

Równoważniki powyższych wielkości fizycznych w obu wymienionych układach przedstawiają się następująco:

$$1 \text{ kG} \approx 9,81 \text{ N}$$

lub

$$1 \text{ N} \approx 0,102 \text{ kG}$$

$$1 \text{ kGm} \approx 9,81 \text{ J}$$

lub

$$1 \text{ J} \approx 0,102 \text{ kGm}.$$

1.5. WŁASNOŚCI FIZYCZNE PŁYNÓW

Do podstawowych parametrów określających własności fizyczne płynów należą: gęstość, ciężar właściwy, ściśliwość i lepkość. Wielkości te będą wyrażone w jednostkach technicznego układu miar, tj. w kG (siły), m, s, lub w układzie SI w kg (masy), m, s.

Gęstość płynu jednorodnego określamy stosunkiem jego masy M do objętości V , czyli

$$\rho = \frac{M}{V} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

Dla płynu niejednorodnego gęstość określamy jako

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V}.$$

W tablicy 1.1 podajemy wartości gęstości niektórych płynów przy ciśnieniu atmosferycznym $1,013 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ w zależności od temperatury, zaś w tablicy 1.2 wartości gęstości niektórych płynów.

Ciężar właściwy płynu jednorodnego określony jest stosunkiem ciężaru G do jego objętości V , czyli

$$\gamma = \frac{G}{V} \frac{\text{N}}{\text{m}^3}.$$

Dla płynu niejednorodnego ciężar właściwy określamy jako

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V}.$$

Tablica 1.1

| Temperatura T [K] | Gęstość $\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ | | |
|----------------------|--|-----------|-----------|
| | woda | rtęć | powietrze |
| 273 | 999,97 | 13 595,46 | 1,293 |
| 277 | 1000,00 | 13 582,20 | 1,273 |
| 283 | 999,73 | 13 570,77 | 1,247 |
| 288 | 999,12 | 13 558,46 | 1,225 |
| 293 | 998,23 | 13 546,16 | 1,205 |
| 303 | 995,37 | 13 521,70 | 1,165 |
| 313 | 992,24 | 13 497,30 | 1,128 |
| 323 | 988,07 | 13 472,72 | 1,093 |
| 333 | 983,24 | 13 448,60 | 1,060 |
| 353 | 971,83 | 13 400,00 | 1,000 |
| 373 | 958,38 | 13 351,80 | 0,945 |

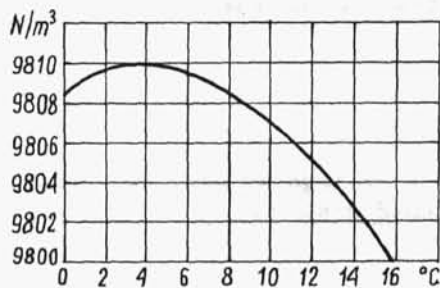
Tablica 1.2

| Nazwa płynu | Gęstość $\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ | Temperatura T [K] |
|-----------------|--|-------------------------------------|
| Woda (czysta) | 1000 | 277 |
| Woda (morska) | 1020 ÷ 1030 | 288 ÷ 293 |
| Gliceryna | 1260 | 273 |
| Alkohol etylowy | 794 | 288 ÷ 293 |
| Olej maszynowy | 890 ÷ 920 | |
| Nafta | 860 ÷ 930 | |
| Benzyna | 700 ÷ 750 | |
| Mleko | 1030 | |
| Powietrze | 1,225 | T = 288 K ciśnienie 760 mm Hg |
| Wodór | 0,0898 | |
| Tlen | 1,4293 | |
| Metan | 0,7168 | |
| Acetylen | 1,175 | |

Zmiana ciśnienia i temperatury wykazuje nieznaczny wpływ na zmianę ciężaru właściwego cieczy.

Wartości ciężaru właściwego wody destylowanej przy ciśnieniu atmosferycznym, w zależności od temperatury, podane zostały na wykresie (rys.1.1). Jak widać ciężar właściwy wody ma największą wartość przy temperaturze $+4^{\circ}\text{C}$ i wynosi

$$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \frac{\text{kG}}{\text{dcm}^3} = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}.$$



Rys.1.1

Krzywą $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = f(t)$ można przedłużyć w kierunku temperatur ujemnych, ponieważ pomiary z wodą przechłodzoną wykazały, że oziębienie wody poniżej temperatury krzepnięcia powoduje dalsze zwiększenie jej objętości.

