

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Andronikos E. Filios

**Fluid Mechanics and
Turbomachinery Laboratory**

<http://fmtulab.wordpress.com/>

Εισαγωγή

- Διάκριση υλικών σωμάτων (στερεά-ρευστά)
Κριτήριο διάκρισης: Διατμητική τάση
- Χαρακτηριστικές ιδιότητες
Πυκνότητα (Συμπιεστότητα) & Ιξώδες
- Μακροσκοπική θεώρηση στη μελέτη των ρευστών – Υπόθεση συνεχούς μέσου

Ο υπολογισμός της κινητικής κατάστασης όλων των μορίων ενός όγκου νερού 1 cm^3 ο οποίος περιέχει $3,3 \times 10^{22}$ μόρια τα οποία συγκρούονται κατά μέσο χρόνο κάθε 10^{-12} sec και για τη χρονική περίοδο ενός δευτερολέπτου, σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος εκτελεί 10^9 πράξεις το δευτερόλεπτο, θα απαιτούσε 10^{12} εκατομμύρια χρόνια!

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

- Διάκριση μεγεθών
Βαθμωτά, Διανυσματικά, Διαδικά/Τανυστές 2^{ης} τάξης
- Διαστάσεις φυσικών μεγεθών (Maxwell)

$$[\phi] = \text{KL}^a \text{M}^b \text{T}^c \Theta^d$$

- Αδιάστατα μεγέθη ($a=b=c=d=0$)

$$[\phi] = 1$$

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ

- Πυκνότητα ομογενούς ρευστού: $\rho = \lim_{dV \rightarrow 0} \frac{dm}{dV}$ [kg/m³]

Εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία και είναι συνάρτηση της θέσης και του χρόνου

Ασυμπίεστα ρευστά ($\rho = \text{const.}$) \Rightarrow ΥΓΡΑ

Συμπιεστά ρευστά ($\rho \neq \text{const.}$) \Rightarrow ΑΕΡΙΑ

Κριτήριο συμπιεστότητας ($\Delta\rho/\rho$)

Ασυμπίεστα ρευστά ($\Delta\rho/\rho \leq 1\%$)

Χαρακτηριστικές τιμές πυκνότητας

$\rho_{\text{water}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{air}} = 1,23 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{oil}} = 800 \text{ kg/m}^3$

Γενικά: $\rho_{\text{ΥΓΡΩΝ}}/\rho_{\text{ΑΕΡΙΩΝ}} = 0(3)$!

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (συνέχεια)

- Εξάρτηση της πυκνότητας από την πίεση (T=σταθ.)

Πυκνότητα υγρών \approx σταθερή

Παράδειγμα

Για το νερό ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$): Αν $\Delta p/p = 220$: $\Delta \rho/\rho = 1\%$

Πυκνότητα αερίων = f (πίεση)

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (συνέχεια)

- Εξάρτηση της πυκνότητας από την θερμοκρασία (ρ =σταθ.)

Νερό $[\rho(t)]_{\text{water}} \approx 1000 - 0,0178|t - 4|^{1,7} \pm 0,2\% \quad [0^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}]$

Αέρας $[\rho(t)]_{\text{air}} \approx \frac{353}{273+t} \pm 0,04\%$

Άσκηση: *Να υπολογισθούν οι πυκνότητες του νερού και του αέρα για θερμοκρασίες $0 < t < 100^\circ\text{C}$ με $\delta t = 5^\circ\text{C}$ και τα αποτελέσματα αφού «πινακοποιηθούν» και παρασταθούν σε διαγράμματα να σχολιασθούν!!!*

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (συνέχεια)

- Σχετική πυκνότητα $\bar{\rho} = \rho / \rho_{\text{ref}}$
Εφαρμογή: Αραιόμετρα - Πυκνόμετρα
- Μέτρηση πυκνότητας σε πετροχημικές βιομηχανίες
Βαθμοί °Be (*Baume*) και **°API** (*American Petroleum Institute*)

Βαθμοί °Be



$\bar{\rho} > 1$:

$$\bar{\rho}_{15,6^{\circ}\text{C}/15,6^{\circ}\text{C}} = \frac{145}{145 - ^{\circ}\text{Be}}$$

$\bar{\rho} < 1$:

$$\bar{\rho}_{15,6^{\circ}\text{C}/15,6^{\circ}\text{C}} = \frac{140}{130 + ^{\circ}\text{Be}}$$

Βαθμοί °API



$$\bar{\rho}_{15,6^{\circ}\text{C}/15,6^{\circ}\text{C}} = \frac{141,5}{131,5 + ^{\circ}\text{API}}$$

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (συνέχεια)

- Ειδικός όγκος ($v=1/\rho$, m^3/kg)
- Ειδικό βάρος ($\gamma=\rho g$, N/m^3 ή $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$)

Παραδείγματα

$$\gamma_{\text{air}}=12,06 \text{ N}/\text{m}^3$$

$$\gamma_{\text{oil}}=7.848 \text{ N}/\text{m}^3$$

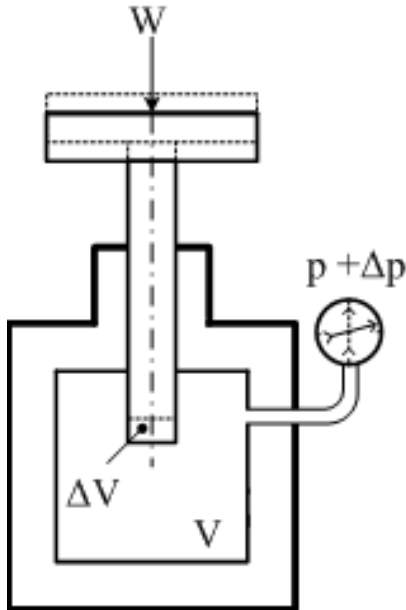
$$\gamma_{\text{water}}=1000 \text{ N}/\text{m}^3$$

$$\gamma_{\text{mercury}}=135.869 \text{ N}/\text{m}^3$$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

Ορισμός: $k = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$, [1/Pa]

Μέτρο Ελαστικότητας: $E = 1/k$, [Pa]



$$E = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho}$$

Παραδείγματα

$$E_{\text{air}} = 1,4 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$E_{\text{water}} = 2,06 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$k_{\text{water}} = 4,85 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$$

Αν $\Delta p = 1$ at τότε
 $-\Delta V/V = 0,005\%$

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$a_{\text{water}} = \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^9}{1000}} \text{ m/s} \approx 1435 \text{ m/s} \approx 5.160 \text{ km/h}$$

$$a_{\text{air}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 10^5}{1,23}} \text{ m/s} \approx 337 \text{ m/s} \approx 1.210 \text{ km/h}$$

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΥΒΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

Το πρόσημο «-» αιτιολογείται από την μείωση της πυκνότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας

με εξαίρεση

μόνο το νερό

και για την περιοχή θερμοκρασιών

$0^{\circ}\text{C} \div 4^{\circ}\text{C}$

όπου $(\partial \rho / \partial T)_p > 0$

ΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

$$p = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dF}{dA}, \quad [\text{Pa}]$$

