ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ

Εισαγωγή στην Υδραυλική – Αντικείμενο

Πυκνότητα και ειδικό βάρος σωμάτων

Συστήματα μονάδων

Ιξώδες ρευστού, επιφανειακή τάση, τριχοειδή φαινόμενα

Υδροστατική πίεση

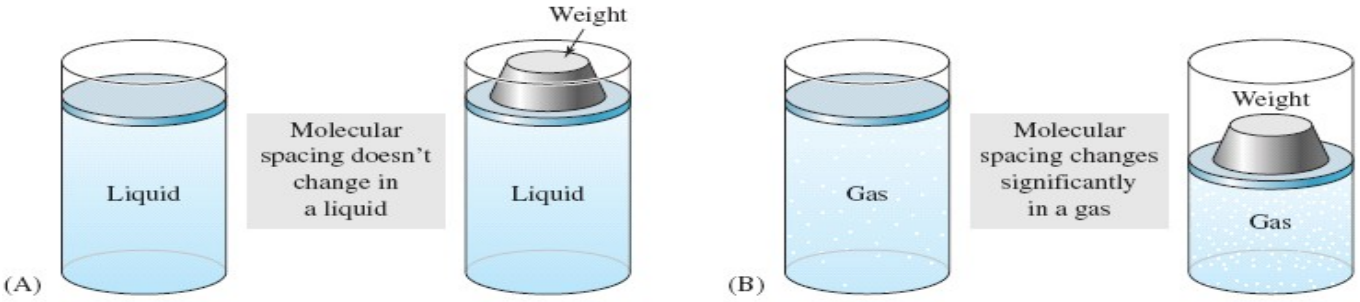
Εισαγωγή

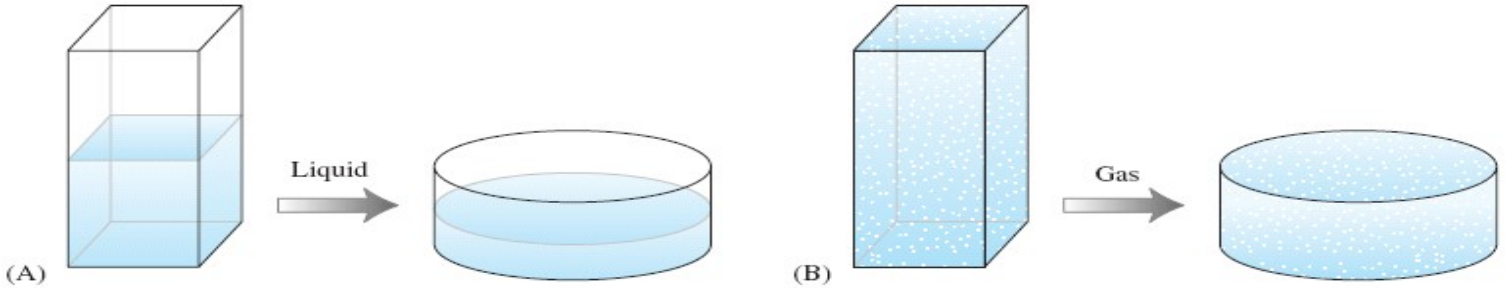
- Ρευστομηχανική = Μηχανικές ιδιότητες των ρευστών (υγρών και αερίων)
- Υδρομηχανική = Υδροστατική + Υδροδυναμική
- Υδραυλική = η εφαρμοσμένη Υδρομηχανική
- Εφαρμογές: Υδρεύσεις – Αρδεύσεις – Μηχανολογία
- Αναλυτική και εμπειρική επιστήμη

Εισαγωγή – Διάκριση των ρευστών

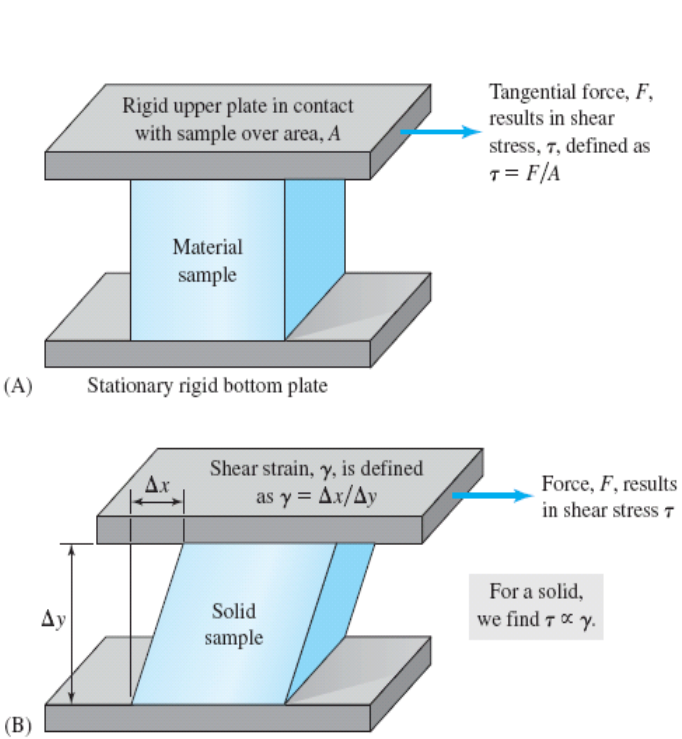
- Ρευστά = μεταβάλλουν τις σχετικές θέσεις των όγκων των στοιχείων τους (μή στατική ισορροπία σε διάτμηση)
- Αέρια = συμπιεστά (μεταβολή ρ με P)
- Στερεά = ελαστική παραμόρφωση σε διάτμηση
- Ρευστά = συνεχής και μόνιμη παραμόρφωση σε διάτμηση
- Ιδανικό ρευστό = μηδενικές δυνάμεις τριβής μεταξύ των μορίων ή απείρως μικρή ΔF, μετακινεί όγκο ΔV

