

8. Emelőtartályos pneumatikus szállítóberendezés

A függőleges irányú pneumatikus szállítóberendezések közül az egyik legfontosabb a fluid emelő.

8.1. A fluidizációs emelőtartályban mozgó szilárd részecskék áramlási paramétereinek meghatározása [96]

Ez a fejezet a fluidizációs emelőtartályban mozgó szilárd részecskék áramlási paramétereinek meghatározásával foglalkozik. A kétfázisú áramlásban kijelölt ellenőrző térfogatra felírt kontinuitási egyenletekkel és a szilárd anyagra, valamint a gázra felírt impulzustétellel az alkalmazott matematikai-fizikai modell alapján differenciálegyenletekhez jutunk, amelyeket Runge-Kutta módszerrel oldunk meg. A mintapélda adataival számított eredményeket diagramokban – nyomás, anyagsebesség, gázsebesség és koncentráció eloszlások az emelőtartály belsejében a sugár függvényében – mutatjuk be.

Jelölések:

A_o [m ²]	a gömb alakú szilárd anyagrészecske áramlásra merőleges keresztmetszete
a_n [m/Pa]	konstans
b [m]	a szállítócső belépő keresztmetszetének az elosztórétegtől mért távolsága
b_n [m/Pa]	konstans
C_e [-]	gömb szemcse ellenállás tényezője
d [m]	átmérő
d_o [m]	a gömb alakú szilárd anyagrészecske átmérője
F [N]	a szemcsére ható előreajtó erő
f [-]	Súrlódási tényező
G_1 [N]	a szilárd anyagrészecske súlya
g [m/s ²]	gravitáció
H [m]	az emelőtartályban lévő fluidizált anyagoszlop magassága
k_o [m/s]	a légelosztó réteg jellemzője
m_1 [kg]	a szilárd anyagrészecske tömege
\dot{m}_g [kg/s]	az elosztóréteg fölött sugár irányban a fúvóka felé áramló levegő tömegárama
\dot{m}_{g1} [kg/s]	az elosztórétegen függőlegesen keresztül áramló levegő tömegárama
\dot{m}_{gk} [kg/s]	levegő tömegáram a fúvóka kilépésénél
$\dot{m}_{g2} = \beta \dot{m}_{g1}$	az anyagrételen keresztül függőlegesen áramló levegő tömegárama
p [Pa]	nyomás
p_o [Pa]	légtörési nyomás
p_l [Pa]	az elosztó réteg alatti nyomás
p_k [Pa]	nyomás a fúvóka kilépésénél
p_t [Pa]	tartálynnyomás az elosztóréteg felett az $R = R_t$ koordinátánál (a falnál)
p_j [Pa]	nyomás a fúvóka előtt
R [m]	sugár
R [J/kgK]	gázállandó
Re [-]	Reynolds szám
R_p [m]	a szállítócső sugara
R_t [m]	az emelőtartály sugara
v [m/s]	sebesség
v_{g1} [m/s]	az elosztórétegen átáramló levegő sebessége az $R=R_t$ koordinátánál (a falnál)

v_j [m/s]	sebesség a fúvóka alatt
v_k [m/s]	sebesség a fúvóka kilépő keresztmetszetében
v_a [m/s]	anyagsebesség az ellenőrző térfogat „R” koordinátájú helyén
$v_{ao} = \varphi v_a$ [m/s]	az anyagrészecske süllyedési sebessége az emelőtartályban

Görög betűk

α [fok]	szög
$\beta = \frac{\dot{m}_{g2}}{\dot{m}_{g1}}$ [-]	tömegáram viszony

$\varphi = \frac{v_{ao}}{v_a}$	sebesség viszony
--------------------------------	------------------

μ [kg/ms]	a levegő abszolút viszkozitása
κ [-]	az izentrópikus állapotváltozás kitevője
ρ_h [kg/m ³]	halmazsűrűség a fluidizált emelőtartályban
ρ_g [kg/m ³]	levegő (gáz) sűrűség
ρ_{go} [kg/m ³]	a légköri állapotú levegő (gáz) sűrűsége
ρ_a [kg/m ³]	Szilárd anyag koncentráció
ρ_{ta} [kg/m ³]	a tömör anyagszemcsé sűrűsége

INDEXEK

g	gáz (levegő)
a	a szilárd anyag
j, k, p, t, l	a hely jelölése
l	egy szilárd részecske
s	súrlódás

Bevezetés

A fluid emelőt különböző szemcsés, poros anyagok függőleges szállítására széles körben használják. Ez a szállítóberendezés alkalmas nagy tömegáramok (10–200 t/h) nagy függőleges távolságra (max. 70–80 m) történő szállítására.

A szállítóberendezés folyamatos, automatikus, pormentes (környezetkímélő) szállítást tesz lehetővé. A berendezés működése üzembiztos, automatikusan alkalmazkodik a szállítóteljesítmény változásához, továbbá gyakorlatilag kopásmentes szállítást tesz lehetővé. Széles körben használják cement, timföld, erőművi pernye, homok, mészipor, stb. szállítására.

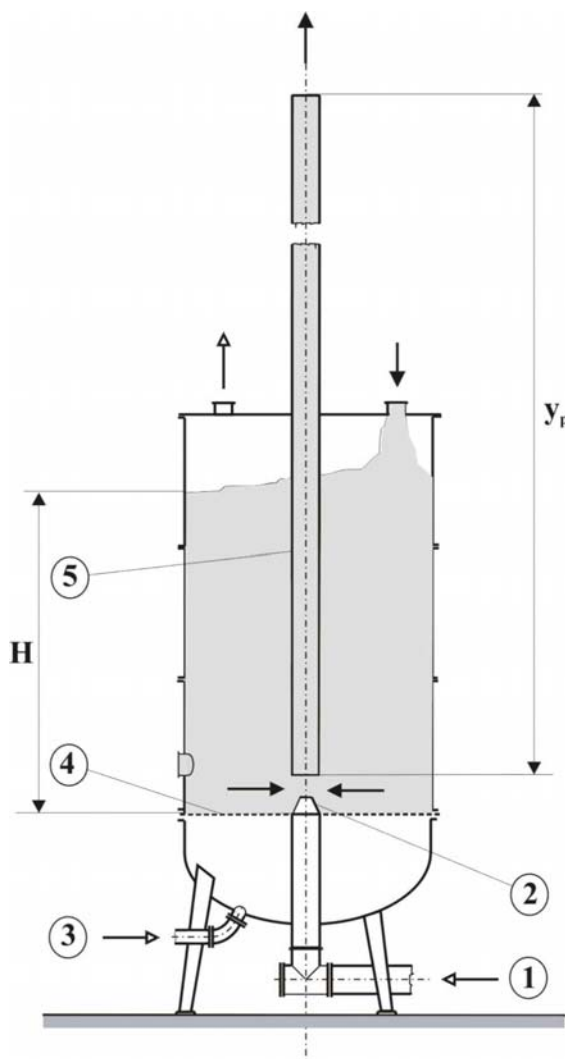
8.1.1. A fluid emelőben végbemenő kétfázisú áramlás

A fluid emelőt működtető primer levegő az 1. ábrában látható vázlatnak megfelelően az 1-el jelölt helyen lép be és jut a 2-vel jelölt fúvóka alá. A fúvókából kilépő nagy sebességű levegősugár magával ragadja a 4-jelű légeosztó rétegen átlépő levegőmennyiség által fluid állapotba hozott és a fúvóka felé áramló poros anyagot.

A primer levegősugár és a benne elkeveredett finomszemcsés szilárd anyag a függőleges 5 jelű szállítócső kezdeti szakaszában (indítószakaszában) lelassulva függőlegesen felfelé áramlik.

A következő fejezet részben a fluid emelő működését alapvetően meghatározó két részfolyamatot különböztetünk meg. Ezek:

- Szilárd anyag-levegő keverék radiális áramlása a fúvóka felé a légelosztó réteg felett
- Az indítószakaszban (a függőleges szállítóvezeték kezdeti szakaszában) történő levegő-szilárd anyag elkeveredése a fúvókából kilépő levegővel



8.1. ábra. A fluid emelő vázlata

8.1.2.1. Szilárd anyag-levegő keverék radiális áramlása a fúvóka felé a légelosztó réteg felett

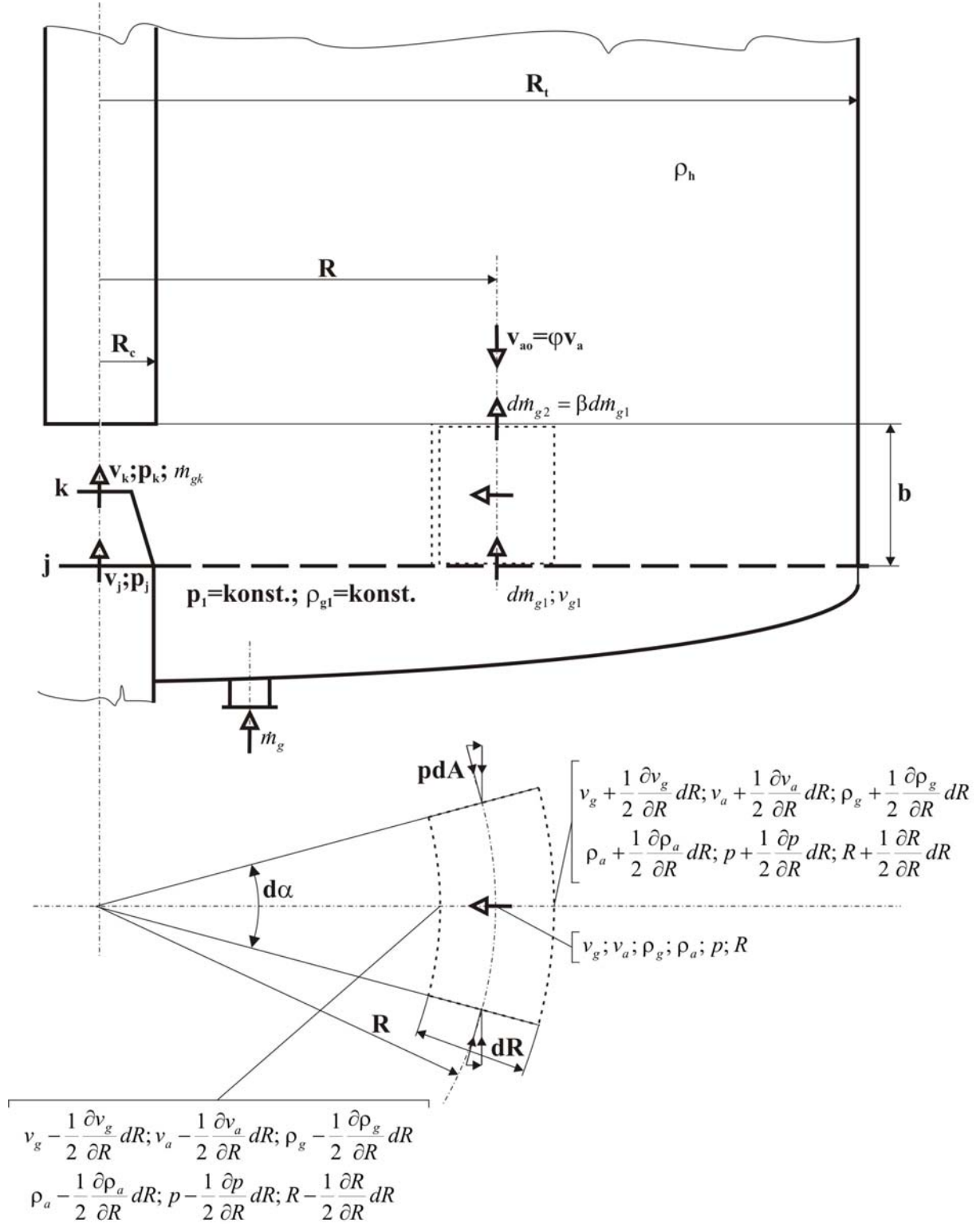
8.1.2.1.1. A levegő radiális áramlása a fúvóka felé a légelosztó réteg felett

A légelosztó réteg alatti „ p_i ” nyomást állandónak tetelezhetjük fel. A légelosztó réteg feletti nyomás értéke az „ R_i ” helyen a tartályban lévő „ H ” magasságú anyagoszlop által meghatározott „ p_i ” értékről az „ R_p ” helyen (8.2. ábra) felvett „ p_k ” értékre csökken a fúvókából kiáramló levegő dinamikus nyomása következtében. A „ p_i ” túlnyomás értéke a tartályban lévő fluidizált oszlop rétegmagasságától függ. Írható, hogy:

$$p_i = \rho_h gH \quad (8.1)$$

Ha a fűvókából kiáramló levegőt sűrűdésmentesnek, az állapotváltozást pedig adiabatikusnak tekintjük, akkor a fűvókából kilépő gáz sebessége:

$$v_k = \left[2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_j \left(1 - \left(\frac{p_k}{p_j} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right) + v_j^2 \right]^{1/2} \quad (8.2)$$



8.2. ábra. Ellenőrző térfogat az elosztóréteg feletti radiális áramlásban

A 8.2. összefüggésből felvett „ v_k ” sebességgel és ismert „ v_j ” sebességgel a „ p_k/p_j ” nyomásviszonyra kapjuk, hogy:

$$\frac{p_k}{p_j} = \left[1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{v_k^2 - v_j^2}{2R T_j} \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (8.3)$$

A „ p_j ” érték ismeretében „ p_k ” nyomás meghatározható. A nyomásváltozást parabolikusnak feltételezve az elosztóréteg feletti nyomáseloszlás az alábbi módon írható:

$$p = \frac{1}{2a_n} \left(-b_n + \sqrt{b_n^2 + 4a_n R} \right) \quad (8.4)$$

Az egyenlet állandói a geometria („ R_t ”; „ R_p ”) ismeretében, továbbá a „ p_t ” és „ p_k ” nyomás értékekből számíthatók. Írható, hogy

$$a_n = \frac{1}{p_k p_t} \frac{R_p p_k - R_t p_t}{p_t - p_k} \quad (8.5)$$

$$b_n = \frac{R_t - a_n p_k^2}{p_k} \quad (8.6)$$

A légeosztó réteg elemi körgyűrű felületén bejövő „ dm_{g1} ” levegő tömegáram $dm_{g2} = \beta dm_{g1}$ része felfelé áramolva elvégzi a tartályban lévő „ H ” magasságú oszlop fluidizálását és a tartályból eltávozik, míg a fennmaradó „ dm_g ”-vel jelölt rész a fúvóka felé (a kisebb nyomású hely felé) áramolva az anyagrészecskéket magával viszi.

A fúvóka felé áramló levegő tömegárama:

$$dm_g = (1 - \beta) dm_{g1} = (1 - \beta) \frac{p_t - p}{k_o \rho_{g1}} \rho_{g1} R dR 2\pi = (1 - \beta) \frac{2\pi}{k_o} \left[p_t + \frac{b_n}{2a_n} - \frac{1}{2a_n} (b_n^2 + 4a_n R)^{1/2} \right] R dR \quad (8.7)$$

Integrálás után a fúvóka felé áramló levegő tömegáramára kapjuk, hogy:

$$m_g = (1 - \beta) \frac{2\pi}{k_o} \left\{ \left(p_t + \frac{b_n}{2a_n} \right) \frac{R_t - R}{2} - \frac{2}{480 a_n^3} \left[(12 a_n R_t - 2 b_n^2) (4 a_n R_t + b_n^2)^{3/2} - (12 a_n R - 2 b_n^2) (4 a_n R + b_n^2)^{3/2} \right] \right\} \quad (8.8)$$

A fúvóka felé áramló szilárd anyag – levegő keverék jellemzőinek számításához szükség lesz a levegősebesség „ dv_g/dR ” deriváltjának értékére. Írjuk fel a kontinuitás egyenletét a gázra a 8.2. ábrán berajzolt ellenőrző térfogatra az alábbiakat figyelembe véve:

- Az ellenőrző térfogatban lévő anyag-részecskék okozta szűkítő hatást nem vesszük figyelembe
- A gáz állapotváltozását izotermikusnak tekintjük.