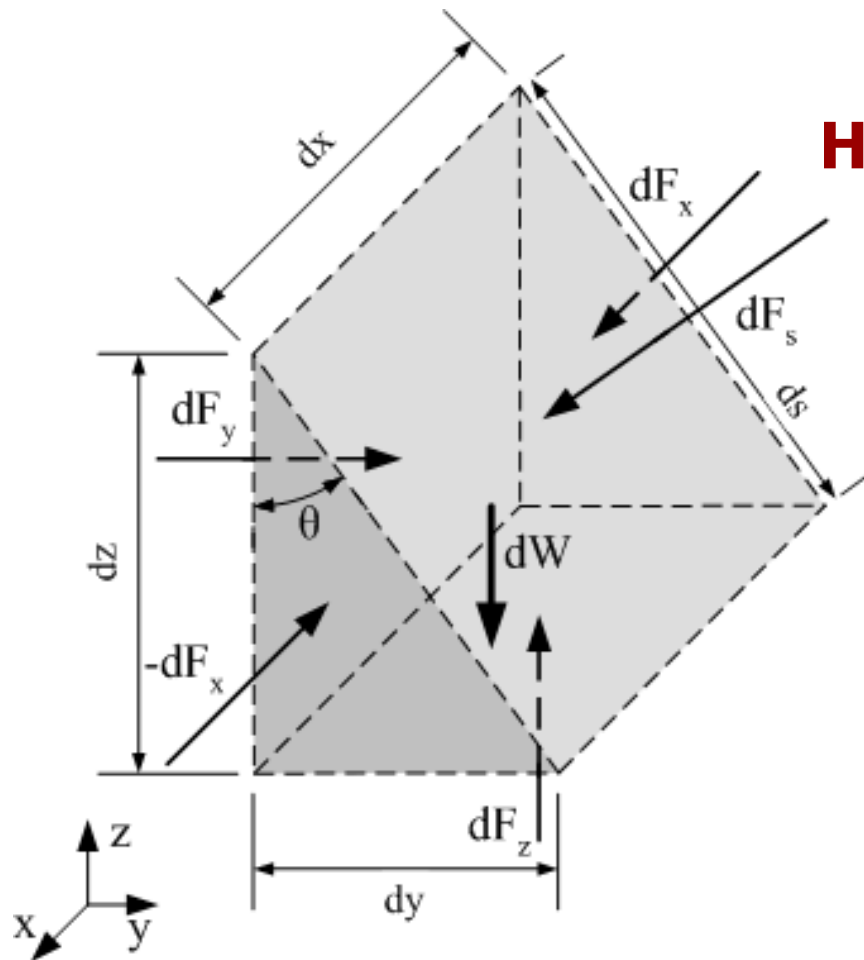
Η πίεση είναι βαθμωτό μέγεθος !

$$p_y dx dz - p_s \frac{dz}{\cos \theta} dx \cos \theta = 0$$

$$p_z dx dy - p_s \frac{dy}{\sin \theta} dx \sin \theta - \frac{\rho g}{2} dx dy dz = 0$$

≈ 0

$$p = p_y = p_z = p_s$$



Μονάδες πίεσης

	atm	bar	Pa	cmHg	Torr	mH ₂ O
1 atm	1	1,013	101.325	76	760	
1 bar		1	10 ⁵			
1 Pa		10 ⁻⁵	1			
1 cmHg				1	10	
1 Torr				0,1	1	
1 mH ₂ O			9.806,65			1

Άσκηση: Να συμπληρωθούν οι τιμές του Πίνακα

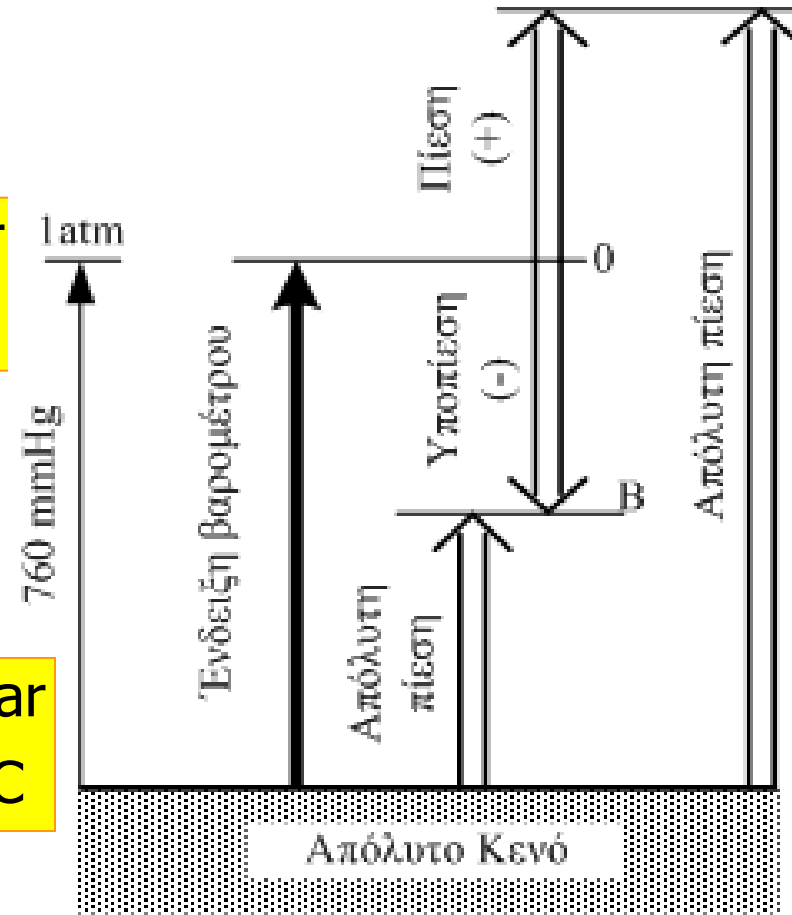
Φυσικές & Τεχνικές συνθήκες

- Κανονικές φυσικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας

$$p_n = 101325 \text{ Pa} = 101,325 \text{ kPa} = 1,013 \text{ bar}$$
$$T_n = 273,15 \text{ K} \approx 273 \text{ K} \quad \text{ή} \quad t_n = 0^\circ \text{C}$$

