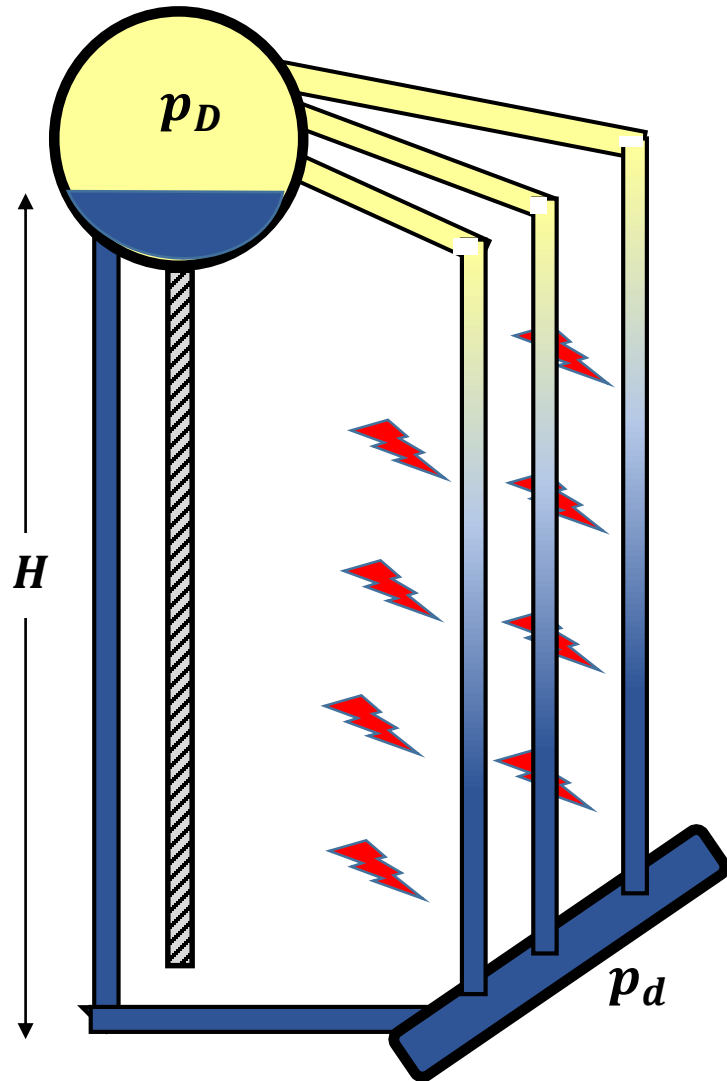
$$q(z), x(z) \Rightarrow q(x)$$

$$Q(z) = \int_0^z q(z)\pi D dz = \left(G \frac{\pi D^2}{4}\right) [x(z) - x_{in}]\lambda$$



