

1. A pneumatikus szállítás elvi alapjai

1.1. A pneumatikus szállítás fejlődése

Az anyagmozgatás technikai fejlesztésének egyik eredményeként a gravitációs, a mechanikus és a hidraulikus szállítórendszerek mellett megjelentek a légáramú, azaz pneumatikus szállítórendszerek. Ezekben zárt csővezetékben illetve csatornában létrehozott légáram poros, apró- vagy durvaszemcsés ömlesztett anyagot képes magával ragadni és a kívánt helyre szállítani. Ez a felismerés már a századforduló éveiben arra serkentette a géptervezőket, hogy hajón, uszályon érkező gabonaféleségek kirakására - a feladatot csak igen körülményesen megoldó mechanikus szállítóberendezések, vagy a költséges emberi munkaerő alkalmazása helyett - légárammal szállító berendezést: ún. pneumatikus szállítóberendezést létesítsenek.

Az ipari fejlődés során az egyre többféle - különböző tulajdonságú - poros ill. szemcsés anyag mozgatására a klasszikusnak tekinthető mechanikus anyagmozgató berendezések nem voltak minden esetben alkalmazhatók, mert nem mindig elégítették ki az újabb, egyre növekvő szállítási követelményeket. Többnyire nagy a helyszükségletük, a beruházási és a karbantartási költségeik, de a kezelésük is meglehetősen munkaigényes. Porlódó, könnyen töredező, aprózódó anyagfajták szállításánál a környezet nehezen szigetelhető el, a kis sűrűségű anyagok (gyapot, fűrészpor, hamu) szállításánál pedig az üzemük igen gazdaságtalan. Hosszabb vagy egymást keresztező, többszintű útvonalon és kisebb anyag tömegáramok esetén a mechanikus berendezések használata nagyon meggondolandó.

Az említettek miatt más, korszerűbb szállítóberendezésekről kellett gondoskodni. Előnyösebb megoldást a helyesen méretezett pneumatikus szállítóberendezés alkalmazásától várhatunk, mert ezek mentesek a fent ismertetett hátrányoktól.

A pneumatikus szállítóberendezések előnyei:

- Kis helyszükséglet, egyszerű berendezés, könnyű karbantartás, viszonylag alacsony beruházási költség,
- Nagy a berendezés üzembiztonsága,
- A berendezés teljesen zárt, nem szennyezi a környezet levegőjét, nincs porvesztés (ami egyes esetekben igen nagymérvű lehet),
- Kicsi a munkaerőigénye
- A közönséges szilárdanyag szállításon túlmenően a pneumatikus szállítóberendezéseket szemcsés szilárd anyagok hevítésére, hűtésére, szárítására, keverésére, osztályozására stb., azaz a technológiai folyamat szerves részeként is használják.
- Kiemelhető előnyként említhető, hogy a pneumatikus szállítóberendezések egyszerű eszközökkel automatizálhatók és vezérelhetők, ezért a folyamatos üzemű technológiák egyre inkább nélkülözhetetlen szállítóberendezésévé válik.

Közvetlenül az előnyök kiemelése után hangsúlyozni kell, hogy a jelenleg alkalmazott pneumatikus szállítóberendezések energiafelhasználása nagyobb, mint egyéb más jó hatásfokú berendezéseké. Az energiafelhasználás azonban jelentősen csökkenthető a pneumatikus szállítóberendezések helyes méretezésével és megfelelő szerkezeti kialakításával. Egyes különleges esetekben energetikailag még kedvezőbb is lehet a pneumatikus szállítás, mint egy

bonyolult mechanikus berendezésben a hagyományos anyagszállítás.

A gabonafélék rakodása során nyert kedvező tapasztalatok, valamint e szállítási mód különleges előnyei azt eredményezték, hogy az utóbbi néhány évtizedben a poros és szemcsés anyagot szállítóberendezések között mind jobban terjednek a pneumatikus szállítóberendezések különféle változatai. A pneumatikus anyagszállítás első klasszikus alkalmazási területén, a gabonatermékek szállításán kívül, több területen elterjedt:

- *Hőerőművekben* pernye, ágyhamu, salak, szénpor, darabos szén,
- *Malmokban* őrlemények és készárúk szállítására,
- *Építőiparban* cement, mészipor,
- *Vegyipari üzemekben* a gyártás folyamán előforduló porok (pl. műanyagok, műgyanta, nyersfoszfát stb.),
- *Öntődékekben* a száraz homok és adalékanyagok (szénpor, bentonit), sőt nedves formázásra alkalmas homok,
- *Mezőgazdaságban* a szemes terményeken kívül szalmas és szecskázott takarmány, növényvédő szerek, műtrágyák szállítására használják elsősorban, de a
- *Textil- és könnyűipar* számos más területén is mind gyakrabban találkozunk a légáramban történő ömlesztett szilárd anyagok szállítással.

A fenti - a teljesség igénye nélkül készült – felsorolásból is kitűnik, hogy már szinte minden iparágban használnak pneumatikus szállítóberendezéseket. Az iparban az egyik legnagyobb mennyiségben előforduló poranyag a cement, így a pneumatikus szállítás fejlődését, elsősorban a hazai viszonyokat elemezve e területen mutatjuk be.

