

VÁKUUMTECHNIKA

Bohátka Sándor és Langer Gábor

13. SZÁMÍTÁSI GYAKORLAT

13. SZÁMÍTÁSI GYAKORLAT

Példánkban tekintsünk egy gyorsítócsövet, amelyet diffúziós szivattyúval akarnak szívni.

Adatok:

Gáz: (az egyszerűség kedvéért) levegő,

A gyorsítócső mérete erősen idealizált közelítéssel:

$$L_{gy} = 60 \text{ cm}; \quad D_{gy} = 12 \text{ cm};$$

Nagynyomású ionforrásában:

$$p_1 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ mbar nyomás van};$$

Az ionforrást a gyorsítócsővel összekötő nyílás keresztmetszete:

$$A = 0,2 \text{ cm}^2;$$

A gyorsítócsövet diffúziós szivattyúval szívjuk, amelynek szívósebessége:

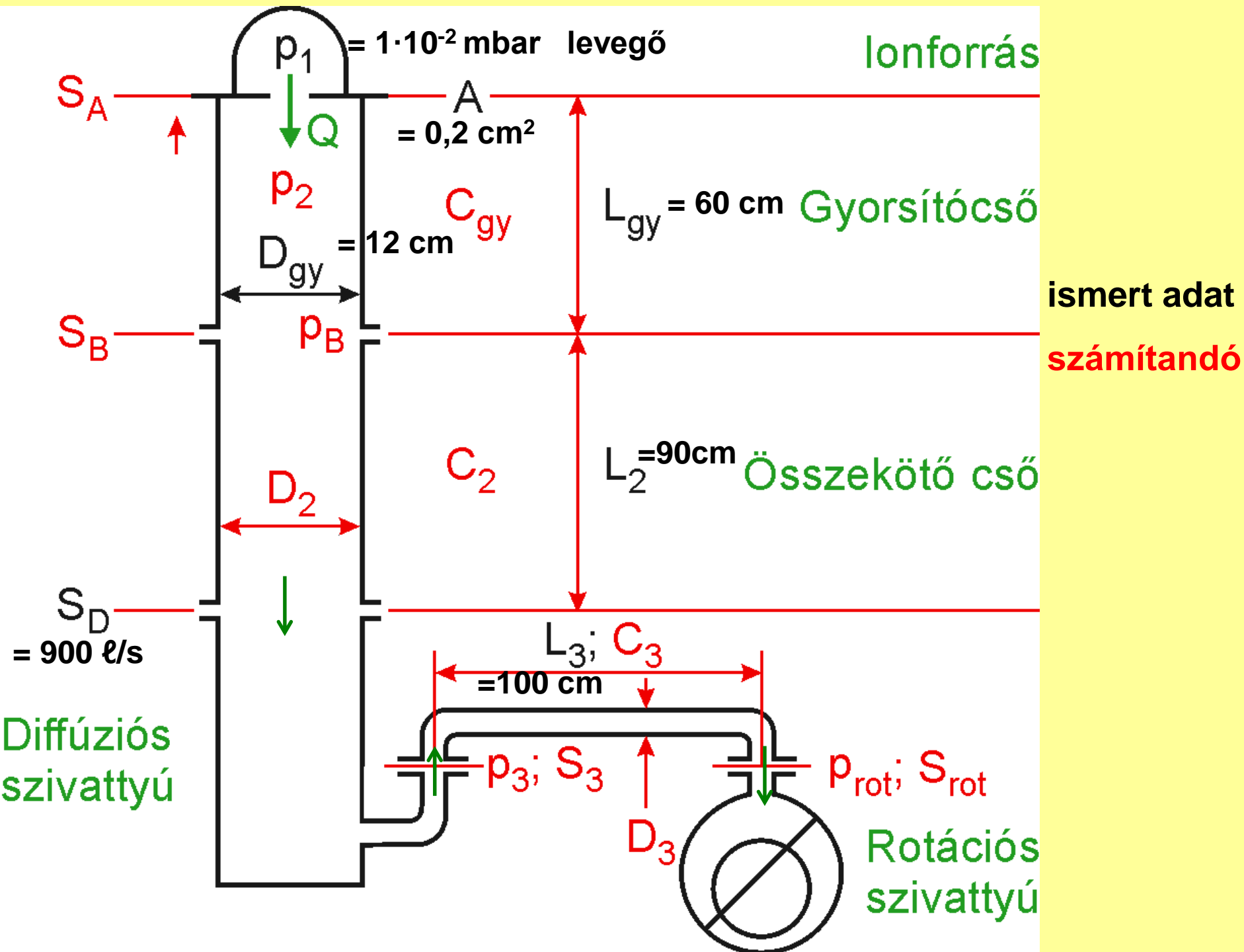
$$S_{Diff.} = 900 \text{ l/s};$$

A gyorsítócsövet és a diffúziós szivattyút nem tudjuk közvetlenül összekapcsolni, ezért egy összekötő csövet kell alkalmazni, amelynek legalább 90 cm-nek kell lennie.

$$L_2 = 90 \text{ cm};$$

A diffúziós szivattyút a rotációs szivattyútól olyan messze tudjuk elhelyezni, hogy az összekötő vezetéknek legalább 1 m-esnek kell lennie.

$$L_3 = 100 \text{ cm}.$$



Feladat:

1. Mennyi a nyomás a gyorsítócsőben? $p_2 = ?$
2. Milyen S_B szívósebességgel kell szívni a gyorsítócsövet, hogy benne a nyomás ténylegesen p_2 vagy annál kisebb legyen? $S_B = ?$

Ehhez tudni kell, hogy

 - 2.1. Mennyi a gázbeömlés az ionforrásból? $Q = ?$
 - 2.2. Mennyi az ionforrás kilépőnyílásának szívósebessége? $S_A = ?$
 - 2.3. Mennyi a gyorsítócső vezetőképessége? $C_{gy} = ?$