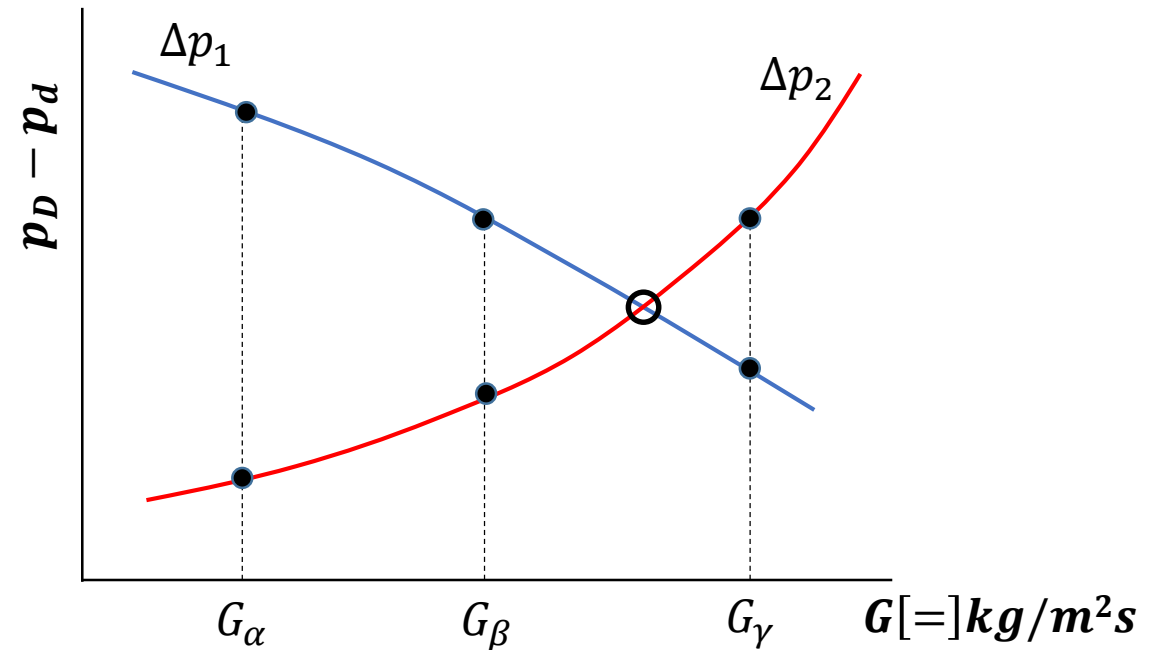


# Πρόβλεψη φυσικής ανακυκλοφορίας

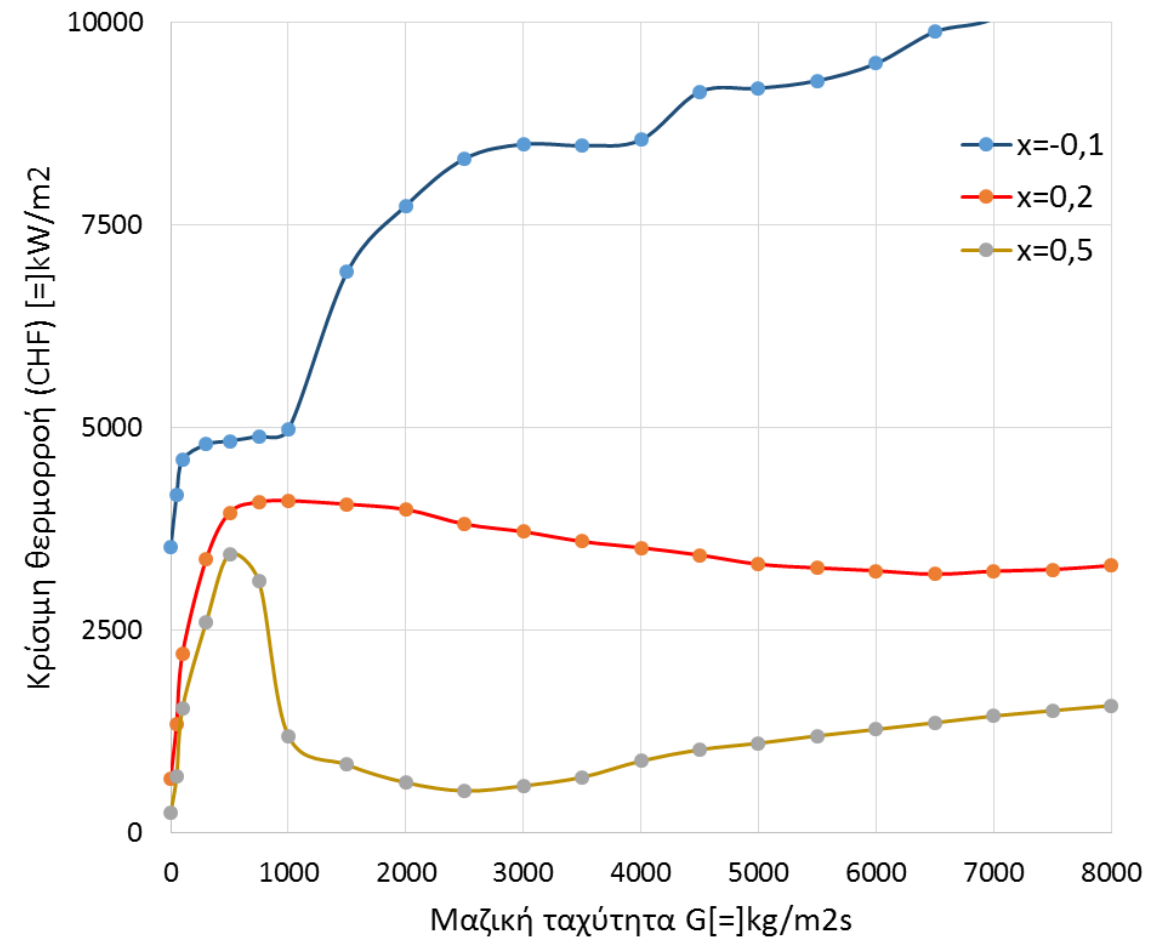