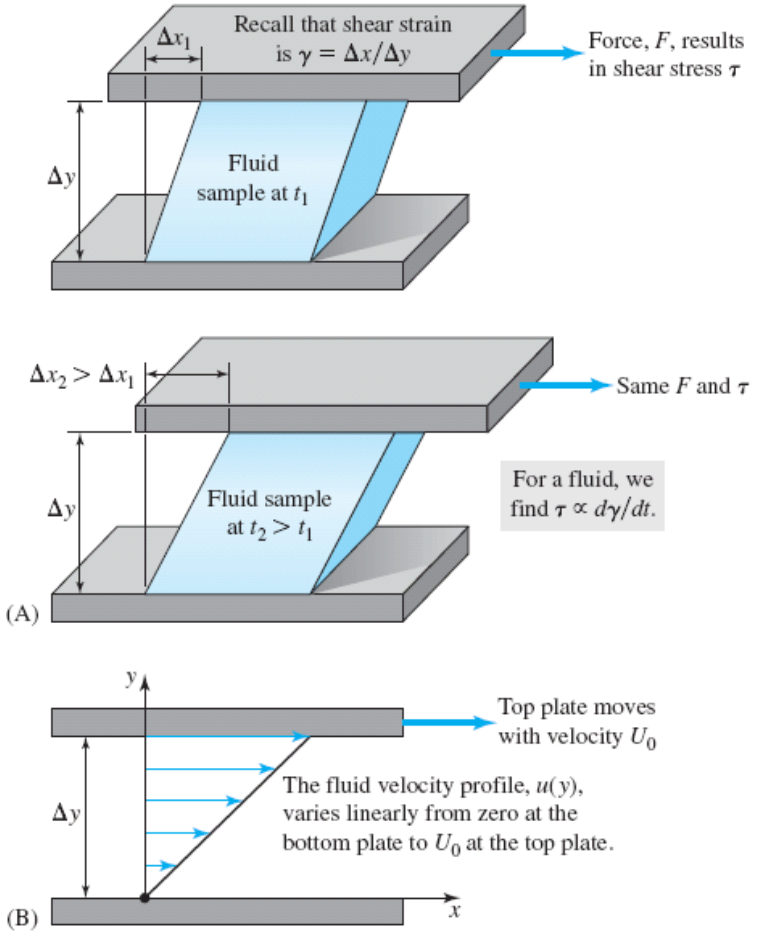
Διάκριση των ρευστών από τα αέρια





Διάκριση των ρευστών από τα στερεά





Στερεά – Υγρά - Αέρια

Διαφορές ως προς τις σχετικές μοριακές θέσεις και αλληλεπιδράσεις, δυνατότητα ελεύθερης επιφάνειας και αποδοχή τάσεων, συμπιεστότητας, ανταπόκρισης σε διατμητική τάση.

		ρευστά	
χαρακτηριστικό	**στερεά**	**υγρά**	**αέρια**
Απόκριση σε διατμητική τάση, τ	τ=Gγ (ανθίσταται στην παραμόρφωση)	τ=μ(dU/dy) – ανθίστανται στον ρυθμό παραμόρφωσης	
Απόσταση μεταξύ γειτονικών μορίων	ελάχιστη	μικρή	μεγάλη
Μοριακή διευθέτηση	ταξινομημένη	Τάξη μικρών αποστάσεων μόνο	Τυχαία
Ενταση μοριακών αλληλεπιδράσεων	δυνατή	μεσαία	αδύνατη
προσαρμογή στο σχήμα του δοχείου	οχι	ναι	ναι
επέκταση χωρίς όρια	οχι	οχι	ναι
Ελεύθερη επιφάνεια	ναι	ναι	Οχι
Αντίσταση σε μικρή τάση	ναι	Θεωρητικά ναι, πρακτικά όχι	οχι
συμπιεστότητα	Ουσιαστικά μηδέν	Σχεδόν ασυμπίεστα	Ιδιαίτερα συμπιεστά

Πυκνότητα – ειδικό βάρος

$$\rho = \frac{\gamma}{g}$$

ρ = μάζα / όγκο ($kg \cdot m^{-3}$)

$\rho_{\text{νερού}}$ = 1000 kg/m^3 στους 4^oC

γ = ειδικό βάρος ($kg \cdot m^{-3} \cdot m \cdot s^{-2} = N \cdot m^{-3}$)

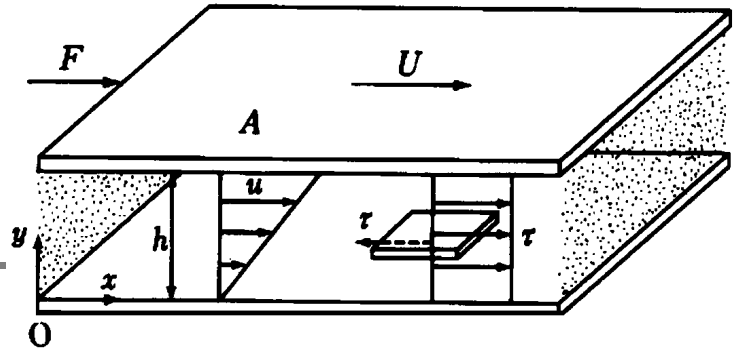
Ειδική βαρύτητα (specific gravity) =
βάρος σώματος / βάρος ίσου όγκου νερού

Συστήματα μονάδων FLS, CGS, MKSA, SI

Πυκνότητα νερού και αέρα με την θερμοκρασία

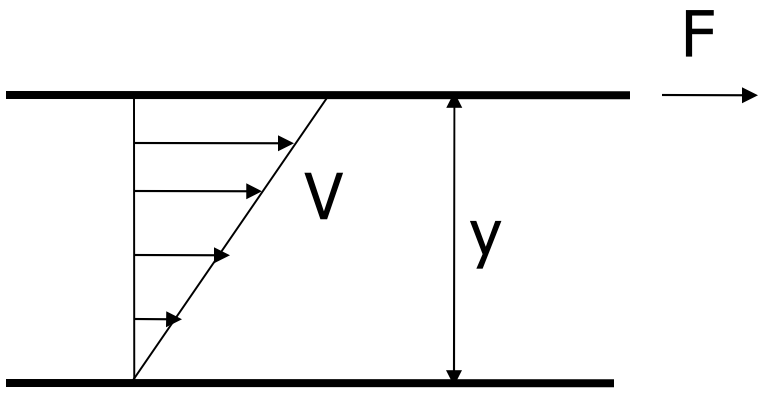
Temperature (°C)		0	10	15	20	40	60	80	100
ρ (kg/m^3)	Water	999.8	999.7	999.1	998.2	992.2	983.2	971.8	958.4
	Air	1.293	1.247	1.226	1.205	1.128	1.060	1.000	0.9464

