

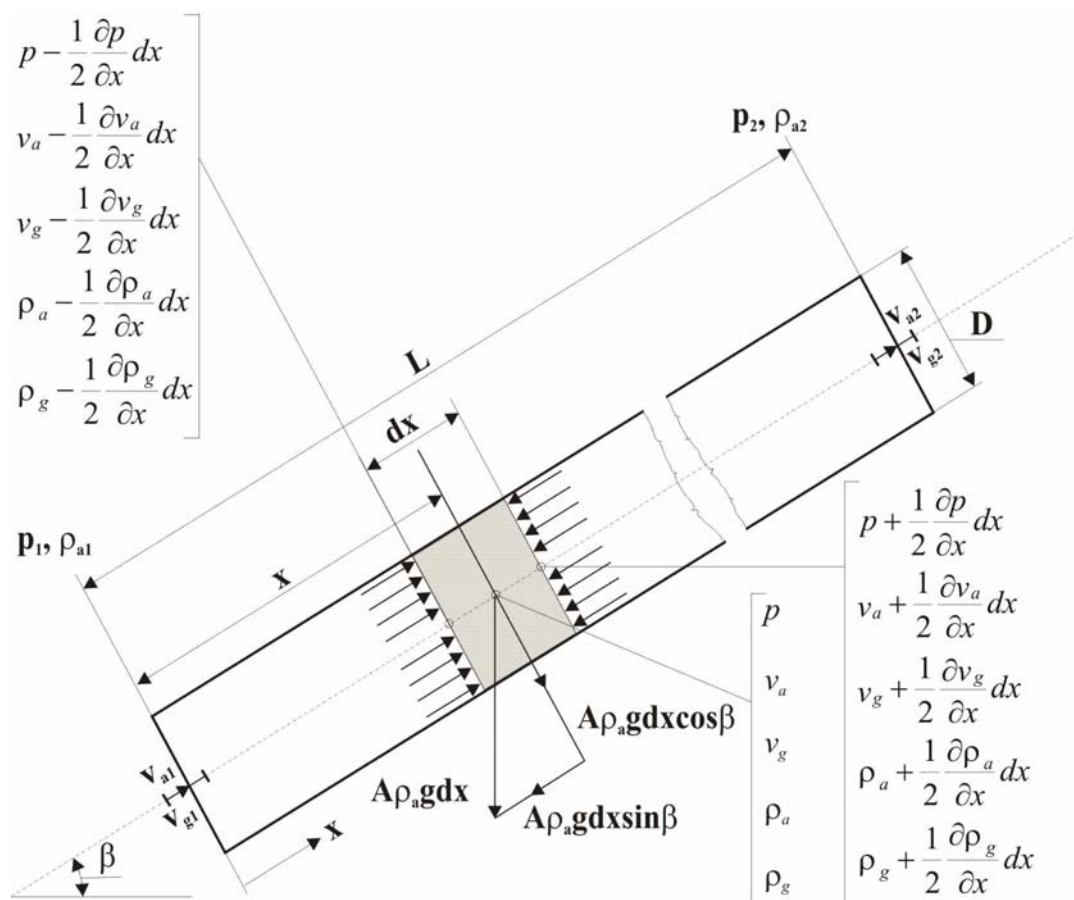
## 9. Tetszőleges nyomvonalú pneumatikus szállítóvezeték méretezése

Jelen fejezetben bemutatjuk a pneumatikus szállítóvezetékben előforduló szerkezeti elemekben mozgó szilárd anyag és levegő keverékre vonatkozó alapegyenleteket (kontinuitás, impulzustétel). Az így kapott, - a kétfázisú áramlást leíró - differenciálegyenletek numerikusan megoldásainak eredményeként a szállítóvezetékben előforduló

- tetszőleges térbeli helyzetű egyenes csőszakaszok,
- ívek,
- valamint a különböző átmérőjű csővezeték összekötő diffuzorok

olyan jellemző mennyiségeinek, - mint a nyomás, a szilárd anyag és a szállító levegő sebességének, továbbá a koncentrációnak - a hossz menti változása meghatározható. A fenti elemek tetszőleges topográfia szerinti illesztésével lehetővé válik a szállítóvezeték energiatakarékos üzemállapotra történő méretezése, a légszállító gép kiválasztása, a csővezeték kopásának, valamint a szállított anyagrészek törésének, aprózódásának elkerülése. A számításhoz szükséges anyagjellemzőket lehetőség szerint legalább félüzemi méretű kísérleti berendezésen végzett mérésekkel kell meghatározni.

### 9.1. Gáz és szilárd anyag kétfázisú áramlása általános térbeli elhelyezkedésű egyenes csőszakaszban



9.1. ábra A modell jelölései

A matematikai – fizikai modell felírásánál az alábbi közelítő feltételekkel élünk:

- A csőben mozgó anyagrészecskékre ható, a légáramból származó előrehajtó erőt Newton féle hajtóerőként vesszük figyelembe.
- A csőben mozgó anyagrészecskékre ható - azok mozgását fékező - erőt a Coulomb súrlódásból származónak feltételezzük
- A szemcseméret eloszlás figyelmen kívül hagyásával állandó átmérőjű gömb szemcsékkel számolunk
- A szállító közeg állapotváltozását izotermikusnak tekintjük
- Az anyagrészecskék keresztmetszet szűkítő hatásától eltekintünk

A csőben az áramlást egydimenziósnak tekintve a kontinuitási egyenlet a szállító gázra a 9.1. ábrában bemutatott vázlatban felvett ellenőrző térfogatra az alábbi módon írható fel:

$$A \left( \rho_g - \frac{d\rho_g}{2} \right) \left( v_g - \frac{dv_g}{2} \right) = A \left( \rho_g + \frac{d\rho_g}{2} \right) \left( v_g + \frac{dv_g}{2} \right) \quad (9.1)$$

Rendezés után kapjuk, hogy:

$$d\rho_g = -\frac{\rho_g}{v_g} dv_g \quad (9.2)$$

Izotermikus állapotváltozást feltételezve írható, hogy:

$$dp = -\frac{p}{v_g} dv_g \quad (9.3)$$

A nyomáskereső meghatározására írjuk fel az ellenőrző térfogatban lévő gázra az impulzus tételt:

$$\begin{aligned} -A \left( \rho_g - \frac{d\rho_g}{2} \right) \left( v_g - \frac{dv_g}{2} \right)^2 + A \left( \rho_g + \frac{d\rho_g}{2} \right) \left( v_g + \frac{dv_g}{2} \right)^2 = \\ = A \left( p - \frac{dp}{2} \right) - A \left( p + \frac{dp}{2} \right) - dF_e - dF_{gs} \end{aligned} \quad (9.4)$$

A 9.4. összefüggésben az anyagrészecskékre ható Newton-féle elemi előrehajtó erő az alábbi módon írható:

$$dF_e = n C_e A_o \frac{\rho_g}{2} w^2 = \frac{dm}{\frac{d_o^3 \pi}{6} \rho_{ta}} C_e A_o \frac{\rho_{go} p}{2 p_o} w^2 \quad (9.5)$$

ahol az elemi ellenőrző térfogatban lévő szemcsék száma:

$$n = \frac{dm}{m_1} = \frac{dm}{\frac{d_o^3 \pi}{6} \rho_{ta}} \quad (9.6)$$

- $d_o$  [m] - A gömbszemcse átmérője  
 $\rho_{ta}$  [kg/m<sup>3</sup>] - A szemcse tömör anyagsűrűsége  
 $C_e$  - A gömbszemcse ellenállás tényezője  
 $A_o = \frac{d_o^2 \pi}{4}$  [m<sup>2</sup>] - A gömbszemcse áramlásra merőleges megfűjt keresztmetszete  
 $\rho_g$  [kg/m<sup>3</sup>] - A szállító közeg (levegő) sűrűsége  
 $w = v_g - v_a$  [m/s] - Relatív sebesség, ami a szállító gáz (levegő) és a szilárd anyag sebességkülönbsége