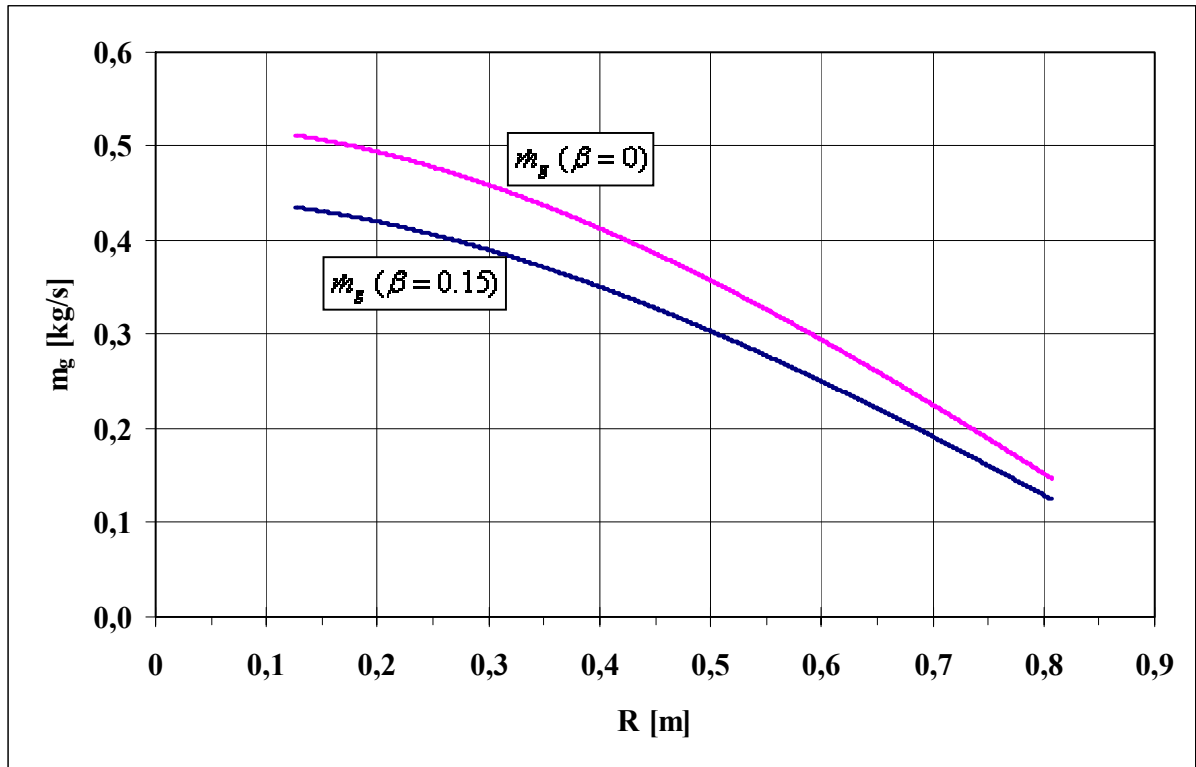
$$\begin{aligned}
 R d\alpha dR \rho_{g1} \frac{p_1 - p}{k_o \rho_{g1}} + \left(R + \frac{dR}{2} \right) \left(\rho_g + \frac{d\rho_g}{2} \right) \left(v_g + \frac{dv_g}{2} \right) d\alpha b \\
 - \left(R - \frac{dR}{2} \right) \left(\rho_g - \frac{d\rho_g}{2} \right) \left(v_g - \frac{dv_g}{2} \right) d\alpha b - \beta R d\alpha dR \rho_{g1} \frac{p_1 - p}{k_o \rho_{g1}} = 0
 \end{aligned} \quad (8.9)$$

Átalakítás és rendezés után, valamint a másodrendű tagok elhanyagolásával a kontinuitási egyenlet az alábbi formában írható:

$$\frac{dv_g}{dR} = -(1-\beta) \frac{(p_1 - p) p_o}{b k_o \rho_{go} p} - \frac{v_g}{R} - \frac{v_g}{p} \frac{dp}{dR} \quad (8.10)$$

(A 8.10. egyenlet integrálása után kapott értékből számított gáz tömegáram megegyezik a 8.8. összefüggésből számítható értékkel)

A 8.3. ábrában egy későbbiekben ismertetett példa adataival a 8.8. összefüggéssel számolt gáz tömegáram $m_g(R)$ sugár menti eloszlása látható. A görbék elméletileg az $R=R_f=1\text{m}$ koordinátánál, azaz az emelőtartály falánál az $m_g=0$ pontból indulnak, ám az ábrában azokat csupán az emelőtartály - később magyarázandó működési tartományában rajzoltuk meg.



8.3. ábra. Levegő tömegáram sugár menti eloszlása

8.1.2.1.2. A szilárdanyag áramlása a fúvóka felé. Az anyagrészecskékre felírt kontinuitási egyenlet

A 8.2. ábra jelöléseit felhasználva az ellenőrző térfogatban lévő anyagrészecskék kontinuitási egyenlete az alábbi formában írható:

$$R d\alpha dR \rho_h \varphi v_a + \left(R + \frac{dR}{2}\right) d\alpha b \left(\rho_a + \frac{d\rho_a}{2}\right) \left(v_a + \frac{dv_a}{2}\right) - \left(R - \frac{dR}{2}\right) d\alpha b \left(\rho_a - \frac{d\rho_a}{2}\right) \left(v_a - \frac{dv_a}{2}\right) = 0 \quad (8.11)$$

Átalakítás és rendezés, valamint a másodrendű tagok elhanyagolása után kapjuk, hogy:

$$\frac{d\rho_a}{dR} = -\frac{\rho_h \varphi v_a}{b v_a} - \frac{\rho_a}{R} - \frac{\rho_a}{v_a} \frac{dv_a}{dR} \quad (8.12)$$

8.1.2.1.3. Az anyagrészecskékre felírt impulzustétel

Az impulzustétel az alábbi formában írható:

$$\left[\left(R + \frac{dR}{2}\right) \left(\rho_a + \frac{d\rho_a}{2}\right) \left(v_a + \frac{dv_a}{2}\right)^2 - \left(R - \frac{dR}{2}\right) \left(\rho_a - \frac{d\rho_a}{2}\right) \left(v_a - \frac{dv_a}{2}\right)^2 \right] b d\alpha = -dF + dF_s \quad (8.13)$$

A 8.13. összefüggés jobb oldalán „ dF ” a részecskékre ható elemi előrehajtó erőt, „ dF_s ” pedig a súrlódó erőt jelenti. Ezek az alábbi formában írhatók:

$$dF = \frac{\rho_a}{m_1} b R d\alpha dR \frac{\rho_g}{2} A_o C_e (|v_g| - |v_a|)^2 \quad (8.14)$$

A „ C_e ” ellenállás tényező Kaskas [97] szerint az alábbi módon számítható:

$$C_e = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}} + 0.4 \quad (8.15)$$

ahol a Reynolds szám: $\text{Re} = \frac{(v_g - v_a) d_o \rho_g}{\mu_g}$

A Coulomb súrlódásból számolt fékező erő:

$$dF_s = f \rho_a g R d\alpha b dR \quad (8.16)$$

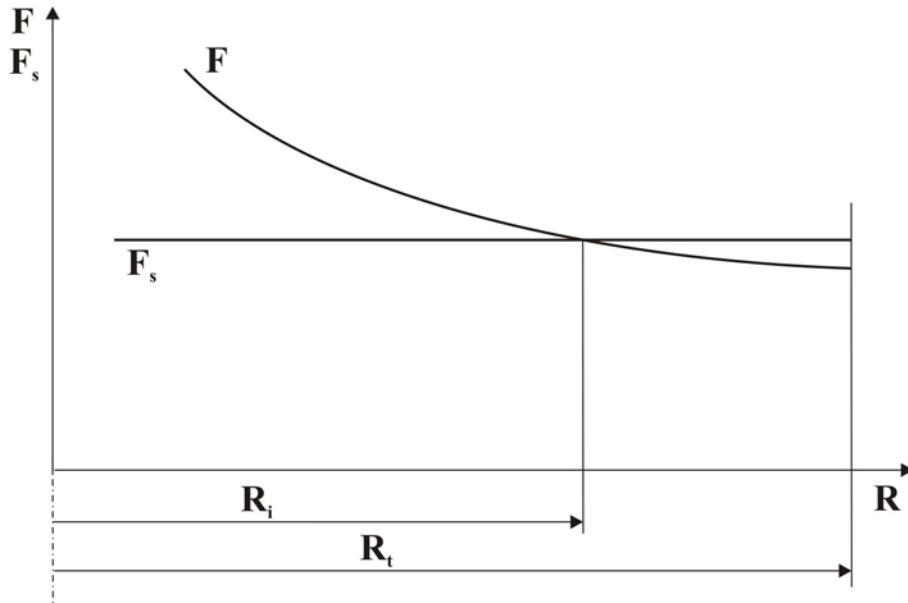
Átalakítás és rendezés, valamint a másodrendű tagok elhanyagolása után és a 8.12. összefüggés figyelembevételével kapjuk, hogy:

$$\frac{dv_a}{dR} = \frac{\rho_b \varphi v_a}{b \rho_a} - \frac{\rho_{go} P A_o C_D}{2 m_1 v_a p_o} \left(|v_g| - |v_a| \right)^2 + \frac{f g}{v_a} \quad (8.17)$$

A 8.4, 8.10, 8.12 és 8.17 egyenletek segítségével a fúvóka felé történő szilárd anyag-levegő keverék jellemzői számíthatók:

A számítások azt mutatták, hogy a fluidizáló rétegen kialakul egy holt zóna. Ez azt jelenti, hogy a „b” magasságú rétegben a fúvóka felé történő anyagáramlás nem a tartály külső, „ R_t ”-vel jelölt falától kezdődik, hanem csak $R_i < R_t$ sugártól. Ezért az „ R_i ” sugárnak akkorának kell lennie, hogy a $\Delta A = \pi (R_t^2 - R_i^2)$ elosztóréteg felületrészen átáramló „ m_g ” gáz tömegáramból meghatározható sugárirányú levegősebességgel számított „ F ” előrehajtó erőre teljesüljön az $F \geq F_f$ feltétel.

A numerikus számítás elkezdéséhez tehát első lépésben „ R_i ” értékét kell meghatározni (lásd a 8.4. ábrát).



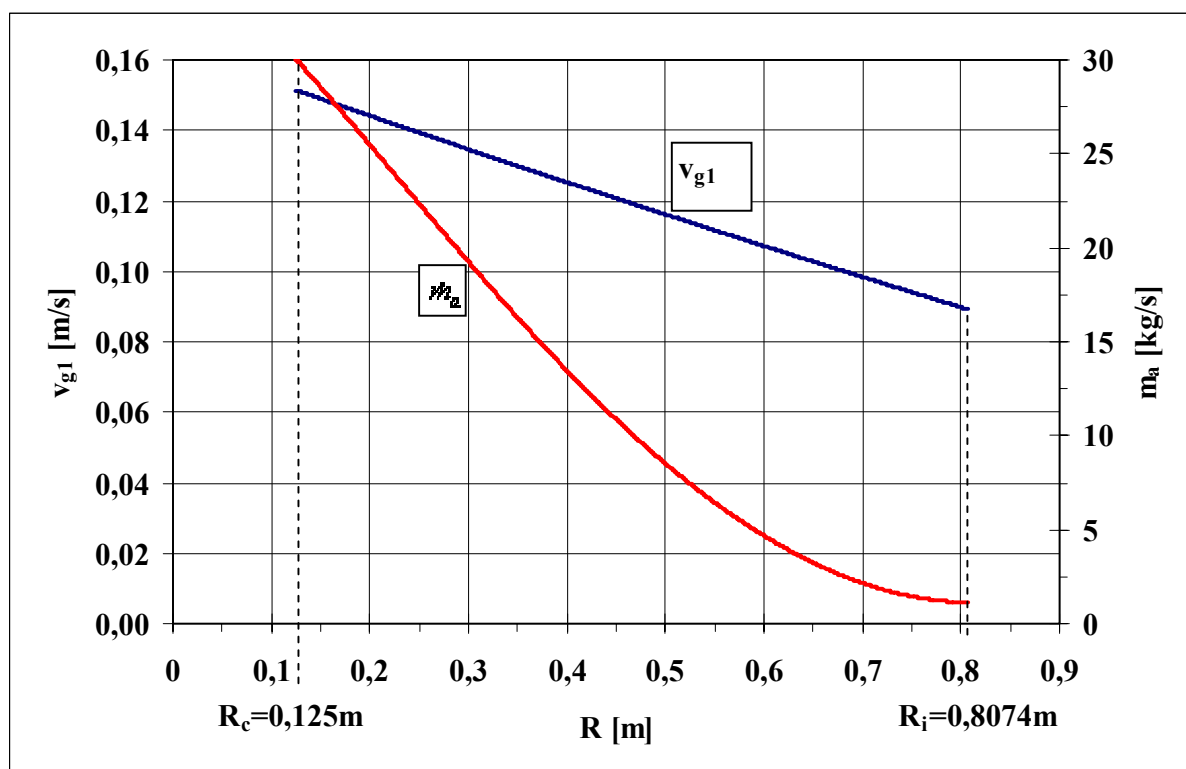
8.4. ábra. Az „ R_i ” sugár meghatározása

A 8.8. összefüggés segítségével különböző „ R ” értékeknél számítjuk az „ m_g ” tömegáramot. A felvett különböző „ R ” értékhez tartozó, a fúvóka felé áramló gáz sebesség értéke a 8.4. összefüggést figyelembe véve:

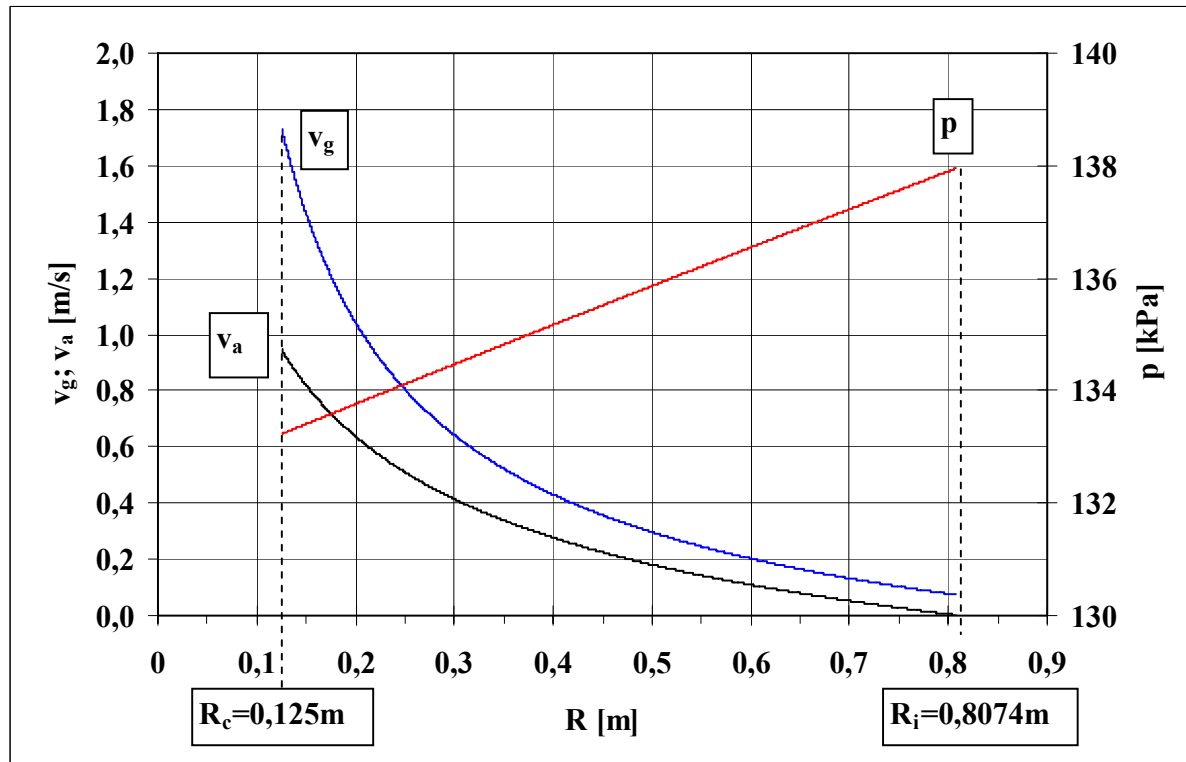
$$v_g = \frac{m_g}{2R\pi b \rho_g} = \frac{m_g p_o}{2R\pi b \rho_{go} p} = \frac{m_g p_o 2 a_n}{2R\pi b \rho_{go} \left(-b_n + \sqrt{b_n^2 + 4 a_n R} \right)} \quad (8.18)$$

A „ v_g ” gázsebességgel $v_a=0$ részecske sebességnél a 8.14. összefüggéssel számítjuk a részecskére ható, a fúvóka felé mutató „ F ” erőt. Ezt több felvett sugárnál megismételve az $F(R)$ görbe felrajzolható. A 8.16. összefüggéssel számítható az „ R ” irányba mutató „ F_s ” súrlódó erő. A két görbe metszéspontja adja a keresett „ R_i ” értéket (lásd a 8.4. ábrát).