A cement alapvető tulajdonsága, hogy nedvesség hatására megköt, hidratizálódik. Ez tehát azt jelenti, hogy más poros anyagokkal ellentétben a cementet egészen a felhasználásig minden nedvességtől, még a sűrített levegő nedvességtartalmától is meg kell óvni. Másrészt szállítás közben erősen porzik. Az elporzás viszont nemcsak veszteség, hanem a szilikózis veszélye miatt az egészségre is erősen ártalmas, ezért a szállítórendszernek zártnak kell lennie.

Mivel a pneumatikus anyagszállítás különféle módzatai a fenti alapvető feltételeket ki tudják elégíteni, így a cementipar és a feldolgozóipar (előgyártás, építőanyag ipar, építőipar) elsőként kapcsolódott be a pneumatikus szállítás kutatóinak, fejlesztőinek, használóinak, terjesztőinek sorába. Ez annál is inkább lehetséges volt, mert a cementpor - tulajdonságai, elsősorban fizikai anyagjellemzői alapján - jól szállítható száraz légáramban.

Ennek megfelelően a cement levegővel történő szállítására használjuk mind az alacsony koncentrációjú, azaz kis keverési arányú hígáramú-, mind a nagy koncentrációjú, nagy keverési arányú sűrűáramú pneumatikus szállítórendszereket. A **keverési arány** - mint a pneumatikus szállítás rendszerezésének, osztályozásának egyik alapvető jellemzője -, az egységnyi gáz tömegáramra (általában levegő tömegáramra) jutó anyag tömegáramot jelöli definíció szerint. A sűrűáramú pneumatikus szállítás elnevezés helyett a szakirodalomban több helyen a fluidizációs szállítás elnevezés használatos. A pneumatikus cementszállító rendszerekben alkalmazásra kerül zárt csővezeték, aerációs csatorna, Fuller szivattyú, fluidizációs nyomótartály, injektor és nem utolsósorban az anyagtároló tartályokban, silókban a léglazítás. Különösen a csővezetékben történő szállításnak van meg az az előnye, hogy minimális helyszükséglettel, szinte tetszőleges útvonalon, zárt rendszerben, kiporzás-, átrakás nélkül szállít az anyagleadó és fogadó pontok

között. Ennek különösen régi gyárak rekonstrukciójánál van nagy előnye.

Az üzemben belüli ömlesztett cementszállítás jelentőségét a magyar szakemberek korán felismerték. A Tatabányai Cement és Mészművek már 1928-ban üzembe helyezett egy vízszintes csővezetékkel szállító levegővel kiszolgáló Fuller szivattyút, mely hosszú éveken át megelégedésükre működött. Igaz, hogy a II. Világháború végéig ennél több nem is történt. Ennek részben gazdasági, másrészt háborús okai voltak.

A háború után a cementgyárak felújítása, majd korszerűsítése során ismét szerepet kapott a pneumatikus cementszállítás. Természetes, hogy az ötvenes években épült Hejőcsabai Cementgyárban is pneumatikus belső cementszállítást létesítettek. Ezek a berendezések pneumatikus szállítócsatornákat és még mindig Fuller szivattyút tartalmaztak. Csak az ötvenes évek során állították üzembe az első nyomótartályokat, melyek előbb „Cera” rendszerrel, a későbbiek „fluidizációs” rendszerrel dolgoztak. A cementgyárakban ettől kezdve általánossá vált a pneumatikus, s egyre inkább a sűrűáramú pneumatikus belső anyagmozgatás. A hazai üzemben belüli pneumatikus cementszállítás nagyságrendjének és a fejlődés ütemének érzékeltetésére szolgál az alábbi két adat: 1970-ben 2,5 millió tonna, míg 1985-ben 6,5 millió tonna cement üzemben belüli pneumatikus szállítására került sor. Meg kell jegyezni, hogy a fenti adatok a cement gyáron belüli egyszeri szállítását veszik alapul, holott esetenként ezt a mennyiséget többször is megmozgatják, (például először mint kölisztet, majd a cementmalom és a siló között, végül a siló és az ömlesztett cementkiadó között).

Az üzemek közötti ömlesztett cementszállítás csak a háború után indult meg. Az első ilyen hazai létesítmény a Látatlanban a Cementgyár és az Eternit Művek között 1951-ben megindult közúti cementszállítás volt. Ennek kedvező tapasztalatai, valamint a nemzetközi tapasztalatok az ország ömlesztett cementellátásának megoldását sürgette. Az építésügyi kormányzat központi irányítás alá vonta a kérdést. Mindenek előtt megtervezte a szállító járműveket és gondoskodott azok legyártásáról. Amíg az első szállítójármű nyomótartálya „Cera” rendszerű ürítéssel működött, addig a tipizált és sorozatban gyártott közúti és vasúti járművek már „fluidizációs” tartállyal vannak felszerelve. A közúti cementszállító járműveket 8 és 15 tonna teherbírással a Csepel Autógyár, a vasúti cementszállító járműveket pedig a Győri Vagongyár, a Székesfehérvári Járműjavító Vállalat (55 tonnás), majd későbbiekben a lengyel ipar (27 tonnás) gyártotta. A cementszállító járműveket az Építőipari Szállítási Vállalat kezeli, diszponálja, gondoskodik karbantartásáról és üzemeltetéséről. Ennek az országos hálózatnak a kiépítése tette lehetővé az ömlesztett cementellátás általános elterjedését, minek során az összes telepített elemgyár, betongyár, házgyár és közepes, vagy ennél nagyobb építési munkahely ma már kizárólag ömlesztett cementet használ.