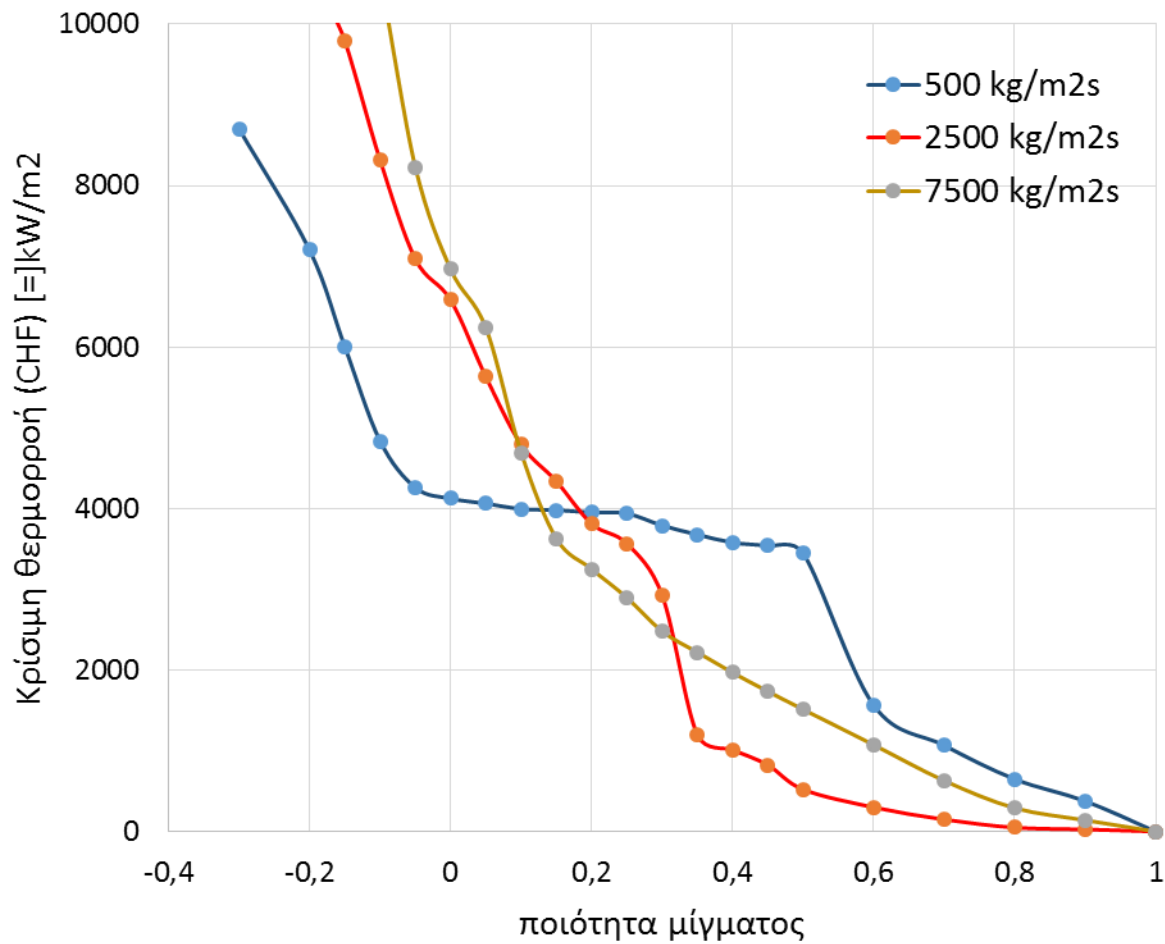


$$p_d = p_D + \rho_l g H - \Delta p_{f,l} \Rightarrow p_d - p_D = \Delta p_1 = \rho_l g H - \Delta p_{f,l}$$