Ιξώδες



- Βαθμός αντίστασης σε διάτμηση

$$\frac{F}{A} = \tau \approx \frac{dV}{dy}$$



Δυναμικό ιξώδες: $\tau = \mu \frac{dV}{dy} = \mu \dot{\gamma}$

Κινηματικό ιξώδες: $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

μονάδες βασικών μεγεθών στο SI

Δύναμη

$$1\mathbf{N} = 1\mathbf{kg}\cdot\mathbf{m}\cdot\mathbf{s}^{-2}$$

Πίεση

$$1\mathbf{Pa} = 1\mathbf{N}\cdot\mathbf{m}^{-2}$$

$$1\mathbf{Torr} = 1\mathbf{mmHg} = 13.6\mathbf{mmH_2O}$$

$$1\mathbf{Atm} = 760\mathbf{Torr} = 101325\mathbf{Pa} = 1\mathbf{kp}\cdot\mathbf{cm}^{2}$$

$$1\mathbf{bar} = 10^{5}\,\mathbf{Pa} = 10^{3}\,\mathbf{mbar} = 750.1\mathbf{Torr}$$

$$1\mathbf{Pa}\cdot\mathbf{s} = 1\mathbf{kg}\cdot\mathbf{m}^{-1}\cdot\mathbf{s}^{-1} = 1000\mathbf{mPas}$$

$$1\mathbf{Poise} = 1\mathbf{P} = 100\mathbf{cPoise} = 100\mathbf{mPas} = 0.1\mathbf{Pas}$$

$$1\mathbf{m}^{2}\cdot\mathbf{s}^{-1} = 10^{4}\,\mathbf{St} = 10^{6}\,\mathbf{cSt}$$

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες νερού σε μονάδες S.I.

Θερμ. °C	Ειδικό Βάρος γ, kN/m³	Πυκνότ. ρ, kg/m³	Ιξώδες $\mu \times 10^{3}$, N s/m²	Κινηματικό ιξώδες $\nu \times 10^{6}$, m²/s	επιφαν. τάση σ, N/m	πίεση ατμών p_v kN/m², abs	ύψος πίεσης ατμών p_v/γ m	Μέτρο διόγκωσης ή ελαστ. $E_v \times 10^{-6}$ kN/m²
0	9.805	999.8	1.781	1.781	0.0756	0.61	0.06	2.02
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	0.0749	0.87	0.09	2.06
10	9.804	999.7	1.307	1.306	0.0742	1.23	0.12	2.10
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.0735	1.70	0.17	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.0728	2.34	0.25	2.28
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.0720	3.17	0.33	2.22
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.0712	4.24	0.44	2.25
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.0696	7.38	0.76	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.0679	12.33	1.26	2.29
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.0662	19.92	2.03	2.28
70	9.589	977.8	0.404	0.413	0.0644	31.16	3.20	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.0626	47.34	4.96	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.0608	70.10	7.18	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.0589	101.33	10.33	2.07

Π Ι Ν Α Κ Α Σ 2.

Φυσικές ιδιότητες υγρών σε κανομική ατμοσφαιρική πίεση.

Μονάδες S.I.

Υγρό:	Θερμο-κρασία T, ^{o}C	Πυκνότ. ρ, kg/m^3	Ειδική Βαρύτητα s	Ιξώδες $\mu \times 10^{4}$, $N\ s/m^2$	επιφαν. τάση σ, N/m	Πίεση ατμών pv, kN/m^2; abs	Μέτρο ελαστ. $Ev \times 10^{-6}$, N/m
Βενζίνη	20	895	0.90	6.5	0.029	10.0	1,030
Τετραχλ. άνθρακας	20	1,588	1.59	9.7	0.026	12.1	1,100
Αλατέρ.πετρ.	20	856	0.86	72	0.03	—	—
Γκαζολίνη	20	678	0.68	2.9	—	55	—
Γλυκερίνη	20	1,258	1.26	14,900	0.063	0.000014	4,350
Υδρογόνο:	-250	72	0.072	0.21	0.003	21.4	—
Κηροζίνη	20	808	0.81	19.2	0.025	3.20	—
Υδράργυρος	20	13,550	13.56	15.6	0.51	0.00017	26,200
Οξυγόνο	-195	1,206	1.21	2.8	0.015	21.4	—
Λάδι SAE 10	20	918	0.92	820	—	—	—
Λάδι SAE 30	20	918	0.92	4,400	—	—	—
Νερό	20	998	1.00	10.1	0.073	2.34	2,070

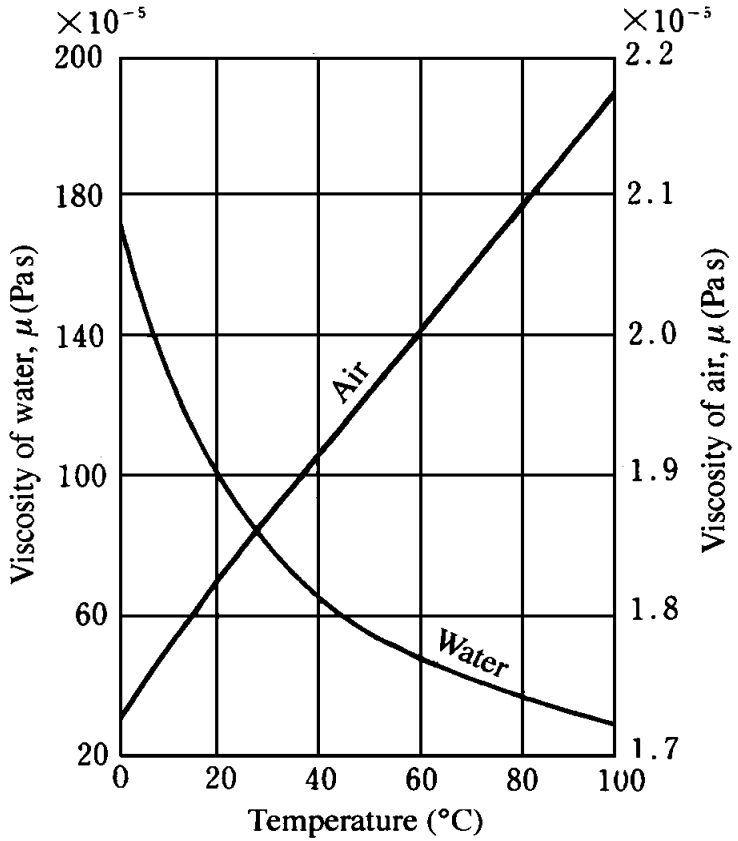
Π Ι Ν Α Κ Α Σ 3.