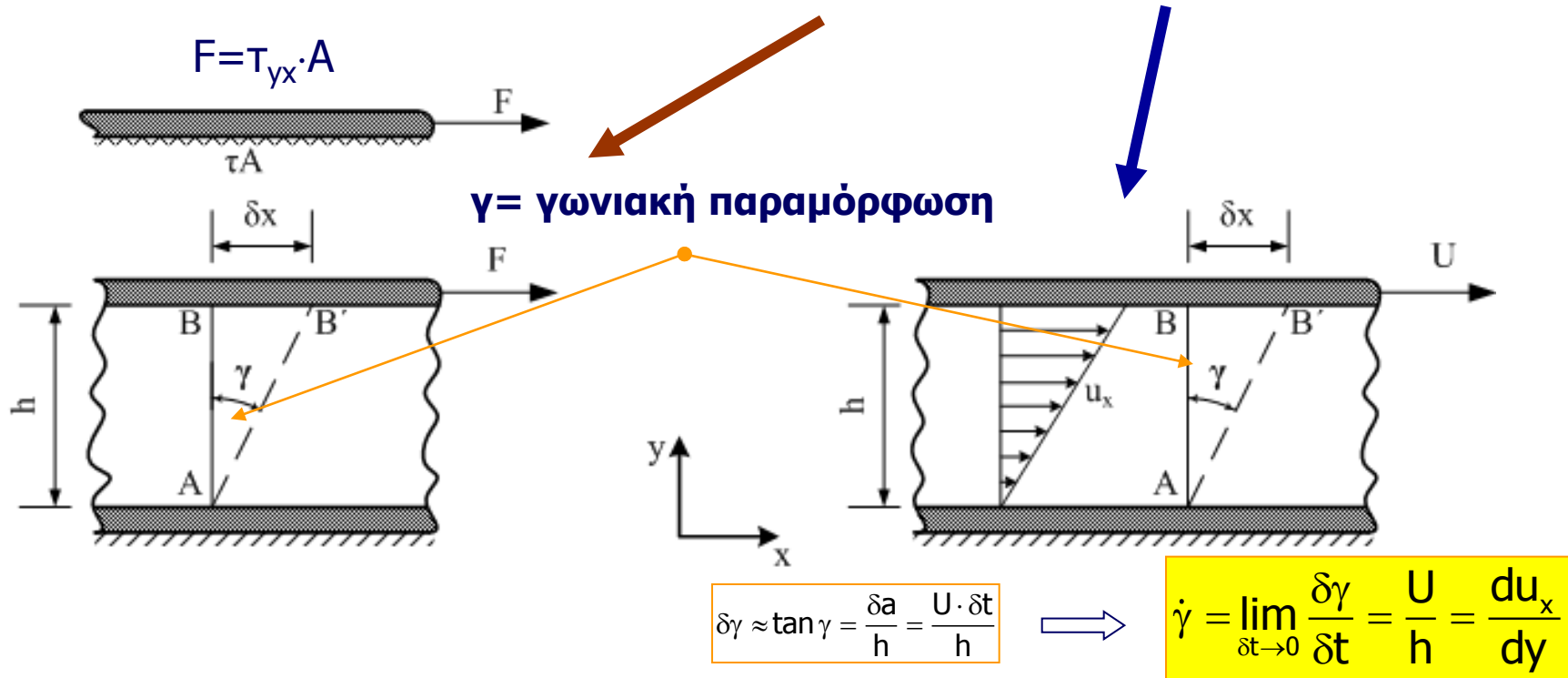
- Κανονικές τεχνικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας

$$p_n = 98066,5 \text{ Pa} = 98,0665 \text{ kPa} \approx 0,981 \text{ bar}$$
$$T_n = 293,15 \text{ K} \approx 293 \text{ K} \quad \text{ή} \quad t_n = 20^\circ \text{C}$$



ΙΞΩΔΕΣ

Διατμητικές τάσεις σε στερεά και ρευστά



Επανάληψη του πειράματος με διαφορετικές τιμές της δύναμης F , επομένως της διατμητικής τάσης τ_{yx} , δείχνει ότι

$$\tau_{yx} \propto \dot{\gamma} \quad \text{ή} \quad \tau_{yx} \propto \frac{du_x}{dy}$$

ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)

$$\tau_{yx} = -\mu \cdot \frac{du_x}{dy}$$

Διατμητική τάση

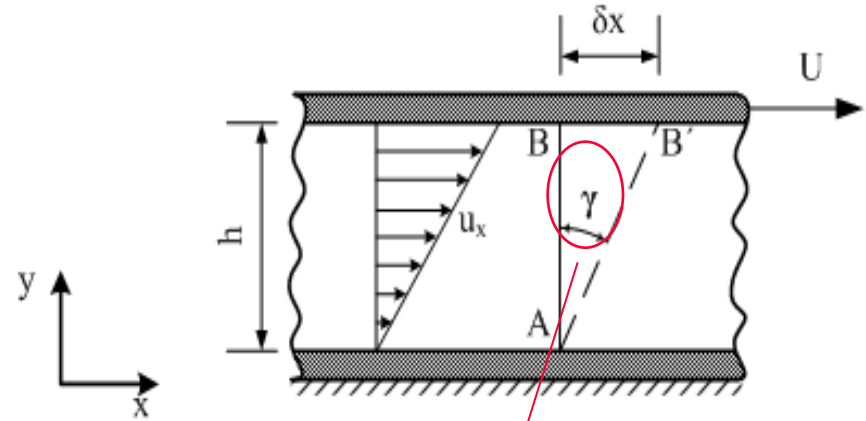
Δυναμικό ιξώδες

Κλίση της ταχύτητας

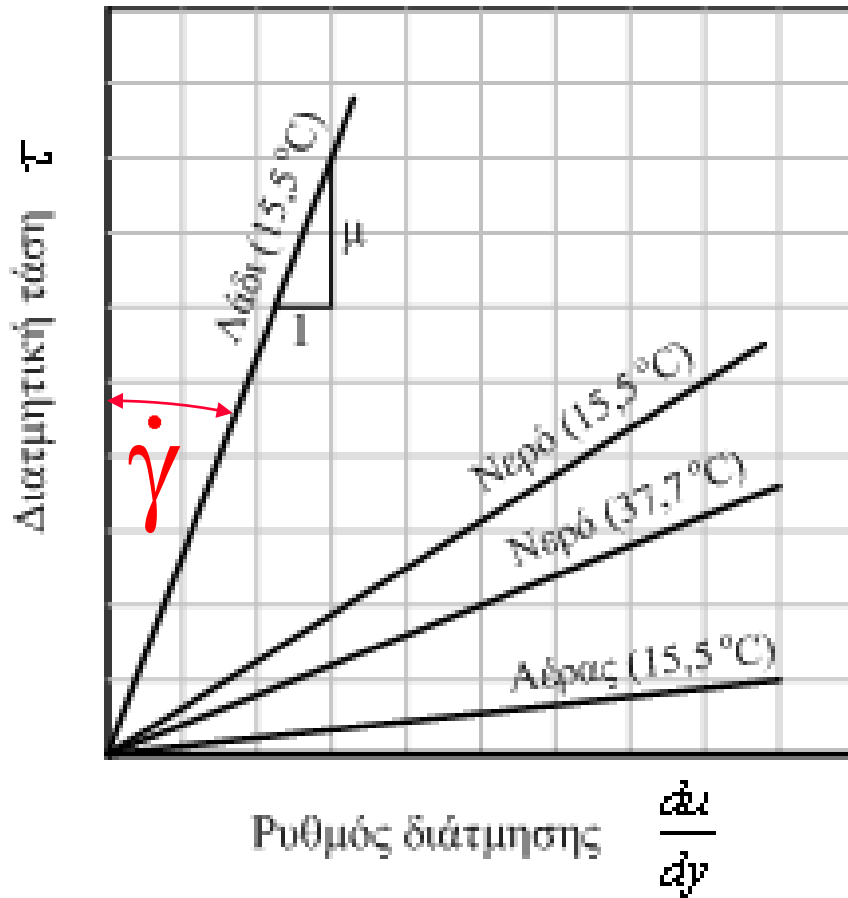
Φορά μεταφοράς ορμής

Μηχανισμός μεταφοράς ορμής

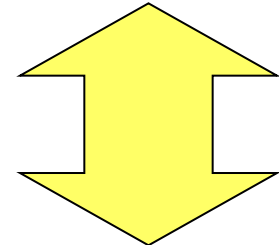
Μεταφορά ορμής σε διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση της ροής **από τα πλουσιότερα - σε ορμή - στρώματα προς τα φτωχότερα**



ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)



$$\tau_{yx} = - \mu \cdot \frac{du_x}{dy}$$



ΝΕΥΤΩΝΕΙΟ ΡΕΥΣΤΟ

**Για υγρά: $\mu \sim 1/T$
Για αέρια: $\mu \sim T$**

ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)

- Μονάδες δυναμικού ιξώδους
SI: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ή $\text{Pa}\cdot\text{s}$

Στην πράξη: P (Poise) & cP (centiPoise)

$$1\text{P} = 10^{-1} \text{Pa}\cdot\text{s}$$

και

$$1\text{cP} = 10^{-2}\text{P} = 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$$

ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)

- Κινηματικό ιξώδες (Maxwell)
- Μονάδες

$$\nu = \mu / \rho$$

SI: m^2/s

Στην πράξη: **Sk** (Stokes) & **cSk** (centiStokes)

$$1\text{Sk} = 10^{-4} \text{m}^2/\text{s} \quad \& \quad 1\text{cSk} = 10^{-2} \text{Sk} = 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$$

Στη βιομηχανία (USA):

SSU (Saybolt Seconds Universal)

SSF (Saybolt Seconds Furol, Furol=Fuel and road oil)

$$(32 < \text{SSU} < 100) : \text{cSk} \approx 0,226 \cdot \text{SSU} - (195 / \text{SSU})$$

$$(\text{SSU} > 100) : \text{cSk} \approx 0,220 \cdot \text{SSU} - (135 / \text{SSU})$$

$$(25 < \text{SSF} < 40) : \text{cSk} \approx 2,24 \cdot \text{SSF} - (184 / \text{SSF})$$

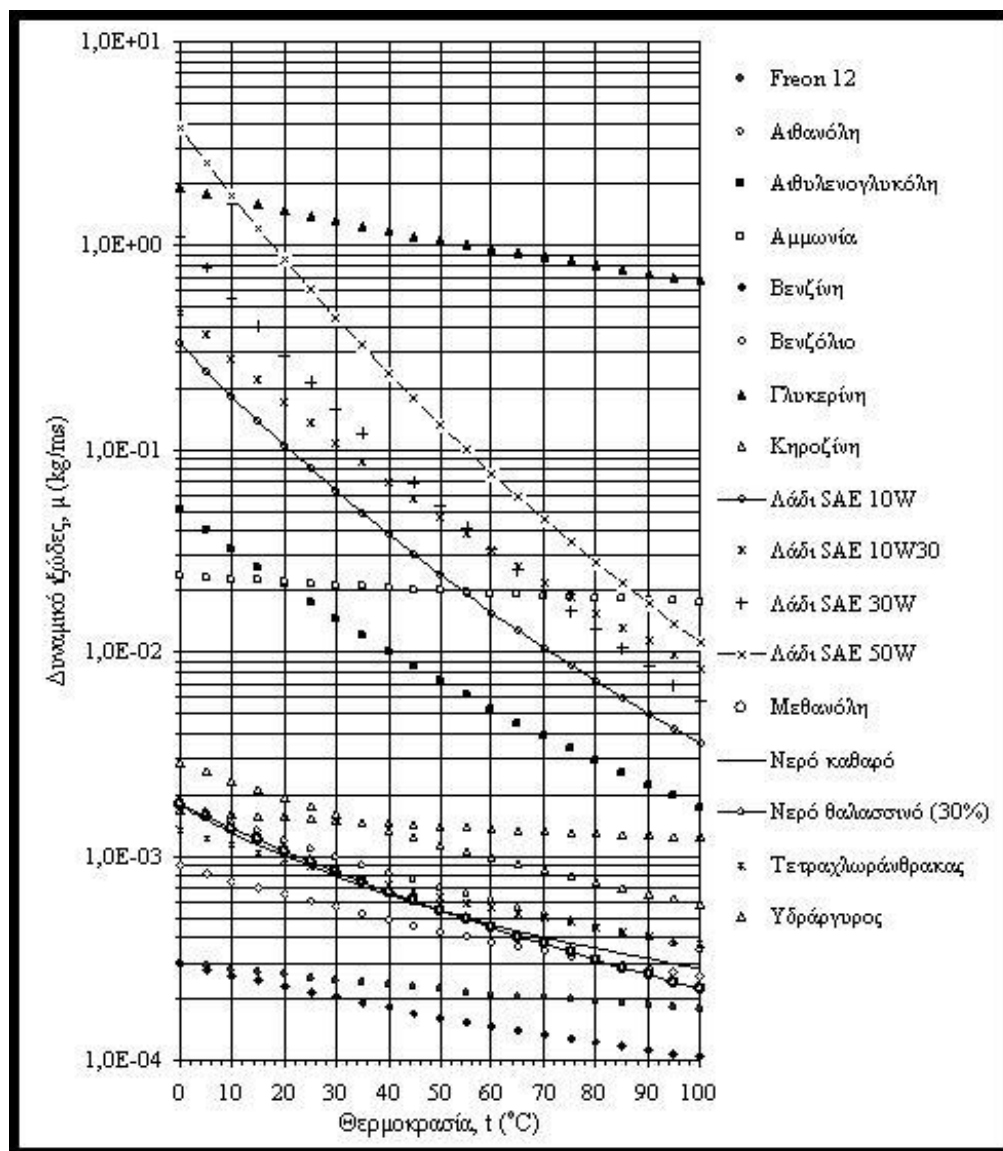
$$(\text{SSF} > 40) : \text{cSk} \approx 2,16 \cdot \text{SSF} - (60 / \text{SSF})$$

ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)

