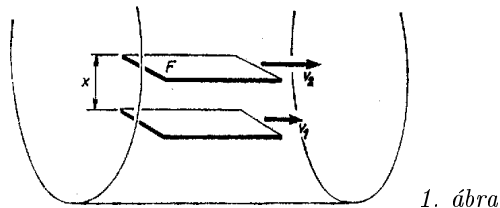


Tegyünk magunk elé három üveget, amelyekben glicerin, víz és aceton van. Rázzuk meg mindegyiket: a glicerin alig mozdul meg, a víz néhány másodpercig mozog, az aceton viszont sokáig hullámszik. Most a folyadékok azon tulajdonságát figyeltük meg, amelyet belső súrlódásnak, idegen szóval viszkozitásnak neveznek. Mozgást gátló erő a szilárd testek felületei között működő súrlódási erő, valamint a folyadékban, gázban mozgó testre ható közegellenállási erő is. Ezekhez hasonló a folyadékok, gázok mozgásakor fellépő belső súrlódás.

Tehát áramló folyadék belsejében, az egyes folyadékrezek között mutatkozik ez a belső súrlódásnak nevezett, mozgást gátló erő. Keressük a törvényét.

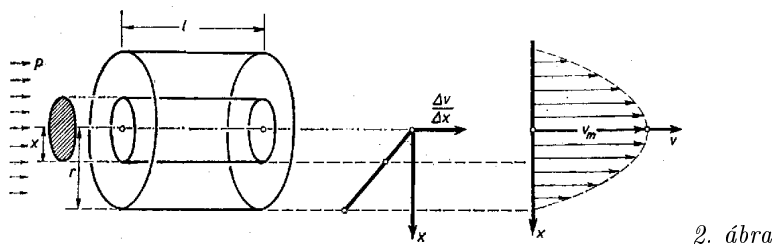


Az első megállapítás, hogy két folyadék réteg között csak akkor lép fel belső súrlódási erő, ha közöttük sebességkülönbség van (1. ábra). Egy csőben folyadék áramlik balról jobbra. Az F cm^2 területű, egymástól x cm távolságban levő rétegek sebessége v_2 , ill. v_1 cm/sec. Ha v_2 és v_1 egyenlő, akkor közöttük épp úgy nem mutatkozik súrlódási erő, mint az egyenletesen mozgó vonat padlója és a rajta fekvő téglák között. A belső súrlódási erő (P) nyilván annál nagyobb, minél nagyobb sebességkülönbség lép fel minél kisebb távolságon:

$$(1) \quad P = -\eta F \cdot \frac{v_2 - v_1}{x} = -\eta F \frac{\Delta v}{\Delta x}.$$

A negatív előjelet azért használjuk, mert a súrlódási erő a hajtó erőhöz képest ellentétes irányú. A súrlódási erő természetesen arányos az F felülettel. $v_2 - v_1$ sebességkülönbségnek az egységnyi távolságra jutó részét, vagyis a $(v_2 - v_1)/x = \Delta v/\Delta x$ törtet sebességésésnek nevezik. η arányossági szorzó az anyagi minőségtől függ, neve belső súrlódási együttható (az ún. viszkozitás). Ez az együttható nagy a glicerin és kicsiny az aceton esetében.

Tehát ha egy csőben folyadék áramlik, akkor a cső rádiusza mentén kifelé haladva a sebesség változását észleljük, sebességésést tapasztalunk. Ezt látjuk a folyóknál is, hiszen a közepén, a sodorvonalban a legnagyobb a sebesség. Közvetlenül a partnál, a cső fala mentén a sebesség nulla. Keressük a sebességésés, valamint a sebesség értékeit, ha a cső rádiusza mentén haladunk a középtől a fal felé (2. ábra).