 - 2.4. Mennyi a gyorsítócső alján a nyomás? $p_B = ?$
3. Milyen csővezetékkel kell használnunk a gyorsítócső és a diffúziós szivattyú összekötésére, hogy a meglévő diffúziós szivattyúval a kellő S_B szívósebességet kapjuk a gyorsítócső alján?
 - 3.1. Ehhez először tudnunk kell a cső vezetőképességét: $C_2 = ?$
 - 3.2. Mennyi legyen az összekötő cső átmérője, ha a cső hossza a hozzáférhetőség miatt adott ($L_2 = 90$ cm) $D_2 = ?$

Feladat

4. Milyen rotációs szivattyú kell és milyen vezetékkel csatlakoztassuk a diffúziós szivattyúhoz, hogy azt jól kiszolgálja?

4.1.

$$p_3 = ?$$

4.2.

$$S_3 = ?$$

4.3.

$$C_3 = ?$$

4.4.

$$S_{rot.} = ?$$

5. Mennyi a nyomáscsökkenés az elővákuum-vezetéken?

$$p_3 - p_{rot} = ?$$

$$p_{rot} = ?$$

6. Milyen névleges szívósebességű rotációs szivattyút kell vennünk, ha a szivattyúban terhelés nélkül

a.) $p_0 = 10^{-3}$ mbar

b.) $p_0 = 10^{-2}$ mbar

alacsony nyomást tudunk elérni?

Meghatározandó a névleges vagy volumetrikus szívósebesség: $S_{vol} = ?$

7. Mennyi idő alatt szívja a gyorsítócső, összekötő cső, diffúziós szivattyú $V = 70$ ℓ térfogatú együttesét atmoszféráról $5 \cdot 10^{-2}$ mbar-ra az alkalmazott rotációs szivattyú?

$$t = ?$$

MEGOLDÁS

- A példamegoldások során első lépés mindig egy rajzvázlat legyen.
- A rajzon egyértelműen jelöljük be a gáz útját, és tegyük egyértelművé, hogy mely vezetőképességek az összetevők és mi az eredőjük – a gyakorlatban a kezdők ennek megítélésében követik el a legtöbb hibát.