Az elvégzett gazdaságossági számítások azt mutatják, hogy hazai viszonylatban a közúti szállítás 80 km távolságig gazdaságos. Ennél nagyobb távolságra a vasúti szállítás jöhet szóba. Miután az iparvágánnyal nem rendelkező, főleg kisebb fogyasztókat gazdaságosan csak közúti járművel lehet kiszolgálni, így meg kellett oldani a cementgyáraktól távolabb eső területek közúti cementellátását biztosító ún. Cement-reléállomások hálózatát. A reléállomások egyrészt a felhasználás súlypontjában vannak, másrészt mind vasúton, mind közúton jól kiszolgálhatók.

Az ömlesztett cementellátás programjának megvalósításához az országos hálózat és szervezés mellett mindenekelőtt ki kellett fejleszteni a cementsilókat és a biztonságos

üzemeltetésükhöz szükséges elemeket: lazítófenék, elzáró szerkezet, porszűrő zsák, szintjelző stb.

A pneumatikus szállítás fejlődése általában - amint az a pneumatikus cementszállításnál is történt -, a hígáramú, nagy sebességű, kis keverési arányú szállítástól a sűrűáramú, kis sebességű, nagy keverési arányú szállítás irányában halad. E minőségi változás mellett - amikor is a levegővel kevert poros anyag a folyadékhoz hasonló tulajdonságokat vesz fel (fluidumként viselkedik) -, egyre intenzívebb mennyiségi változás is mutatkozik, ugyanis a legújabb feladatok megoldásakor nagyobb méretekkel (nagyobb csőátmérővel, szállítási távolsággal, emelési magassággal) találkozunk és egyre nagyobb anyag tömegáramok valósítandók meg.

A légáramban történő anyagszállítás nem a jól bevált mechanikai szállítóberendezéseket helyettesítő eszköz, hanem alkalmazását általában különleges adottságai indokolják. Gyakran meglévő üzemek teljesítőképességének növelésére nyújt lehetőséget, mert egy-két szállítócső - az építészeti adottságokat figyelembe véve, akár a mennyezet alatt vezetve - még olyan helyen is elfér, ahol más szállítóberendezés elhelyezésére már nincs mód. Más esetben a létesítendő épület lehet lényegesen kisebb, az üzem pedig portalan és tiszta. Például a mechanikus szállítóeszközökkel ellátott öntöde épületének tekintélyes részét a szállítóberendezések foglalják el. Jelentős beruházási költség takarítható meg, ha az öntödei anyagok mozgását zárt csővezetékben végezzük.

Szívóüzemű pneumatikus szállítóberendezéssel különböző helyekről egy helyre, - akár egy időben, akár a feladat igényeihez igazodva megfelelő időbeni ütemezés szerint felváltva - nyomóüzemű berendezéssel pedig egy központi feladóállomásról több különböző helyre szállíthatunk. Így egy berendezéssel egészen változatos - szükség szerint üzem közben változtatható - útvonalon dolgozhatunk. Az irányváltást megoldó váltóberendezések egyszerű eszközökkel megvalósíthatók, vezérlésük és előírt program szerinti távműködtetésük az elektronizáció térhódításával egyre inkább megoldódik, a poros, szemcsés anyagokat kezelő, feldolgozó és szállító üzemek korszerű technológiai folyamatainál éppen ezért mindinkább előtérbe kerülnek.

A szívóüzemű pneumatikus szállítóberendezések igen nagy előnye, hogy segítségükkel a szállítás teljesen portmentes lehet. A szívás alatt álló szállítócsőből a szállított por semmiképpen nem jut ki a szabadba, legfeljebb - a szállítócső tökéletlen zárása következtében - külső levegő jut a csőbe. Ilyen berendezés alkalmazásával elkerülhető a poros anyagot szállító mechanikus berendezéssel együtt járó portalanító, porelszívó berendezés. Szívóüzemű pneumatikus szállítóberendezés ezek szerint egy szállító és egy portalanító berendezés feladatát látja el. A berendezés gazdaságosságának számítását ennek figyelembevételével kell elkészíteni.

A légáramban történő anyagszállítás rohamos elterjedését - az eddigiekben felsorolt kedvező tulajdonságai ellenére - akadályozta, hogy hiányzott a kellő elméleti alátámasztás. Ezért kezdetben a szállítóberendezések létesítésénél a tervező csak jó műszaki érzékére támaszkodhatott.

A pneumatikus szállítóberendezések méretezéséhez és a berendezés gazdaságos üzeméhez a gáz-szilárd anyagot tartalmazó kétfázisú keverékek áramlási viszonyainak ismerete szükséges. Ezért számos kutatóintézet kezdett laboratóriumi és ipari berendezésen végzett mérésekkel alátámasztott elvi vizsgálatot. A szakirodalomban kezdetben megjelent munkák

száma igen kevés. A kétfázisú áramlással foglalkozó kutatómunka során számos részlet tisztázódott és egyre fejlődő, egymást kiegészítő, de nem ritkán egymásnak ellentmondó elméletek láttak napvilágot. A legjelentősebbekről röviden beszámolunk.