8.1.2.1.4. Az egyenletek megoldásával kapott diagramok



8.5. ábra. A lazítósebesség és a szilárd anyag tömegáramának sugár menti eloszlása

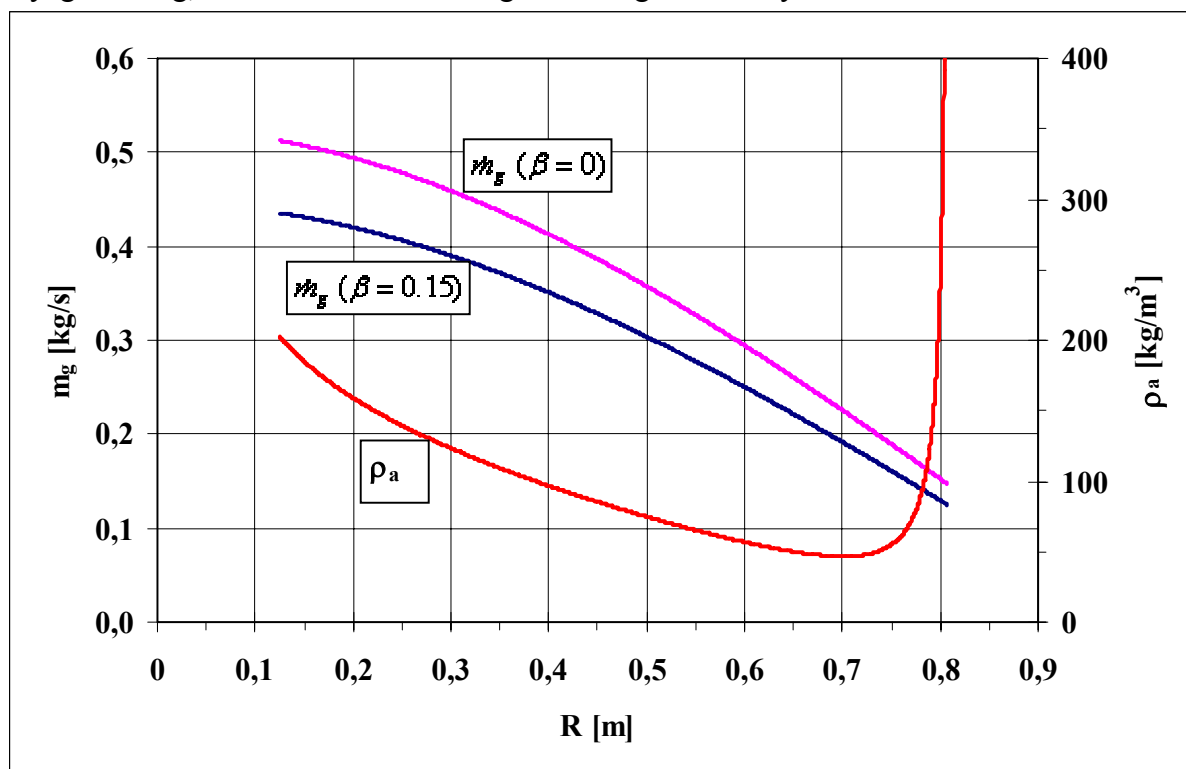


8.6. ábra. Levegő-, anyagsebesség és nyomáseloszlás

A 8.10, 8.12 és 8.17 egyenleteket Runge - Kutta numerikus módszert használva oldottuk meg. A példa adatai: $b=0.2\text{m}$; $H=5\text{m}$; $k_o=50000\text{m/s}$; $\dot{m}_a=30\text{kg/s}$; $p_l=145.3\text{kPa}$; $p_r=139.23\text{kPa}$; $p_k=133.23\text{kPa}$; $R_l=1\text{m}$; $R_p=0.125\text{m}$; $v_k=100\text{m/s}$; $\beta=0.15$; $\rho_b=800\text{kg/m}^3$; $\rho_s=2600\text{kg/m}^3$.

A 8.5. ábrában az elosztórétegen (8.1. ábra (2) jelű réteg) átáramló levegő sebesség-eloszlását, valamint a fűvóka felé áramló anyag tömegáram változását ábrázoltuk a sugár függvényében.

A 8.6. ábrában „b” magasságú rétegben (lásd a 8.2. ábrát) a fűvóka felé áramló levegő- és anyagebesség, valamint az elosztóréteg feletti sugár menti nyomáseloszlás látható.



8.7. ábra. Levegő tömegáram és koncentráció eloszlás

A 8.7. ábrán a „ ρ_a ” jelű anyag koncentráció, valamint a sugárirányú „ \dot{m}_g ” levegő tömegáram változását láthatjuk. A sugárirányú levegő tömegáram értéke a bemutatott példában:

0.435 kg/s.

Következtetések

A dolgozatban ismertett modell alkalmas arra, hogy a fluid emelőben végbemenő bonyolult áramlás leírására a kezdő lépést megtegyük. A levezetett egyenletek segítségével a fő paraméterek számíthatók és így a berendezés fő méretei meghatározhatók.

A fluid emelőtartályban kialakuló kétfázisú áramlás leírására használt modell javításához, ellenőrzéséhez, az alábbi kísérleteket kell elvégezni:

- A 8.1.2.1. pont alatti szilárd anyag levegő keverék áramlásban felvett ellenőrző térfogatba felülről érkező $v_{ao} = \varphi v_a$ anyagebesség „ φ ”-vel jelölt arányossági tényezőjének meghatározása.

- Az elosztórétgen átlépő levegőmennyiség „ β ”-val jelölt része fluidizálja a „ H ” magaságú anyagoszlopot. „ β ” értékét kísérlettel meg kell határozni.
- Az elosztórétg felett a nyomáseloszlás változását a dolgozatban parabolikusnak tekintettük. Kísérlettel ellenőrizni kell ennek a közelítésnek a jóságát.
- Kísérlettel kell ellenőrizni a 8.1.2.1.3. alatti részben tárgyalt holt zóna „ R_i ”-vel jelölt sugarát.

8.2. Kétfázisú áramlás a fluid emelő keveredési zónájában [98]

Ez a fejezet a fluidizációs emelőtartály keveredési zónájában mozgó szilárd részecskék áramlási paramétereinek meghatározásával foglalkozik. A kétfázisú áramlásban kijelölt ellenőrző térfogatra felírt kontinuitási egyenletekkel és a szilárd anyagra, valamint a gázra felírt impulzustétellel az alkalmazott matematikai-fizikai modell alapján differenciálegyenletekhez jutunk, amelyeket Runge-Kutta módszerrel oldunk meg. A mintapélda adataival számított eredményeket diagramokban – nyomás, anyagsebesség, gázsebesség és koncentráció eloszlások az emelőtartály keveredési zónájában a hossz függvényében – mutatjuk be.

Jelölések:

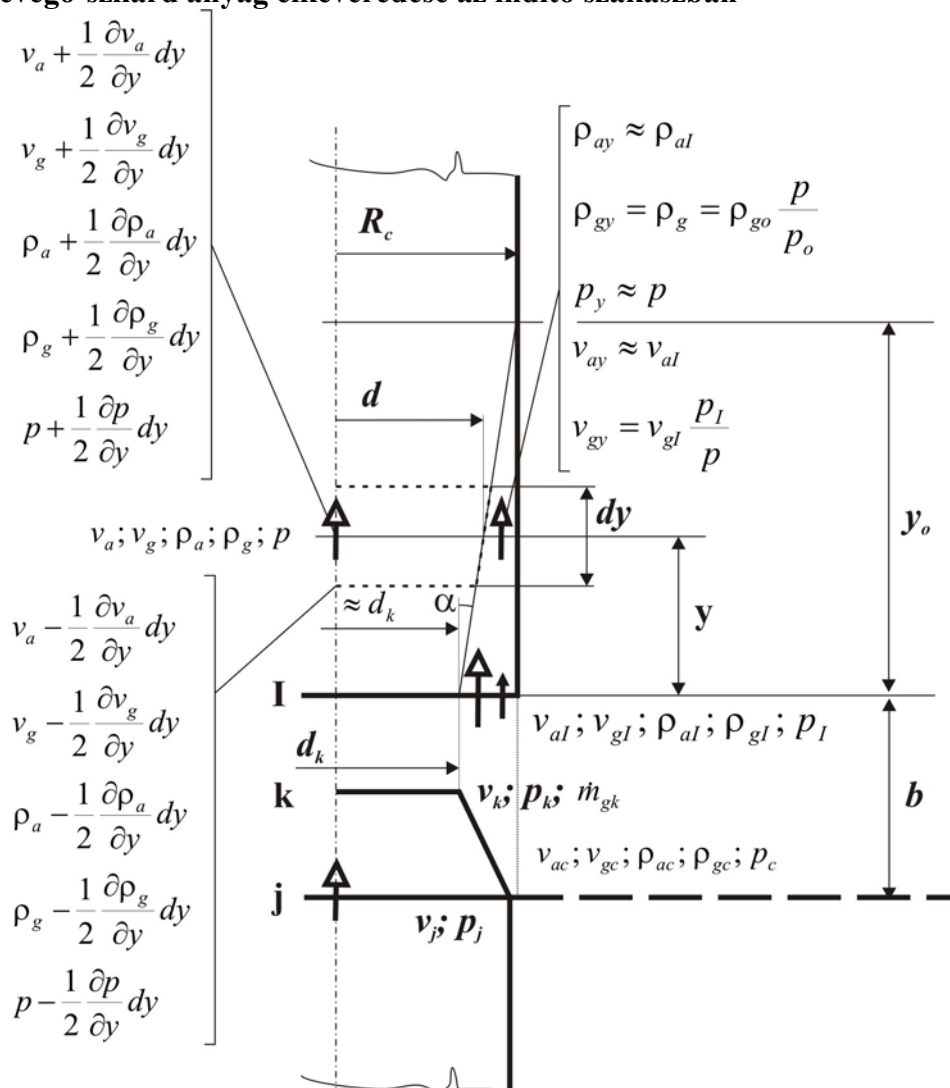
A_o [m ²]	a gömb alakú szilárd anyagrészecske áramlásra merőleges keresztmetszete
b [m]	a szállítócső belépő keresztmetszetének az elosztórétgtől mért távolsága
C_e [-]	gömb szemcse ellenállás tényezője
d [m]	átmérő
d_o [m]	a gömb alakú szilárd anyagrészecske átmérője
F [N]	a szemcsére ható előrehajtó erő
F_s [N]	Súrlódó erő
f [-]	Súrlódási tényező
G_1 [N]	a szilárd anyagrészecske súlya
g [m/s ²]	gravitáció
m_1 [kg]	a szilárd anyagrészecske tömege
m_{gk} [kg/s]	levegő tömegáram a fúvóka kilépésénél
p [Pa]	nyomás
p_o [Pa]	légtörő nyomás
p_I [Pa]	nyomás a szállítócső „I” jelű belépő keresztmetszetében
p_k [Pa]	nyomás a fúvóka kilépésénél
p_j [Pa]	nyomás a fúvóka előtt
R [J/kgK]	gázállandó
Re [-]	Reynolds szám
R_c [m]	a szállítócső sugara
v [m/s]	sebesség
v_{gl} [m/s]	levegő sebessége a szállítócső „I” jelű belépő keresztmetszetében
v_{gy} [m/s]	levegő sebesség a keveredési zóna „y” koordinátájánál
v_j [m/s]	sebesség a fúvóka alatt
v_k [m/s]	sebesség a fúvóka kilépő keresztmetszetében
v_a [m/s]	anyagsebesség
v_{ay} [m/s]	anyagsebesség a keveredési zóna „y” koordinátájánál
$v_{ao} = \varphi v_a$ [m/s]	az anyagrészecske süllyedési sebessége az emelőtartályban

Görög betűk

α [fok]	szög
μ [kg/ms]	a levegő abszolút viszkozitása
ρ_g [kg/m ³]	levegő (gáz) sűrűség
ρ_{gy} [kg/m ³]	levegő sűrűség a keveredési zóna „y” koordinátájánál
ρ_{go} [kg/m ³]	a légköri állapotú levegő (gáz) sűrűsége
ρ_a [kg/m ³]	szilárd anyag koncentráció
ρ_{ay} [kg/m ³]	szilárd anyag koncentráció a keveredési zóna „y” koordinátájánál

INDEXEK

a	a szilárd anyag
g	gáz (levegő)
j, k, y, I	a hely jelölése
s	súrlódás
l	egy szilárd részecske

8.2.1. A levegő-szilárd anyag elkeveredése az indító szakaszban

8.8. ábra. A fluid emelő függőleges szállítócsövének indító szakasza

A légeosztó rétegen keresztül a fűvóka felé áramló „ m_a ” anyag tömegáram, valamint az „ m_g ” gáz tömegáram értékei az [96] publikáció 5, illetve a 7. ábráiból az $R = R_c$ helyen kiolvashatók. A fűvókából kilépő „ m_{gk} ” gáz tömegáram a szállítóvezeték kezdeti szakaszában (indító szakaszában) elkeveredik az elosztóréteg feletti „ b ” szélességű rétegben a fűvóka felé áramló „ m_g ” gáz tömegárammal, valamint az „ m_a ” anyag tömegárammal. A függőleges szállítóvezetékben a szilárd anyag – levegő keverék az impulzuscseré után tovább áramlik. (lásd a 8.8. ábrát).

Az egyenletek felírásánál az alábbi közelítéssel élünk:

- Nem vesszük figyelembe az ellenőrző térfogatban az anyagrészecskék szűkítő hatását
- A gáz állapotváltozását izotermikusnak tekintjük
- A 8.8. ábrában az „ v_o ” magasságú háromszög által határolt forgástérfogatban felfelé áramló „ v_a ” anyag sebességet és a „ ρ_a ” anyag koncentrációt állandónak tekintjük.

8.2.2. A gázra felírt kontinuitási egyenlet

A 8.8. ábrában szaggatott vonallal körülhatárolt ellenőrző térfogat geometriai jellemzői az alábbiak:

$$\begin{aligned} d &= 2tg\alpha y + d_k & d_{y+dy/2} &= d + tg\alpha dy & A_{y+dy/2} &= (d + tg\alpha dy)^2 \pi / 4 \\ d_{y-dy/2} &= d - tg\alpha dy & A_{y-dy/2} &= (d - tg\alpha dy)^2 \pi / 4 \end{aligned} \quad (8.19)$$

Az indítószakasz elején a „ I ” keresztmetszetben a gáz és anyag tömegáramok értékei megegyeznek a [96] publikációban a 4, 10, 12, 17, 19 egyenletek segítségével számolt adatok $R = R_c$ helyen felvett „ ρ_{ac} ”, „ v_{ac} ”, „ ρ_{gc} ”, „ v_{gcp} ” értékeivel. Írható, hogy:

$$2 R_c \pi b \rho_{ac} v_{ac} = \pi \left(R_c^2 - \frac{d_k^2}{4} \right) \rho_{al} v_{al} \quad 2 R_c \pi b \rho_{gc} v_{gc} = \pi \left(R_c^2 - \frac{d_k^2}{4} \right) \rho_{gl} v_{gl} \quad (8.20)$$

A 8.20. egyenlet segítségével az indítószakasz elején (a „ I ” keresztmetszetben) a „ v_{al} ” és a „ v_{gl} ” értékei a „ $\rho_{ac} \approx \rho_{al}$ ” valamint a „ $\rho_{gc} \approx \rho_{gl}$ ” feltételezésével számíthatók.