A gömbszemcse „ $C_e$ ” ellenállástényezője Kaskas [97] szerint a szemcse Reynolds-szám függvényében az alábbi összefüggés szerint változik:

$$C_e = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0.4 \quad \text{ahol} \quad Re = \frac{d_o w}{\nu_g} = \frac{d_o \rho_g w}{\mu_g} = \frac{d_o \rho_{go} p w}{p_o \mu_g} \quad (9.7)$$

ahol:

- $p_o$  [Pa] - Atmoszférikus környezeti légnyomás (a mintapéldában  $p_o = 100$  kPa)  
 $\rho_{go}$  [kg/m<sup>3</sup>] - A szállító közeg (levegő) sűrűsége légköri állapotban ( $\rho_{go} = 1.2$  kg/m<sup>3</sup> a mintapéldában)  
 $\nu_g$  [m<sup>2</sup>/s] - A szállító közeg (levegő) kinematikai viszkozitása  
 $\mu_g$  [kg/ms] - A szállító közeg (levegő) dinamikai viszkozitása

Az elemi térfogatban a gáz súrlódásból származó elemi erő

$$dF_{gs} = A dp = A f \frac{dx}{D} \frac{\rho_g}{2} v_g^2 \quad (9.8)$$

ahol

- $f$  [-] - A gáz súrlódási tényezője  
 $A$  [m<sup>2</sup>] - csőkeresztmetszet

Rendezés, összevonások és átalakítások után a nyomás hossz menti változását leíró differenciál egyenlet az alábbi alakban adódik:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\frac{A_o C_e \rho_{go} m_a}{2 A m_1 v_a} \left( \frac{p}{p_o} \right)^3 \left( v_{go} \frac{p_o}{p} - v_a \right)^2 + \frac{f \rho_{go} v_{go}^2}{2 D} \frac{p}{p_o}}{\frac{\rho_{go} v_{go}^2}{p_o} - \left( \frac{p}{p_o} \right)^2} \quad (9.9)$$

Kontinuitás az anyagra:

$$A \left( \rho_a - \frac{d\rho_a}{2} \right) \left( v_a - \frac{dv_a}{2} \right) = A \left( \rho_a + \frac{d\rho_a}{2} \right) \left( v_a + \frac{dv_a}{2} \right) \quad (9.10)$$

Rendezés után kapjuk, hogy:

$$d\rho_a = -\frac{\rho_a}{v_a} dv_a \quad (9.11)$$

vagy a koncentráció hossz menti változását leíró differenciálegyenlet alakjában:

$$\frac{d\rho_a}{dx} = -\frac{\rho_a}{v_a} \frac{dv_a}{dx} \quad (9.12)$$

Impulzustétel az anyagra:

$$-A \left( \rho_a - \frac{d\rho_a}{2} \right) \left( v_a - \frac{dv_a}{2} \right)^2 + A \left( \rho_a + \frac{d\rho_a}{2} \right) \left( v_a + \frac{dv_a}{2} \right)^2 = dF_e - dF_{as} - dG_x \quad (9.13)$$

Az anyagrészecskék mozgását fékező erőt az elemi térfogatban lévő anyagrészecskékre ható Coulomb súrlódásból származónak tételezzük fel, azaz:

$$dF_{as} = A dx \rho_a g \mu_s \cos \beta \quad (9.14)$$

ahol

$\mu_s [-]$  - anyagsúrlódási tényező  
 $\rho_a [\text{kg/m}^3]$  - koncentráció

Az elemi térfogatban lévő anyagrészecskék súlyának mozgás irányával ellentétes komponense:

$$dG_x = A dx \rho_a g \sin \beta \quad (9.15)$$

Rendezés és átalakítások után az anyagsebesség hossz menti változását leíró differenciálegyenlet az alábbi alakban adódik:

$$\frac{dv_a}{dx} = \frac{A_o C_e \rho_{go} p}{2 m_1 p_o v_a} \left( v_{go} \frac{p_o}{p} - v_a \right)^2 - \frac{g}{v_a} (\mu_s \cos \beta + \sin \beta) \quad (9.16)$$

A 9.3. összefüggésből a gázsebesség hossz menti változását leíró differenciálegyenlet az alábbi alakban adódik:

$$\frac{dv_g}{dx} = -\frac{v_g}{p} \frac{dp}{dx} \quad (9.17)$$

A 9.9., 9.12., 9.16. és 9.17. egyenleteket Runge-Kutta numerikus módszert használva oldottuk meg. A perem adatok felvételét követően, azaz az  $x=0$  helyen a  $p_1$ ,  $\rho_{a1}$ ,  $v_{a1}$  és  $v_{g1}$  adatok választásával a számítás addig ismétlődő, míg a csővégi állapot  $p_2$  nyomás adata az előírt hibahatáron belül megközelíti a kívánt értéket. Amennyiben a vizsgált egyenes szakasz a nyomóüzemű szállítócső utolsó eleme, úgy a csővégi nyomás értéke az iteráció végeredményeként a környezeti, atmoszférikus nyomással azonos ( $p_2=p_o$ ) kell legyen.

## 9.2. Gáz és szilárd anyag kétfázisú áramlása pneumatikus szállítóvezetékbe épített ívekben [100]

A cikk számítási eljárást ismerteti a pneumatikus szállítóvezetékbe épített különböző beépítési helyzetű és sugarú ívek nyomás és sebességviszonyainak meghatározására. Az ívben mozgó anyagrészecskék a rájuk ható erők következtében lelassulnak, a szállító gázáram az ív után csatlakozó egyenes csőszakaszban a lelassult anyagrészecskéket elegendően hosszú csatlakozó egyenes csőszakasz esetén felgyorsítja a csőszakaszhoz tartozó határsebességre.

A matematikai – fizikai modell felírásánál az alábbi közelítő feltételekkel élünk:

- Az ívben mozgó anyagrészecskékre ható, a légáramból származó előrehajtó erőt Newton-féle hajtóerőként vesszük figyelembe.
- Az ívben mozgó anyagrészecskékre ható - azok mozgását fékező - erőt a Coulomb súrlódásból származónak feltételezzük
- A szemcseméret eloszlás figyelmen kívül hagyásával állandó átmérőjű gömb szemcsékkel számolunk
- A szállító közeg állapotváltozását izotermikusnak tekintjük
- Az anyagrészecskék keresztmetszet szűkítő hatásától eltekintünk

A szállítóvezetékbe épített különböző síkú ívek közül a gyakorlatban leggyakrabban előforduló, alábbi módon elhelyezkedő íveket tárgyaljuk:

- Vízszintesből függőlegesbe vezető ív (jelölése:  $V \rightarrow F$ )
- Függőlegesből vízszintesbe vezető ív ( $F \rightarrow V$ )
- Vízszintes síkú ív ( $V \rightarrow V$ )