A század elején a húszas-harmincas évekig a tervezők saját tapasztalataikon kívül leginkább csak Gasterstädt gabonával végzett kísérleti kutatási eredményeire támaszkodhattak és a Gasterstädt-féle elmélet alapjait próbálták más anyagokra is kiterjeszteni. 1924-ben Gasterstädt [1] a nyomásesések - a csővezetékben anyagszállításkor illetve a tiszta gáz (legtöbbször levegő) áramlásakor fellépő nyomásesések - viszonyát tartotta jelentősnek. Gabonaszállítás terén Segler [2] 1951-ben megjelent értékes könyve érdemel figyelmet, amelyben a szerző húsz éves kutatási eredményeit foglalja össze. Elméletében a tiszta gáz áramlás csősúrlódási tényezőjét terjesztette ki, illetve általánosította az anyagszállításra. Pernye és szénpor szállítás területén Uszpenszkij könyve és szakcikkei emelkednek ki, amelyek ennek a súlyponti feladatnak számos részletkérdését tisztázzák. A cementszállítás területéről a Grinyev és társszerzői [3] által írt könyv érdemel említést. Harin és Molstad 1949-ben dolgozatukban a szállítás közben fellépő járulékos nyomásesés fogalmát vezették be. Ebből az elvből kiindulva Barth [4, 5] és számos követője rengeteg elvi részletet és gyakorlati kérdést tisztázott [6, 7]. A Barth-féle elmélet alapja, hogy a szállítás járulékos nyomásesése a csőfalon járulékos csúsztatófeszültség formájában számítható. A különböző szerzők által javasolt számítási módszerek korlátjaira, meglevő hiányokra mutatott rá Siegel [8] és Flatow [9] igen nagyszámú mérési anyag publikálásával. A szállított anyag sebességének mérésében Uszpenszkij [10], Mesch [11], az anyagsebesség és a nyomásesések számításának kapcsolatában Palcev [12] eredményei jelentősek.

Az utóbbi évtizedekben a fejlődés ugrásszerűvé vált, amit a szakirodalom, a kutatók számának jelentős növekedése is igazol (Bohnet, Buhrke, Lippert, Muschelknautz, Rausch, Vollheim, Weber...). E fejlődés alapja, hogy világszerte kialakultak a téma kutatóbázisai: Braunschweig, Budapest, Drezda, Karlsruhe, Moszkva, Ogyessza, Osaka, Stuttgart, Szófia, Zürich, hogy a teljesség igénye nélkül néhányat említsünk, továbbá kifejlődött egy sor komoly műszaki fejlesztési bázissal rendelkező cég: BAYER AG GATTYS, BRAUN-ANGOTT, BÜHLER-MIAG, FUMOS, GERICKE, INTRANSZMAS, MACAWBER, ZVVZ MILEVSKO, MITTELMANN, SIETAM, STURTEVANT, WAESCHLE, WARREN SPRING LABORATORY stb., amelyek nagymértékben hozzájárultak a pneumatikus szállítás világméretű, egyre gyorsuló ütemű térhódításához.

A pneumatikus szállítás magyarországi fejlődését az 1.1. táblázat mutatja.

1.1. táblázat. Magyarországon szállított évi mennyiségek ezer tonnában

Üzemen belüli szállítás	1965	1975	1985
Építőipar	2520	4340	6500
Erőművek	4000	4800	6500
Élelmiszeripar és mezőgazdaság	4100	5780	8300
Alumíniumipar	240	500	2000
Vegyipar	140	430	1000
Könnyűipar (textil és fa)	90	120	190

Gépipar	10	40	60
Összesen	11100	16010	24550
Üzemek közötti szállítás (tartálykocsival)	1965	1975	1985
Cement és mész	1000	2300	4100
Timföld	100	300	1100
Cukor, liszt, keveréktakarmány		1000	4000
Műanyag			100
Könnyűipari termék			60
Összesen	1100	3600	9360

A szakirodalom tanulmányozása és a fejlődési trend becslése alapján várhatóan a kutatási-fejlesztési munkák a pneumatikus szállítás, ezen belül pedig elsősorban a sűrűáramú pneumatikus szállítás legfontosabb paramétereinek - anyag tömegáram, keverési arány, fajlagos energiafelhasználás - javítása irányába mutatnak, mind az általános érvényű alapvető fizikai törvényszerűségekre épülő elmélet megteremtése, mind pedig az előzőt igazoló széleskörű kísérleti kutatómunka terén. Ennek megfelelően lényeges fejlődésnek kell bekövetkeznie a pneumatikus szállítóberendezések egészének és benne az egyes berendezés-elemeknek illetve géptípusoknak minőségi paramétereiben, ami döntő kihatással lesz további elterjedésükre és használhatóságukra is.