A kontinuitási egyenlet az alábbi formában írható:

$$A_{y-dy/2} \left(\rho_g - \frac{d\rho_g}{2} \right) \left(v_g - \frac{dv_g}{2} \right) + (A_{y+dy/2} - A_{y-dy/2}) \rho_{gy} v_{gy} - A_{y+dy/2} \left(\rho_g + \frac{d\rho_g}{2} \right) \left(v_g + \frac{dv_g}{2} \right) = 0 \quad (8.21)$$

Az egyenlet átalakítása, valamint a másodrendű tagok elhanyagolása, és a $\rho_{gy} v_{gy} = \rho_{gl} v_{gl}$ valamint a $\rho_{gl} = \rho_{go} \frac{p_I}{p_o}$ figyelembe vétele után a gáz kontinuitási egyenlete:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{p_I v_{gl}}{d v_g} 4tg\alpha - \frac{p}{d} 4tg\alpha - \frac{p}{v_g} \frac{dv_g}{dy} \quad (8.22)$$

8.2.3. Az anyagrészecskére felírt kontinuitási egyenlet

A kontinuitási egyenlet az alábbi:

$$A_{y-dy/2} \left(\rho_a - \frac{d\rho_a}{2} \right) \left(v_a - \frac{dv_a}{2} \right) + (A_{y+dy/2} - A_{y-dy/2}) \rho_{ay} v_{ay} - A_{y+dy/2} \left(\rho_a + \frac{d\rho_a}{2} \right) \left(v_a + \frac{dv_a}{2} \right) = 0 \quad (8.23)$$

Átalakítás és rendezés, továbbá a másodrendű tagok elhanyagolása után, valamint a $v_{ay} \approx v_{ac}$ és a $\rho_{ay} \approx \rho_{ac}$ közelítést figyelembe véve kapjuk, hogy:

$$\frac{d\rho_a}{dy} = \frac{\rho_{al} v_{al}}{d v_a} 4tg\alpha - \frac{\rho_a}{d} 4tg\alpha - \frac{\rho_a}{v_a} \frac{dv_a}{dy} \quad (8.24)$$

Mint látjuk a 8.21, valamint a 8.23 kontinuitási egyenletek alakilag megegyeznek.

8.2.4. Az anyagrészecskére felírt impulzustétel

Az impulzustétel az alábbi formában írható:

$$\begin{aligned} & -A_{y-dy/2} \left(\rho_a - \frac{d\rho_a}{2} \right) \left(v_a - \frac{dv_a}{2} \right)^2 - (A_{y+dy/2} - A_{y-dy/2}) \rho_{ay} v_{ay}^2 + \\ & + A_{y+dy/2} \left(\rho_m + \frac{d\rho_m}{2} \right) \left(v_m + \frac{dv_m}{2} \right)^2 = dF - dG_m - dF_f \end{aligned} \quad (8.25)$$

Figyelembe véve, hogy

$$dF = \frac{\pi d^2}{8m_1} \frac{\rho_{go} P}{p_o} \rho_a A_o C_e \left(|v_g| - |v_a| \right)^2 dy \quad (8.26)$$

valamint

$$dG_a + dF_s = (1+f) \rho_a \frac{d^2 \pi}{4} dy g \quad (8.27)$$

átalakítás és a másodrendű tagok elhanyagolása után, valamint a 8.24, 8.26; 8.27 egyenletek figyelembevételével kapjuk, hogy:

$$\frac{dv_a}{dy} = -\frac{\rho_{al} v_{al}}{d \rho_a} 4tg\alpha + \frac{\rho_{al} v_{al}^2}{\rho_a v_a d} 4tg\alpha + \frac{\rho_{go} P}{2m_1 p_o} A_o C_e \frac{\left(|v_g| - |v_a| \right)^2}{v_a} - \frac{g}{v_a} (1+f) \quad (8.28)$$

8.2.5. A gázra felírt impulzustétel

A 8.8. ábra jelöléseit felhasználva az impulzustétel az alábbi módon írható:

$$\begin{aligned}
 & -A_{y-dy/2} \left(\rho_g - \frac{d\rho_g}{2} \right) \left(v_g - \frac{dv_g}{2} \right)^2 - (A_{y+dy/2} - A_{y-dy/2}) \rho_{gy} v_{gy}^2 + \\
 & + A_{y+dy/2} \left(\rho_g + \frac{d\rho_g}{2} \right) \left(v_g + \frac{dv_g}{2} \right)^2 = A_{y-dy/2} \left(p - \frac{dp}{2} \right) - \\
 & - A_{y+dy/2} \left(p + \frac{dp}{2} \right) + (A_{y+dy/2} - A_{y-dy/2}) p - dF
 \end{aligned} \quad (8.29)$$

Átalakítás és a másodrendű tagok elhanyagolása után, valamint a $v_{gy} = v_{gl} \frac{p_l}{p}$ és

$$\rho_{gy} = \rho_g = \rho_{go} \frac{p_l}{p_o}$$

figyelembe vételével

$$\begin{aligned}
 \frac{dv_g}{dy} = \frac{v_g}{\left(\frac{\rho_{go} v_g^2}{p_o} - 1 \right) pd} & \left[4ptg\alpha - 4tga \frac{p_l^2 v_{gl}}{p v_g} - 4tg\alpha \rho_{gl} v_{gl} v_g \frac{p_l}{p} + 4tg\alpha \frac{\rho_{gl} v_{gl}^2 p_l}{p_o} - \right. \\
 & \left. - \frac{\rho_{go} \rho_a pd}{2m_1 p_o} A_o C_e (|v_g| - |v_a|)^2 \right]
 \end{aligned} \quad (8.30)$$

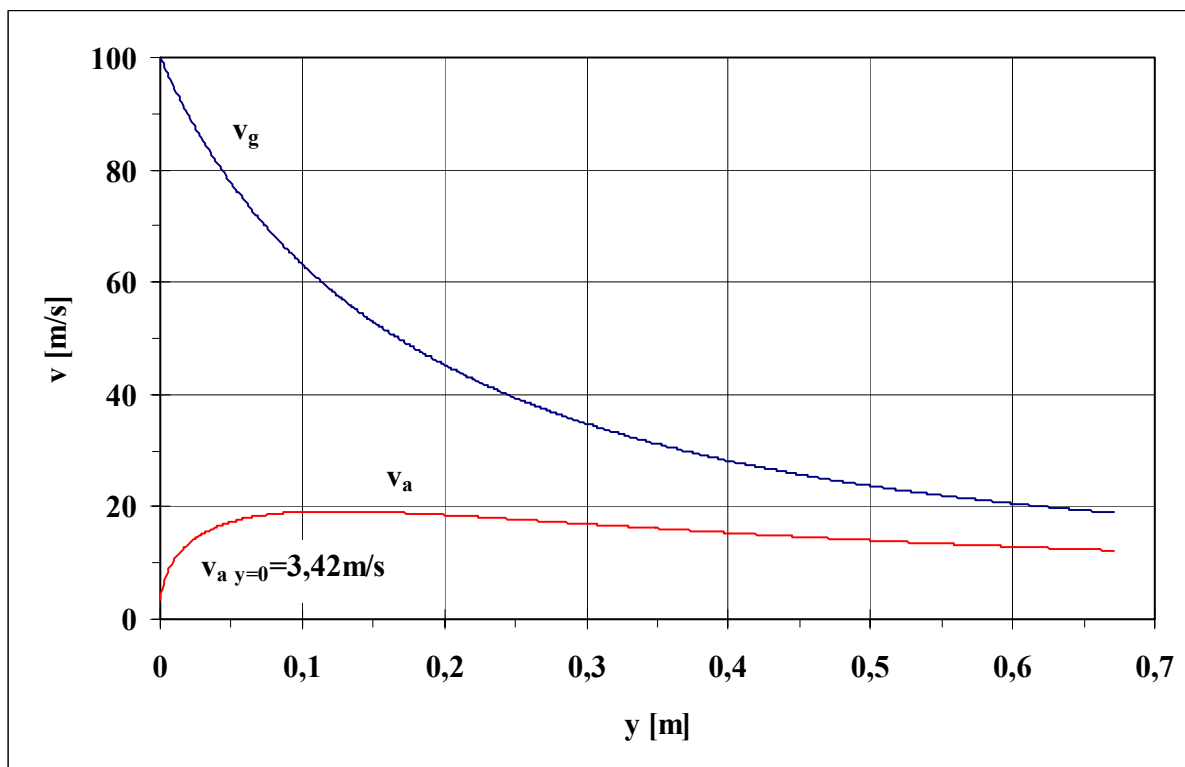
8.2.6. Az egyenletek megoldásával kapott diagramok

A 8.22, 8.24, 8.28, 8.30 egyenleteket Runge-Kutta numerikus módszert használva oldottuk meg. A megoldás kezdeti értékei kiolvashatók a [96] dolgozat 5, 6, 7 ábráinak $R = R_c$ értékeinél. Ezeket az indítószakasz „I”-vel jelölt ($y = 0$) helyén felvett kezdeti értékekre átszámítottuk. Ezek az értékek $v_{gl} \approx 6.27 \text{ m/s}$; $p_l = 133.23 \text{ kPa}$

További adatok:

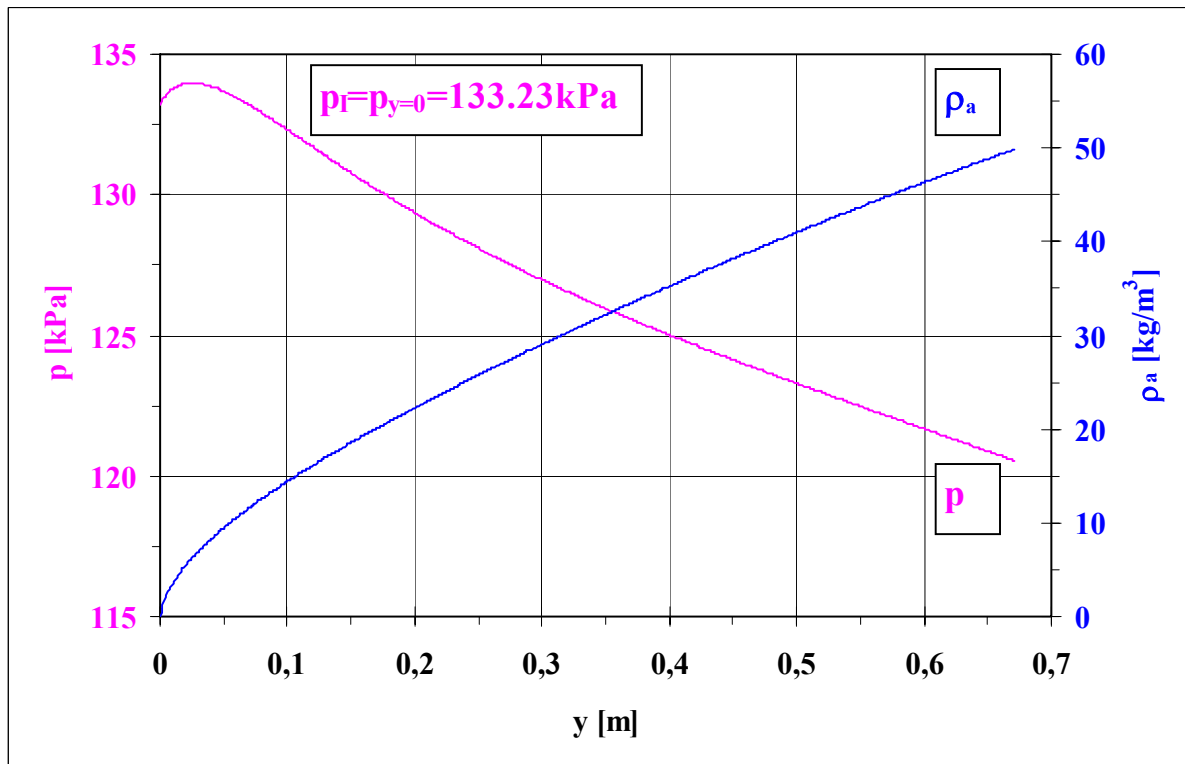
$$\begin{aligned}
 \alpha &= 7^\circ, v_k = 100 \text{ m/s}, d_k = 0.085 \text{ m}, \dot{m}_{gk} = 0.91 \text{ kg/s}, v_j = 25 \text{ m/s}, p_j = 145.3 \text{ kPa}, p_l = 133.23 \text{ kPa} \\
 \rho_{ac} &= \rho_{ac} = 202 \text{ kg/m}^3, R_c = 0.125 \text{ m}, \rho_{gl} = 1.6 \text{ kg/m}^3, \dot{m}_{gk} + \dot{m}_{gl} = 1.34 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

A 8.9. ábrában a „ v_g ” gázsebesség, valamint a „ v_a ” anyagsebesség diagramjait láthatjuk.



8.9. ábra. Az anyag- és levegősebesség hossz menti változása a szállítócső indítószakaszában

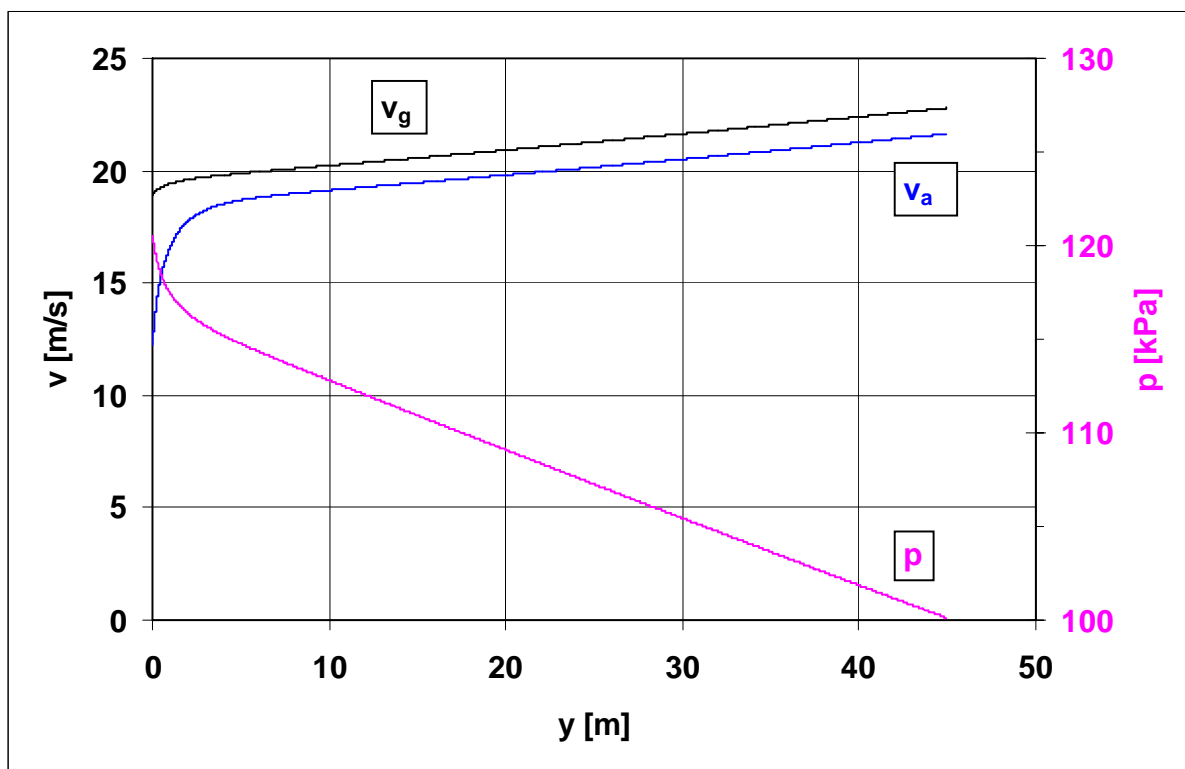
A 8.10. ábra a „ ρ_a ” anyagkoncentráció és a „ p ” nyomás értékeit mutatja.



8.10. ábra. A koncentráció és a nyomás hossz menti változása a szállítócső indítószakaszában

8.3. Az indítószakasz utáni függőleges csővezetékben mozgó szilárd anyag-levegőkeverék áramlástan jellemzői

A gyorsító szakasz végén lévő paraméterek ismeretében a csatlakozó függőleges szakaszban az anyagjellemzőket mutatja a 8.11. ábra. Ezeket a diagramokat a meglévő számítógépi programot felhasználva számítottuk, ugyancsak Runge-Kutta módszert felhasználva.



8.11. Sebesség és nyomáeloszlás a függőleges szállítócső hossza mentén

A 8.11. ábra a „ v_g ” gázsebesség, a „ v_a ” anyagsebesség, valamint a „ p ” nyomás változását mutatja a függőleges csőben.

A diagramokról az alábbi csővégi adatok olvashatók ki.