### 9.2.1. Vízszintesből függőlegesbe vezető ( $V \rightarrow F$ ) 90°-os ív

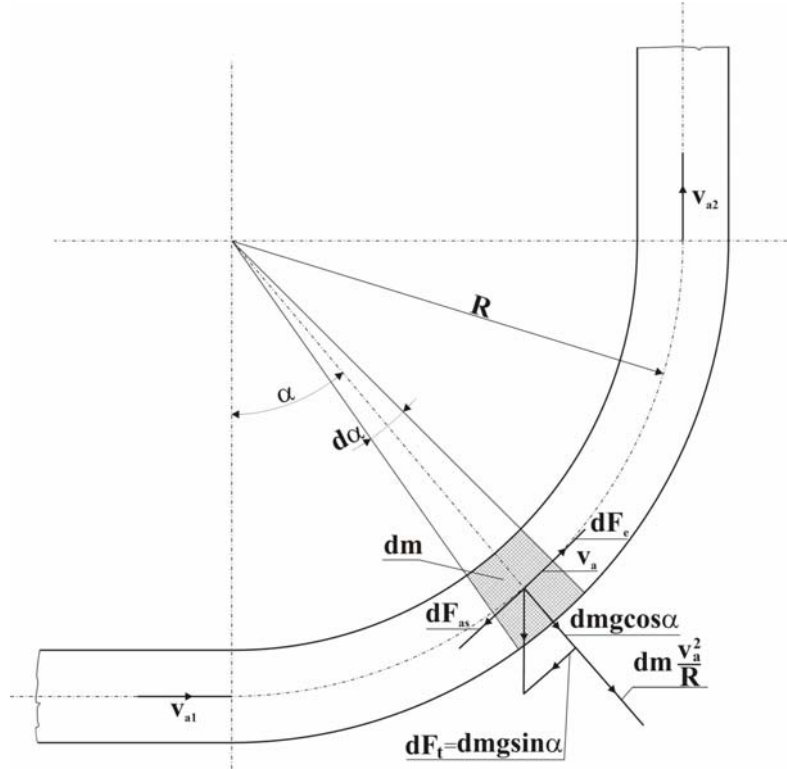
Az anyagrészecskékre ható Newton féle elemi előrehajtó erő megegyezik a 9.5. összefüggéssel.

A 9.2. ábrában látható ív tetszőleges „ $\alpha$ ” szöggel jellemzett helyén kimetszett elemi szakaszában mozgó anyagtömegre ható elemi súrlódó erő a „ $\mu_s$ ” súrlódási tényező figyelembe vételével az alábbi módon számítható:

$$dF_{as} = \mu_s \left( \frac{v_a^2}{R} + g \cos \alpha \right) dm \quad (9.18)$$

A mozgás irányával ellentétes elemi erő komponense:

$$dF_t = dm g \sin \alpha \quad (9.19)$$



9.2. ábra Vízszintesből függőlegesbe vezető (V→F) 90°-os ív

A mozgást fékező erő ezek után a következőként írható

$$dF_f = dF_{as} + dF_t = dm \left[ \mu_s \left( \frac{v_a^2}{R} + g \cos \alpha \right) + g \sin \alpha \right] \quad (9.20)$$

Az elemi térfogatban lévő anyagra felírt impulzustétel ezek után az alábbi formát ölti:

$$\begin{aligned} -A \left( \rho_a - \frac{d\rho_a}{2} \right) \left( v_a - \frac{dv_a}{2} \right)^2 + A \left( \rho_a + \frac{d\rho_a}{2} \right) \left( v_a + \frac{dv_a}{2} \right)^2 = \\ = dF_e - dF_f = dF_e - (dF_{as} + dF_t) \end{aligned} \quad (9.21)$$

Behelyettesítés és átrendezés után az anyagrészecskék ívbéli mozgását leíró alábbi differenciálegyenletet adódik:

$$\frac{dv_a}{d\alpha} = \frac{R}{v_a} \left[ \frac{3C_e \rho_{go} P}{4d_o \rho_{ta} p_o} (v_g - v_a)^2 - \mu_s \left( \frac{v_a^2}{R} + g \cos \alpha \right) - g \sin \alpha \right] \quad (9.22)$$

A nyomásesés meghatározásához írjuk fel az ellenőrző térfogatban lévő gázáramra az impulzustételt, ami az alábbi alakot ölti:

$$\begin{aligned}
A \left( \rho_g + \frac{d\rho_g}{2} \right) \left( v_g + \frac{dv_g}{2} \right)^2 - A \left( \rho_g - \frac{d\rho_g}{2} \right) \left( v_g - \frac{dv_g}{2} \right)^2 = \\
= -A \left( p + \frac{dp}{2} \right) + A \left( p - \frac{dp}{2} \right) - dF_e - dF_{gs}
\end{aligned} \quad (9.23)$$

Az összefüggésben „ $dF_{gs}$ ” a csőfalon súrlódó gáz hatását veszi figyelembe. Ennek érdekében a 9.8. egyenlethez hasonlóan:

$$dF_{gs} = Adp = Af \frac{dx}{D} \frac{\rho_g}{2} v_g^2 = Af \frac{Rd\alpha}{D} \frac{\rho_{go} p}{2 p_o} v_g^2 \quad (9.24)$$

Rendezés után a másodrendűen kicsiny tagokat elhanyagolva az alábbi egyenletet nyerjük:

$$\frac{dp}{d\alpha} = - \frac{\rho_{go} v_g^2}{\rho_{go} v_g^2 + p_o} \left[ \frac{3 \dot{m}_a R}{d_o^3 \pi v_a} \frac{C_e A_o p}{A \rho_{ta}} \frac{(v_g - v_a)^2}{v_g^2} + f \frac{pR}{2D} + \frac{2p}{v_g} \frac{dv_g}{d\alpha} \right] \quad (9.25)$$

A gázra felírt kontinuitási egyenlet a 9.1. egyenlethez hasonlóan, az alábbi formát ölti:

$$A \left( \rho_g - \frac{d\rho_g}{2} \right) \left( v_g - \frac{dv_g}{2} \right) = A \left( \rho_g + \frac{d\rho_g}{2} \right) \left( v_g + \frac{dv_g}{2} \right) \quad (9.26)$$

A másodrendű tagokat itt is elhanyagolva kapjuk, hogy:

$$v_g d\rho_g + \rho_g dv_g = 0 \quad (9.27)$$

Izotermikus állapotváltozást figyelembe véve az alábbi egyenletre jutunk:

$$\frac{dv_g}{d\alpha} = - \frac{v_g}{p} \frac{dp}{d\alpha} \quad (9.28)$$

A 9.25. összefüggésbe a 9.28. összefüggést helyettesítve az alábbi egyenletet nyerjük:

$$\frac{dp}{d\alpha} = \frac{\rho_{go} v_g^2}{\rho_{go} v_g^2 - p_o} \left[ \frac{3 \dot{m}_a R}{d_o^3 \pi v_a} \frac{C_e A_o p}{A \rho_{ta}} \frac{(v_g - v_a)^2}{v_g^2} + f \frac{pR}{2D} \right] \quad (9.29)$$

Kontinuitás az anyagra:

$$A \left( \rho_a - \frac{d\rho_a}{2} \right) \left( v_a - \frac{dv_a}{2} \right) = A \left( \rho_a + \frac{d\rho_a}{2} \right) \left( v_a + \frac{dv_a}{2} \right) \quad (9.30)$$

Rendezés után kapjuk, hogy:

$$d\rho_a = -\frac{\rho_a}{v_a} dv_a \quad (9.31)$$

vagy a koncentráció hossz menti változását leíró differenciálegyenlet alakjában:

$$\frac{d\rho_a}{dx} = -\frac{\rho_a}{v_a} \frac{dv_a}{dx} \quad (9.32)$$

A megoldás során az ív belépéséhez tartozó perem adatok - az  $\alpha=0$  helyen  $v_a=v_{aI}$ ,  $v_g=v_{gI}$ ,  $p=p_I$ , és  $\rho_a=\rho_{aI}$  ismeretében a 9.22., 9.28, 9.29. és 9.32. differenciálegyenletek Runge Kutta numerikus módszerrel számíthatók, azaz belőlük az anyagebesség, gázsebesség, a nyomás és a koncentráció ívhossz menti változása meghatározható.