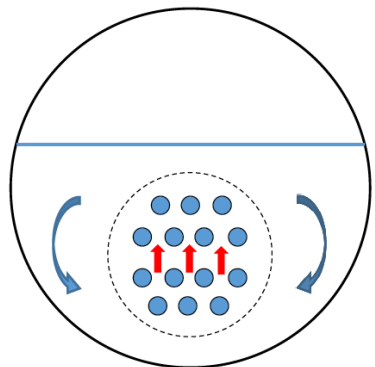
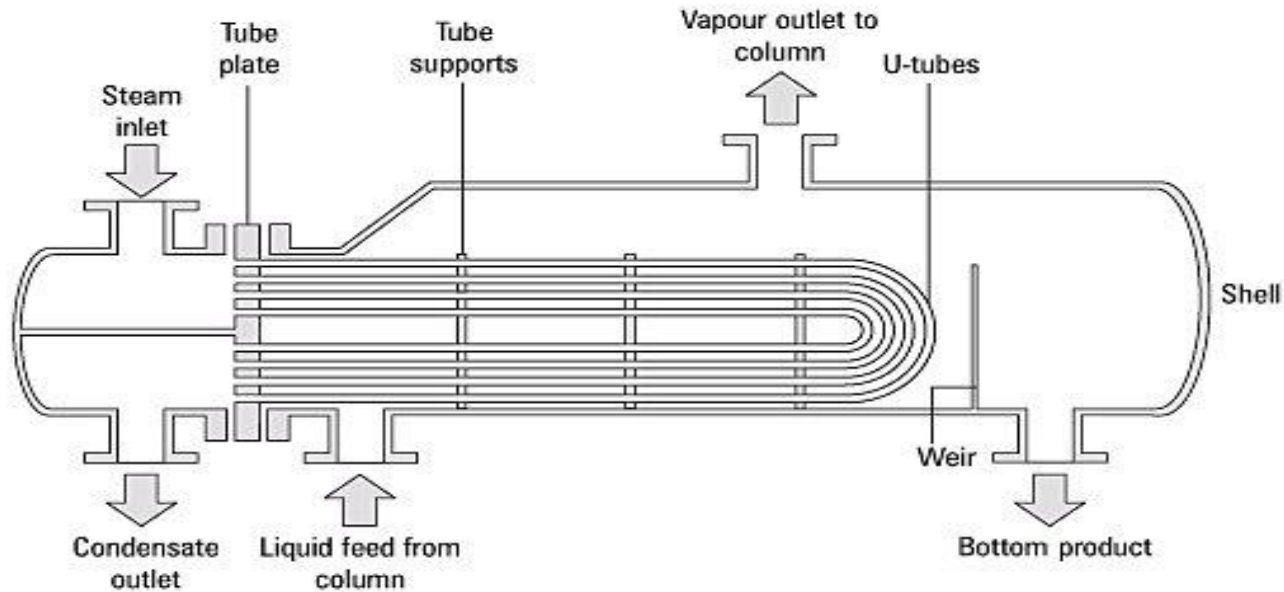
$$p_d = p_D + \Delta p_{g,2\Phi} + \Delta p_{f,2\Phi} + \Delta p_{a,2\Phi} \Rightarrow p_d - p_D = \Delta p_2 = \Delta p_{g,2\Phi} + \Delta p_{f,2\Phi} + \Delta p_{a,2\Phi}$$