Wzory określające zmianę ciężaru właściwego wody w zależności od temperatury ustalono doświadczalnie.

W przeciwieństwie do cieczy ciężar właściwy gazów zmienia się znacznie w zależności od ciśnienia i temperatury. Wychodząc z równania stanu dla gazów możemy wyznaczyć ciężar właściwy gazu γ dla dowolnego ciśnienia p i temperatury t $^{\circ}\text{C}$ ze wzoru

$$\gamma = \gamma_0 \frac{p}{p_0} \frac{273 + t_0}{273 + t} = \gamma_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T},$$

gdzie: γ_0 - ciężar właściwy gazu przy ciśnieniu p_0 i temperaturze T_0 K.

Ciężar właściwy powietrza w warunkach normalnych (ciśnienie atmosferyczne równe $1,013 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ i temperatura równa 288 K) wynosi

$$\gamma_p = 1,225 \cdot 9,81 = 11,988 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}.$$

Ciężar G można wyrazić w postaci iloczynu masy M przyspieszenia ziemskiego g ; $G = Mg$, stąd

$$\gamma = \frac{M g}{V} = \rho g.$$



Objętość właściwą płynu określamy stosunkiem jego objętości V do masy M

$$w = \frac{V}{M} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

Z tego wynika, że objętość właściwą można określić jako odwrotność gęstości

$$w = \frac{1}{\varrho}.$$

Zależność gęstości gazów od ciśnienia i temperatury określa się z równania stanu. Dla gazów doskonałych równaniem takim jest równanie Clapeyrona

$$\frac{p}{\varrho} = RT \quad \text{lub} \quad p w = RT,$$

gdzie: R - stała gazowa, która dla powietrza wynosi $287,04 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$,
 T - temperatura bezwzględna w K .

Zależność gęstości gazu od temperatury i ciśnienia przyjmuje następującą postać

$$\varrho = \frac{p}{R T}.$$

Dla warunków normalnych, tj. przy temperaturze 288 K i ciśnieniu $1,013 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ z zależności tej można obliczyć wartość gęstości powietrza

$$\varrho_0 = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

Znając ϱ_0 , można wyliczyć gęstość ϱ dla dowolnych warunków, a mianowicie

$$\varrho = \varrho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}.$$

Ścisłością cieczy nazywamy jej zdolność do zmniejszania pierwotnej objętości na skutek działania sił zewnętrznych (ciśnienia).

Ścisłość cieczy określa współczynnik ścisłości β_p . Jest to stosunek względnej zmiany objętości V cieczy do przyrostu ciśnienia, który zmianę tę wywołał. Współczynnik ten wyraża się wzorem

$$\beta_p = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \frac{m^2}{N}.$$

Zakładając, że współczynnik ścisłości cieczy β_p nie zmienia się w zakresie zmiany ciśnienia o wielkość Δp , co jest prawdziwe przy niezbyt dużych zmianach ciśnienia, otrzymuje się

$$\beta_p = - \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V}.$$

A stąd możemy obliczyć

$$V_1 = V(1 - \beta_p \Delta p),$$

gdzie: V - objętość cieczy przy ciśnieniu p ,

V_1 - objętość cieczy przy ciśnieniu $p_1 = p + \Delta p$,

Δp - przyrost ciśnienia.

Współczynnik β_p można przedstawić również w innej postaci, a mianowicie:

$$V = \frac{M}{\varrho}, \text{ gdzie masa } M = \text{idem},$$

$$dV = - \frac{M}{\varrho^2} d\varrho,$$

stąd

$$\beta_p = \frac{1}{dp} \frac{d\varrho}{\varrho}.$$

Odwrotnością współczynnika ścisłości jest tak zwany moduł sprężystości

$$E_o = \frac{1}{\beta_p} = \varrho \frac{dp}{d\varrho} \frac{N}{m^2}.$$

Ciecze odznaczają się małą ścisłością i dlatego współczynnik ścisłości β_p jest wielkością bardzo małą.

Ze wzrostem temperatury i ciśnienia współczynnik ściśliwości cieczy maleje.

Praktycznie do obliczeń przyjmujemy następujące wartości średnie modułu sprężystości dla cieczy o temp. 293 K:

- dla wody $E_0 = 20\ 601\ \text{bar}$,
- dla nafty $E_0 = 13\ 243\ \text{bar}$,

gdzie $1\ \text{bar} = 10^5\ \text{N/m}^2$.