A pneumatikus szállítás fejlődési irányaként az előzőeken túlmenően a nagy teljesítőképességű és a részben vagy teljesen automatizált pneumatikus anyagszállítóberendezések és rendszerek elterjedése jelölhető meg. Ennek következtében fokozott mértékben kerül sor a hazánkban még kevésbé alkalmazott folyamatos működésű, automatizálható szállítórendszerek különböző változatainak bevezetésére, amelyek az ömlesztett poros, szemcsés illetve darabos anyagok fogadását, tárolását, szállítását, bizonyos technológiai műveleteket (keverés, szárítás, adszorpció stb.), valamint a környezet védelme érdekében szükséges portalanítás, porleválasztás, porszűrés feladatait egyaránt megoldják.

1.2. A pneumatikus szállítóberendezések osztályozása

A kétfázisú áramlás, ezen belül a gáz-szilárdanyag áramlás, azaz a pneumatikus szállítás igen sokféle alakban fordul elő. A lehetséges változatok száma meglehetősen nagy, hiszen a tiszta szállítóközeg (levegő, gáz) tulajdonságain túl a csővezeték geometriája és minősége (anyaga, érdessége), valamint a szállított szilárd anyag tulajdonságai is a szállításat lényegesen befolyásoló jelentős paraméterek. Már önmagában a szilárd és gáz fázis keveredése, a keverési arány is számos különböző változatot eredményez.

A **szállító közeg** legfontosabb jellemzői: a nyomás, hőmérséklet, sűrűség, viszkozitás, sebesség.

A **szállított szilárd anyag** legfontosabb olyan jellemzői, amelyek a szállításat jelentősen befolyásolják: a tömör anyag illetve az ömlesztett anyagalmaz sűrűsége, a szemcseméret, szemcsealak, belső súrlódás, keménység, képlékenység, ütközési tényező, rézsűszög, szilárd anyag koncentráció, anyagsebesség, hézagterfoghat, nedvességtartalom, fluidizációs tulajdonság.

gok.

A **szállítócsőre** jellemző legfontosabb adatok: a cső anyaga, a gyártás módja (varratnélküli, hosszvarratos, spirálvarratos; kopóbéléses elemek), a belső csőátmérő, a vízszintes és függőleges egyenes szakaszok hossza, az érdesség, az ívek száma, térbeli helyzete, méretviszonyai, a külső súrlódás, keménység, rugalmasság stb.

A felsorolt paraméterek mellett a pneumatikus szállítóberendezések, szállítórendszerek kialakításakor további - konstrukciós, szabályozási, vezérlési, automatizálási, üzembiztonsági, környezetvédelmi - szempontok növelhetik a különböző változatok számát.

A pneumatikus szállítóberendezések osztályozása, rendszerezése többféleképpen lehetséges.

<i>A szilárdanyag koncentrációja szerint:</i>	<ul style="list-style-type: none"> - hígáramú - sűrűáramú - átmeneti vagy vegyes állapotú
<i>A működési elv szerint:</i>	<ul style="list-style-type: none"> - szívóüzemű - nyomóüzemű - vegyes üzemű - nyitott rendszerű - zárt rendszerű
<i>A szállítócső helyzete szerint:</i>	<ul style="list-style-type: none"> - vízszintes - függőleges (felfelé vagy lefelé szállítás) - ferde (emelkedő vagy lejtő)
<i>A légszállító gép nyomása szerint:</i>	<ul style="list-style-type: none"> - kis nyomású - közepes nyomású - nagy nyomású
<i>Az üzemmód szerint:</i>	<ul style="list-style-type: none"> - szakaszos működésű - folyamatos működésű
<i>Az automatizálás foka szerint:</i>	<ul style="list-style-type: none"> - kézi működtetésű - fél-automatikus - automatikus működtetésű

1.2.1. A szilárdanyag koncentrációja szerint

Hígáramú pneumatikus szállítás esetében zárt csővezetékben a légszállító gép (ventilátor, fűvő vagy kompresszor) segítségével nagy sebességű légáramot hozunk létre. Ebben a nagy sebességű légáramba beadagolt szemes vagy poros anyag szemcséit a légáram magával ragadja. Az anyagszemcsék meglehetősen nagy sebességgel haladnak, ezért még nagy anyag tömegáramok esetében is az egyes szemcsék távol vannak egymástól. A hígáramú szállítás legfőbb jellemzője, hogy a szállított anyagszemcsék a cső falához ütközve, repülve haladnak. A nagy sebességű légáramban közel homogén eloszlású, egymás mozgását jelentősen nem

befolyásoló szemcsék elkülönítve - egyedi szemcsékként - vizsgálhatók, a részecske mozgása kvázi-stacionáriusnak tekinthető. Az előállt levegő-anyag keverék meglehetősen „híg” a ritkán jelenlévő szemcsék következtében. Ezért nevezik ezt a ritka anyagáramú szállítást hígáramú pneumatikus szállításnak. A szállítás jellemzésére legelterjedtebben használatos fogalom a „ μ ” keverési arány, ami definíció szerint a szilárd anyag és a levegő tömegáramainak viszonya, hígáramú szállításnál általában $\mu < 10$. Jellemezhető a hígáramú szállítás a szilárd anyag térfogat koncentrációjának $\varepsilon_a < 0,03$ értékével is.