# Παράδειγμα κρίσιμης θερμορροής ( $P_{sat}=10 \text{ bar}$ )

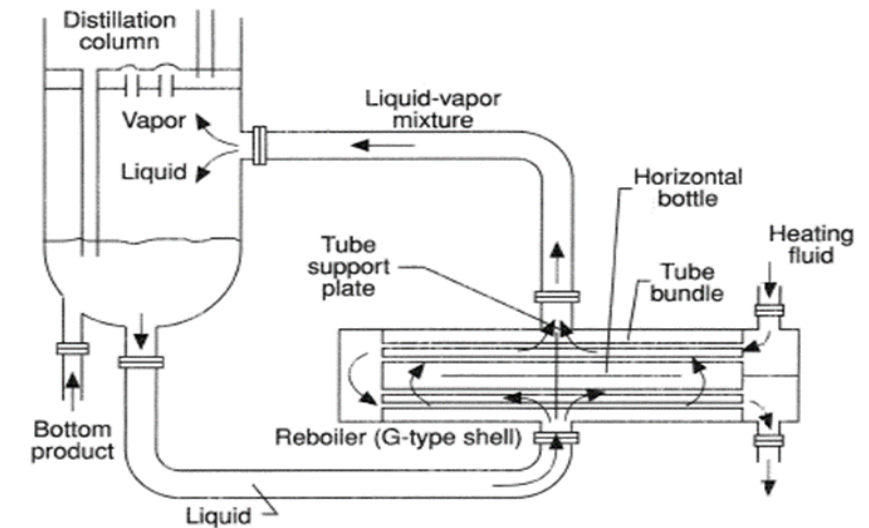
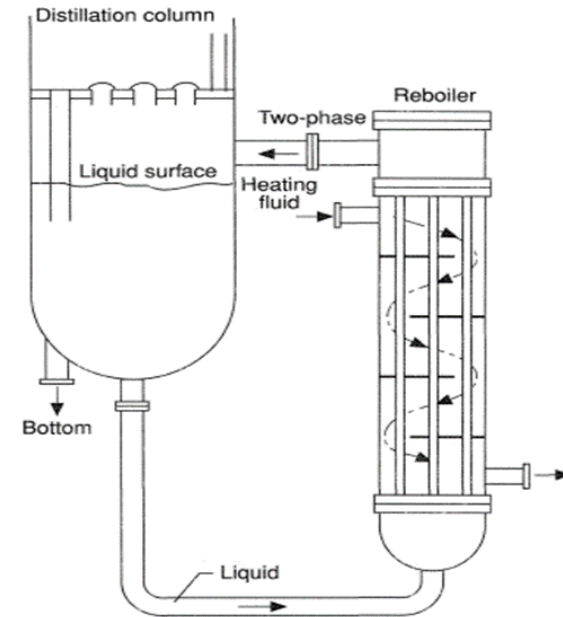


## Αναβραστήρας τύπου λέβητα

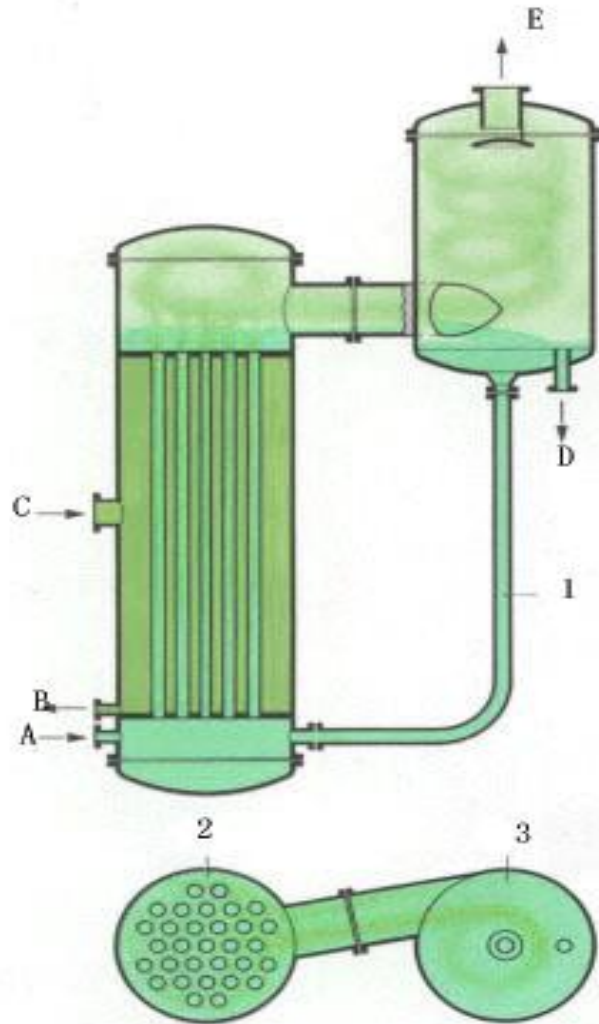


$D_{\text{shell}}/D_{\text{bundle}}$	$Q [=] \text{ kW/m}^2$
1,2-1,5	<25
1,4-1,8	25-40
1,7-2,0	>40