### 9.2.2. Függőlegesből vízszintesbe vezető (F→V) 90°-os ív

Ezt az ívhelyzetet az előzőekben bemutatotthoz teljesen hasonló gondolatmenettel vizsgálhatjuk. Az eltérést az adja, hogy az elemi ívszakaszra felírható elemi súrlódó erő alakja megváltozik a 9.14. összefüggés helyett az alábbiak szerint:

$$dF_{as} = \mu_s \left( \frac{v_a^2}{R} - g \sin \alpha \right) dm \quad (9.33)$$

Ezzel az anyagebesség változását az ívben a következő differenciálegyenlet írja le:

$$\frac{dv_a}{d\alpha} = \frac{R}{v_a} \left[ \frac{3C_e \rho_{go} p}{4d_o \rho_{ta} p_o} (v_g - v_a)^2 - \mu_s \left( \frac{v_a^2}{R} - g \sin \alpha \right) - g \cos \alpha \right] \quad (9.34)$$

### 9.2.3. Vízszintes síkú (V→V) 90°-os ív

Az elemi súrlódó erő ezen ívhelyzet esetén a következő alakban írható:

$$dF_{as} = \mu_s dF_n = \mu_s dm \sqrt{g^2 + \frac{v_a^4}{R^2}} \quad (9.35)$$

Az anyagebesség változását ennél az ívnél a következő differenciálegyenlet írja le:

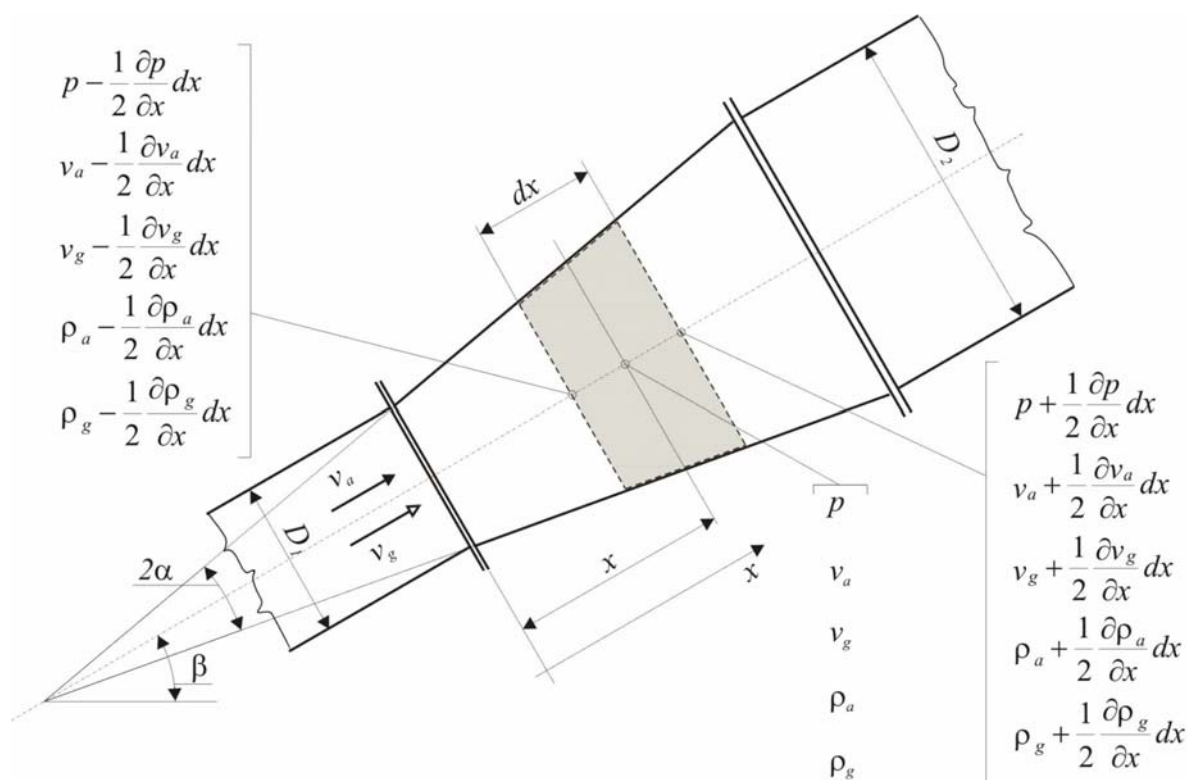
$$\frac{dv_a}{d\alpha} = \frac{R}{v_a} \left[ \frac{3C_e \rho_{go} p}{4d_o \rho_{ta} p_o} (v_g - v_a)^2 - \mu_s \sqrt{g^2 + \frac{v_a^4}{R^2}} \right] \quad (9.36)$$



### 9.3. Gáz és szilárd anyag kétfázisú áramlása pneumatikus szállítóvezetékbe épített diffuzorban [101]

Hosszú pneumatikus szállítóvezetékénél a gáz expanziója miatt a gázsebesség és vele együtt a szállított anyagrészecskék sebessége a vezeték hossza mentén nemkívánatos mértékben megnövekszik. Ez a megnövekedett részecskesebesség a csővezeték fokozott kopásához, valamint a részecskék nemkívánatos mértékű töréséhez vezethet. A nemkívánatos mértékű sebességnövekedést azáltal csökkentik, hogy a vezetéket bővülő átmérővel készítik el. A különböző átmérőjű vezetékszakaszokat rendszerint diffuzorral kötik össze.

Az alábbiakban bemutatunk egy számítási eljárást, melynek segítségével a diffuzorban lejátszódó folyamat paramétereinek (anyag sebesség, gáz sebesség, nyomás, anyag-koncentráció stb.) hossz menti változásai számíthatók. Ez azt jelenti, hogy a szállítóvezeték Kovács - Váradi szerzőpáros által korábban meghatározott jellemzői [102, 103, 104] a beépített diffuzor figyelembe vételével a tervezés során pontosíthatók.



9.3. ábra Szállítócsőbe épített diffuzor. Jelölések az ellenőrző térfogatban

**Kontinuitási egyenlet a gázra:**

$$\left( A - \frac{dA}{2} \right) \left( \rho_g - \frac{d\rho_g}{2} \right) \left( v_g - \frac{dv_g}{2} \right) - \left( A + \frac{dA}{2} \right) \left( \rho_g + \frac{d\rho_g}{2} \right) \left( v_g + \frac{dv_g}{2} \right) = 0 \quad (9.37)$$

$$\text{Az} \quad A - \frac{dA}{2} = \frac{\pi}{4} (D^2 - 2D \operatorname{tg} \alpha dx) \quad (9.38)$$

és

$$A + \frac{dA}{2} = \frac{\pi}{4} (D^2 + 2 D \operatorname{tg} \alpha dx) \quad (9.39)$$

egyenleteket felhasználva átalakítás és a másodrendű tagok elhanyagolása után a következő egyenletet kapjuk:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{p}{v_g} \frac{dv_g}{dx} - \frac{p}{D} 4 \operatorname{tg} \alpha \quad (9.40)$$