Oznacza to, że współczynnik ściśliwości β_p dla cieczy jest bardzo mały. Dlatego też w zagadnieniach technicznych w większości przypadków cieczy traktowane są jako nieściśliwe. W niektórych przypadkach, takich jak np. przy uderzeniu hydraulicznym w przewodzie, należy jednakże uwzględnić ściśliwość cieczy.

Rozszerzalnością cieplną cieczy nazywamy jej zdolność do zmiany objętości pod wpływem zmian temperatury.

Rozszerzalność cieplną określamy przy pomocy współczynnika β_t , wyrażającego stosunek względnej zmiany objętości do przyrostu temperatury, który tę zmianę wywołał. Współczynnik rozszerzalności cieplnej β_t przy danym ciśnieniu wyrażany jest wzorem

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \text{ 1/K.}$$

W tablicy 1.3 podano wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej β_T dla wody w zależności od ciśnienia p i temperatury T .

Tablica 1.3

| Ciśnienie $p\ [\text{bar}]$ | Temperatura $T\ [\text{K}]$ | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 277 ÷ 283 | 283 ÷ 293 | 313 ÷ 323 | 333 ÷ 343 | 363 ÷ 373 |
| 1 | 0,000014 | 0,000150 | 0,000422 | 0,000556 | 0,000719 |
| 100 | 0,000043 | 0,000165 | 0,000424 | 0,000548 | 0,000704 |
| 200 | 0,000072 | 0,000183 | 0,000426 | 0,000539 | - |
| 500 | 0,000149 | 0,000236 | 0,000429 | 0,000523 | 0,000661 |
| 900 | 0,000229 | 0,000289 | 0,000439 | 0,000514 | 0,000621 |

Jak widać z powyższej tablicy współczynnik rozszerzalności cieplnej β_T dla wody w zakresie temperatur od 273 do 323 K rośnie ze wzrostem ciśnienia, a przy temperaturach powyżej 323 K maleje.

Lepkością nazywamy zdolność płynów do przenoszenia naprężeń stycznych przy wzajemnym przemieszczeniu elementów poruszających się z różnymi prędkościami. Powstają przy tym siły styczne do kierunku przemieszczenia, które noszą nazwę sił stycznych lub sił tarcia. Siły te będą tym większe, im większa jest lepkość płynu i im większe są różnice prędkości między sąsiednimi elementami płynu.

Stosunek sił stycznych do powierzchni, na której działają, określa naprężenie styczne

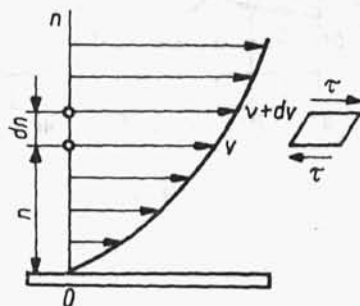
$$\tau = \frac{T}{F} \frac{N}{m}.$$

Według wzoru Newtona naprężenia styczne są proporcjonalne do przyrostu prędkości w kierunku normalnym do przepływu (gradientu prędkości - rys. 1.2)

$$\tau = \mu \frac{dv}{dn}.$$

Współczynnik proporcjonalności μ jest miarą lepkości i nazywa się dynamicznym współczynnikiem lepkości

$$\mu = \tau \frac{dn}{dv} \frac{Ns}{m}.$$



Rys. 1.2

Stosunek dynamicznego współczynnika lepkości do gęstości nazywa się kinematycznym współczynnikiem lepkości

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \frac{m^2}{s}.$$

Lepkość zależy głównie od temperatury, nieznacznie zaś od ciśnienia.

Zmianę lepkości wody w zależności od temperatury można wyznaczyć ze wzoru

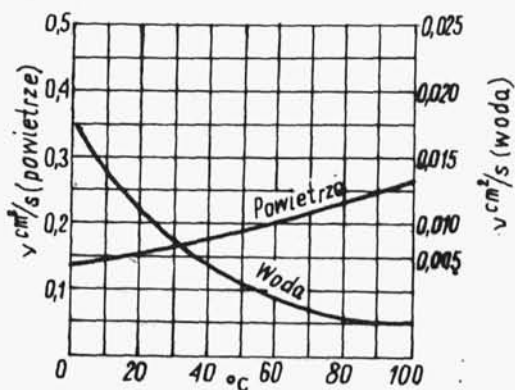
$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0,0337 t + 0,00022 t^2},$$

gdzie μ_0 - dynamiczny współczynnik lepkości przy temperaturze $t = 0^\circ C$.