$y_c = 45$ m	függőleges szállítási távolság
$v_g = 22.8$ m/s	csővégi gázsebesség
$v_a = 21.6$ m/s	csővégi anyagsebesség
$p = 100$ kPa	csővégi nyomás

Következtetések

A 8.2. fejezetben ismertetett modell alkalmas arra, hogy a fluid emelőben végbemenő bonyolult áramlás leírására a kezdő lépést megtegyük. A levezetett egyenletek segítségével a fő paraméterek számíthatók és így a berendezés fő méretei meghatározhatók. A keveredési zónában kialakuló kétfázisú áramlás leírására használt modell ellenőrzéséhez az alábbiakat kell elvégezni.

- A 8.8. ábrában „ α ”-val jelölt szög tájékoztató értékét kísérlettel kell meghatározni.

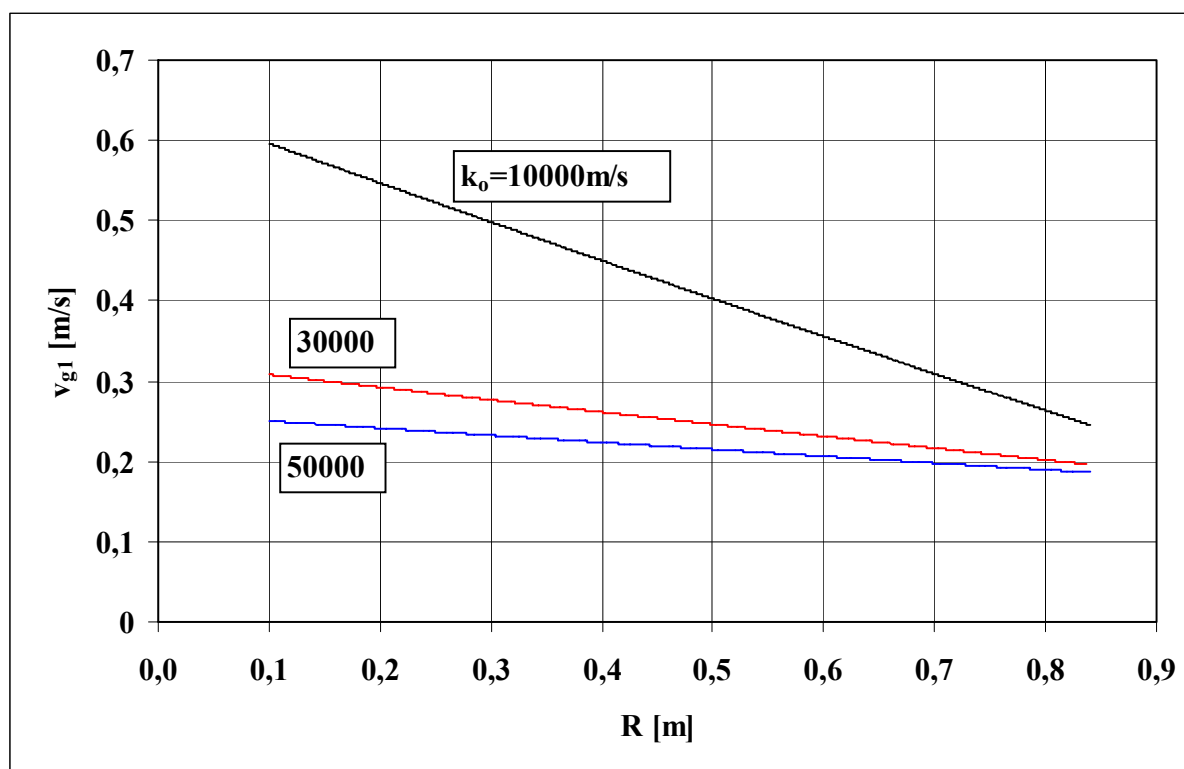
A bemutatott mintapéldán túl az emelőtartályban kialakuló kétfázisú áramlás leírása során előforduló legfontosabb paraméterek változtatásának hatását a [99] dolgozat részletesen tárgyalja.

8.4. A fluid emelő tartályában kialakuló kétfázisú áramlást befolyásoló főbb paraméterek hatásának vizsgálata

A 8.1., 8.2. és 8.3. fejezetben bemutatott matematikai fizikai modellek megoldásaként kapott elméleti számítási eredményeit a nyomás-, anyag- és levegősebesség-, valamint a koncentráció eloszlások mutatják.

Ebben a fejezetben azt vizsgáljuk, hogy fentiek alakulását és így a fluid emelő működését az alábbi fontosabb paraméterek változtatása, hogyan befolyásolják:

- A levegő elosztóréteg minősége
- A szilárd anyag tömegárama
- A tartályban lévő szilárd anyagoszlop magassága
- A lazítósebesség
- A halmazsűrűség
- Az anyagsúrlódási tényező
- A fúvókából kiáramló levegő sebessége



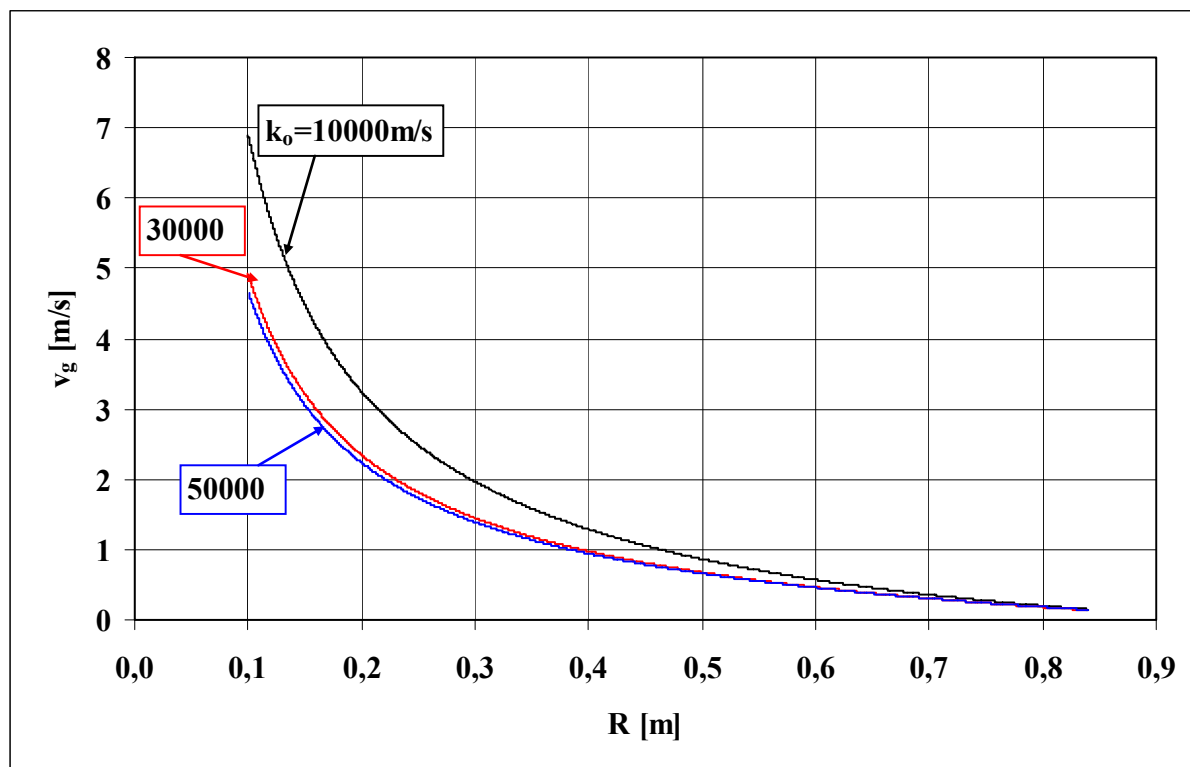
8.12. A lazító sebesség sugár menti eloszlása. Paraméter: az elosztóréteg minősége

A fluid emelőtartályban kialakuló kétfázisú áramlást leginkább befolyásoló paraméterek változtatása során azt mutatjuk be, hogy a matematikai-fizikai modellre felírt differenciálegyenletek megoldásaként kapott eloszlásfüggvények – a $v_g(R)$ gázsebesség, a

$v_{gl}(R)$ lazító sebesség, a $v_a(R)$ anyagsebesség, a $\rho_a(R)$ koncentráció, az $\dot{m}_g = f(R)$ levegő tömegáram és az $\dot{m}_a(R)$ anyag tömegáram sugár menti változása – hogyan változnak.

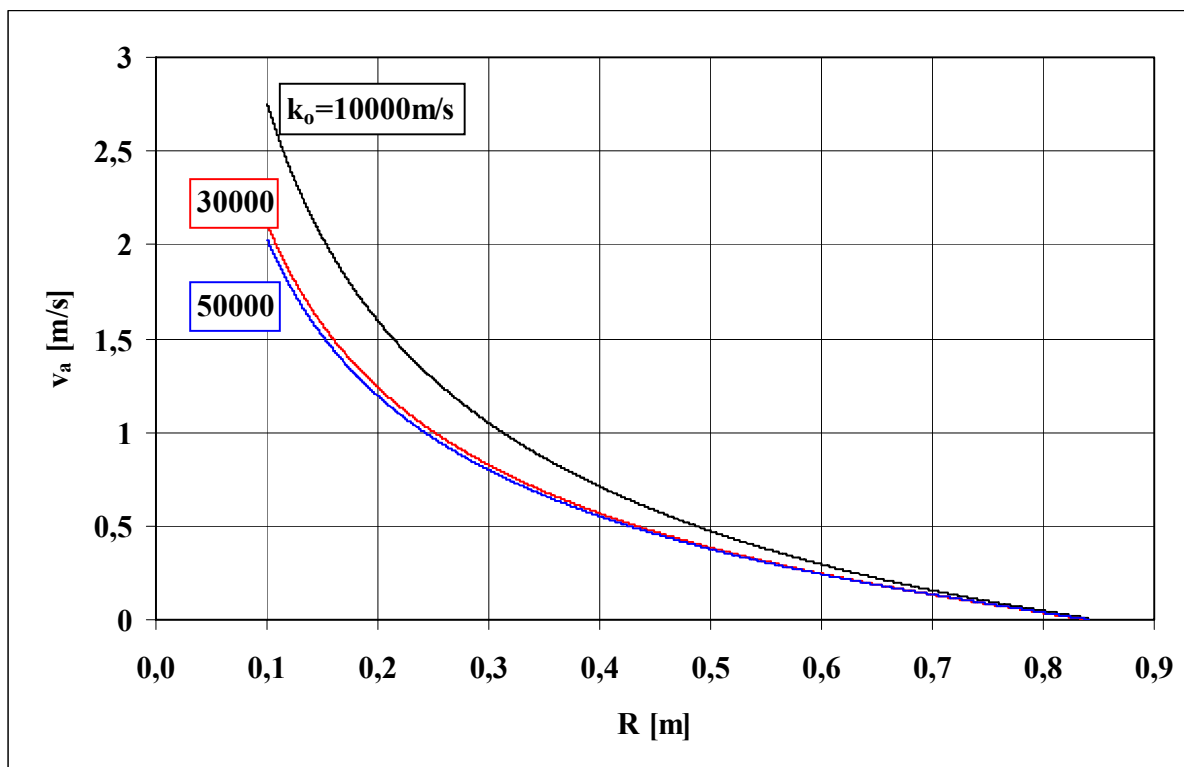
A vizsgálat során a mintapéldákban az alábbi állandó adatokkal dolgoztunk:

$b=0.2\text{m}$; $H=4\text{m}$; $k_o=50000\text{m/s}$; $\dot{m}_a=30\text{kg/s}$; $p_l=129.1\text{kPa}$; $p_r=115.69\text{kPa}$; $p_k=109.69\text{kPa}$;
 $R_l=1\text{m}$; $R_c=0.1\text{m}$; $v_k=100\text{m/s}$; $\beta=0.15$; $\rho_h=400\text{kg/m}^3$; $\rho_{la}=2600\text{kg/m}^3$

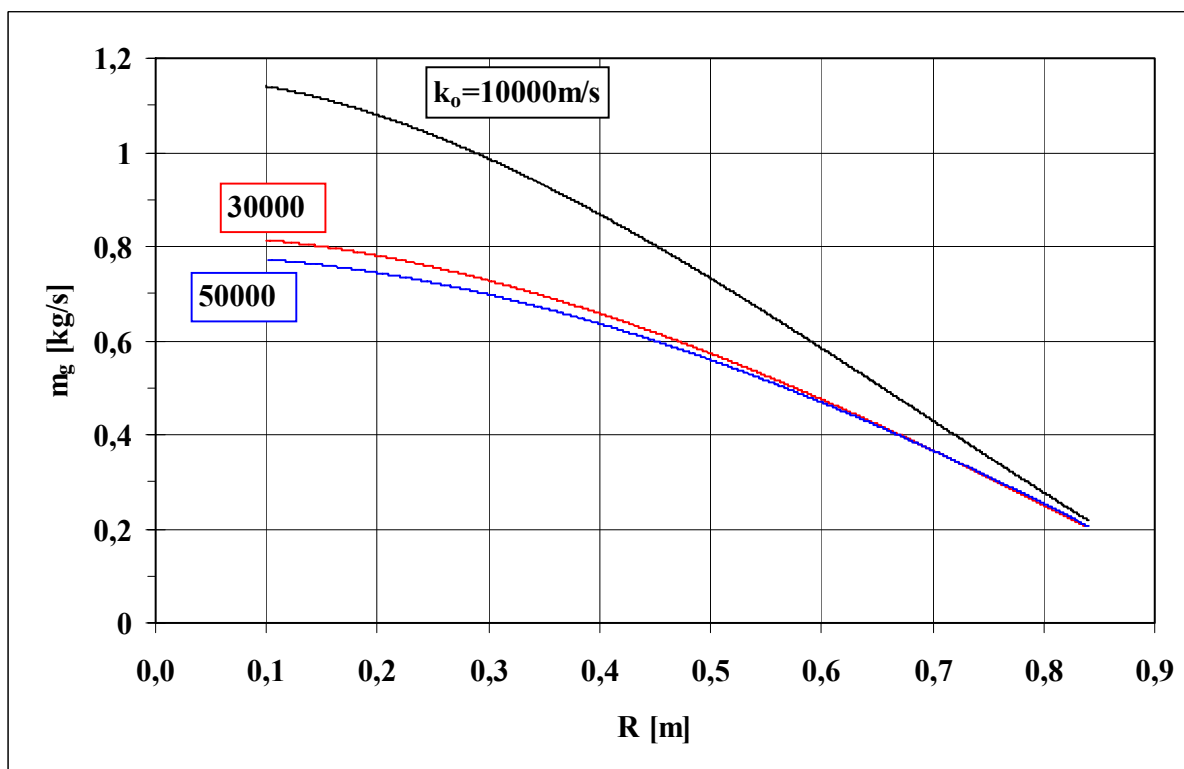


8.13. ábra. Sugárirányú levegősebesség eloszlás. Paraméter: az elosztóréteg minősége

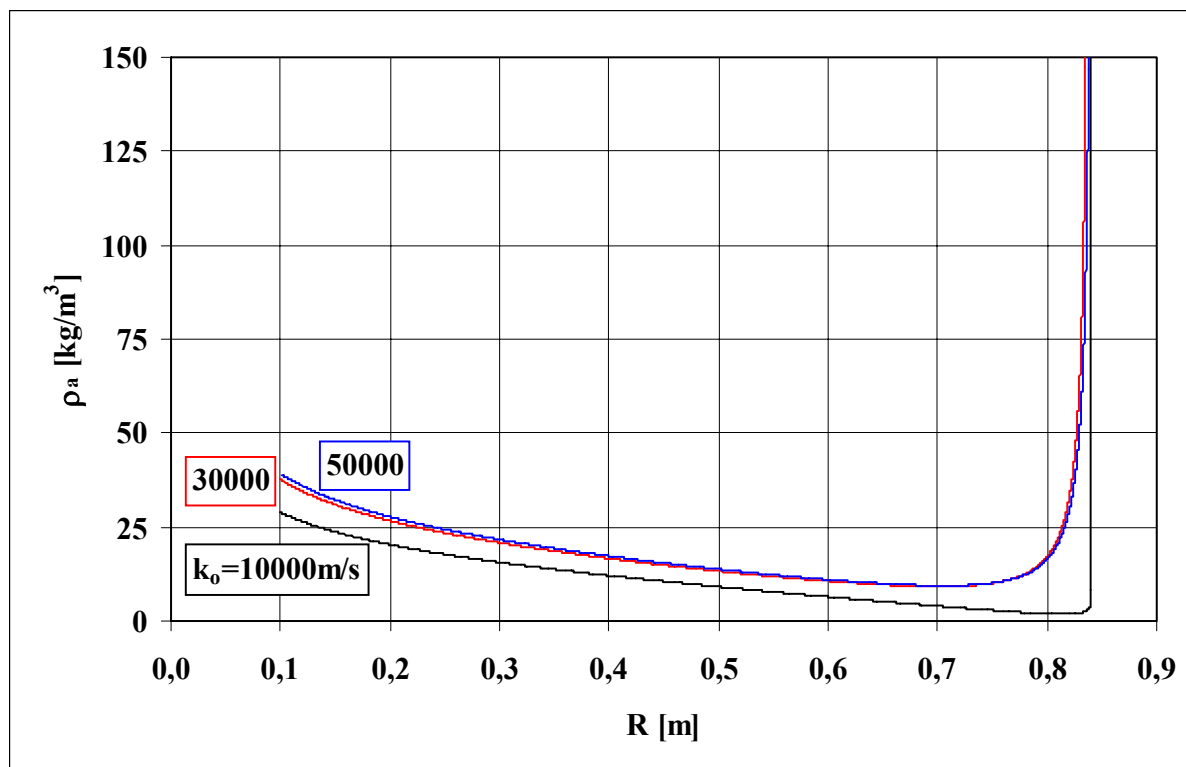
A „ k_o ” levegő elosztó réteg ellenállásának 8.12. ábrán bemutatott növelése a $v_{gl}=f(R)$ lazító sebesség egyenletesebb eloszlását eredményezi, azaz a lazító sebesség a sugár mentén kisebb mértékben változik. Az elosztó réteg ellenállásának változtatása egyúttal hatással van a 8.13. ábra szerinti $v_g(R)$ gázsebesség és a 8.14. ábra szerinti $v_a(R)$ anyagsebesség, továbbá a 8.15. ábrán látható $\dot{m}_g = f(R)$ levegő tömegáram és a 8.16. ábra szerinti $\rho_a(R)$ koncentráció sugár menti változására is.