1. Mennyi a nyomás a gyorsítócsőben?

$$p_2 = ?$$

A gyorsítócsőben uralkodó nyomást a gyorsítócső funkciója fogja meghatározni.

A gyorsítócsőben molekuláris áramlásnak kell lennie, hogy benne ne ütközzenek az ionok a maradékgázokkal :

$$\bar{l} > L_{gy} = 60 \text{ cm}$$

Tudjuk (2.5.1.3.a.), hogy $p \cdot \bar{l} \approx 6 \times 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{cm}$,

amiből következik:

$$p_2 < 10^{-4} \text{ mbar}$$

A gyakorlatban a biztonság érdekében erősen az egyenlőtlenség irányában mozdulunk el.

2. Milyen S_B szívósebességgel kell szívni a gyorsítócsövet, hogy benne a nyomás ténylegesen p_2 vagy annál kisebb legyen? $S_B = ?$

A szívósebesség és gázmennyiség-áram összefüggését kell kihasználnunk:

$$Q = p_B \cdot S_B \Rightarrow S_B = \frac{Q}{p_B}$$

Q : az átáramlott gázmennyiség ugyanannyi az áramlási útvonal minden szakaszán. A nyíláson átáramló molekuláris gázmennyiség-áram (4.5.10.) összefüggéséből határozhatjuk meg a legkönnyebben:

$$Q = 11,6 (p_1 - p_2) \cdot A \quad \text{levegőre, egyébként}$$

$$\left(Q \propto \sqrt{\frac{T}{m_a}} \right) \quad \text{szerint változik a gáz fajtájával.}$$

2.1. $Q = 11,6(p_1 - p_2) \cdot A = 11,6 (10 - 0,1) \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$
 $= 23 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \ell \cdot \text{s}^{-1}$

2.2.

S_B kiszámításához nem feltétlen szükséges, de mellékesen meghatározhatjuk az ionforrás kilépőnyílásának szívósebességét (S_A) is :

$$Q = p_1 \cdot S_A \Rightarrow S_A = \frac{Q}{p_1}$$

vagy másként a: $S_A = 11,6(1 - p_2/p_1) \cdot A$ egyenlőségekből.

$$S_A = \frac{Q}{p_1} = \frac{23 \times 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}}{10^{-2} \text{ mbar}} = 2,3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

vagy $S_A = 11,6(1 - p_2/p_1) \cdot A = 11,6(1 - 10^{-4}/10^{-2}) \cdot 0,2 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$
 $= 2,3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$

p_B kiszámítása

S_B kiszámításához az előbb használt $S_B = Q/p_B$ összefüggésben Q -t meghatároztuk, de még szükség van p_B ismeretére.

A gyorsítócső ellenállásán van valamilyen nyomásesés ($p_B < p_2$). Ez a nyomásesés a vezetőképesség segítségével (4.3.2. egyenlőség) kiszámítható:

$$\frac{Q}{C_{gy}} = p_2 - p_B \Rightarrow p_B = p_2 - \frac{Q}{C_{gy}}$$

ahol a gyorsítócső vezetőképessége a méretei ismeretében a (4.7.9.) egyenlőségből számolható ki:

2.3.

$$C_{gy} = 12,1 \cdot \frac{D_{gy}^3}{L_{gy}}$$

$$C_{gy} = 12,1 \frac{12^3}{60} \text{ l s}^{-1} = 348 \text{ l s}^{-1} \approx 350 \text{ l s}^{-1}$$

2.4. Ha az A nyílás után a nyomás: $p_2 < 10^{-4}$ mbar, akkor a gyorsítócső alján ennél alacsonyabb nyomásnak kell lennie, hogy áramlás legyen.

$$p_B = p_2 - \frac{Q}{C_{gy}}$$

$$p_B < 10^{-4} \text{ mbar} - \frac{23 \cdot 10^{-3}}{350} \text{ mbar} = (10^{-4} - 6,6 \cdot 10^{-5}) \text{ mbar}$$

$$p_B < 3,4 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$$

2.5.

$$S_B = \frac{Q}{p_B} = \frac{23 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{s}^{-1}}{3,4 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}} = 676 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \approx 680 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p_B < 3,4 \times 10^{-5} \text{ mbar miatt } S_B > 680 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

Ad 2.1.