Sűrűáramú (fluidizációs) szállításnál a szilárd anyagszemcsék kisebb-nagyobb halmazokba tömörülve haladnak a csővezetékben. A szemcsék egymásra hatása már nem hagyható figyelmen kívül. Az anyaghalmazok sűrűsége és sebessége is változó, az áramlás többnyire instacionárius. Sűrűáramú szállításra csak a poros, esetleg nem túl nagyméretű szemcsékből álló ($d < 5$ mm) anyag alkalmas. Igen előnyös, ha a szemcsézet szempontjából az anyag közel homogén. A sűrűáramú pneumatikus szállítás folyamán a szállítandó anyagot levegővel (vagy gázzal) keverve a folyadékokhoz közelálló tulajdonságokkal rendelkező „sűrű” keveréket hozunk létre, amely zárt csővezetékben sűrített levegő segítségével tetszőleges irányban szállítható (zártcsövű sűrűáramú pneumatikus szállítás), vagy kis esésű nyitott vályúban, csatornában közel vízszintesen elfolyatható (pneumatikus vagy fluidizációs szállítóvályú illetve szállítócsatorna, aerációs csatorna). Az ilyen szállításra jellemző a kis levegő- és anyagsebesség, a nagy nyomásesés és keverési arány ($\mu \gg 10$), valamint a nagy szilárdanyag térfogat koncentráció ($\varepsilon_a \gg 0,03$). A fluidizációs szállítás során létrehozott anyag-levegő keverék aránya többszöröse (esetleg nagyságrendekkel is!) a hígáramú pneumatikus szállításnál kialakuló anyag-levegő keverék arányának, ezért a fluidizációs szállítást sűrű anyagáramú pneumatikus szállításnak is szokták nevezni.

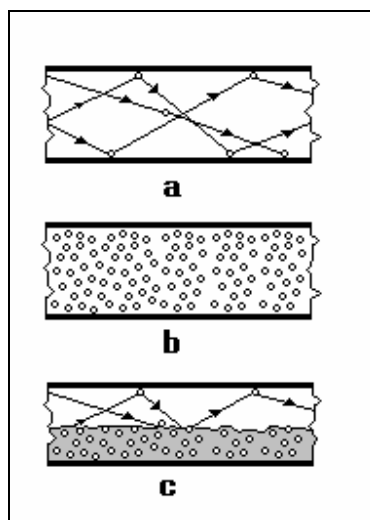
Sűrűáramú pneumatikus szállításra általában csak a fluidizálható anyagok alkalmasak. Nem fluidizálhatók az agglomerációra hajlamos, ragadós, tapadó, összeálló, vagy a nagyon különböző szemcseméretű halmazból álló anyagok (pl.: a nedves répaszelet, vagy olyan műanyagtörmelék, melyben 10 μ m-es porszemcsék és 10 mm-es szemek is találhatóak.), továbbá a nedves porok.

Átmeneti (vagy vegyes) állapotú a szállítás, ha a szállítócsőben a hígáramú és a sűrűáramú szállítási képre jellemző állapot egyidejűleg alakul ki. Pl.: a vízszintes cső aljára rakódott szemcsék kis sebességgel sűrűáramban haladnak, felette pedig nagy sebességű, hígáramban mozgó réteget találunk.

Az 1.1. ábra vízszintes csőben mutatja az anyag elhelyezkedését különböző szilárd anyag koncentrációk, azaz különböző szállítási állapotok esetén.

Az 1.1. a.) ábrán hígáramú pneumatikus szállítás során az ütközve, pattogva röppölő anyagrészecskék pályája látható. A kevés számú szemcse a szállítócsőben gyakorlatilag szabadon mozog, azaz a szemcsék egymásra hatása jó közelítéssel figyelmen kívül hagyható. A szemcsék csőfalhoz és esetlegesen egymáshoz ütközése véletlenszerű esemény, melyeknél a determinisztikus sajátságok hiányoznak, így a pillanat értékek előre megadása nem lehetséges. Az ütközések idő- illetve hely szerinti változása nem determinálja a következő idő pillanatban illetve más helyen adódó értékeket. Az ütközések és így bizonyos fokig a szemcsék röppályája

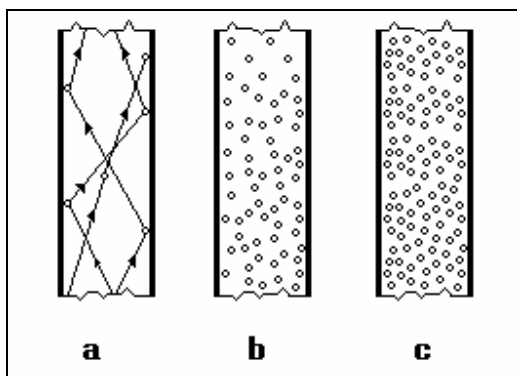
valószínűségi törvények szerint változnak és ezért ezeket sztochasztikus eseményeknek hívjuk.



1.1. ábra

Az 1.1. b.) ábra a sűrűáramú pneumatikus szállítás áramképét mutatja. Itt a keverék szinte teljesen betölti a csövet, de az anyagalmaz sűrűség- és sebességeloszlása egyaránt inhomogén.