8.14. ábra. Sugárirányú anyagsebesség eloszlás. Paraméter: az elosztórétég minősége

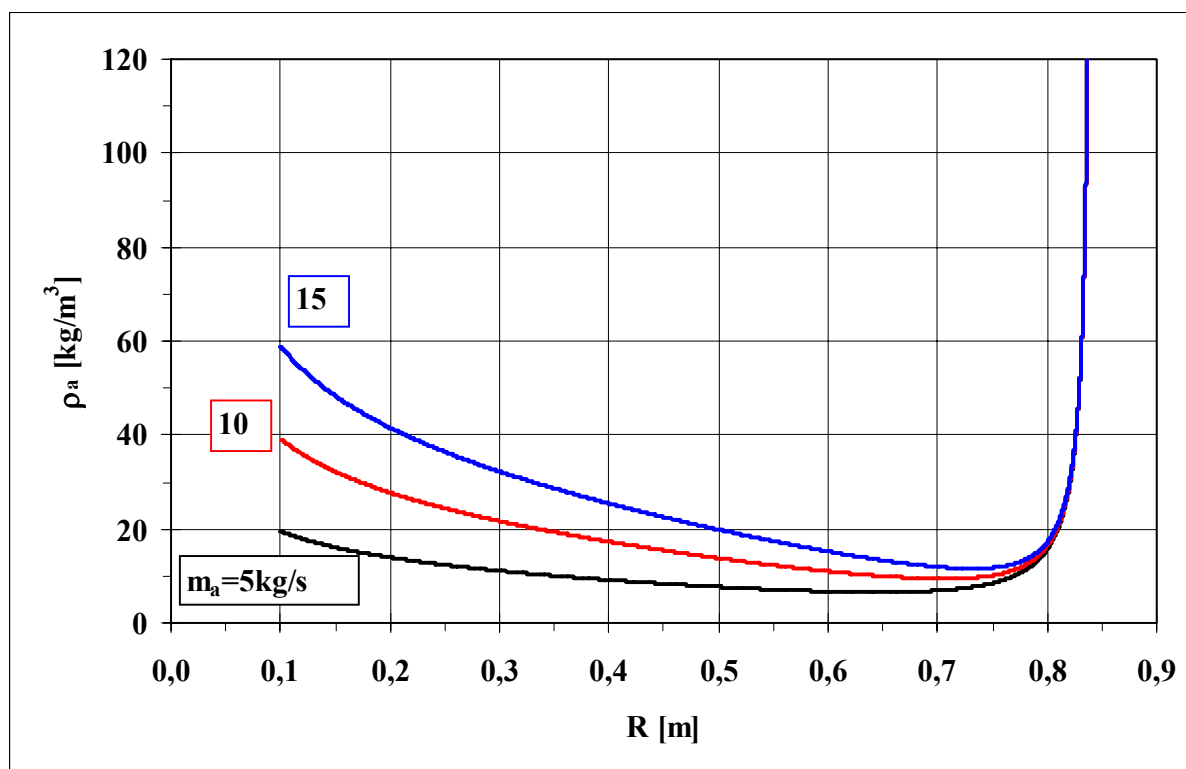


8.15. ábra. Levegő tömegáram eloszlás. Paraméter: az elosztórétég minősége

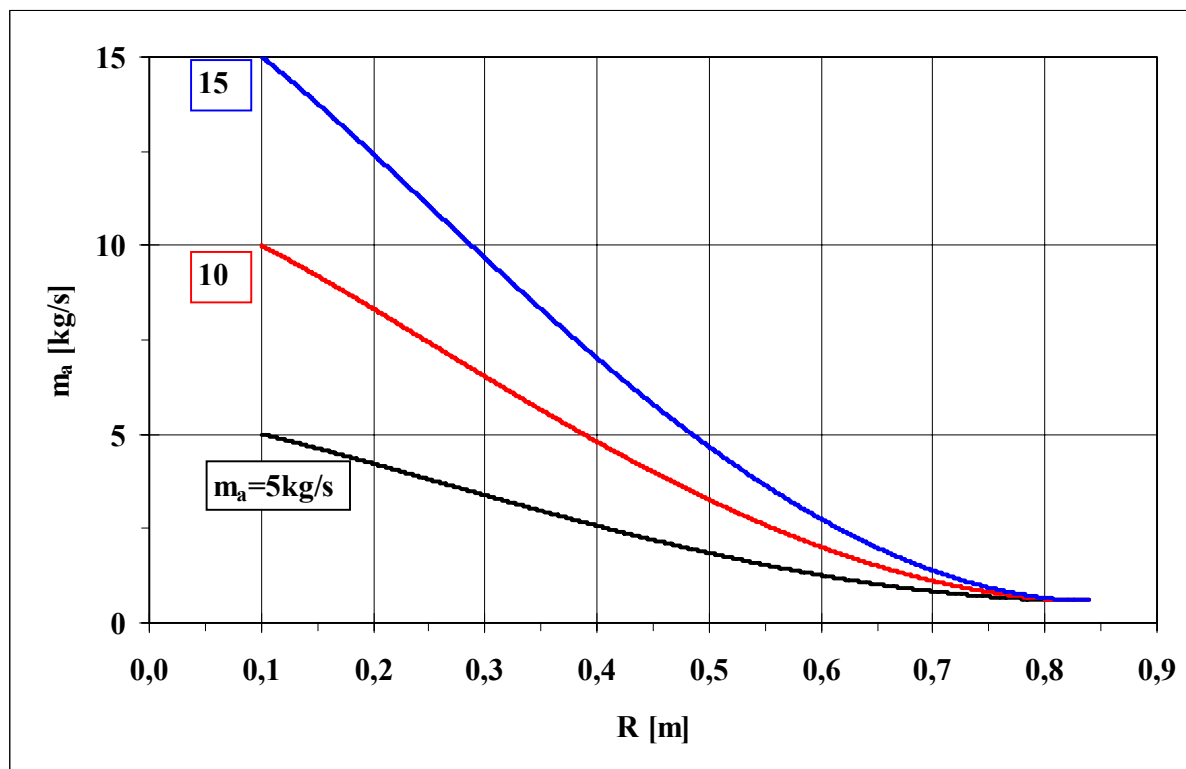


8.16. ábra. Koncentráció eloszlás. Paraméter: az elosztóréteg minősége

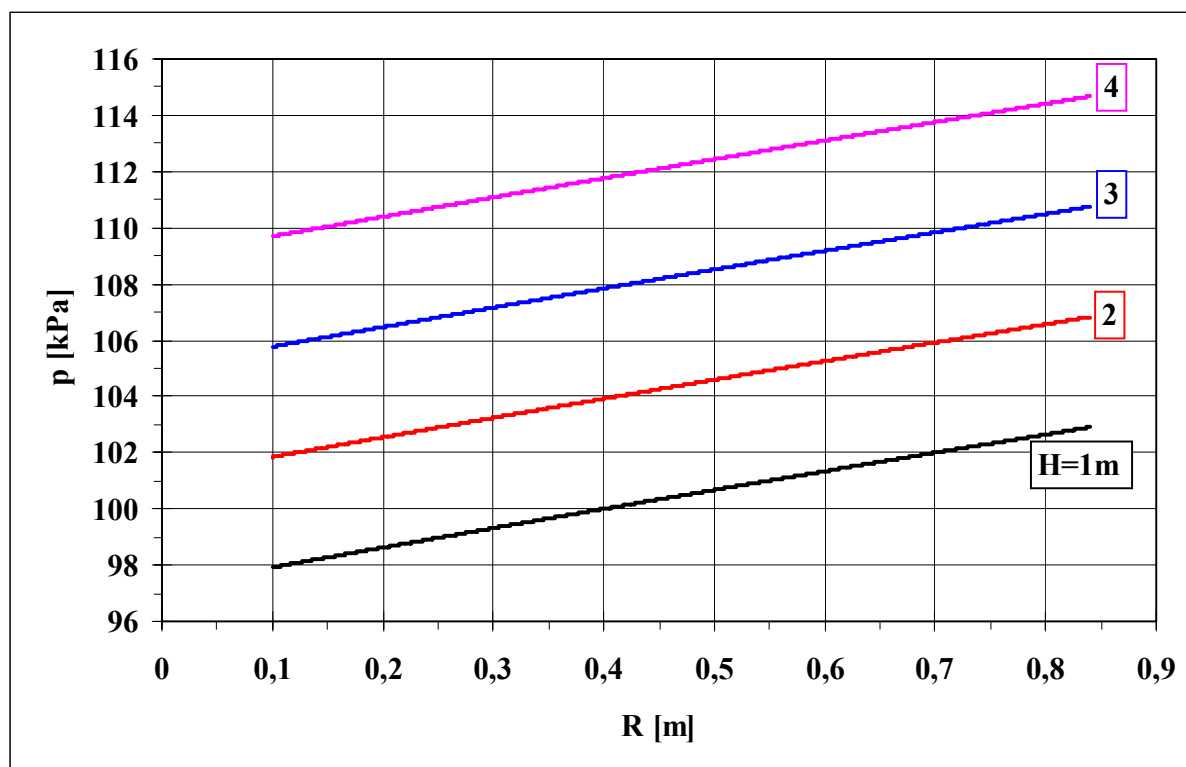
Az „ m_a ” anyag tömegáram paraméter változtatása – állandó levegő tömegáram mellett – magától értetődően befolyásolja a 8.17. ábrán bemutatott $\rho_a(R)$ koncentráció és a 8.18. ábra $\dot{m}_m(R)$ anyag tömegáram sugár menti változását.



8.17. ábra. Koncentráció eloszlás. Paraméter: a szilárd anyag tömegáram

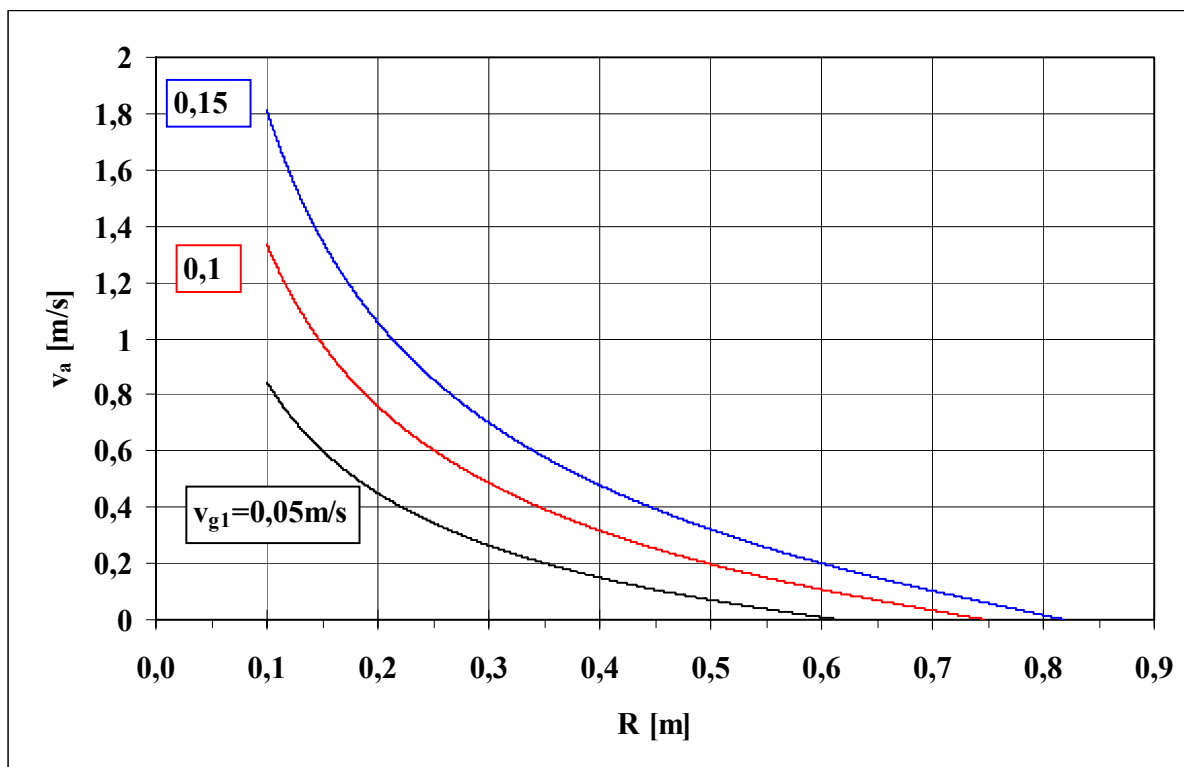


8.18. ábra. Szilárd anyag tömegáram eloszlás. Paraméter: a szállítóteljesítmény

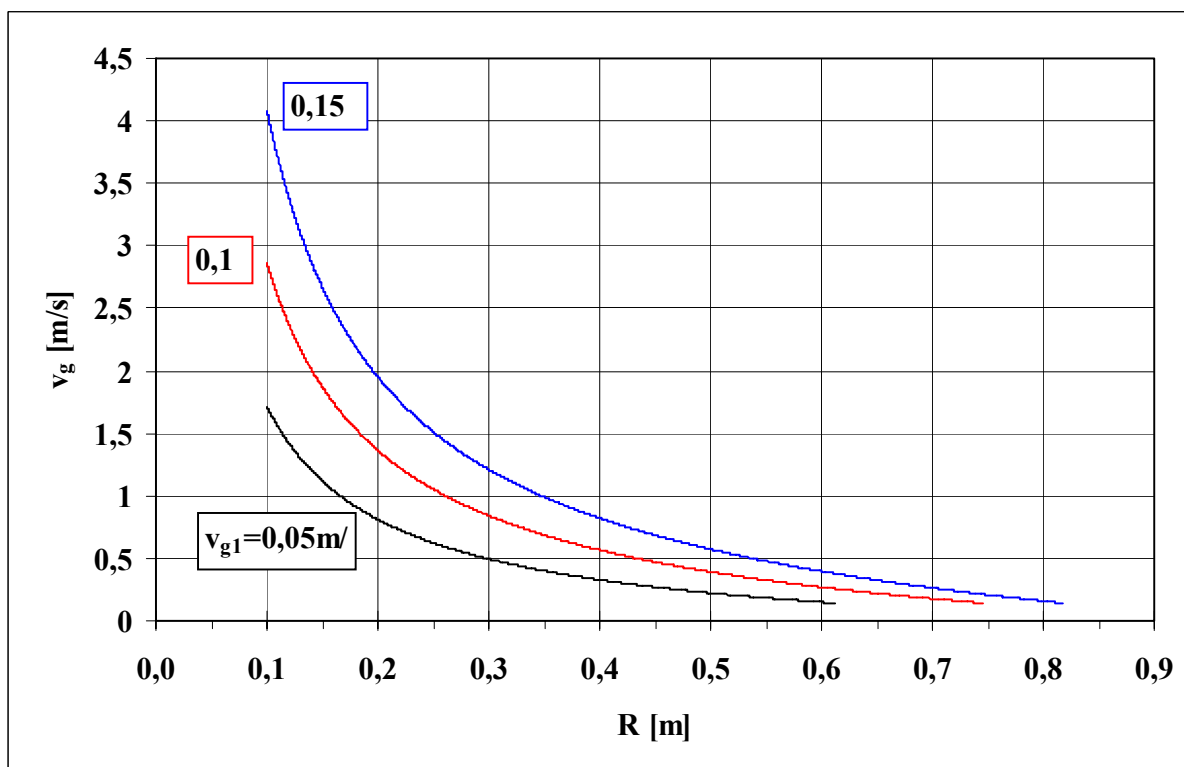


8.19. ábra. Nyomáseloszlás. Paraméter: a szállítóteljesítmény

A fluid emelő tartályában kialakuló „ H ” anyagoszlop magasságának változtatása alapvetően befolyásolja 8.19. ábrán látható $p(R)$ nyomás sugár menti változását. A többi paraméter állandósága mellett a levegősebesség, az anyagsebesség és a koncentráció görbék sugár menti változása elhanyagolható mértékű, a mintapéldában a fenti görbék szinte egybeesnek.