Lepkość powietrza w zależności od temperatury określa się ze wzoru

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,76},$$

gdzie μ_0 odpowiada temperaturze $T_0 = 273 K$.



Rys.1.3

Na rys.1.3 podano wykresy zależności lepkości wody i powietrza od temperatury. Jak wynika ze wzorów i wykresów ze wzrostem temperatury lepkość wody maleje, natomiast lepkość powietrza rośnie.

W tablicy 1.4 podano wartości kinematycznego współczynnika lepkości niektórych płynów.

Wartości kinematycznego współczynnika lepkości w zależności od temperatury zestawiono dla wody w tablicy 1.5, zaś dla powietrza w tablicy 1.6.

Tablica 1.4

| Nazwa płynu | $\nu \cdot 10^4 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ | Temperatura T [K] |
|----------------|---|-------------------|
| Woda | 0,01 | 293 |
| Benzyna | 0,0083 | 293 |
| Nafta | 0,022 | 293 |
| Olej maszynowy | 0,60 | 313 |
| Gliceryna | 12,00 | 293 |
| Powietrze | 0,149 | 293 |
| Wodór | 0,945 | 273 |
| Tlen | 0,014 | 273 |
| Metan | 0,145 | 273 |

Tablica 1.5

| T [K] | $\nu \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ | T [K] | $\nu \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ | T [K] | $\nu \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ |
|-------|--|-------|--|-------|--|
| 273 | 0,000001789 | 303 | 0,0000008048 | 343 | 0,0000004154 |
| 278 | 0,000001515 | 313 | 0,0000006583 | 353 | 0,0000003658 |
| 288 | 0,000001306 | 323 | 0,0000005561 | 363 | 0,0000003258 |
| 293 | 0,000001006 | 333 | 0,0000004779 | 373 | 0,0000002942 |

Tablica 1.6

| T [K] | $\nu \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ | T [K] | $\nu \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ | T [K] | $\nu \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ |
|-------|--|-------|--|-------|--|
| 273 | 0,0000137 | 293 | 0,0000157 | 333 | 0,0000196 |
| 283 | 0,0000147 | 303 | 0,0000166 | 353 | 0,0000217 |
| 288 | 0,0000152 | 313 | 0,0000176 | 373 | 0,0000238 |

Lepkość cieczy określana jest zazwyczaj przy pomocy wiskozymetrów, z których najbardziej rozpowszechnionym jest wiskozymetr Englera. Lepkość przy pomocy tego wiskozymetru określana jest jako stosunek czasu wypływu cieczy badanej o objętości 200 cm³ do czasu wypływu tej samej objętości wody destylowanej o temperaturze T = 293 K przez otwór kalibrowany. Mając lepkość cieczy w stopniach Englera możemy określić kinematyczny współczynnik lepkości ν ze wzoru

$$\nu = 0,0731 \cdot {}^{\circ}\text{E} - \frac{0,0631}{{}^{\circ}\text{E}} \text{ cm}^2/\text{s}.$$

Wzór ten otrzymany na drodze doświadczalnej daje bardzo dokładne wartości współczynnika ν .

Wytrzymałość na rozerwanie jest zdolnością cieczy przenoszenia naprężeń rozrywających na skutek istnienia sił między cząsteczkowych. Przykładem takiej zdolności cieczy jest zwisająca kropla. Ciężar kropli jest wówczas zrównoważony siłami międzycząsteczkowymi. Należy zauważyć, że wytrzymałość na rozerwanie dla cieczy jest bardzo mała w porównaniu z wytrzymałością na rozerwanie dla ciał stałych i zależy od lepkości cieczy. Dla wody o temperaturze T = 285 K naprężenie rozrywające wynosi

$$\zeta_{\text{H}_2\text{O}} = 36 \frac{\text{N}}{\text{m}},$$

a dla cieczy o większej lepkości jest nieco większa.

Parowanie cieczy polega na zamianie jej stanu skupienia na stan lotny. Proces wytwarzania pary, na powierzchni swobodnej cieczy zachodzi niezależnie od temperatury i ciśnienia i nazywany jest parowaniem.