Az 1.1. c.) ábrán az átmeneti állapotú pneumatikus szállítás áramképén jól elkülöníthető a vízszintes csővezeték alsó részén kis sebességgel csúszva haladó nagy sűrűségű anyagalmaz- és a felül nagy sebességgel ütközve, pattogva hígáramban mozgó szemcsék tere.



1.2. ábra

Az 1.2. ábra a függőleges csőben kialakuló áramképeket illetve az anyag elhelyezkedését mutatja.

Az 1.2. a.) ábra szerinti kép teljesen megegyezik a vízszintes hígáramú pneumatikus szállításnál bemutatottal.

Az 1.2. b.) ábrák, azaz a sűrűáramú pneumatikus szállítás képei szintén hasonlóak, talán

annyi különbség adódik, hogy a gravitációs erőternek a függőleges csőben nincs a véletlenszerűen kialakuló tengelyszimmetriát megbontó hatása, míg vízszintes cső esetén az erőter hatására alul az anyag halmazsűrűség eloszlás nagyobb, illetve az anyagsebesség eloszlás valószínűsíthetően kisebb értékei adódnak.

Az 1.2. c.) ábra szerinti átmeneti állapotú szállításra jellemző kép jelentősen eltér a vízszintes csőnél bemutatottól, mivel itt - függőleges csőben - szintén eltűnik a gravitációs erőter kitüntetett szerepe, s így az anyaghalmaz-sűrűség eloszlás fal közelében kialakuló nagyobb, illetve az anyagsebesség eloszlás kisebb értékei valószínűsíthetők.

A híg- és sűrűáramú szállítás a szállított anyag és szállító gáz (levegő) sebességekben nagyságrendileg a következők szerint különbözik egymástól. A sűrűáramú szállítás során a keverék 1 - 8 m/s sebességgel továbbítható. Hígáramú pneumatikus szállításnál ennél sokkal nagyobb sebességekre van szükség (15 - 30 m/s szállító levegő sebességre), mert kis sebességnél az anyagszemcsék lerakódnak és a szállítócső eldugul. Átmeneti állapotú szállítás - mely csak egyes anyagfajtáknál alakulhat ki - a szállítás sebessége az előző két érték közé esik.

A sűrűáramú szállítási állapotok sokkal változatosabb képet mutatnak, mint a hígáramú szállításé. Az ismert legfontosabb ilyen sűrűáramú szállítási állapotok a következők:

- csomós és pászmás szállítás
- buckás szállítás
- dugós szállítás
- toló szállítás
- fluidizációs szállítás

Csomós és pászmás szállítás

A csomós és pászmás szállítást a hígáramú pneumatikus szállításból fejlesztették ki. Ez a szállítási állapot akkor lép fel, ha finom szemcsés anyagnál, kis levegősebesség esetén az egyensúlyi helyzethez tartozó keverési arányt - mint határhelyzetet - túllépjük, azaz az egyensúlyi helyzetbeli állandó anyag tömegáram mellett lecsökkentjük a levegő tömegáramot. Ebben az esetben a vízszintes cső alján anyaglerakódások és pászmák alakulnak ki, amelyekben a lerakódott szilárd anyag gördülve vagy csúszva mozog, kisebb sebességgel mint a fölötte repülő részecske. A finom szemcsés anyagok függőleges csőben fonalas, vízszintes csőben pedig inkább pászmaszerű összeállásra hajlamosak. Az összeállt, összetapadt anyaghalmazok és csomók kiválhatnak az áramlásból, mivel lebegtetési sebességük nagyobb, mint az egyes szemcsék lebegtetéséhez szükséges sebesség. A pászma körüli szabad keresztmetszeten hígáramban szállított nagy sebességű szemcsék ütközéseik révén mozgási energiájuk egy részét átadják a pászmának és a levegő súrlódásával együtt a pászma „hajtóerejét” szolgáltatják. Ha a pászma mérete nő, akkor a szabad csőkeresztmetszetben a levegő sebessége megnő és így a pászma határfelületéről a szemcséket a levegő magával ragadja. Megfelelően választott légszállító gép esetén egy meghatározott pászmavastagság stabilizálódhat. Mindkét szállítási állapot kvázistacionáriusnak tekinthető, a szemcseeloszlás pedig inhomogén. Ez a szállítási állapot arról is felismerhető, hogy a szállítószakasz elején lévő adagoló garatban a szilárd anyag nem olyan lökesszerűen omlik össze, mint a hígáramú pneumatikus szállításnál, hanem több idő szükséges, hogy egyébként azonos feltételek mellett minden anyagrészecske a csőbe jusson. A csomós és

pázmás szállításnál a levegősebesség kisebb (2 - 20 m/s), mint a hígáramú pneumatikus szállításnál, a keverési arány tartománya pedig $\mu = 20 - 30$ körüli.