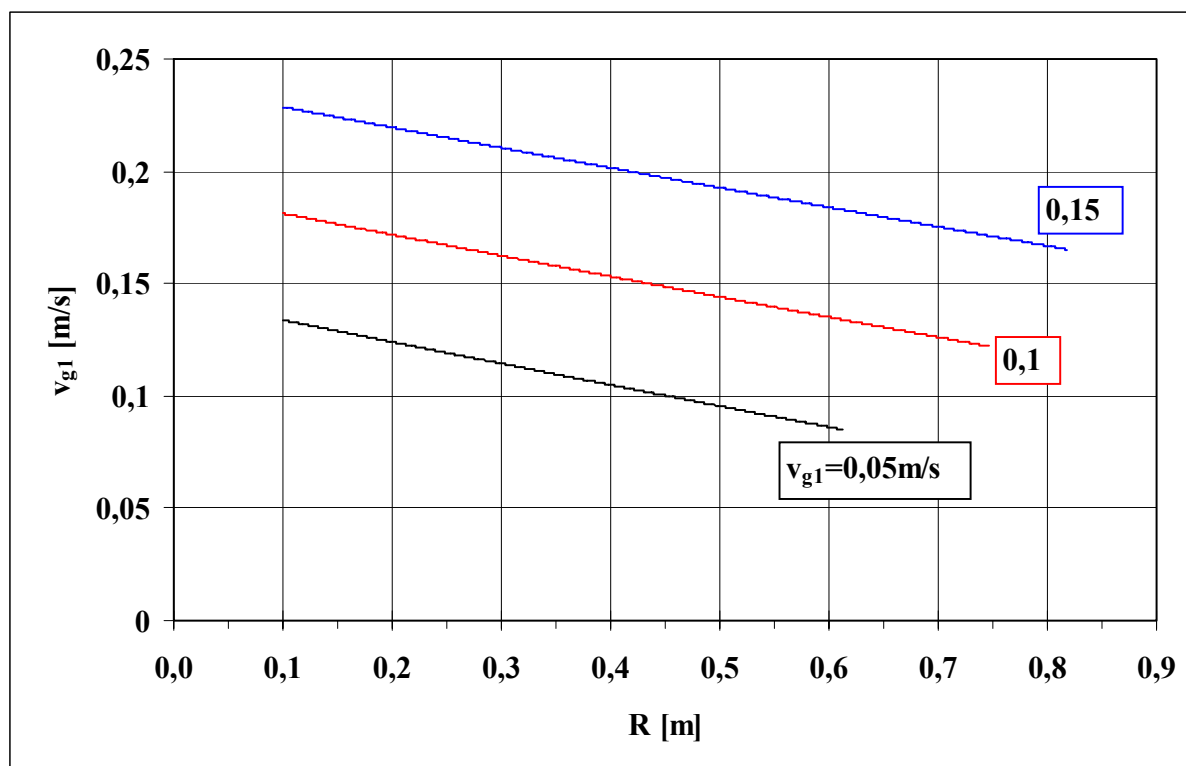
8.20. ábra. Sugárirányú anyagsebesség eloszlás. Paraméter: a lazítósebesség



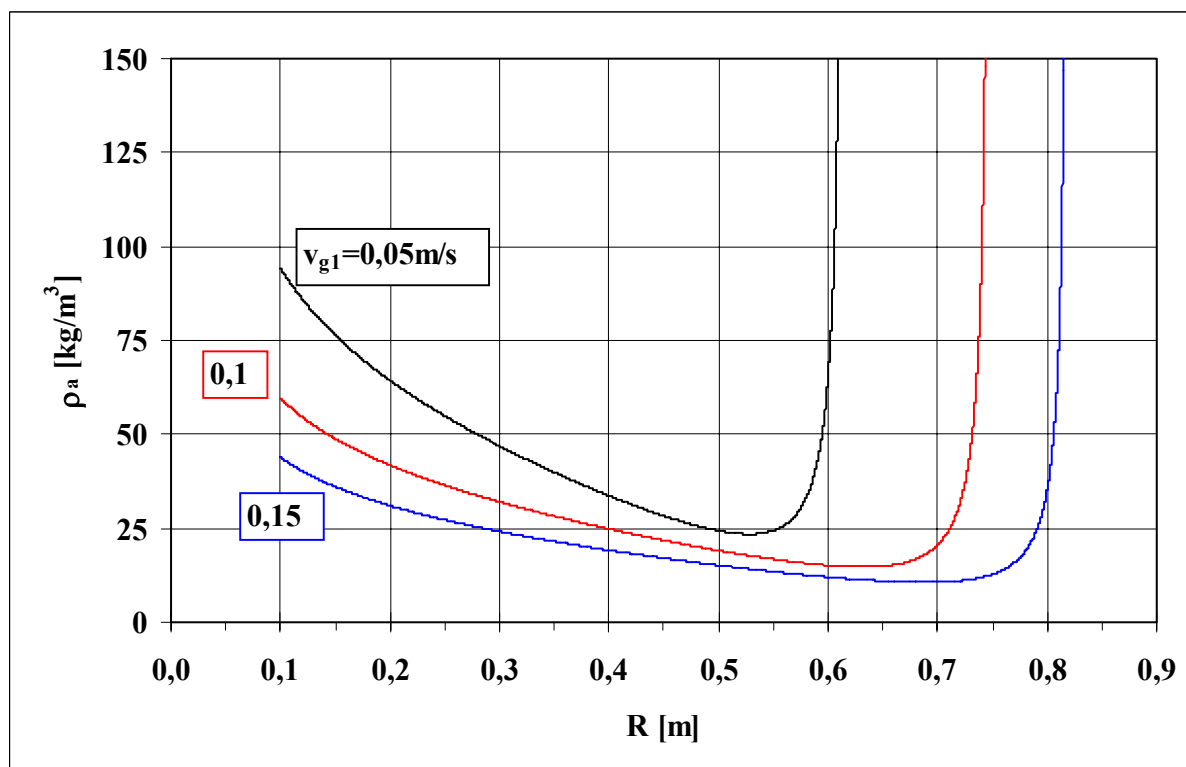
8.21. ábra. Sugárirányú levegősebesség eloszlás. Paraméter: a lazítósebesség

A „ v_{g1} ” lazítósebesség paraméter két jelentős hatással bír: egyrészt meghatározza a holt tér nagyságát, vagy ezzel egyenértékű módon a fluid emelő lazítórétegének működő tartományát, továbbá jelentősen befolyásolja a sugár menti $v_a(R)$ anyag sebesség (8.20. ábra), $v_g(R)$ levegő

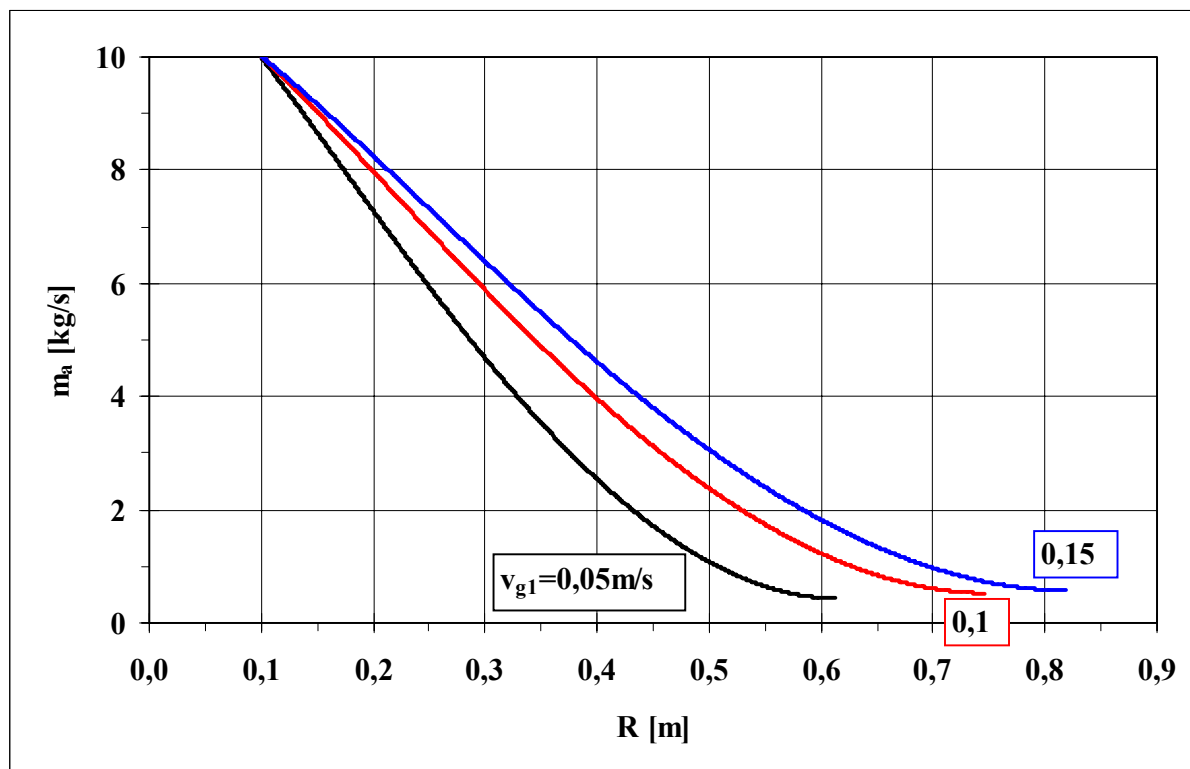
sebesség (8.21. ábra), $v_{g1}=f(R)$ lazító sebesség (8.22. ábra), $\rho_a(R)$ koncentráció (8.23. ábra) és $m_a(R)$ anyag tömegáram (8.24. ábra) eloszlás görbék alakját.