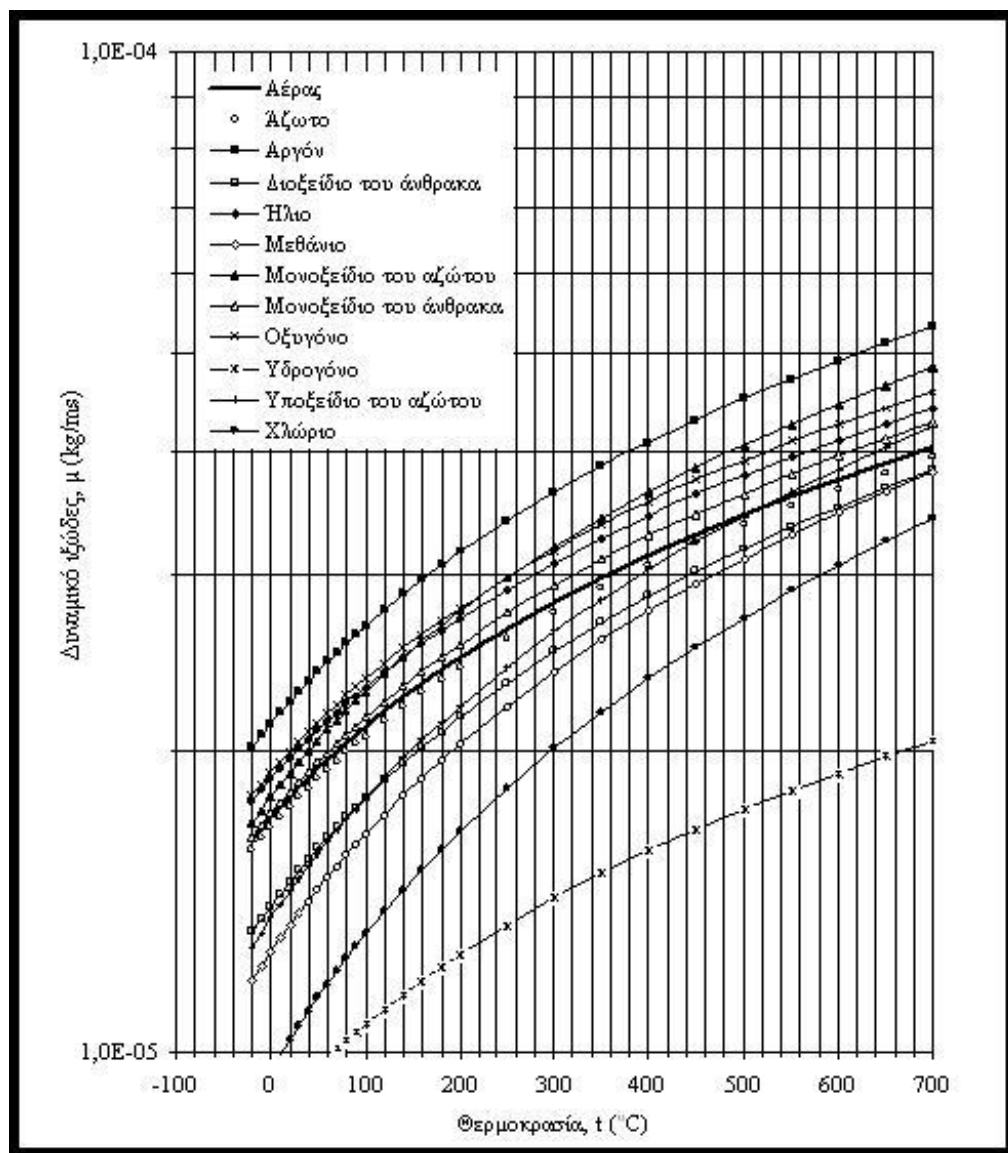
- Ενδεικτικές τιμές του δυναμικού και του κινηματικού ιξώδους ($p=1\text{atm}$, $t=15^\circ\text{C}$)

	Νερό	Αέρας	Λάδι
μ, kg/(ms)	$1,14 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-5}$	1,9
ν, m²/s	$1,14 \cdot 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$2,375 \cdot 10^{-3}$

Δυναμικό ιξώδες συνηθισμένων υγρών για $p=1\text{atm}$.



Δυναμικό ιξώδες συνηθισμένων αερίων για $p=1\text{atm}$.



ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)

- Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού ιξώδους νευτώνειων υγρών

$$[\mu(T)]_{\text{liquid}} \approx \mu_o \cdot \exp\left(\frac{a}{b+T} - \frac{a}{b+T_o}\right)$$

$$[\mu(T)]_{\text{liquid}} \approx A \cdot \exp(B/T) \quad (\text{Εξίσωση του Arrhenius})$$

- Ιξώδες νερού ($0^\circ\text{C} < t < 100^\circ\text{C}$)

$$[\mu(t)]_{\text{water}} \approx \frac{1,788}{1000} \cdot \exp\left[-1,704 - 5,306 \cdot \left(\frac{273}{t+273}\right) + 7,003 \cdot \left(\frac{273}{t+273}\right)^2\right]$$

$$[\nu(t)]_{\text{water}} = \frac{0,168}{10^4} t^{-0,88} \pm 4\%$$

ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)

- Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού ιξώδους αερίων

$$[\mu(T)]_{\text{gas}} \approx \mu_o \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^{3/2} \left(\frac{T_o + S}{T + S}\right)$$

(Εξίσωση του Sutherland)

$$[\mu(T)]_{\text{gas}} \approx \mu_o \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^n$$

Όπου: $0,5 < n < 1$

Για το αέρα είναι:

$T_o = 293\text{K}$, $\mu_o = 1,80 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$ και $n = 0,67$

ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)

- Μη νευτώνεια ρευστά
- Κατηγορίες μη-νευτώνειων ρευστών (MNP)
 - MNP που η συμπεριφορά τους είναι ανεξάρτητη του χρόνου
 - MNP που η συμπεριφορά τους εξαρτάται από το χρόνο
 - ιξωδοελαστικά (visco-elastic) ρευστά που συμπεριφέρονται είτε ως ρευστά είτε ως στερεά ανάλογα με την εφαρμογή της διατμητικής τάσης

$$\tau_{yx} = - \eta \cdot \frac{du_x}{dy}$$

**Φαινομενικό
ιξώδες
 $\eta = \eta(\tau_{yx})$**

ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)

MNP με ρεολογική συμπεριφορά ανεξάρτητη του χρόνου

- ✓ Ρευστά όπου παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική ιδιότητα της μείωσης του φαινομενικού ιξώδους (η) με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης ($-du_x/dy$) και αυτά ονομάζονται **ψευδοπλαστικά** (*pseudoplastic*)
- ✓ Ρευστά στα οποία το η αυξάνει με την αύξηση του $-du_x/dy$ και αυτά ονομάζονται **διασταλτικά** (*dilatant*)

ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)

MNP με ρεολογική συμπεριφορά εξαρτώμενη του χρόνου

- ✓ **Θιξοτροπικά** ρευστά ή ουσίες που με τη συνεχή εφαρμογή διατμ. τάσης ελαττώνουν το ιξώδες με το χρόνο και μετά την εφαρμογή αυτής επανέρχονται στην αρχική κατάσταση τους. Οι θιξοτροπικές ουσίες ιδιαίτερα χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες χρωμάτων και τροφίμων
- ✓ **Ρεοπηκτικά** ρευστά, στα οποία το ιξώδες αυξάνει με το χρόνο, έχουν σπάνιες εφαρμογές.