Egy l hosszúságú csőben állandó sebességgel áramlik a folyadék. Ez azt jelenti, hogy minden egyes molekula a tengellyel párhuzamos egyenes mentén halad és sebessége elején-végén állandóan ugyanannyi. A fentiek szerint a tengelytől különböző távolságban levő molekulák sebessége eltérő. A cső eleje és vége között állandó p nyomáskülönbséget hozunk létre, és ez okozza az áramlást. Leírt berendezésünkben állandó erő mellett a sebesség állandó. Ez csak úgy lehetséges, hogy az állandó erőt egy másik állandó erő, éppen a belső súrlódási erő egyensúlyozza ki. Felírjuk a hajtóerőt és a belső súrlódási erő egyenlőségét.

Tekintsük a cső tengelyét körülvevő, x rádiuszú hengeres részt. Ennek alapterülete πx^2 , így p nyomás esetében a hajtóerő $\pi x^2 p$. Ezt az x rádiuszú henger palástja mentén fellépő belső súrlódási erő egyensúlyozza ki. A súrlódó felület $2\pi x l$, a sebességésés a tengelytől x távolságban valamilyen $\Delta v/\Delta x$ érték, tehát (1) alapján:

$$\pi x^2 p = -\eta \cdot 2\pi x l \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x}.$$

Innen:

$$(2) \quad \frac{\Delta v}{\Delta x} = -\frac{p}{2\eta l} \cdot x.$$

Tehát a sebességésés egyenesen arányos az x távolsággal. Ennek végeredményben az az oka, hogy x -szel arányos a palást területe, a súrlódó felület nagysága. A sebességésés a közepén nulla, abszolút értékét tekintve a fal mentén a legnagyobb. A 2. ábrán a cső rajza melletti első diagramm a sebességésést tünteti fel x függvényként.

De hogyan alakul magának a sebességnek a rádiustól való függése? Belátjuk: ha $\Delta v/\Delta x$ sebességés x -szel arányos, akkor v -nek x^2 -től kell függenie. Hiszen $y = kx^2$ érintője az x -tengellyel olyan α szöget alkot, amelynek tangense $2kx$, tehát x -szel arányos. Ennek alapján a sebességnek az x -től való függése:

$$(3) \quad v = \frac{p}{4\eta l} \cdot (r^2 - x^2).$$

Vizsgáljuk meg a szélső értékeket. Ha $x = 0$, kapjuk a cső tengelyében észlelhető maximális sebességet:

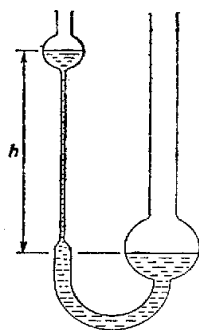
$$(4) \quad v_m = \frac{pr^2}{4\eta^2},$$

a falnál pedig, ahol $x = r$, $v = 0$. Valóban, itt áll a folyadék. Megvizsgálhatjuk, hogy a (3) sebességből a (2) sebességés következik. A 2. ábra jobb oldali rajza a sebességek eloszlását ábrázolja.

Kísérletileg az egyes részecskék sebességének megfigyelése nem könnyű. Ezért v , illetve v_m helyett az 1 másodperc alatt átáramlott folyadékmennyiséget, V -t használjuk. A 2. ábrában a jobboldali rajz paraboláját tengelye körül megforgatva kapjuk azt a forgási paraboloidot, amelyen belül levő folyadék áramlik át 1 másodperc alatt a cső valamely keresztmetszetén. A forgási paraboloid köbtartalmát az alapterület és a magasság szorzatának a fele adja meg: $\pi r^2 v_m/2$, így az 1 másodperc alatt átfolyó folyadékmennyiség:

$$(5) \quad V = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{r^4 p}{\eta l}.$$

Ez az a híres törvény, amelyet Poiseuille 1840-ben állapított meg. Eszerint egy vékony csövön 1 másodperc alatt átfolyó folyadékmennyiség egyenesen arányos a nyomáskülönbséggel és a cső rádiuszának negyedik hatványával, de fordítva arányos a cső hosszával. Az anyagra jellemző η belső súrlódási együttható (1) szerint megadja, hogy hány din erő szükséges két, 1–1 cm² nagyságú, 1 cm távolságban levő felület egymáshoz képest 1 cm/sec sebességgel történő mozgatásához. η egységének neve: 1 poise (poáz). Annak a folyadéknak a belső súrlódása 1 poise, amelynél az ilyen mozgatáshoz 1 din erő szükséges. Képleteink poise, cm, cm³/sec, din/cm² egységek használata mellett érvényesek.