Φυσικές ιδιότητες αέρα σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση.

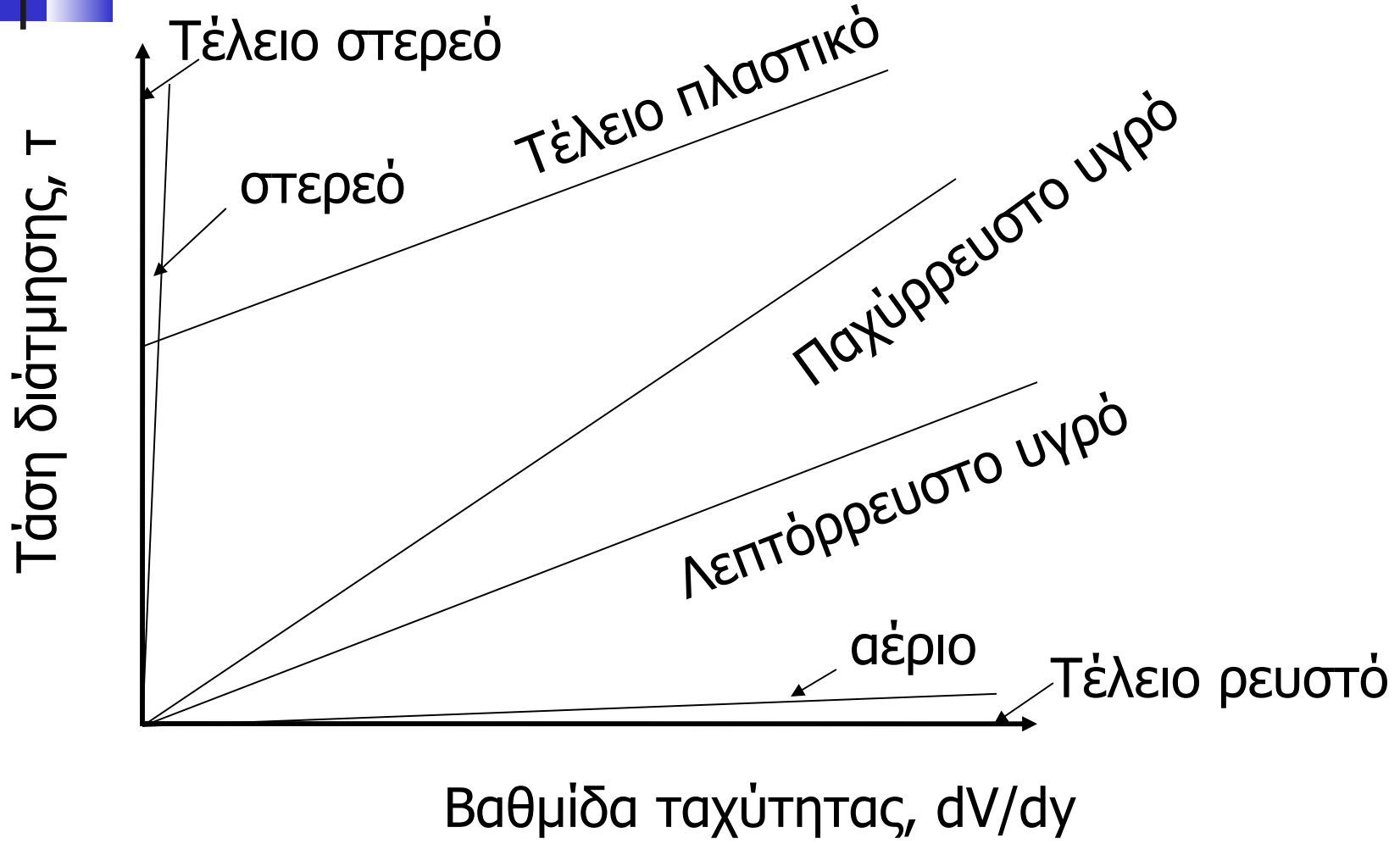
σε μονάδες S.I.

Θερμοκρασία		Πυκνότητα	Ειδικό Βάρος	Ιξώδες	Κινηματικό ιξώδες
T, ^oC	T, ^oF	ρ kg/m³	γ, N/m³	μx10^5, N s/m²	νx10^5 m²/s
-40	-40	1.515	14.86	1.49	0.98
-20	- 4	1.395	13.68	1.61	1.15
0	32	1.293	12.68	1.71	1.32
10	50	1.248	12.24	1.76	1.41
20	68	1.205	11.82	1.81	1.50
30	86	1.165	11.43	1.86	1.60
40	104	1.128	11.06	1.90	1.68
60	140	1.060	10.40	2.00	1.87
80	176	1.000	9,81	2.09	2.09
100	212	0.946	9.28	2.18	2.31
200	392	0.747	7.33	2.58	3.45