8.22. ábra. Lazítósebesség eloszlás. Paraméter: a lazítósebesség

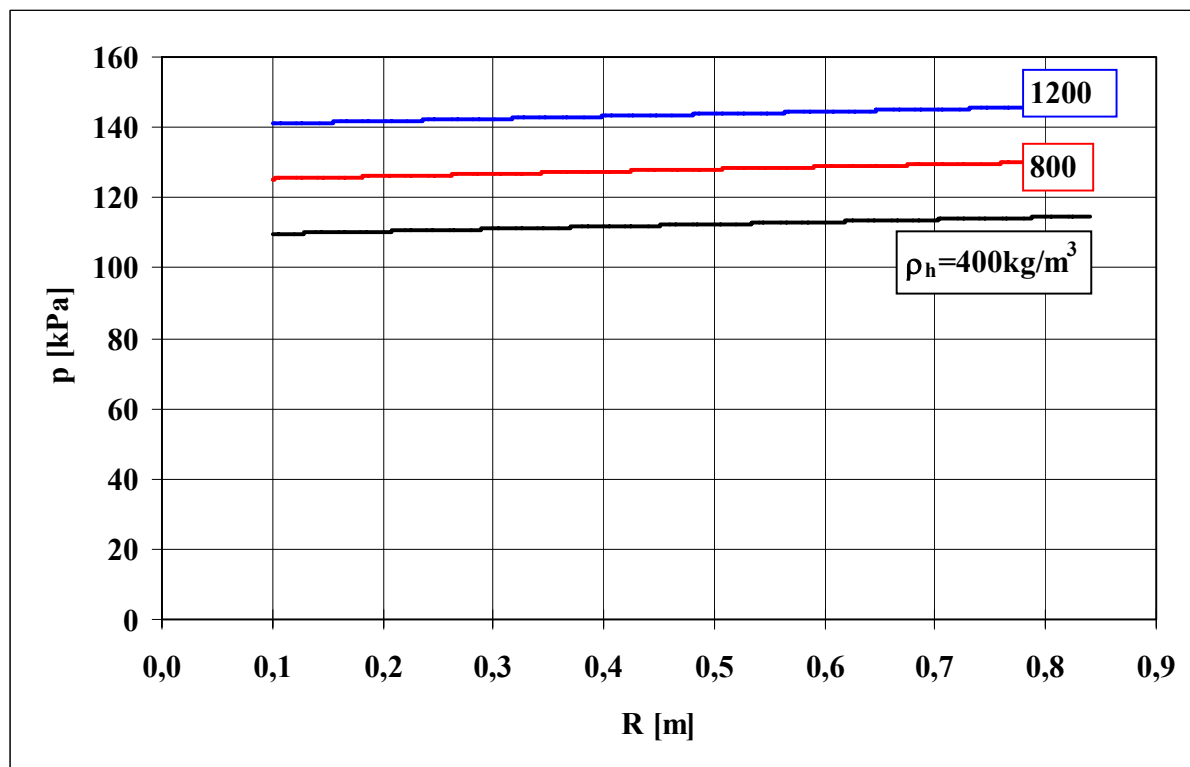


8.23. ábra. Koncentráció eloszlás. Paraméter: a lazítósebesség

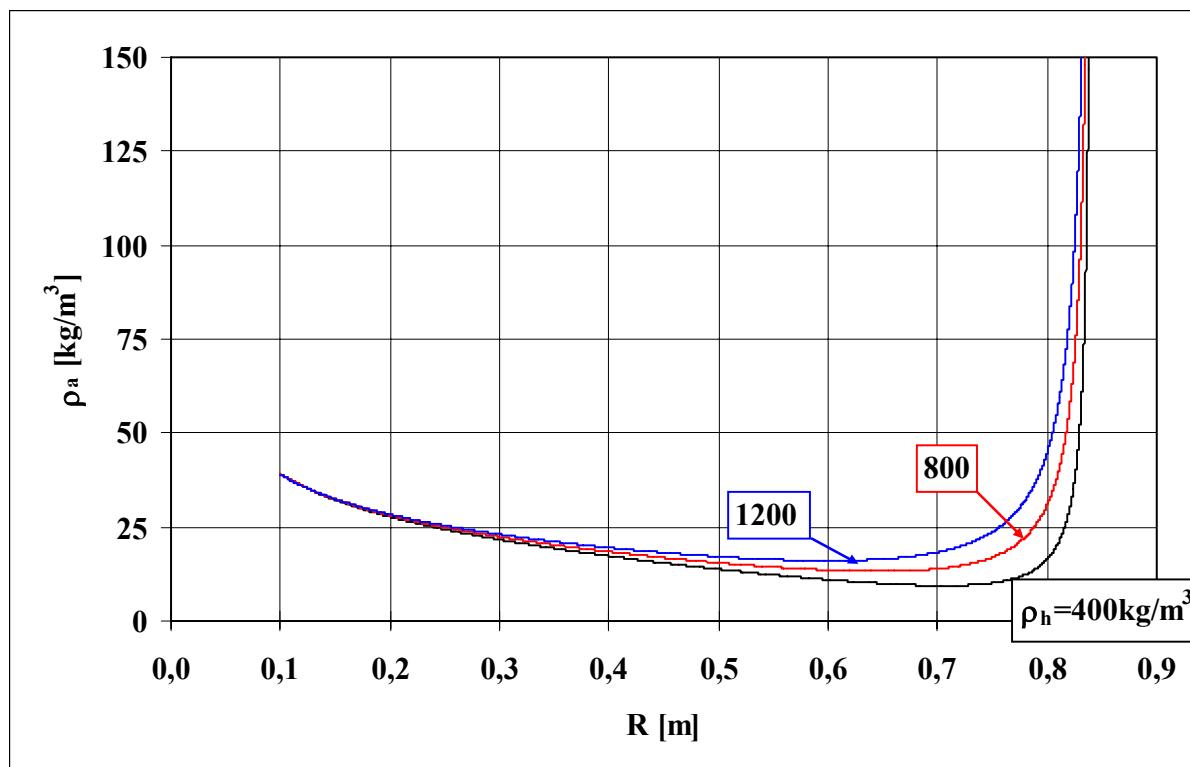


8.24. ábra. Szilárd anyag tömegáram eloszlás. Paraméter: a lazítósebesség

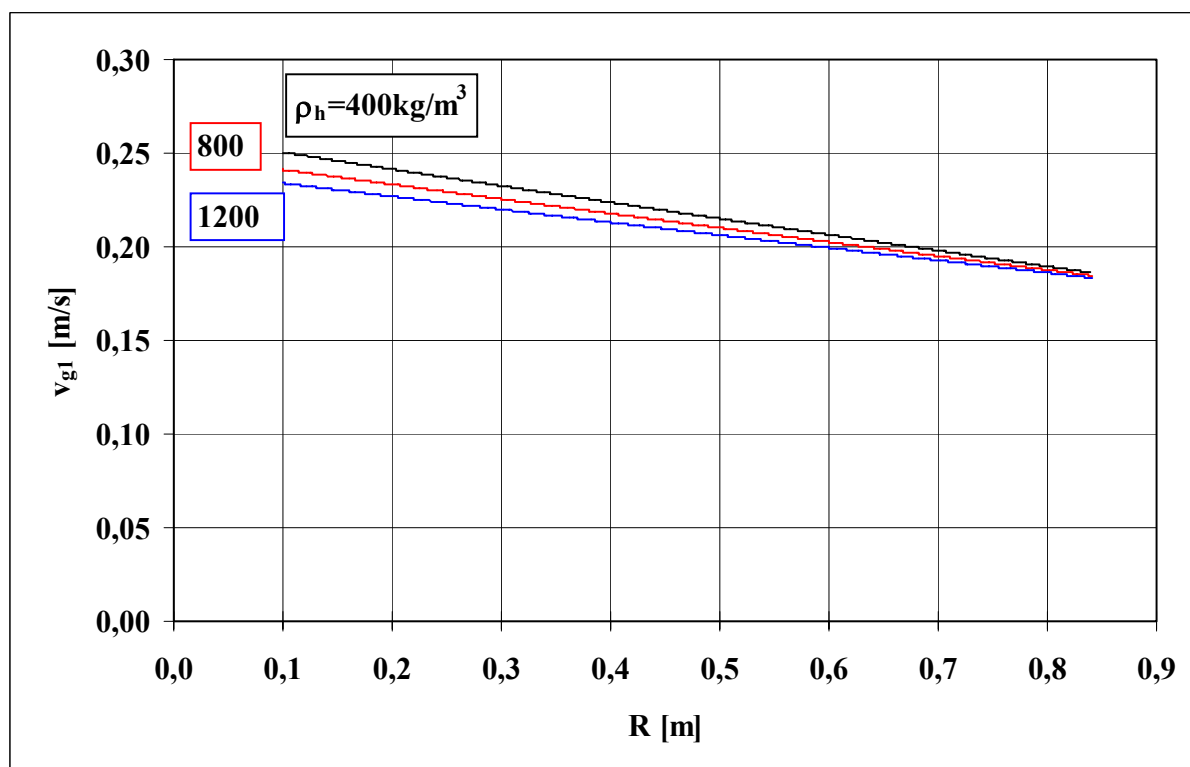
A „ ρ_h ” halmazsűrűség paraméter változtatása alapvetően befolyásolja a fluid emelő tartályában kialakuló nyomás nagyságát (8.25. ábra), kisebb mértékben hatással van a $\rho_a(R)$ koncentráció (8.26. ábra), a $v_{gl}(R)$ lazító sebesség (16. ábra) sugár menti változására is.



8.25. ábra. Nyomáseloszlás. Paraméter: a halmazsűrűség

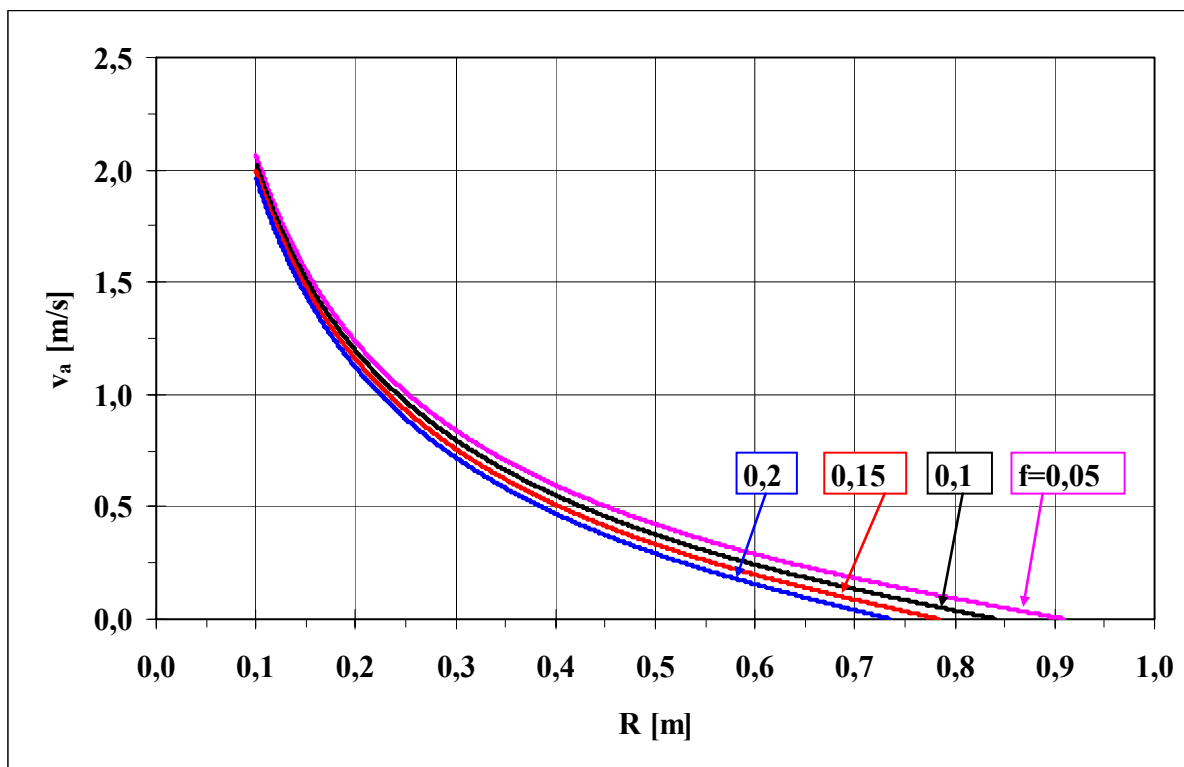


8.26. ábra. Koncentráció eloszlás. Paraméter: a halmazsűrűség

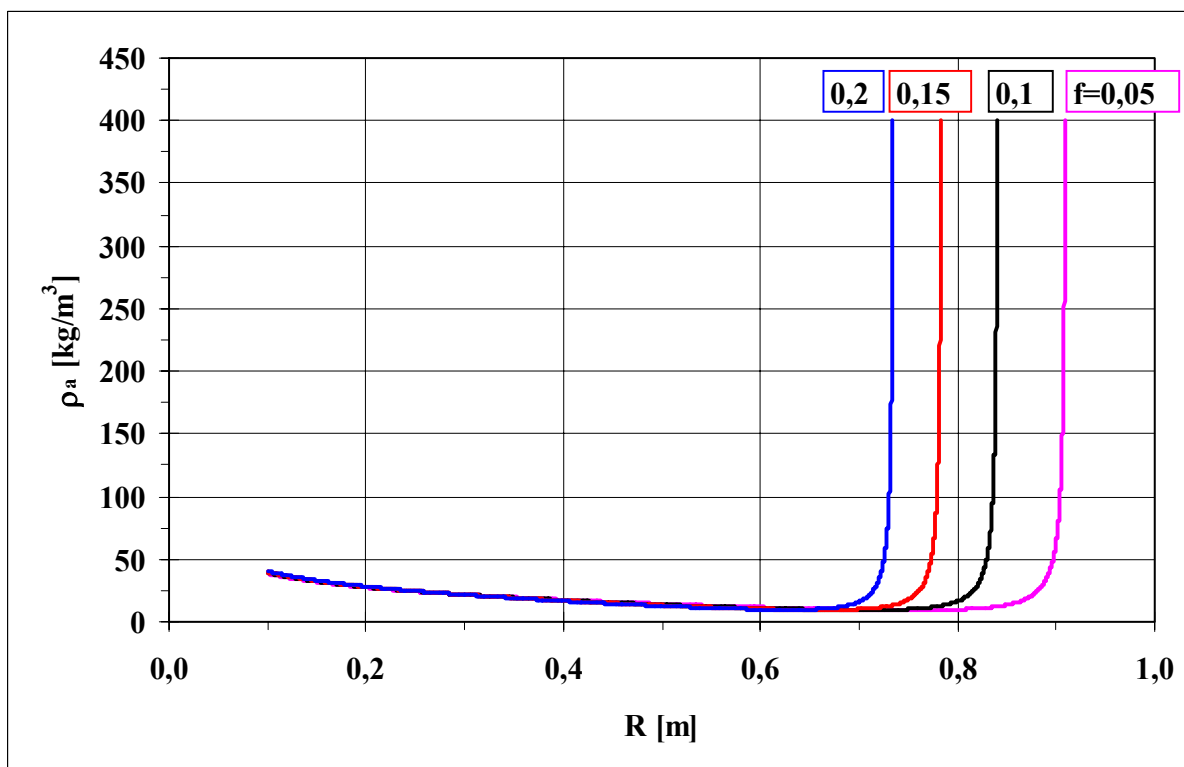


8.27. ábra. Lazítósebesség eloszlás. Paraméter: a halmazsűrűség

A sűrűlási tényező paraméter változtatása két jelentős hatással bír: egyrészt meghatározza a holt tér nagyságát, másrészt alapvetően befolyásolja az $v_a(R)$ anyagsebesség 8.28. ábrán látható és a $\rho_a(R)$ koncentráció 8.29. ábra szerinti sugár menti alakulását.

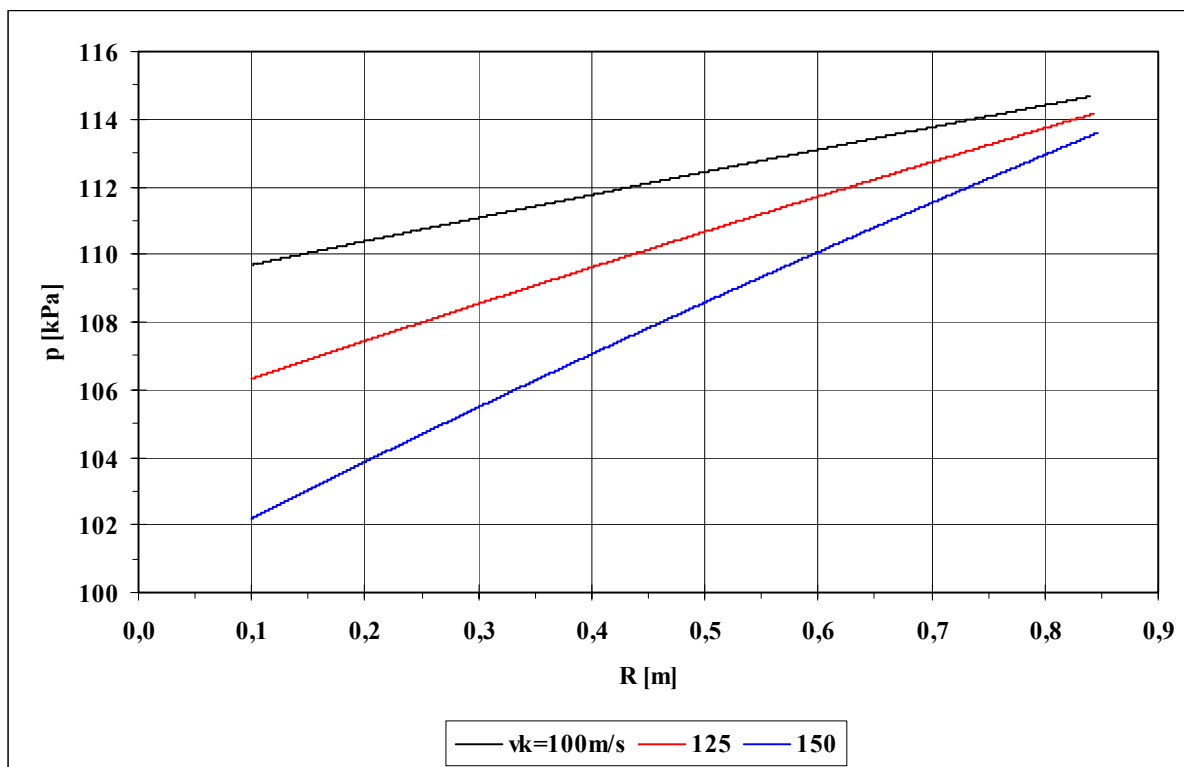


8.28. ábra. Sugárirányú anyagsebesség eloszlás. Paraméter: az anyagsűrűldási tényező

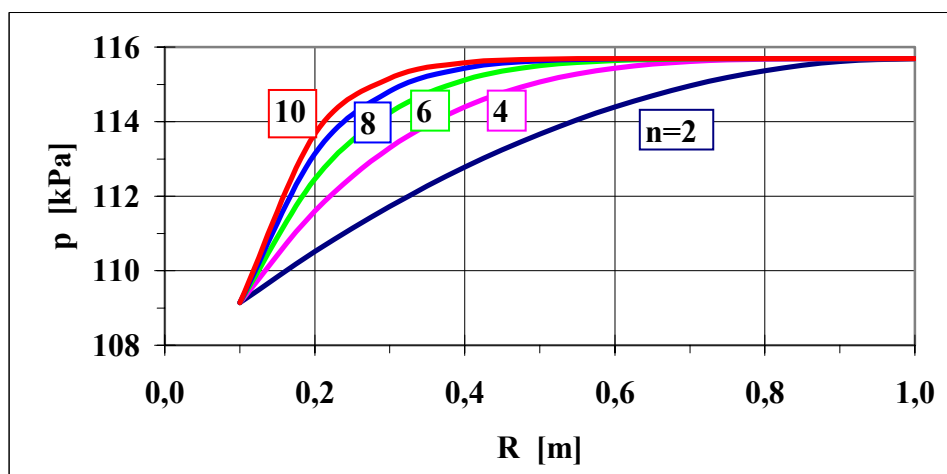


8.29. ábra. Koncentráció eloszlás. Paraméter: az anyagsűrűldási tényező

A „ v_k ” fúvóka kilépő sebesség paraméter értékének megváltoztatása alapvetően kihat a nyomás $p(R)$ 8.30. ábrán látható sugár menti változására. Természetesen a nyomás függvényt más alakban is előírhatjuk (lásd a 8.31. ábrát).



8.30. ábra. Nyomáseloszlás. Paraméter: a fúvókából kilépő primer levegőáram sebessége



8.31. ábra. Nyomáseloszlás függvény. Paraméter: a függvény „n” kitevője

A 8.31. ábrán látható nyomáseloszlás függvényt az alábbi alakban írtuk fel:

$$p = p_i \left[1 - C(R - R_i)^n \right] \quad (8.31)$$

ahol a „C” együttható:

$$C = \frac{1}{\left(1 + \frac{2 p_o}{\rho_{go} v_k^2} \right) (R_c - R_i)^n} \quad (8.32)$$

A számítás során szükség van még a függvény alábbi alakban írható deriváltjára:

$$\frac{dp}{dR} = -nC p_t (R - R_t)^{n-1} \quad (8.33)$$

A végső megoldás kísérleti úton nyerhető.