Helyesen feltételeztük-e, hogy a $0,2 \text{ cm}^2$ keresztmetszetű nyíláson keresztül 10^{-2} mbar -ról 10^{-4} mbar -ra molekuláris az áramlás?

A 4.1.1. táblázatból vagy a 4.5.2. fejezetből:

molekuláris az áramlás, ha

$$\bar{p} \cdot d < 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{cm} \quad \text{vagy} \quad \bar{l} > d$$

Itt $d \approx 0,5 \text{ cm}$ (környílást feltételezünk)

$$\bar{p} = \frac{10^{-2} + 10^{-4}}{2} \text{ mbar} = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$$

$$\bar{p} \cdot d = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{cm}$$

$$= 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{cm} < 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{cm},$$

vagy

$$\bar{l} = \frac{6 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{cm}}{\bar{p}} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-2}} \text{ cm} = 1,2 \text{ cm}$$

$$1,2 \text{ cm} > 0,5 \text{ cm}$$

Tehát a nyíláson az áramlás molekuláris.

3. Feladatsor

3.1. $C_2 = ?$

(4.4.2.b.)-t felhasználva:

$$\frac{1}{S_B} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{S_{Diff}} \qquad \frac{1}{C_2} = \frac{1}{S_B} - \frac{1}{S_{Diff}}$$

$$C_2 = \frac{S_B \cdot S_{Diff}}{S_{Diff} - S_B} = \frac{680 \cdot 900}{900 - 680} \text{ l / s} = 2782 \text{ ls}^{-1} \approx 2800 \text{ ls}^{-1}$$

Legalább ilyen vezetőképességű csövet kell választanunk!

3.2. $D_2 = ?$

$$C_2 = 12,1 \frac{D_2^3}{L_2} (\text{l / s}) \qquad D_2 = \sqrt[3]{\frac{C_2 \cdot L_2}{12,1}} (\text{cm})$$

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{2800 \cdot 90}{12,1}} (\text{cm}) = 27,5 \text{ cm}$$

Az áramlás valóban molekuláris-e az összekötő csőben?

Itt $\bar{p} < p_B$

$$\bar{p} D_2 < p_B D_2 = 3,4 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot 27,5 \text{ cm} \approx 9,4 \times 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{cm}$$
$$9,4 \times 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{cm} < 6,6 \times 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{cm}, \text{ tehát molekuláris!}$$

Valóban hosszú-e a cső?

A 4.7.3.1. fejezetből: $L = 90 \text{ cm} > \frac{4}{3} D_2 = \frac{4}{3} 27,5 \text{ cm} = 36,7 \text{ cm}$ **Igen!**

4. Feladatsor

4.1. p_3 értékét a diffúziós szivattyú működési sajátosságainak ismerete alapján határozhatjuk meg.

A diffúziós szivattyú működéséhez az ürítési oldalon $p_3 < 10^{-1}$ mbar nyomás szükséges.

Tartós üzemben ajánlatos $p_3 \leq 5 \cdot 10^{-2}$ mbar nyomást fenntartani.

4.2. p_3 értékének fenntartásához

$$S_3 = \frac{Q}{p_3} = \frac{23 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{ls}^{-1}}{\leq 5 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}} \geq 4,6 \cdot 10^{-1} \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

$S_3 \geq 4,6 \cdot 10^{-1} \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ szívósebességre van szükség a diffúziós szivattyú ürítő oldalán.