ΙΞΩΔΕΣ (συνέχεια)

Ρεολογικά πρότυπα (*models*) MNP

Bingham

$$|\tau_{yx}| > \tau_o : \tau_{yx} = -\mu_o \frac{du_x}{dy} \pm \tau_o$$

$$|\tau_{yx}| < \tau_o : \frac{du_x}{dy} = 0$$

Reiner-Philippof

$$-\frac{du_x}{dy} = \left(\frac{1}{\mu_\infty + \frac{\mu_o - \mu_\infty}{1 + (\tau_{yx}/\tau_s)^2}} \right) \tau_{yx}$$

Ostwald-de Waele

$$\tau_{yx} = -m \left| \frac{du_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{du_x}{dy}$$

Eyring

$$\tau_{yx} = A \operatorname{arcsinh} \left(-\frac{1}{B} \frac{du_x}{dy} \right)$$

Ellis

$$-\frac{du_x}{dy} = \left(\varphi_o + \varphi_1 |\tau_{yx}|^{a-1} \right) \tau_{yx}$$

ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η θερμική αγωγιμότητα εκφράζει τη ροή θερμότητας μεταξύ των στρωμάτων του ρευστού όταν η θερμοκρασία του δεν είναι σταθερή.

Νόμος της θερμικής αγωγιμότητας του *Fourier*

$$\dot{q}_y = -k \frac{dT}{dy}$$

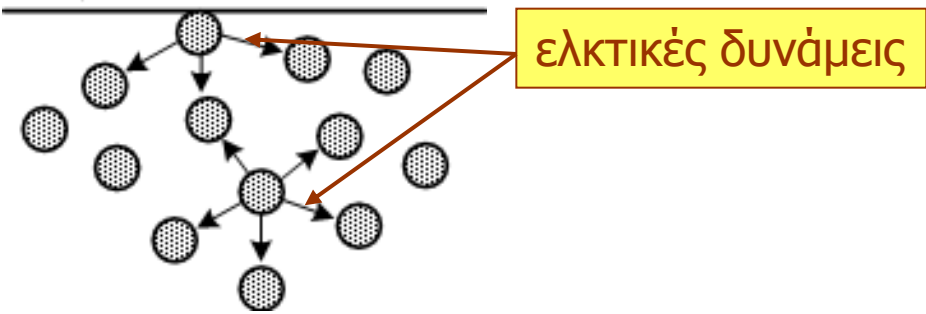
πυκνότητα ροής
θερμότητας

κλίση της θερμοκρασίας

συντελεστής θερμικής
αγωγιμότητας

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ

Επιφάνεια

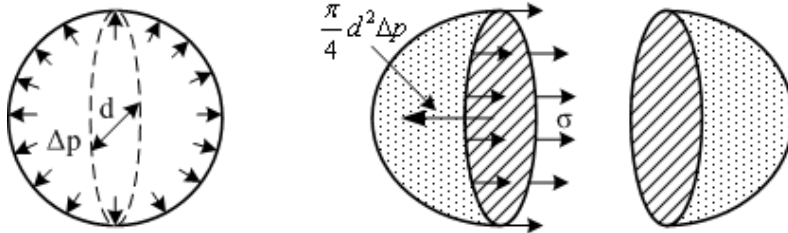


$$\sigma = \text{Δύναμη} / \text{Μήκος} \quad [\text{N/m}]$$

$$\sigma = f(T, \text{υλικό})$$

Τιμές επιφανειακής τάσης συνηθων υγρών σε επαφή με αέρα

Αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό φυσαλίδας



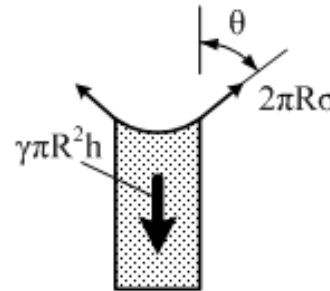
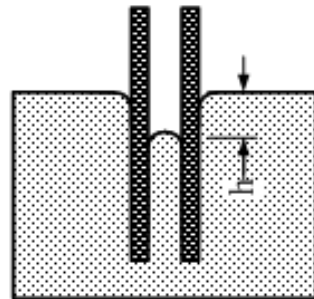
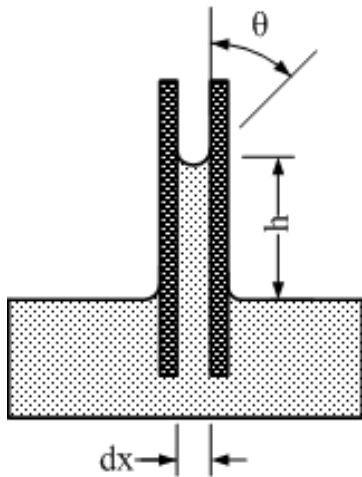
$$\Delta p \pi \frac{d^2}{4} = \sigma \pi d$$

$$\Delta p = p_i - p_e = \frac{4\sigma}{d}$$

Υγρό	Επιφανειακή τάση, σ (N/m), σε 20°C
Αλκοόλη	0,0223
Βενζίνη	0,022-0,032
Βενζόλιο	0,0289
Λάδι SAE 30	0,0350
Νερό	0,0728
Τετραχλ/χος άνθρακας	0,0269
Υδράργυρος	0,0466

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ (συνέχεια)

Ανύψωση ή βύθιση της ελεύθερης επιφάνειας υγρού σε τριχοειδή σωλήνα και διάγραμμα ελευθέρου σώματος για την τριχοειδή ανύψωση



$$\rho g \pi \frac{d^2}{4} h = \sigma \pi d \cdot \cos \theta$$

$$h = \frac{4\sigma \cdot \cos \theta}{\rho g d}$$

- Αποσταγμένο νερό: $h \approx 30/d$
- Αλκοόλη: $h \approx 11,6/d$
- Υδράργυρος: $h \approx -10/d$

ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

- Καταστατική εξίσωση είναι η συναρτησιακή σχέση **p-v-T** ή **p-ρ-T** που καθορίζεται από τη φύση του ρευστού και την κατάσταση που βρίσκεται.
- Οι καταστατικές εξισώσεις ταξινομούνται με κριτήριο το είδος του ρευστού και το πρότυπο που επιλέγεται για την μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς του.
- Η συμπεριφορά των **αερίων** εξαρτάται από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων τους.