#### Kontinuitási egyenlet az anyagra:

A diffuzorban áramló „ $\rho_a$ ” koncentrációjú anyagrészecskékre felírt egyenlet a 9.37. egyenlethez hasonló alakú. Írható, hogy:

$$\left(A - \frac{dA}{2}\right) \left(\rho_a - \frac{d\rho_a}{2}\right) \left(v_a - \frac{dv_a}{2}\right) - \left(A + \frac{dA}{2}\right) \left(\rho_a + \frac{d\rho_a}{2}\right) \left(v_a + \frac{dv_a}{2}\right) = 0 \quad (9.41)$$

Az előzőekhez hasonlóan eljárva a koncentráció hossz menti változására a következő egyenletet kapjuk:

$$\frac{d\rho_a}{dx} = -\frac{\rho_a}{v_a} \frac{dv_a}{dx} - \frac{\rho_a}{D} 4 \operatorname{tg} \alpha \quad (9.42)$$

A Newton féle előrehajtó erőt figyelembe véve az impulzustétel a szállító gázra az alábbi módon írható:

$$\begin{aligned} -\left(A - \frac{dA}{2}\right) \left(\rho_g - \frac{d\rho_g}{2}\right) \left(v_g - \frac{dv_g}{2}\right)^2 + \left(A + \frac{dA}{2}\right) \left(\rho_g + \frac{d\rho_g}{2}\right) \left(v_g + \frac{dv_g}{2}\right)^2 = \\ = \left(A - \frac{dA}{2}\right) \left(p - \frac{dp}{2}\right) - \left(A + \frac{dA}{2}\right) \left(p + \frac{dp}{2}\right) + \left[\left(A + \frac{dA}{2}\right) - \left(A - \frac{dA}{2}\right)\right] p - dF_e \end{aligned} \quad (9.43)$$

A 9.43. összefüggés átalakítás és rendezés, valamint a 9.40. összefüggés helyettesítése után az alábbi differenciálegyenlettel írja le a gázsebesség hossz menti változását:

$$\frac{dv_g}{dx} = \frac{\rho_{go} v_g^2}{\rho_{go} v_g^2 - p_o} \left[ \frac{4 p_o \operatorname{tg} \alpha}{\rho_{go} v_g D} - \frac{\rho_a A_o C_e}{2 m_1 v_g} (v_g - v_a)^2 \right] \quad (9.44)$$

Az anyagrészecskékre felírt impulzustétel a gázra felírt impulzustételhez hasonló alakú. Írható, hogy:

$$-\left(A - \frac{dA}{2}\right) \left(\rho_a - \frac{d\rho_a}{2}\right) \left(v_a - \frac{dv_a}{2}\right)^2 + \left(A + \frac{dA}{2}\right) \left(\rho_a + \frac{d\rho_a}{2}\right) \left(v_a + \frac{dv_a}{2}\right)^2 =$$

$$= dF_e - dm g (\sin \beta + \mu_s \cos \beta) \quad (9.45)$$

Átalakítás és rendezés, valamint a 9.42. egyenlet helyettesítése után kapjuk, hogy:

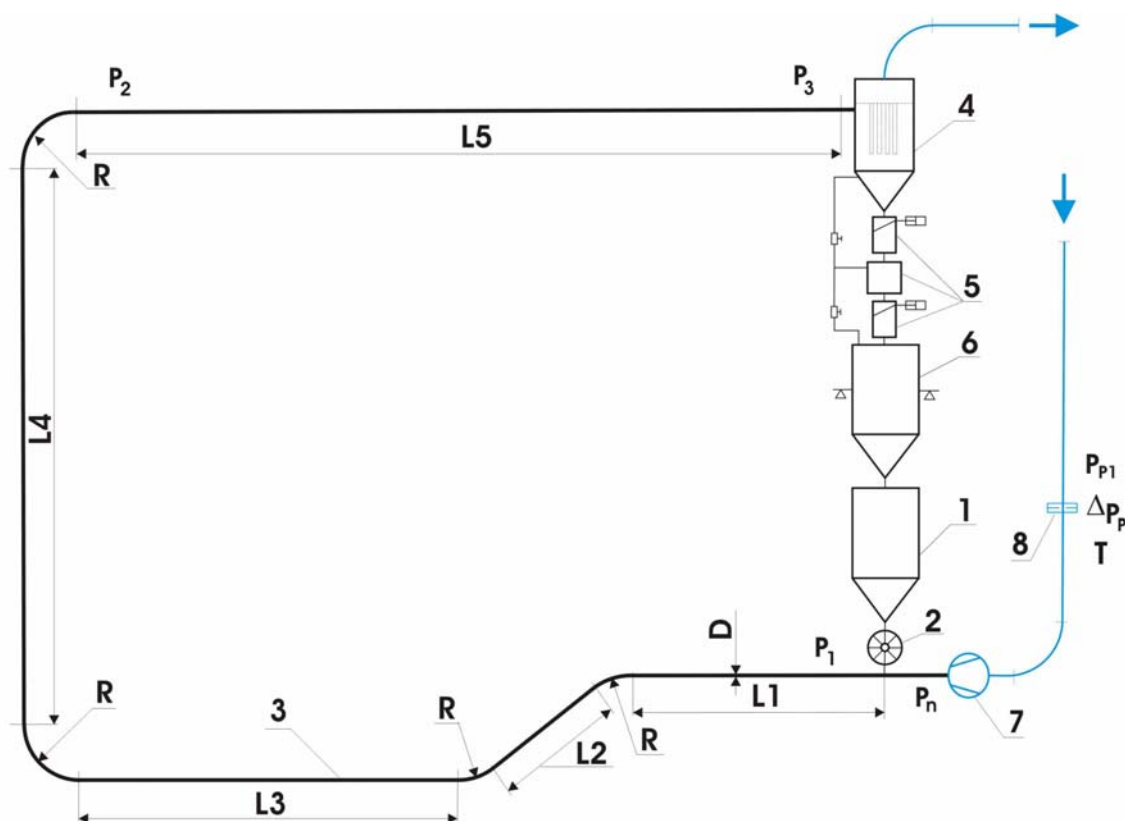
$$\frac{dv_a}{dx} = \frac{\rho_{go} P A_o C_e}{2 m_1 p_o v_a} (v_g - v_a)^2 - \frac{g}{v_a} (\sin \beta + \mu_s \cos \beta) \quad (9.46)$$

Az anyagszűkítés figyelmen kívül hagyása esetén a 4 darab – 9.40., 9.42., 9.44. és 9.46. – közösleges differenciálegyenlet írja le a diffuzorban lejátszódó kétfázisú áramlást. Az egyenleteket Runge-Kutta numerikus módszert használva oldottuk meg.

#### 9.4. Alkalmazási példa

Az előző fejezetekben összefoglalt számítási eljárást egy mintapélda segítségével kívánjuk bemutatni. Példaként a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék Laboratóriumában megépített hígáramú nyomóüzemű pneumatikus szállítóberendezés 9.4. ábrán látható szállítóvezetékének hossz menti nyomás -, sebesség - és koncentráció változásának meghatározását választottuk.

##### A félüzemi méretű kísérleti berendezés ismertetése



9.4. ábra. A kísérleti berendezés vázlata, műszerezése

A 9.4. ábrából a „3” jelű DN80-as szállítóvezeték nyomvonala és fő geometriai adatai kiolvashatók. A vízszintesen induló szállítóvezeték-szakasz fölött helyezkedik el a „2” jelű változtatható fordulatszámú forgócellás adagoló, amelyen keresztül a szállítandó poros, vagy szemcsés anyag az „1” jelű indítótartályból a szállítócsőbe juttatható.