4. Feladatsor

4.3. A rotációs szivattyú összekötő csövének vezetőképességét úgy tudjuk kiszámítani, ha tudjuk milyen az áramlás!

Megfontolás:

$$p_3 \leq 5 \times 10^{-2} \text{ mbar}$$

$$p_3 \cdot \bar{l} \approx 6 \times 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{cm}$$

$$\bar{l} \geq \frac{6 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-2}} \text{ cm} = 0,12 \text{ cm}$$

lamináris áramlás:

$$\text{ha } \bar{l} < D/100$$

molekuláris áramlás:

$$\text{ha } \bar{l} > D/3$$

Nézzük meg néhány ésszerű méretnél: $D_3 = 1 \text{ cm}; 2 \text{ cm}; 4 \text{ cm}!$

$$D_3/100 = 0,01 \text{ cm}; 0,02 \text{ cm}; 0,04 \text{ cm}$$

$$D_3/3 = 0,33 \text{ cm}; 0,66 \text{ cm}; 1,33 \text{ cm}$$

$$\bar{l} = 0,12 \text{ cm} < D_3 / 100 \quad \text{Nem igaz!}$$

$$\bar{l} = 0,12 \text{ cm} > D_3 / 3 \quad \text{Nem igaz!}$$

**Az áramlás átmeneti, a
használandó képlet (4.7.7.):**

$$C_3 = 12,1 \frac{D_3^3}{L_3} J$$

4.3. $C_3 = ?$

D_3 (cm)	1	2	4
$D_3 \cdot \bar{p}$ (mbar·cm)	0,05	0,1	0,2
J (4.7.2. fejezet)	1,4	2	3
C_3 (l/s)	$12,1 \cdot 1 \cdot 1,4 / 100$	$12,1 \cdot 2^3 \cdot 2 / 100$	$12,1 \cdot 4^3 \cdot 3 / 100$
C_3 (l/s)	0,17	1,94	23

4.4. $S_{rot.} = ?$

$$\frac{1}{S_3} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{S_{rot.}} \quad S_{rot.} = \frac{S_3 \cdot C_3}{C_3 - S_3}$$

D_3 (cm)	1	2	4
$S_{rot.}$ (l/s)	$0,46 \cdot 0,17 / (0,17 - 0,46)$	$0,46 \cdot 1,94 / (1,94 - 0,46)$	$0,46 \cdot 23 / (23 - 0,46)$
$S_{rot.}$ (l/s)	-0,27 Negatív nem lehet!	0,60	0,47

Tehát a) az 1 cm átmérőjű csővel a feladat megvalósíthatatlan,
b) a nagyobb vezetőképességű csővel csatlakoztatva kisebb teljesítményű szivattyút is használhatunk.

5. $p_{rot} = ?$

$$C = \frac{Q}{\Delta p} \Rightarrow \Delta p = \frac{Q}{C}$$

$$p_3 - p_{rot} = \frac{Q}{C_3}$$

$$p_{rot} = p_3 - \frac{Q}{C_3} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} - \frac{23 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}}{C_3}$$

D_3 (cm)	-	2	4
Q/C_3 (mbar)		0,012	0,001
p_{rot} (mbar)		$3,8 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$

Nagyobb vezetőképességű összekötő csővel még akkor is tartható az elérni szükséges p_3 nyomás, ha a szivattyú végvákuuma kissé rosszabb.

6. S_{vol} mennyi, ha a szivattyú terhelés nélküli alapnyomása p_0 ?

(4.4.4.) összefüggést idézve:

$$S_{eff} = S_{sz} \left(1 - \frac{p_0}{p} \right) \quad \text{Itt:} \quad S_{rot} = S_{vol} \left(1 - \frac{p_0}{p_{rot}} \right) \quad S_{vol} = S_{rot} \frac{p_{rot}}{p_{rot} - p_0}$$

D_3 (cm)	2		4	
S_{rot} (l/s)	0,60		0,47	
p_{rot} (mbar)	$3,8 \cdot 10^{-2}$		$4,9 \cdot 10^{-2}$	
p_0 (mbar)	10^{-3}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-2}
S_{vol} (l/s)	0,62	0,81	0,48	0,59
S_{vol} (m³/h)	2,23	2,92	1,73	2,13