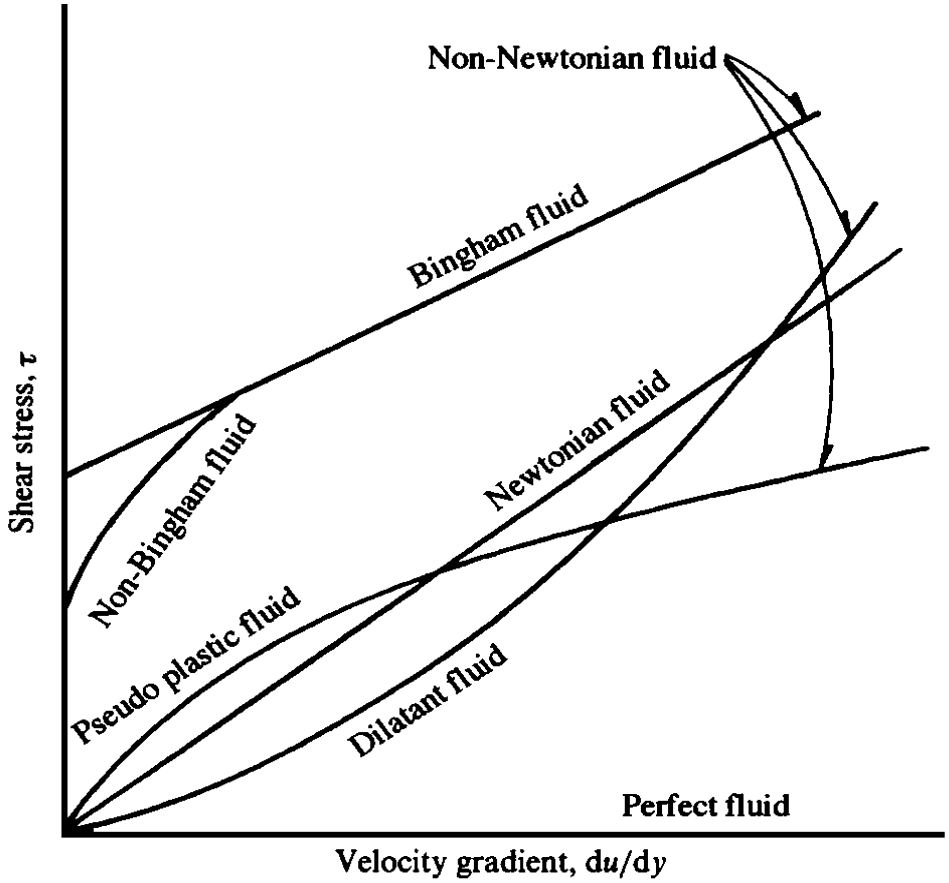
Ιξώδες νερού και αέρα



Συμπεριφορά σωμάτων σε διάτμηση



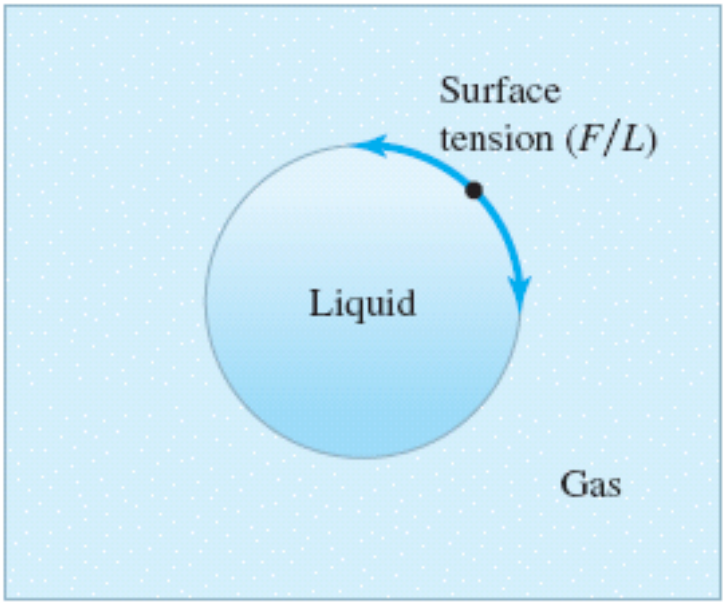
Νευτώνεια και μη-νευτώνεια ρευστά

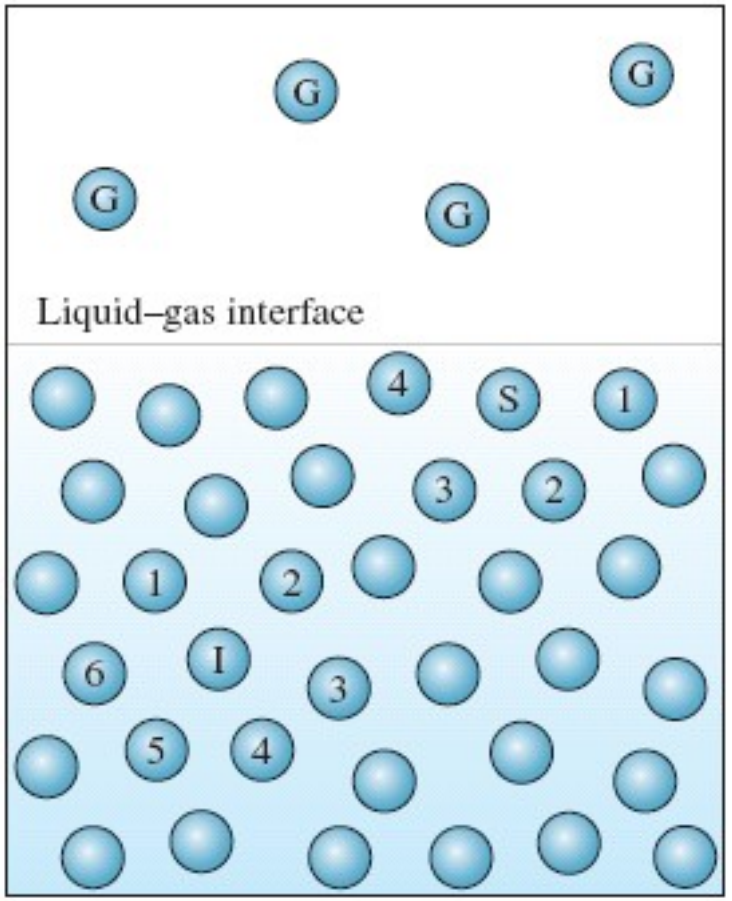


Πίεση υδρατμών, Επιφανειακή τάση

- Πίεση υδρατμών
- Επιφανειακή τάση: απαιτούμενη ενέργεια για μεταφορά μορίων στην επιφάνεια = το έργο για να μεταφερθεί από το εσωτερικό ένα μοναδιαίο εμβαδό στην επιφάνεια (Nm/m^2)
- Όχι σημαντική για συνηθισμένες εφαρμογές