A szállítóvezeték vízszintes induló szakaszát egy a vízszinteshez  $\beta=30^\circ$  szöggel hajló, lefelé vezető ferde egyenes csőszakasz követi. Ezután a laboratóriumi adottságokhoz igazodva a szállítócső egy vízszintes egyenes csőszakasszal folytatódik. Ezt követően egy  $90^\circ$  –os ívvel ( $V \rightarrow F$ ) a szállítócső függőlegesbe fordul. A függőleges egyenes szakasz után egy függőleges síkban beépített  $90^\circ$  –os ív ( $F \rightarrow V$ ) található. Mindkét ív  $R=750\text{mm}$  görbületi sugárral készült. A felső vízszintes egyenes szállítócső szakasz vége a „4” jelű porleválasztó ciklonba csatlakozik. A leválasztó belső terében az utószűrő funkcióját ellátó automatikus visszatisztítású zsákos szűrő van beépítve. A „4” jelű leválasztó-utószűrő egység alatt a pneumatikus munkahengerekkel működtetett „5” jelű kettős adagoló helyezkedik el, ami a leválasztott anyagot a mérlegre támaszkodó, flexibilis alsó és felső csatlakozással kialakított „6” jelű fogadó tartályba juttatja. Szállítás közben a mérleg digitális jeleit az idő függvényében gyűjtöttük. Az „5” jelű kettős adagoló a korábbi szívóüzemű hígáramú pneumatikus szállítóberendezés használata során készült és azt a feladatot látta el, hogy a vákuum alatt lévő leválasztóból a kettős adagoló zsiliptartályának felhasználásával a légköri állapotú fogadó tartályba kiadja a leválasztott szilárd anyagot. A jelen fejezetben tárgyalt nyomóüzemű hígáramú pneumatikus szállítóberendezésben a túlnyomás alatti leválasztóból a kettős adagoló állandó nyitott helyzetében a leválasztott szilárd anyag gravitáció hatására lesurran a „6” jelű fogadótartályba.

A szállításhoz szükséges levegőt a „7” jelű egyenáramú motorral hajtott Root fűvő szolgáltatja, így fordulatszám változtatással a szállítólevegő térfogatáram a kívánt értékre beállítható. A Root fűvő szívócsonkja előtt a levegő térfogatáramának mérésére a „8” jelű mérőperemes mérőszakaszt építettünk be.

A 9.4. ábrán vázolt kísérleti berendezés az alábbi mérőhelyeket tartalmazza:

- $p_1$  - nyomás a szállítócső elején, az anyagfeladási hely közelében
- $p_2$  - nyomás a leválasztó egységbe csatlakozó egyenes szállítócső-szakasz elején
- $p_3$  - nyomás a leválasztó egységbe csatlakozó egyenes szállítócső-szakasz végén
- $p_n$  - nyomás a Root fűvő nyomócsonkja közelében
- $p_{p1}$  - nyomás a mérőperem szűkítő nyílása előtt
- $\Delta p_p$  - a mérőperem mérőnyomása
- $t$  - a hőmérséklet a mérőperemes mérőszakaszban

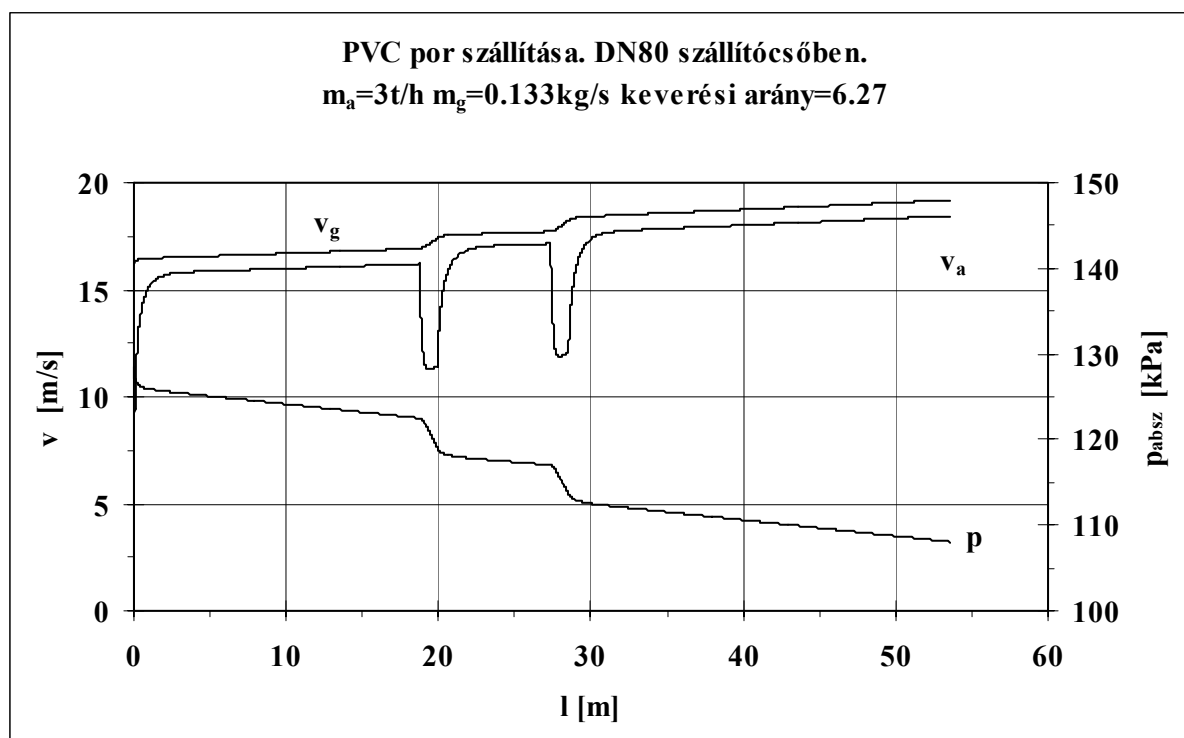
A  $p_1$ - $p_3$ ,  $p_n$ ,  $p_{p1}$  és  $\Delta p_p$  nyomások, valamint a  $t$  hőmérséklet jeleit a kísérleti berendezéshez telepített számítógéphez csatlakoztattuk. A mérések megkezdésekor és a szállítási kísérletek befejezése után a távadó műszereket kalibráltuk és a kiértékeléskor a lineáris karakterisztikájú műszerek regressziós kalibrációs összefüggéseit használtuk a szükséges számítások során.

A szállítócső számításához felhasznált adatai az alábbiak:

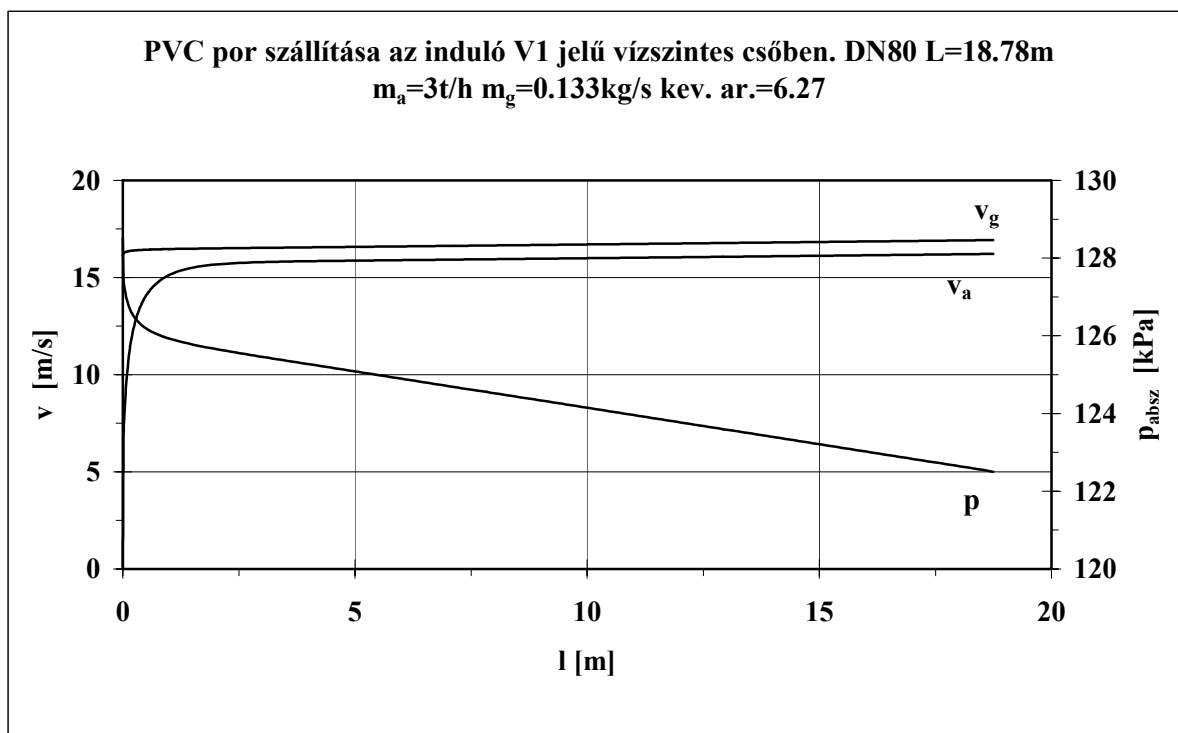
Sorszám	Megnevezés	Hossz	Átmérő	Görbületi sugár
1.	V1 jelű vízszintes egyenes cső	18.78 m	82.5 mm	
2.	VF jelű 90°-os ív	1.178 m	82.5 mm	750 mm
3.	F1 jelű függőleges egyenes cső	7.45 m	82.5 mm	
4.	FV jelű 90°-os ív	1.178 m	82.5 mm	750 mm
5.	V2 jelű vízszintes egyenes cső	25.16 m	82.5 mm	
<b>Teljes csőhossz:</b>		<b>53.746 m</b>		

A számítási mintapélda alapadatai:

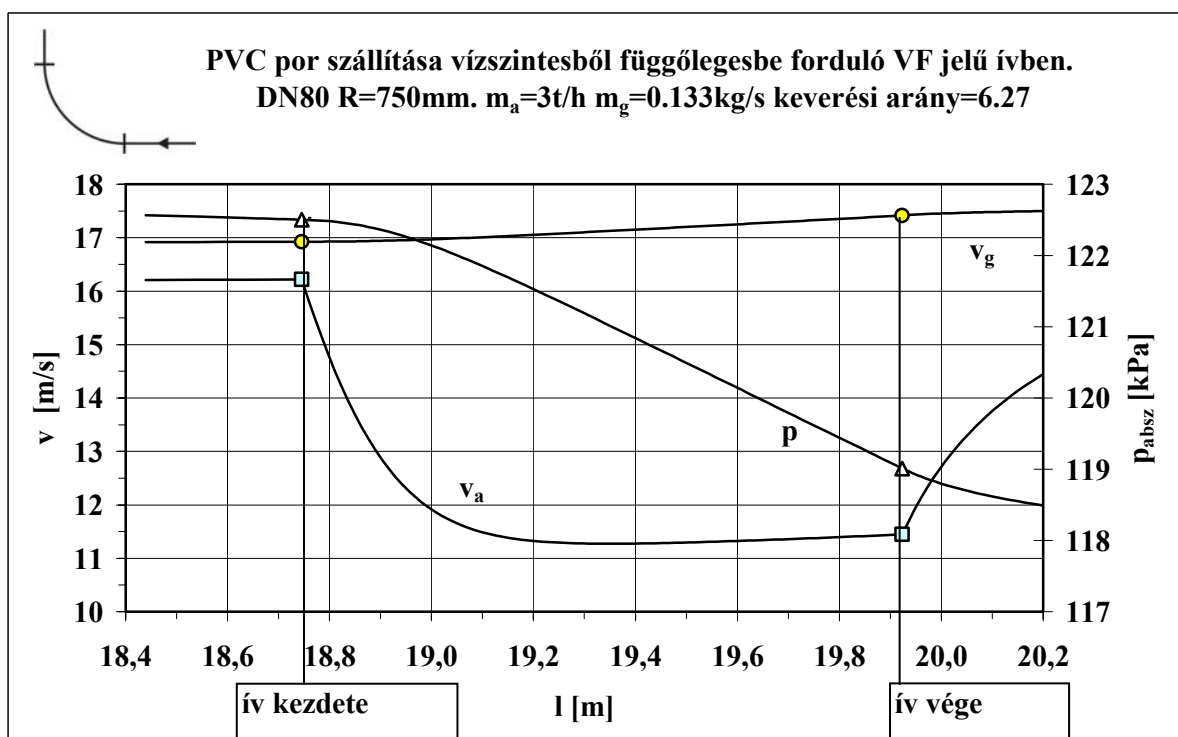
Szállított anyag	PVC por	
Anyag tömegáram	3	t/h
Gáz (levegő) tömegáram	0.133	kg/s
Keverési arány = $\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_g}$	6.27	
Gáz sűrűlási tényező	0.025	
Anyag sűrűlási tényező	1.35	
A gömbszemcse átmérője	0.15	mm
A szemcse tömör anyagsűrűsége	1250	kg/m <sup>3</sup>



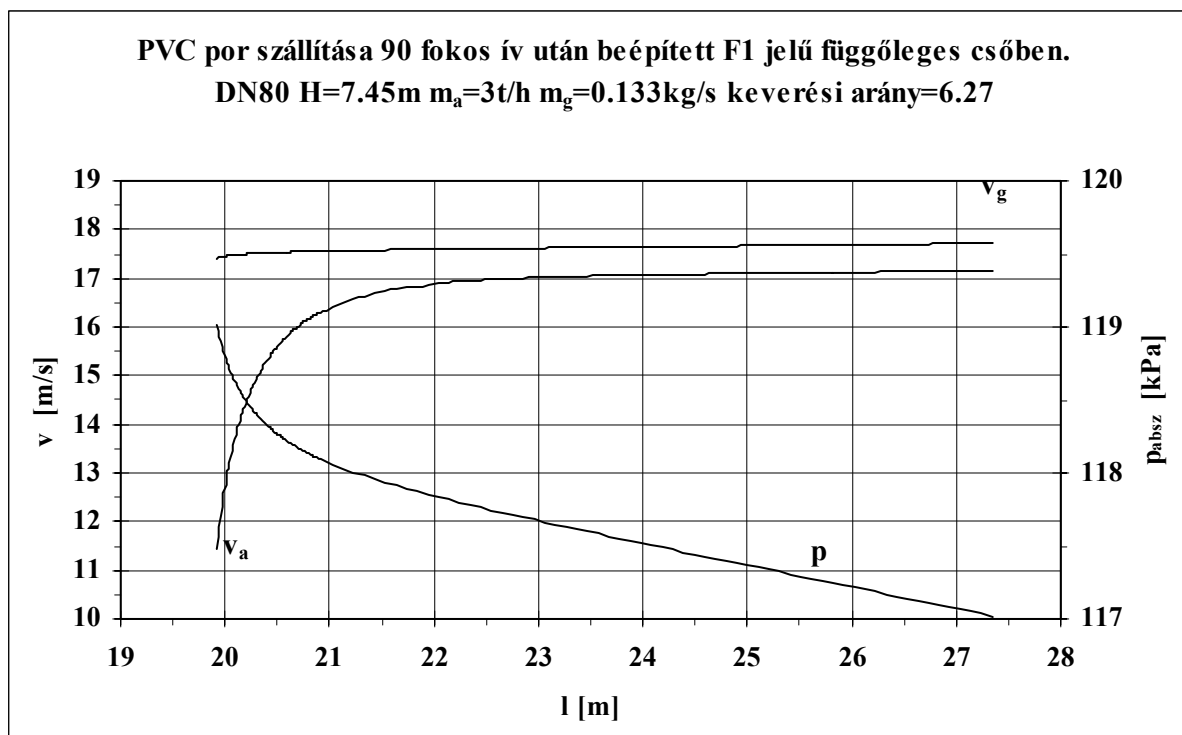
9.5. ábra Nyomás, anyagsebesség és gázsebesség hossz menti változása a teljes szállító csővezetékben