Ιδανικά αέρια – Τέλεια αέρια

Ιδανικά αέρια ονομάζονται τα αέρια που τα μεγέθη p - v - T συνδέονται στην καταστατική εξίσωση

$$p = \frac{1}{v} R_G T = \frac{M_m}{v} \frac{R_G}{M_m} T = \rho R T$$

Για τον αέρα: $[M_m]_{\text{air}} = 28,97 \text{ kg/kmol}$ $[R]_{\text{air}} = \frac{8.314,36}{28,97} \text{ J/(kgK)} \approx 287 \text{ J/(kgK)}$

Τέλεια αέρια είναι τα ιδανικά αέρια που η εσωτερική ενέργεια τους είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας

$$R = c_p - c_v$$

$$c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$$

$$c_v = \frac{R}{\gamma - 1}$$

$$\gamma = c_p / c_v$$

Καταστατικές μεταβολές

Γενική εξίσωση πολυτροπικών μεταβολών :

$$pv^n = C$$

Ισοβαρής μεταβολή $n = 0$: $p = \text{const.}$, $\frac{T}{v} = \frac{T_0}{v_0}$

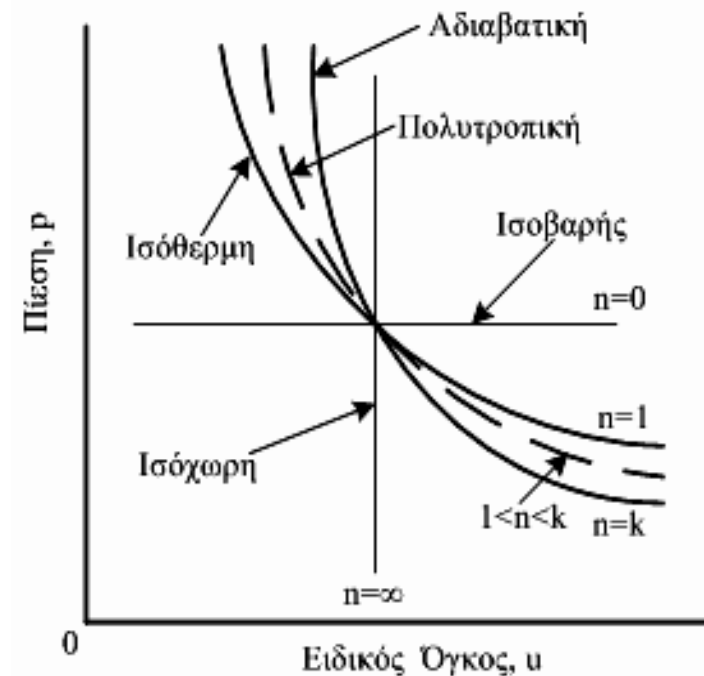
Ισόθερμος μεταβολή $n = 1$: $T = \text{const.}$, $pv = p_0 v_0$

Αδιαβατική ή αδιάθερμη μεταβολή $n = \gamma$: $pv^\gamma = p_0 v_0^\gamma$

Πολυτροπική μεταβολή $1 < n < \gamma$: $pv^n = p_0 v_0^n$

Ισόχωρη μεταβολή $n = \infty$: $v = \text{const.}$, $\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0}$

Καταστατικές μεταβολές τελείων αερίων



Πραγματικά αέρια

Είναι τα αέρια που η συμπεριφορά τους αποκλίνει από αυτή των ιδανικών αερίων και η απόκλιση τους εκφράζεται από το συντελεστή συμπίεστικότητας

$$Z = \frac{pv}{R_G T}$$

Για ιδανικά αέρια $Z=1$

Για πραγματικά αέρια $Z \neq 1$

Εξίσωση van der Waals : $\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = R_G T$ με $a = \frac{27 R_G^2 T_c^2}{64 p_c}$, $b = \frac{R_G T_c}{8 p_c}$

$$Z = \frac{3v_r}{3v_r - 1} - \frac{9}{8T_r v_r}$$

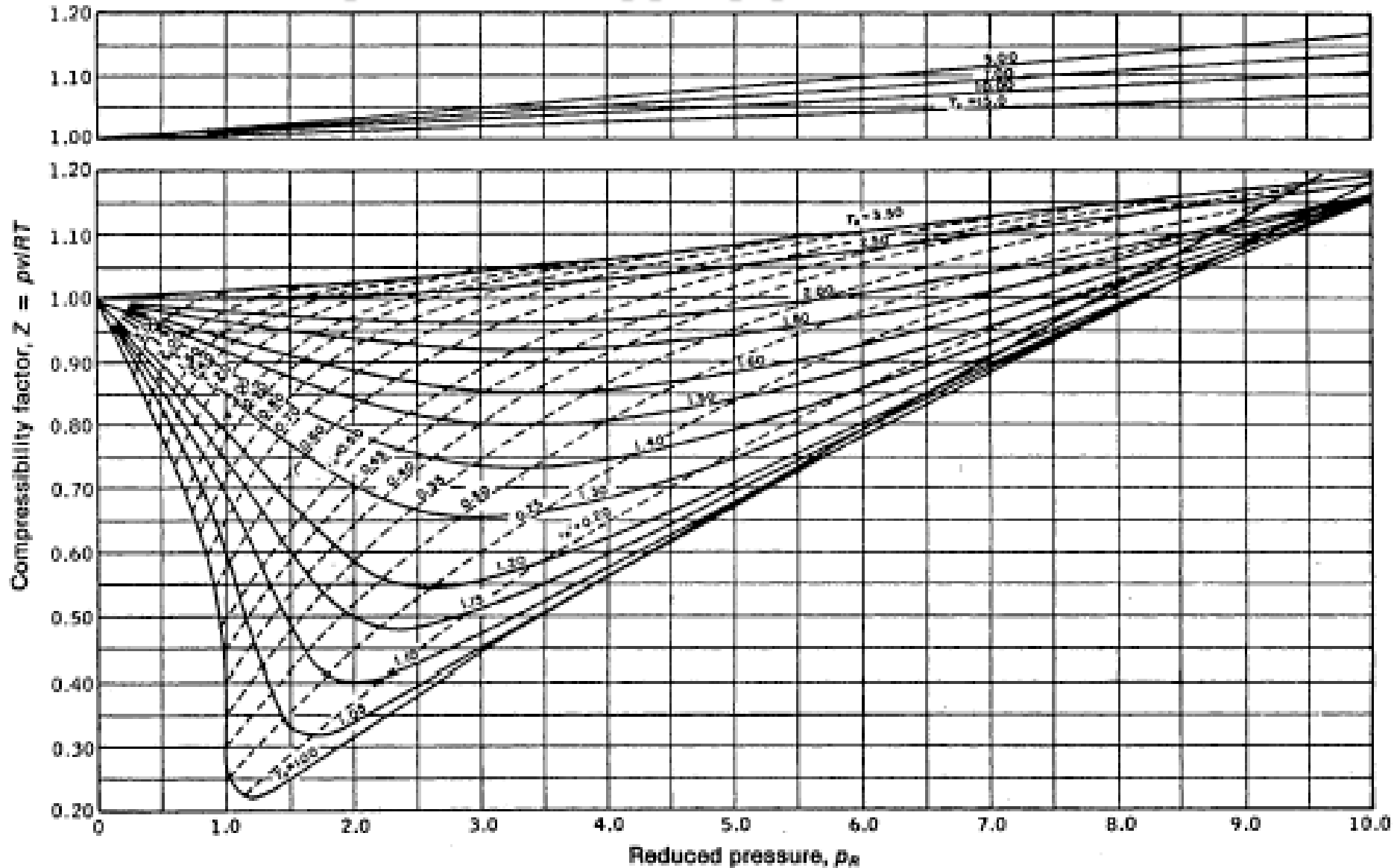
$$Z_c = \frac{p_c v_c}{R_G T_c} = \frac{3}{8} = 0,375$$