Επιφανειακή τάση





Επιφανειακή τάση

	Surface Tension, σ (N/m)	
Liquid	**When in Contact with Air**	**When in Contact with Water**
Benzene	0.029	0.035
Carbon tetrachloride	0.027	0.045
Glycerin	0.063	—
Hexane	0.018	0.051
Mercury	0.484	0.375
Methanol	0.023	0.023
Octane	0.022	0.051
Water	0.073	—

Επιφανειακή τάση - συνέπειες

- Το αν το υγρό θα "υγράνει" την επιφάνεια του στερεού, ή όχι, εξαρτάται από την γωνία θc, για την οποία ισχύει:
- θc = (σ23-σ13)/σ12
- Όπου σik είναι οι επιφανειακές τάσεις των τριών διεπιφανειών

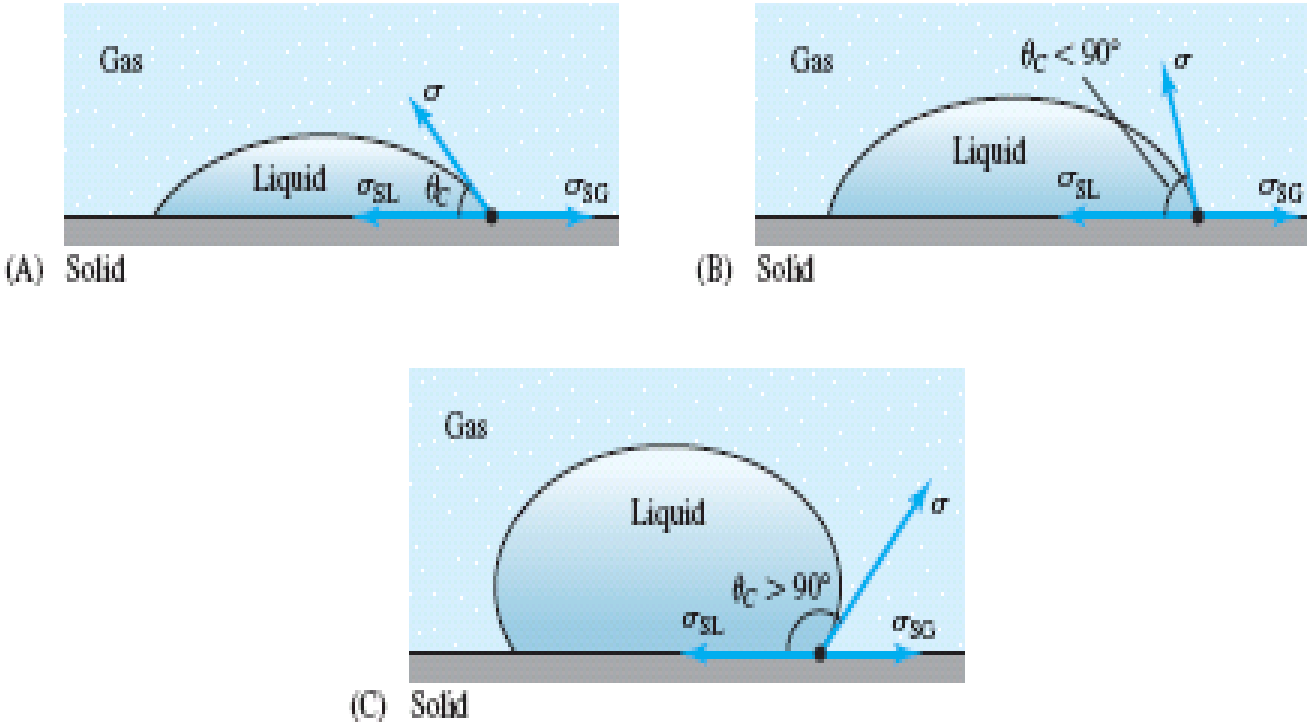
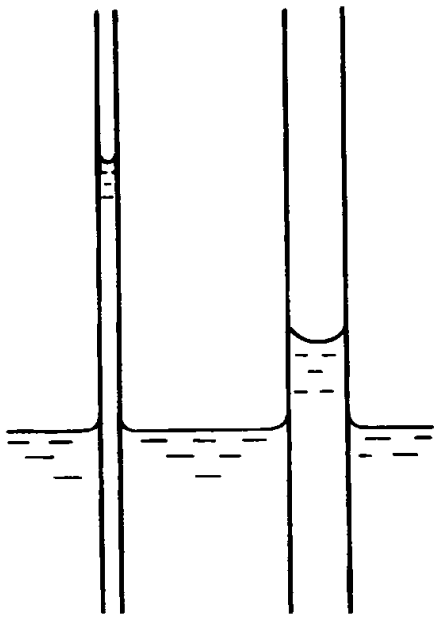
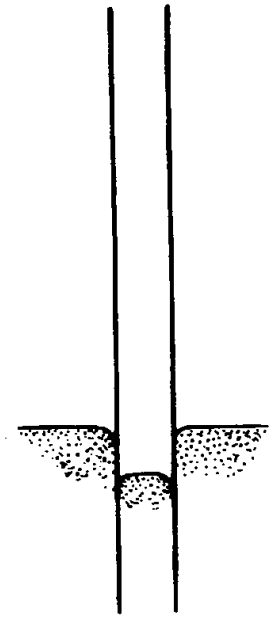


Figure 2.22 Schematic diagrams of a liquid in contact with a solid and a gas. (A) The relevant force balance at the contact line. (B) Example of a liquid wetting a solid as defined by a contact angle $\theta_c < 90°$. (C) In contrast, the liquid does not wet the solid, since $\theta_c > 90°$. The air–water–glass system forms a contact angle of ~0° so that water wets glass. In contrast, the air–mercury–glass system forms a contact angle of ~140° so that Hg does not wet the glass.