Gwałtowne parowanie w całej masie cieczy zachodzi tylko w określonych warunkach, to jest przy określonej temperaturze i ciśnieniu i nazywa się wrzeniem. Ciśnienie i temperaturę, przy których ciecz wrze nazywamy ciśnieniem wrzenia i temperaturą wrzenia i oznaczają się

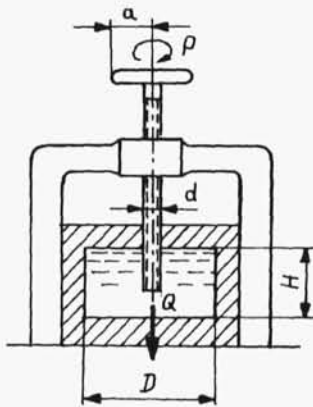
p_w i t_w . Ogólnie biorąc, im wyższe jest ciśnienie, tym wyższa jest temperatura wrzenia i odwrotnie.

W tablicy 1.7 podajemy temperaturę wrzenia wody oraz odpowiadające jej ciśnienie wrzenia.

Tablica 1.7

| Temperatura wrzenia T_w [K] | Ciśnienie wrzenia p_w [bar] | Temperatura wrzenia T_w [K] | Ciśnienie wrzenia p_w [bar] |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 273 | 0,006110 | 328 | 0,14690 |
| 278 | 0,008731 | 333 | 0,19914 |
| 283 | 0,012213 | 338 | 0,25001 |
| 288 | 0,016970 | 343 | 0,31090 |
| 293 | 0,023340 | 348 | 0,38553 |
| 298 | 0,031580 | 353 | 0,47382 |
| 303 | 0,041279 | 358 | 0,57780 |
| 308 | 0,056211 | 363 | 0,70141 |
| 313 | 0,073771 | 368 | 0,84560 |
| 318 | 0,095843 | 373 | 1,01337 |
| 323 | 0,12360 | | |

Przykład 1.1. W prasie hydraulicznej wałek śruby o średnicy $d = 3,5$ cm i skoku $h = 1$ cm, przez pokręcanie koła o promieniu $a = 15$ cm może być wciśnięty do wnętrza cylindra o wewnętrznej średnicy $D = 25$ cm i wysokości $H = 20$ cm. Cylinder wypełniony jest całkowicie wodą.



Rys.1.4

Określić wzrost ciśnienia w cylindrze, parcie na dno cylindra, oraz siłę z jaką należy obracać koło, gdy śruba wykona $n = 10$ obrotów. Tarcie należy pominąć (rys. 1.4).

Rozwiązanie. Po obrocie kołem n razy otrzymamy zmniejszenie objętości cieczy w cylindrze o

$$\Delta V = \frac{\pi d^2}{4} h n.$$

Objętość pierwotna cieczy w cylindrze

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H.$$

Ponieważ

$$\Delta V = - \beta_p \Delta p V,$$

a więc przyrost ciśnienia w cylindrze

$$\begin{aligned}\Delta p &= - \frac{\Delta V}{\beta_p V} = - \frac{d^2 h n}{\beta_p D^2 H} = \frac{3,5^2 \cdot 1 \cdot 10}{0,000047 \cdot 25^2 \cdot 20} = \\ &= 208,5 \text{ kG/cm}^2 = 204,54 \text{ bar}.\end{aligned}$$

Parcie na dno cylindra wynosi

$$P = \frac{\pi d^2}{4} \Delta p = \frac{\pi 3,5^2}{4} \cdot 208,5 = 102\,000 \text{ kG} = 1\,000\,620 \text{ N}.$$

Na wałek śruby działa w kierunku poosiowym siła

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

Dla wyznaczenia siły R , jaką należy przyłożyć na obwodzie koła, porównamy pracę wykonaną przez siłę R na obwodzie koła $2\pi a$ z wykonaną przez siłę poosiową

$$R \cdot 2\pi a = \frac{\pi d^2}{4} \Delta p h,$$

a stąd otrzymamy siłę na obwodzie koła

$$R = \frac{\Delta p d^2 h}{8a} = \frac{208,5 \cdot 3,5^2 \cdot 1}{8 \cdot 15} = 22 \text{ kG} = 215,82 \text{ N}$$

1.6. PODSTAWOWE PRAWA GAZÓW

Gazy doskonałe i rzeczywiste. Gazy doskonałe charakteryzują się tym, że siły międzymolekularne są znikome a objętości mole-