3. ábra

A belső súrlódási együttható mérésére igen sokféle kísérleti eszköz ismeretes. Az (5) alatti Poiseuille-törvény alapján is meghatározható η , ha a többi mennyiséget lemérjük. Kis ügyességgel házilag is végezhetünk ilyen kísérleteket. Nagyon sokszor a kérdéses folyadék viszkozitását a vízéhez viszonyított relatív értékkel adják meg. Ekkor használható például az Ostwald-féle viszkoziméter (3. ábra). Órával megmérjük, mennyi idő alatt folyik át a készülék hajszálcsövén egyrészt a kérdéses folyadék, másrészt a víz. A működő nyomás a kérdéses, γ fajsúlyú folyadék esetében $h\gamma$, a γ_v fajsúlyú víz esetében $h\gamma_v$; a felső, K térfogatú tartálykából a kérdéses folyadék t , a víz t_v idő alatt folyik le (viszkozitása η_v). Felírva Poiseuille törvényét a kérdéses folyadékra és vízre:

$$\frac{K}{t} = \frac{\pi r^4 h \gamma}{8\eta l}, \quad \frac{K}{t_v} = \frac{\pi r^4 h \gamma_v}{8\eta_v l}.$$

Osztással kapjuk a vízre vonatkoztatott relatív viszkozitást:

$$\frac{\eta}{\eta_v} = \frac{\gamma}{\gamma_v} \cdot \frac{t}{t_v}.$$

Tájékozódásul jó tudni, hogy a víz viszkozitása 20°-on 0,01 poise.

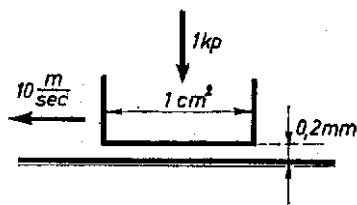
Lássunk néhány adatot; kettő kivételével valamennyi 20° C-ra vonatkozik (I. táblázat). Néhány megjegyzést kell tennünk. A Poiseuille-törvény csak akkor alkalmazható, ha a folyadék részecskéi a tengellyel párhuzamos egyeneseken haladnak (az áramlás lamináris). Nagyobb sebességnél kavargás jön létre, de ezzel most nem foglalkozunk. Azonkívül nagyobb sebességnél elsősorban nem a belső súrlódás, hanem örvényképződés, tehetetlenségi erők akadályozzák a mozgást, amit arról is észreveszünk, hogy ilyenkor az akadályozó erő nem a sebesség első, hanem második hatványával

arányos. A belső súrlódási együttható nem függ a folyadék fajsúlyától (sűrűségétől), vele nem tévesztendő össze. Sókat feloldva általában kissé emelkedik a víz viszkozitása. Igen érdekes eredményre jutunk azonban, ha víz-metilalkohol, víz-etilalkohol stb. keverékek viszkozitását tanulmányozzuk, mint az összetétel függvényét! Táblázatunkban a kolofónium (hegedűgyanta) nem szilárd anyagnak, hanem túlhűtött folyadéknak számít. Gázok belső súrlódása is mérhető megfelelő módszerekkel és eszközökkel.