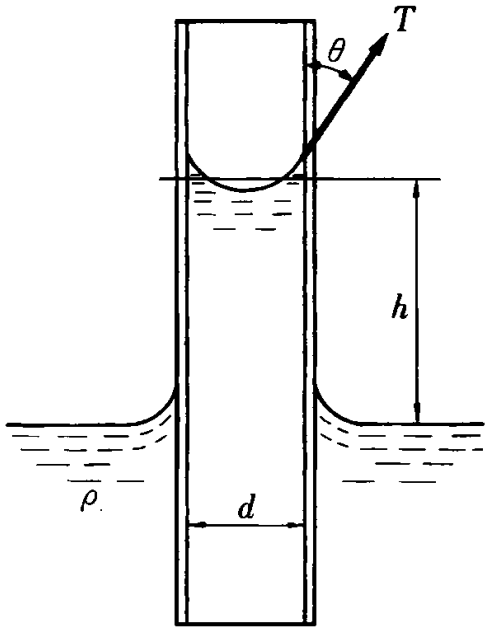
Τριχοειδή φαινόμενα



(a) Water



(b) Mercury



Στους σωλήνες μικρής διαμέτρου, στο φαινόμενο της “διαβροχής”, προστίθεται και αυτό της αντίστοιχης ανύψωσης ή ταπείνωσης της στάθμης

Ανύψωση της στάθμης

- Στην περίπτωση C, οι δυνάμεις των ατμοσφαιρικών πιέσεων είναι ίσες και αλληλοαναιρούνται. Η εξισορρόπηση της επιφανειακής τάσης με το βάρος της στήλης, δίνει για το ύψος της στήλης:

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

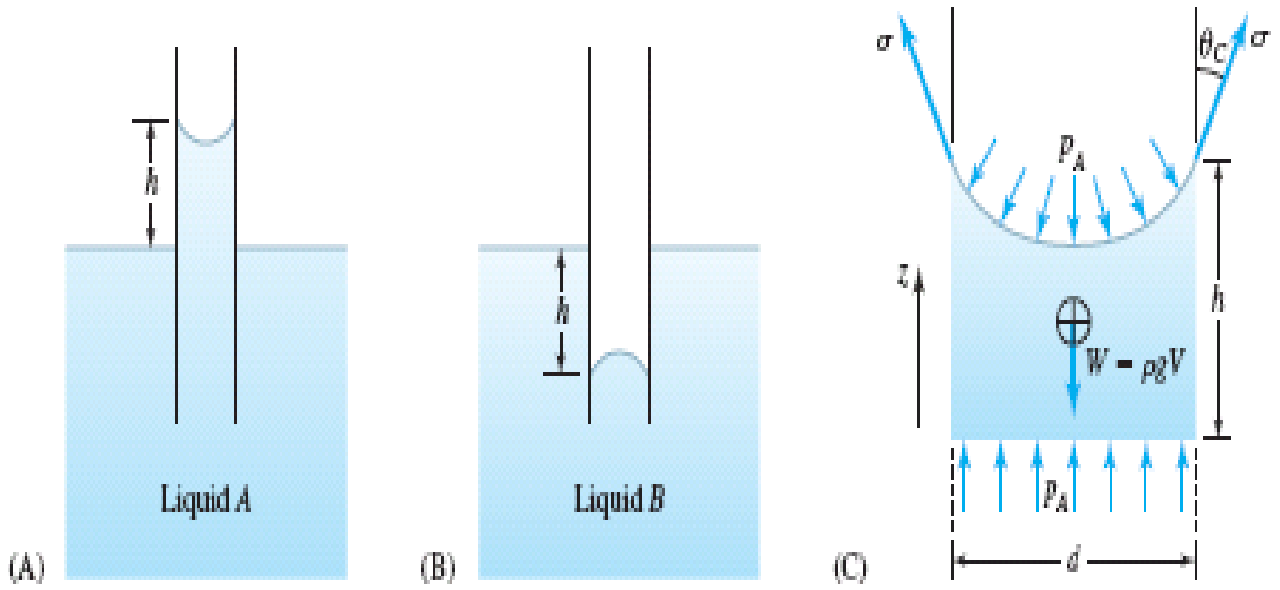


Figure 2.23 The capillary action in a solid tube depends on the contact angle associated with the corresponding gas–liquid–solid system. (A) When the liquid wets the solid ($\theta_c < 90°$), the liquid level within the tube will be above the liquid–gas interface outside the tube. (B) When the liquid does not wet the solid ($\theta_c > 90°$), the liquid level within the tube will be below the general liquid–gas interface. (C) Enlarged view of the case in (A) including the terms associated with the force balance on the liquid within the capillary tube. See text for discussion of this force balance.

τριχοειδή φαινόμενα (capillarity)

- Από επιφανειακή τάση:
- Συνοχή υγρού < συνάφεια υγρού/τοιχώμ. Βρέχεται το τοίχωμα
- Συνοχή υγρού > συνάφεια υγρού/τοιχώμ. Δεν βρέχεται το τοίχωμα
- Σωλήνες <10mm και πορώδη μέσα