Εξίσωση Dieterici : $p = \frac{R_G T}{v - b} \exp\left(-\frac{a}{v R_G T}\right)$ με $a = \frac{4 R_G^2 T_c^2}{e^2 p_c}$, $b = \frac{R_G T_c}{e^2 p_c}$

$$Z = \frac{2v_r}{2v_r - 1} \exp\left(-\frac{2}{v_r T_r}\right)$$

$$Z_c = \frac{p_c v_c}{R_G T_c} = \frac{2}{e^2} \approx 0,27$$

Γενικευμένο διάγραμμα του Z

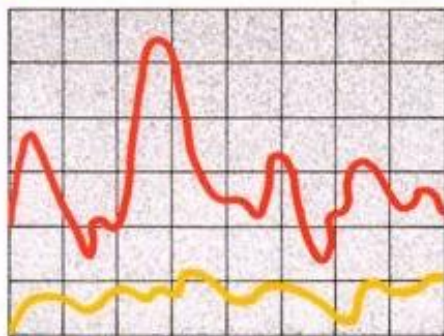


ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

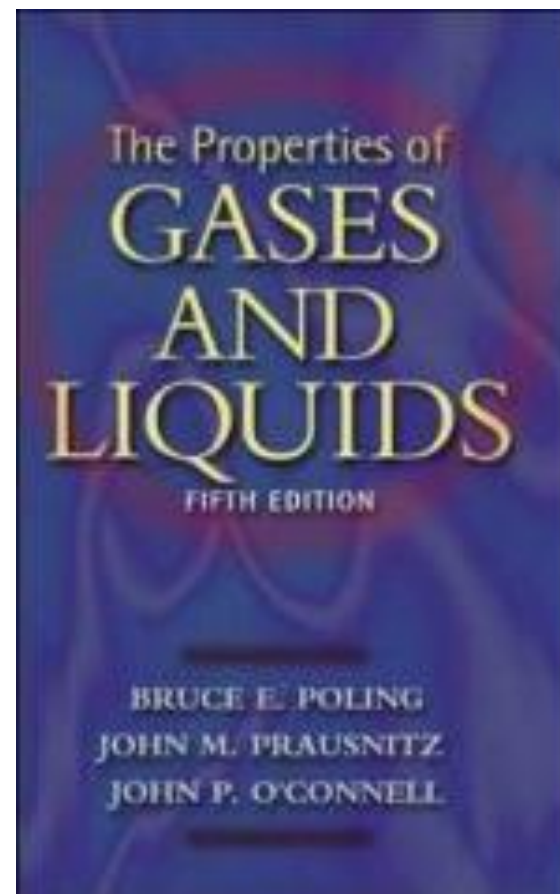
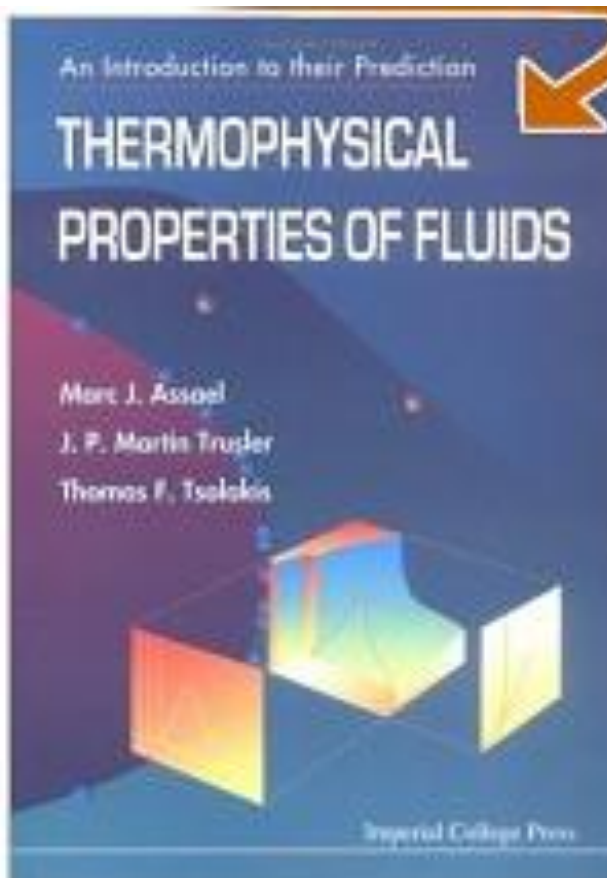
- <http://www.amazon.com>

THE PROPERTIES OF **GASES & LIQUIDS**

FOURTH EDITION



ROBERT C. REID
JOHN M. PRAUSNITZ
BRUCE E. POLING



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Φιλιός Α.Ε., Κεφ.1: Ιδιότητες των ρευστών, *ΑΣΠΑΙΤΕ e-class*.
- Φιλιός Α.Ε., Παράρτημα: Πίνακες φυσικών ιδιοτήτων ρευστών, *ΑΣΠΑΙΤΕ e-class*.
- Φιλιός Α.Ε., Παράρτημα: Ορολογία μηχανικής ρευστών στην αγγλική γλώσσα, *ΑΣΠΑΙΤΕ e-class*.
- Φιλιός Α.Ε., Τυπολόγιο μαθήματος (για τις αξιολογήσεις), *ΑΣΠΑΙΤΕ e-class*.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (συνέχεια)

- Fluid Properties Calculator
<http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>
- Thermodynamic properties of air
<http://www.aoe.vt.edu/~devenpor/tgas/>
- Free Excel/VBA Spreadsheet for Air-Water Properties
<http://www.faculty.virginia.edu/ribando/modules/xls/>
- TEST - a visual platform to analyze thermofluids problems
<http://www.thermofluids.net/>

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (συνέχεια)

- Equations of State

http://www.ccl.net/cca/documents/dyoung/topics-orig/eq_state.html

- Gas Specific Gravity and Ideal Gas Law Calculator

<http://www.Imnoeng.com/idealgas.htm>

- Molecular Weight Calculator

<http://www.Imnoeng.com/molecule.htm>

- Gas Viscosity Calculator

<http://www.Imnoeng.com/Flow/GasViscosity.htm>

Software

- AFT-Chempak Chemical Properties Databases for Liquids & Gases
<http://www.codecad.com/Chempak.htm>
- Thermodynamic and Transport Properties of Fluids
<http://www.pdas.com/fluid.htm>
- Viscosity converter
<http://www.softslide.com/volumes/v3/t3/p1/>
- FluidPro - A portable tool to determine the properties of different fluids
<http://handheld.softpedia.com/get/Educational/Science/FluidPro-13618.shtml>

Finding Physical Properties on the Internet

- Cheresources.com

<http://www.cheresources.com/indexzz.shtml>

- Data & Property Calculation Websites

<http://tigger.uic.edu/~mansoori/Thermodynamic.Data.and.Property.html>

- Thermodynamic and Transport Properties of Water and Steam

<http://www.cheresources.com/physinternetzz.shtml>

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

- Λυμένες ασκήσεις κεφαλαίου «Ιδιότητες των ρευστών», βλ. ΑΣΠΑΙΤΕ **e-class**.