**Árak: pl. 2,5 m³/h szívósebességű szivattyú: 1470 eur,
4,5 m³/h szívósebességű szivattyú: 1820 eur.**

Leszívási idő

A leszívási időt a (4.8.2.) egyenlet segítségével számíthatjuk ki.

$$t = 2,3 \cdot \frac{V}{S_p} \cdot \log \frac{p_o}{p} \quad \tau = \frac{V}{S_p} \quad \text{Itt a jelöléseket összeigazítva:}$$
$$S_p = S_{rot}$$

(Adott mennyiségek: $V = 70 \ell$, $p_o = 1013 \text{ mbar}$, $p = 5 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$)

$$S_{rot} = 0,6 \text{ l/s}; \quad 0,47 \text{ l/s}$$

$$\tau = 116,7 \text{ s}; \quad 149 \text{ s}$$

$$t = 19,2 \text{ perc}; \quad 24,6 \text{ perc}$$

A rotációs szivattyú kiválasztásakor nemcsak a diffúziós szivattyú igényeit kell figyelembe venni, hanem a leszívási időt is.

Ilyen hosszú leszívási idő nem engedhető meg. Célszerű legalább 4-szer nagyobb szivattyút választani. (A gyakorlatban ha nagy különbség van a nagyvákuum-szivattyú elővákuum-szivattyúja és a recipienst elővákuumra leszívó szivattyú megkívánt szívósebessége között, akkor utóbbinak külön szivattyút állítanak be.)

Ajánlatos a szivattyú számított szívósebesség értékét az adódó veszteségek kompenzálására felülbecsülni. A költség optimalizálása megfontolást kíván.

További, gyakorlásra ajánlott számítási példák

Egy edénybe $3,4 \cdot 10^{-5}$ mbar·ℓ/s a beömlés, és ezt az edényt egy 1 m hosszúságú, 20 cm átmérőjű csövön keresztül 200 ℓ/s szívósebességű szivattyúval szívjuk. Mennyi a nyomás a recipiensben és a szivattyú torkában?

Egy tömegspektrométerbe levegőmintát engedünk be egy kétfokozatú mintavevőn. Az első fokozatban forgólapátos szivattyú szívja be a levegőt egy vékony kapillárison át. A kapilláris szívott oldalán $1 \cdot 10^{-1}$ mbar nyomás áll be. Erről a nyomásról engedjük be a mintát a tömegspektrométerbe egy kör keresztmetszetű, vékony kis nyomáscsökkentő lyukon keresztül úgy, hogy a tömegspektrométer nagyvákuum-terét egy 365 ℓ/s szívósebességű szivattyú szívja, és a tömegspektrométerben $1 \cdot 10^{-6}$ mbar nyomás áll be. Milyen átmérőjűnek kell lennie ennek a nyomáscsökkentő kis lyuknak?

Egy recipienst $10,8$ m³/h szívósebességű rotációs szivattyúval szívunk úgy, hogy 2 db, egyenként 5 m hosszú, 1 cm átmérőjű, egymással párhuzamosan kapcsolt cső köti össze őket. Milyen szívósebesség érvényesül a recipiensben, ha ott a nyomás 1 mbar, és mennyi a nyomás a szivattyú torkában?

A csövek vezetőképességének a hosszúságtól (L), átmérőtől (D) és nyomástól (p) való függését mutatjuk be az alábbi értékekre számolt adatokkal. Figyeljük meg, hogyan változik az áramlás jellege (színes jelölés)!

C: molekuláris

C: átmeneti

C: viszkózus

L (cm)	D cm	p mbar	C (l/s)	p mbar	C (l/s)	p mbar	C (l/s)	p mbar	C (l/s)	p mbar	C (l/s)
400	4	0,01	2,420	0,1	10,38	1	87,68	10	876,8	30	2630
176	3,65	0,01	4,012	0,1	16,62	1	138,2	10	1382	30	4145
50	1	0,01	0,242	0,1	0,484	1	2,977	10	27,4	30	82,2
12,5	0,4	0,01	0,062	0,1	0,077	1	0,332	10	2,8	30	8,4