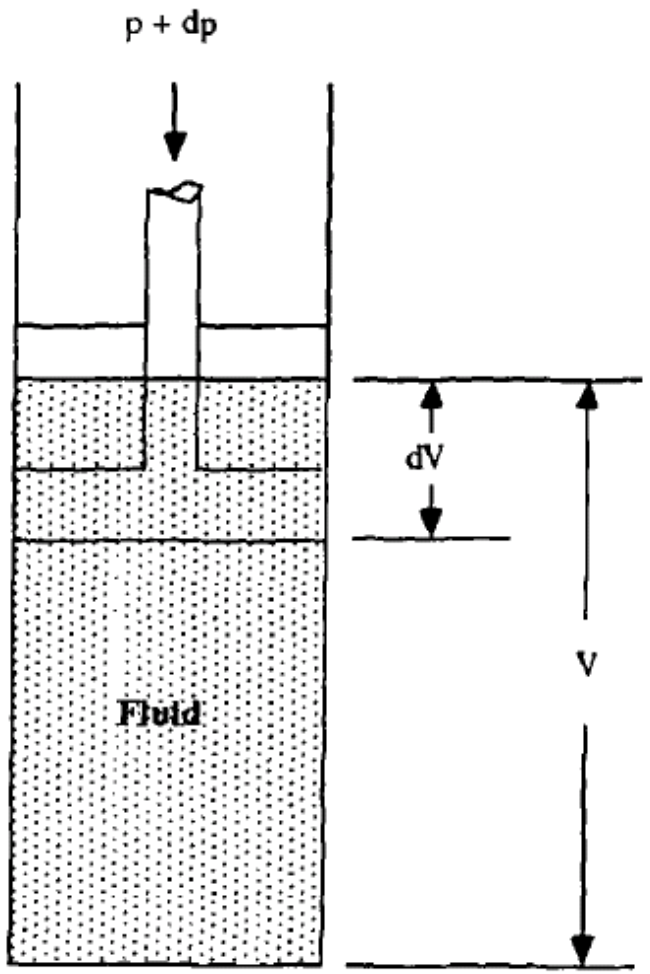
Υδροστατική πίεση, μέτρο ελαστικότητας

- Διαφορική πίεση: $p_2-p_1=\rho g(h_2-h_1)$
- Ταχύτητα μετάδοσης κυμάτων: $C = (E/\rho)^{1/2}$
- E = μέτρο συμπιεστότητας (ελαστικότητας) (Pa=Pa/(m^3/m^3)): πίεση που χρειάζεται δια της αντίστοιχης αδιάστατης αλλαγής όγκου

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{dp}}{-\frac{\mathbf{dU}}{\mathbf{U}}}$$

Μέτρο συμπιεστότητας ή ελαστικότητας

$$E = \frac{dp}{-\frac{dU}{U}}$$



Διαστάσεις μεγεθών

$$Q = cL^{\alpha}M^{\beta}T^{\gamma} \quad \text{(SI)}$$

Quantity	Absolute system of units			
	α	β	γ	Units
Length	1	0	0	m
Mass	0	1	0	kg
Time	0	0	1	s
Velocity	1	0	−1	m/s
Acceleration	1	0	−2	m/s^2
Density	−3	1	0	kg/m^3
Force	1	1	−2	$N = kg\,m/s^2$
Pressure, stress	−1	1	−2	$Pa = N/m^2$
Energy, work	2	1	−2	J
Viscosity	−1	1	−1	Pa s
Kinematic viscosity	2	0	−1	m^2/s

Άσκηση πυκνότητας

- **Εάν 5.6 m^3 ενός λαδιού ζυγίζουν 46800 N, υπολογίστε την πυκνότητα ρ και την σχετική πυκνότητά του.**
- Ειδικό βάρος γ (= ρg) = 46800/5.6 =8360 N/m^3,
- Πυκνότητα ρ = γ/g = 8360/9.81 = 852 kg/m^3
- Σχετική πυκνότητα ή ειδική βαρύτητα
  - $\rho_{\lambda\alpha\delta\iota o\acute{u}} / \rho_{\nu\epsilon\rho o\acute{u}}$ = 852 / 1000 = 0.852

Άσκηση μέτρησης ρ με την μέθοδο βυθιζόμενου σωλήνα

- **Σε πείραμα μέτρησης πυκνότητας λαδιού με την μέθοδο του βυθιζόμενου σωλήνα, ο ίδιος σωλήνας βυθίστηκε σε νερό (κατά 113mm) και στο υπό έλεγχο λάδι κατά 126mm. Να βρεθεί η πυκνότητα του λαδιού εάν αυτή του νερού στην συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι 993kg/m3.**

$$\rho_{\lambda\alpha\delta} = \frac{l_{\nu\varepsilon\rho}}{l_{\lambda\alpha\delta}} \chi \rho_{\nu\varepsilon\rho} = \frac{113}{126} \chi 993 = 890.5 kg/m^3$$

Άσκηση ιξώδους με μέθοδο Stokes

- **Σε πείραμα μέτρησης του ιξώδους υγρού πυκνότητας 920kg/m3 με την μέθοδο Stokes, ρίχτηκαν τρεις σφαίρες πυκνότητας 7600kg/m3 και διαμέτρων 1.5, 2,5 και 3mm. Αυτές χρειάστηκαν αντίστοιχα 1.4, 0.5 και 0.35 sec αντίστοιχα για να διανύσουν διάστημα 150mm μέσα στο υγρό κατά την κατακόρυφη έννοια. Πόσο είναι το ιξώδες του υγρού?**

$$\mu = \frac{2}{9} \chi r^2 \chi g \chi \frac{\rho_{\sigma\phi} - \rho_{\upsilon\gamma\rho\upsilon}}{U}$$

r(mm)	t(sec)	U(m/sec)	μ(Pas)
0.75	1.4	0.107	0.0764
1.25	0.5	0.300	0.0758
1.5	0.35	0.437	0.0764

Άσκηση μέτρου ελαστικότητας

- **Να βρεθεί η αλλαγή του όγκου 1.00 m^3 νερού στους 26.7 ^oC, όταν υπόκειται σε πίεση 20 bar. Επίσης, από τα παρακάτω δεδομένα, να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας του νερού Ε: στα 35 bar, ο όγκος ήταν 1.000 m^3 και στα 240 bar ήταν 0.990 m^3.**
- το Ε στους 26.7 οC είναι $2.24.10^9$ Pa
- Ο ορισμός του μέτρου ελαστικότητας είναι:

$$E = \frac{dp}{-\frac{dV}{V}} \text{ ή } \quad dV = -\frac{V \times dp}{E} = -\frac{1 \times 20 \times 10^5}{2.24 \times 10^9} = -0.00089 m^3$$

$$E = \frac{dp}{-\frac{dV}{V}} = -\frac{(240 - 35) \times 10^5}{\frac{(0.99 - 1)}{1}} = 2.05 \times 10^9 \, Pa$$

... στη συνέχεια

- Υδροστατική πίεση και αποτελέσματά της
- Η σημαντικότερη από πλευράς εφαρμογών ιδιότητα του νερού σε ακινησία ...