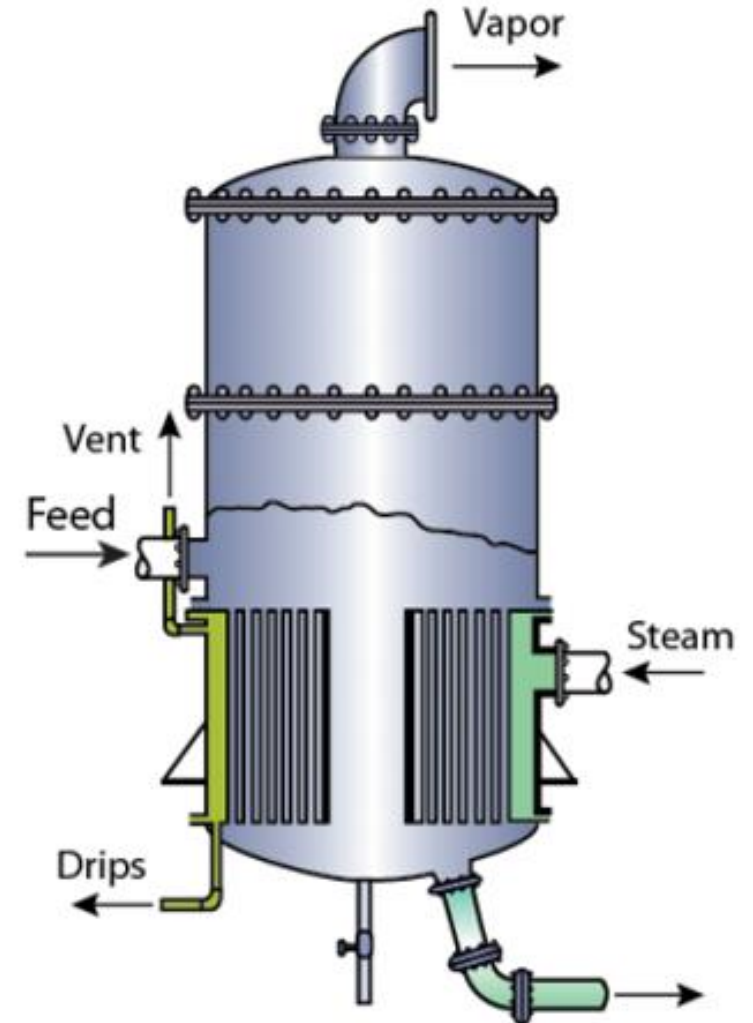
## Κατακόρυφος και Οριζόντιος αναβραστήρας τύπου θερμοσίφωνα