I. táblázat

az anyag neve	poise	$\frac{\eta}{\eta_0}$
víz	0,01	1
metilalkohol	0,0061	0,61
etilalkohol	0,012	1,2
n-propilalkohol	0,022	2,2
i-propilalkohol	0,024	2,4
aceton	0,0033	0,33
etiléter	0,0023	0,23
kloroform	0,0062	0,62
benzol	0,0064	0,64
széndiszulfid	0,0038	0,38
glicerin, 100 %-os	7,78	778
85 %-os glicerin	1,22	122
ásványolaj	0,5	50
ricinusolaj	10,27	1027
higany	0,0159	1,59
folyékony CO ₂	0,0007	0,07
foly. levegő -180°-on	0,0033	0,33
vér 38 C°-on	0,035	3,5
vérszérum 20 C°-on	0,011	1,1
kolofónium	6 · 10 ¹⁶	6 · 10 ¹⁷
levegő	0,00019	0,019

Lássunk néhány példát. 10 cm hosszú, 1 mm átmérőjű csövön saját súlyától származó nyomás által hajtva 1 másodperc alatt 0,29 cm³ víz, 0,87 cm³ etiléter, 0,00026 cm³ ricinusolaj folyik át. A lispei olajvezeték hossza 210 km, átmérője 20 cm, a mozgató nyomás 80 atmoszféra; ennek alapján 1 másodperc alatt 30 liter, 1 óra alatt 108 m³ olaj folyik át, és a cső tengelyében a sebesség kb. 2 m/sec. Egy 0,06 mm átmérőjű hajszáléren, annak 1 cm hosszú darabján 1 másodperc alatt 1 mm³ vér átréseléséhez Poiseuille képlete szerint 1,1 atmoszféra nyomáskülönbség szükséges. A véresejtsüllyedés néven ismeretes orvosi vizsgálati módszernél a kicsapott vörös vértesteknek a vérszérumban való süllyedési sebességét mérik. Ha a vérszérum fehérjetartalma a rendestől eltérő, akkor kisebb a viszkozitása, és a vörös vértestek ugyanazon idő alatt mélyebbre süllyednek.



4. ábra

Az olajozás lényegét mutatja egy tájékoztató jellegű példánk (4. ábra). Az 1 cm² területű fémlemez 1 kp erő szorítja az alatta levő fémlemezhez. Ha a száraz súrlódás együtthatóját 0,1-nek vesszük, akkor mozgatáskor 0,1 kp súrlódási erőt kell leküzdenünk. Helyezzünk a fémfelületek közé 0,5 poise viszkozitású ásványolajat, és mozogjon a fémlemez 10 m/sec sebességgel. Ekkor az olajrétegben a sebességesés kb. 1000 : 0,02 = 50000, és a leküzdendő belső súrlódási erő (1) szerint 25000 din = 0,025 kp, tehát sokkal kevesebb mint előbb.

II. táblázatunk a belső súrlódási együtthatónak a hőmérséklettől való függésére mutat néhány példát. Folyadékok viszkozitása melegen sokkal kisebb, amint az a víz esetében jól megfigyelhető. Higany esetében a csökkenés nem olyan rohamos. Táblázatunk harmadik oszlopa a megolvadt kén átmenetileg nyúlóssá válását mutatja. A levegő és a gázok viszkozitása melegítéskor kissé növekszik. Ennek oka, hogy melegen valamivel nagyobb a molekulák repülési sebessége, ezért a lassabban és gyorsabban mozgó gágrétegek molekulái mélyebben repülnek be a másik rétegbe és nagyobb mértékben akadályozzák annak mozgását.

II. táblázat

	víz	higany	folyékony kén	levegő
0°	0,0179	0,0168		0,00018
20°	0,01	0,0159		
40°	0,0066	0,0148		
60°	0,0047			
80°	0,0036			
100°	0,0028	0,0123		0,00023
120°		0,0117	0,12	
150°		0,0108	0,088	
180°		0,0103	561	0,00026
300°		0,0092	24	0,00029
440°			0,88	0,00034

A felsorolt példák is mutatják, hogy a belső súrlódás ismerete számos területen szükséges, amilyen például a gépek olajozása, a távvezetékek, vízvezetékek tervezése, a szűrés, a vér áramlásának megértése stb.