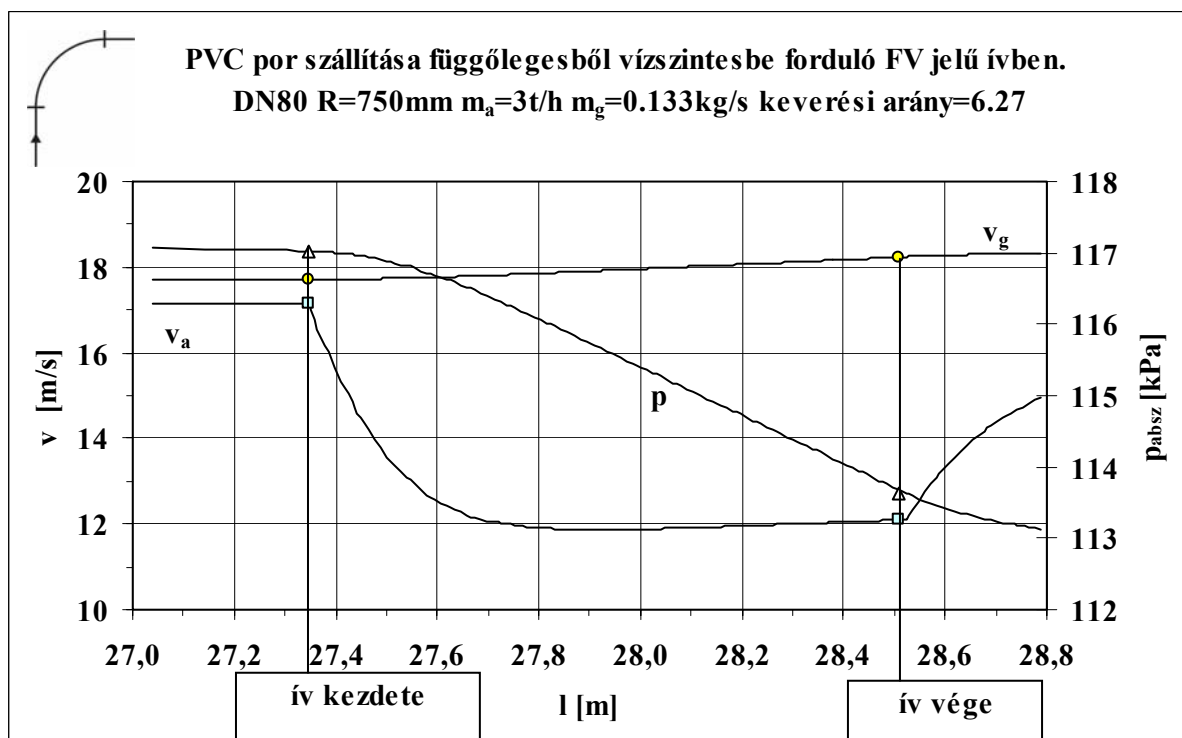
9.6. ábra Nyomás, anyagsebesség és gázsebesség hossz menti változása a V1 jelű vízszintes csővezetékben



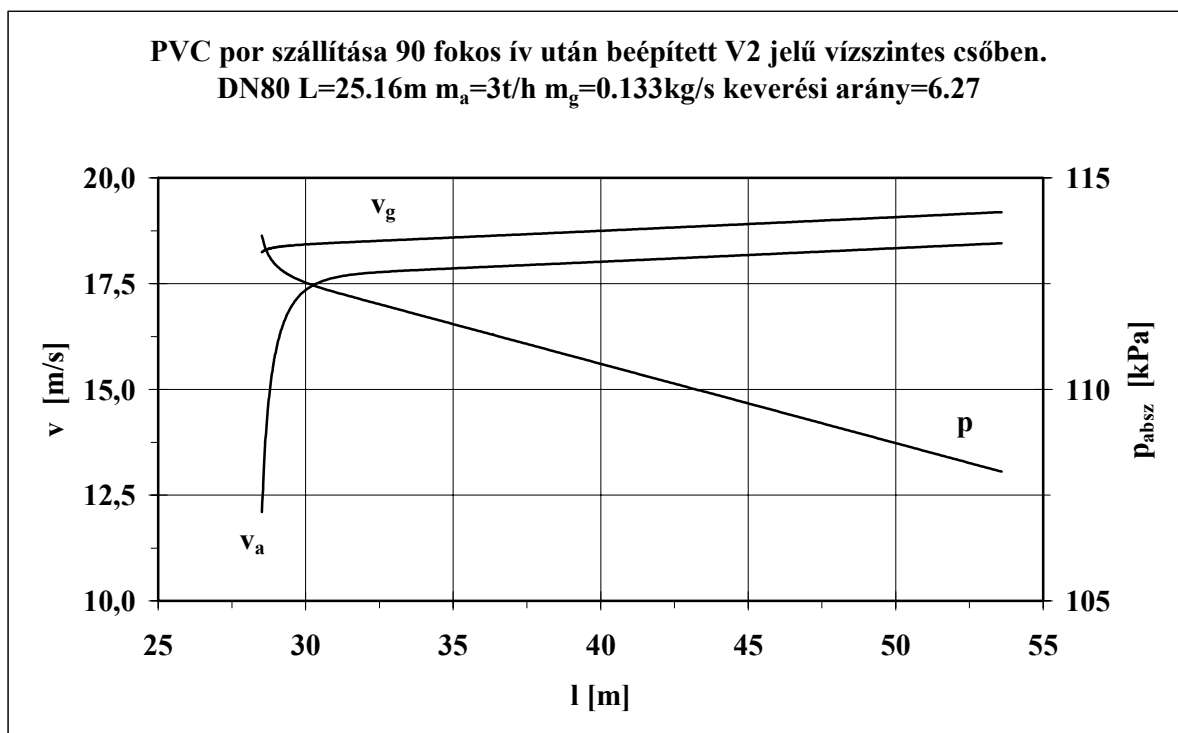
9.7. ábra Nyomás, anyagsebesség és gázsebesség hossz menti változása a VF jelű 90°-os ívben



9.8. ábra Nyomás, anyagsebesség és gázsebesség hossz menti változása az F1 jelű függőleges csővezetékben



9.9. ábra Nyomás, anyagsebesség és gázsebesség hossz menti változása a FV jelű 90°-os ívben



9.10. ábra Nyomás, anyagsebesség és gázsebesség hossz menti változása a V2 jelű vízszintes csővezetékben