## Εξατμιστήρας επιμήκων αυλών



## Εξατμιστήρας τύπου καλαθίου



# Εξατμιστήρας πίπτοντος λεπτού υμένα

## Τοπική ανάλυση

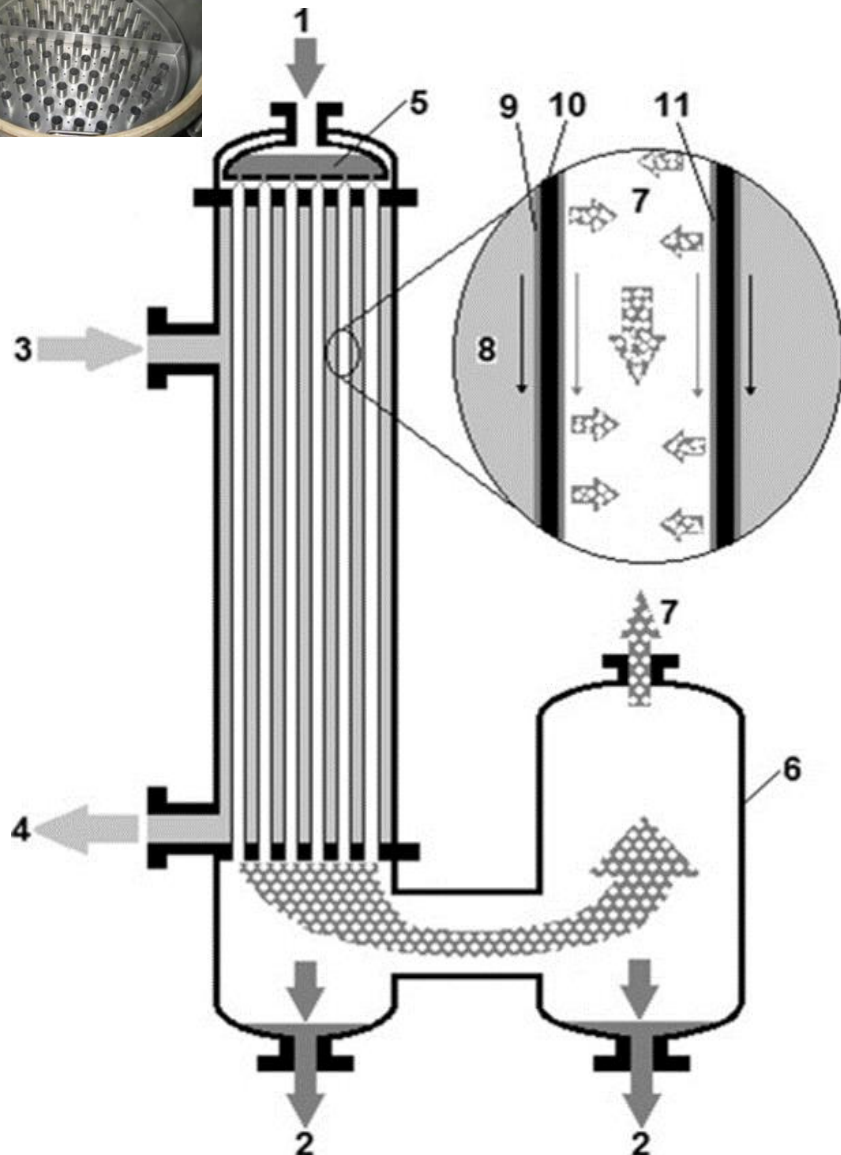
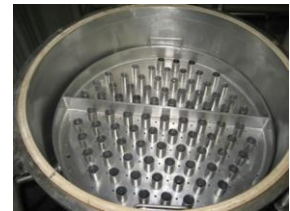
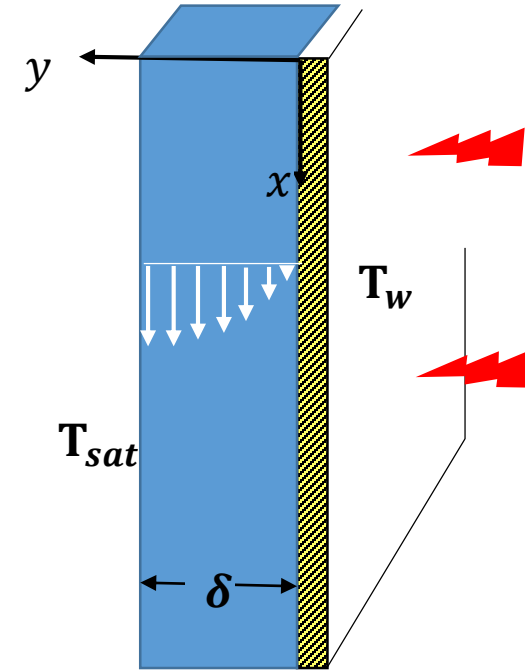
$$Re = \frac{4 m}{\pi D \mu_l} = \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g \delta^3}{3 \mu_l^2}$$

$$h = \frac{k_l}{\delta} \Rightarrow Nu = \frac{h}{k_l} \left[ \frac{\mu_l^2}{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g} \right]^{1/3} = 1,1 Re^{-1/3}$$

$$Nu = 0,82 Re^{-0,22}, \quad Re > 30$$

$$Nu = 0,0038 Re^{0,4} Pr_l^{0,65}, \quad Re \geq 5800 / Pr_l^{1,06}$$

$$Nu = A Re^n Pr_l^m$$



## Ολοκλήρωση κατά μήκος του αυλού

$$dQ = h (\pi D dz) (T_w - T_{sat}) = \lambda dm \Rightarrow$$

$$\left[ \frac{\mu_l \lambda}{4(T_w - T_{sat})L} \right] \left[ \frac{\mu_l^2}{k_l^3 \rho_l (\rho_l - \rho_g) g} \right]^{1/3} = \frac{A (1 - n) Pr_l^m}{Re_0^{1-n} - Re_L^{1-n}}$$