Buckás szállítás

Buckás szállítás alakul ki a keverési arány $\mu \approx 30$ körüli értékénél, ha a vízszintes szállítócsőben a levegő sebessége lecsökken és a szilárd szemcsehalmoz süllyedési sebességének közelébe kerül. Erre az állapotra háromféle véletlenszerűen kialakuló illetve változó anyagmozgás jellemző. A cső alján létrejöhet egy kis sebességgel haladó, vagy esetenként rövid időre megálló tömör anyagréteg. Fölötte a szilárdanyag fő tömege pázmásan vagy buckaszerűen áramlik. Legfelül a cső szabad keresztmetszetében a nagy sebességű légáram által elragadott szemcsék hígáramban pattogva, ütközve mozognak. A fenti háromféle mozgáshoz rendelhető keresztmetszetek, tehát a tömör anyagréteg keresztmetszete, a pázmák - buckák keresztmetszete és a hígáram keresztmetszete bár időben változnak, de a keresztmetszet-viszonyok itt is stabilizálódhatnak. A szállítási állapot instacionárius, a szemcseeloszlás inhomogén, könnyen kialakulhat a dugulás.

Dugós szállítás

A dugós szállítás jellemzője a $\mu > 30$ keverési arány érték. Hosszú ideig azt tartották, hogy ez egy instabil szállítási állapot, míg azután a kutató-fejlesztő munka eredményeként időközben használható dugós szállítórendszereket fejlesztettek ki. A szállítási állapot stabilizálása az időben szabályozott anyagfeladás révén, megfelelően kialakított zsilipelés segítségével vált elérhetővé. Az eljárás a szakirodalomban ütemes-tolóeljárás néven ismert. A szilárd anyagot lassan, kíméletesen dugók formájában szállítják a csővezetékben. A kialakuló dugók hossza jelentős mértékben függ a szállított szilárd anyag minőségétől, különösen a szilárd részecskék belső súrlódásától. A rendszer főleg durvaszemcsés és esetleg poros anyagokhoz alkalmas. Vízszintes csővezetékben a dugók már szinte a keletkezésük pillanatában ismét felbomlanak, a lemorzsolódó anyagot a következő dugó veszi fel. Függőleges csővezetékben a dugó alakja erősebben kifejezésre jut.

A megkerülő vezetékes dugós szállítás a fenti eljárás továbbfejlesztése. Ez esetben a szállítócső mentén végig kiépítenek egy kis átmérőjű levegővezeték, ami akár a szállítócső belsejében, akár kívül elhelyezhető. Ez a rendszer finomszemcsés, lisztszerű, poros anyagokhoz megfelelő. A megkerülő vezeték hozzájárul a szállítás stabilizálásához, átmérője körülbelül a „D” szállítócső-átmérő tizede. A két cső megfelelő szakaszonként - $L = (5 - 15) D$ - össze van nyitva, ezzel az anyagoszlop beékelődése kikerülhető és elérhető, hogy egyedülálló dugók alakuljanak ki. Ennél a szállítási módnál a súrlódó erő szerepe igen jelentős.

Toló szállítás

Toló szállítás esetén igen nagy keverési arány ($\mu = 100 - 300$) valósítható meg. A csővezeték a szilárd anyaghalmoz teljesen kitölti. Ez a szállítási mód rövid egyenes szakaszok esetén és durva szemcsés anyagoknál használható. A szállítási sebesség nagyon kicsi, a levegősebesség a hígáramú pneumatikus szállításnál szokásos értékek 1/10 - 1/20 része, míg a nyomásesés viszont 60 - 100 - szorosa a hígáramú szállításnál szokásosnak. A szállítócső végén

egy nagy ellenállású visszatorlasztó adagolót kell alkalmazni, ugyanis ennek elmaradása esetén a toló szállítás könnyen dugós szállítássá alakulhat át. A visszatorlasztás miatt a szilárdanyag összefüggő oszlopban mozog, melyben a szemcsék egymáshoz képest viszonylagos nyugalomban vannak. A szállítócsőbe épített ívekben az anyag könnyen összetorlódhat, ami a vezeték dugulásához vezethet. A szállítás stacionárius, a szemcseeloszlás homogén. A kis szállítási sebesség miatt az anyag sérülése, törése, kopása, aprózódása jelentéktelen. Mindazonáltal ez a szállítórendszer a finomszemcsés, lisztszerű vagy poros anyagokra alkalmas csupán. A gyakorlatban aránylag ritkán hasznosítják.

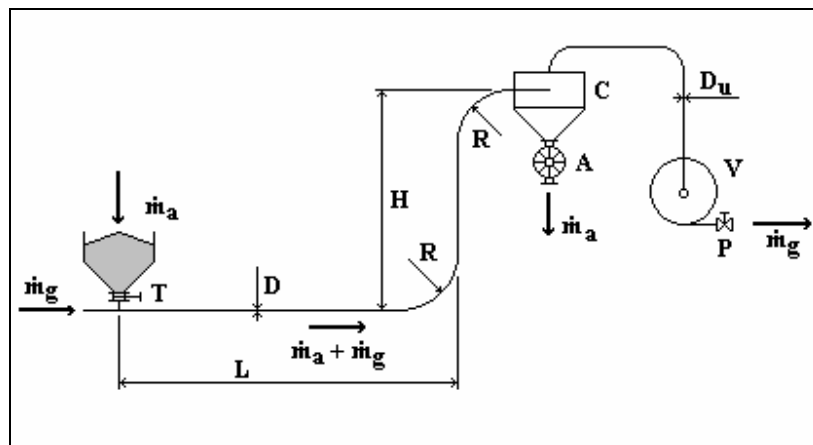
Fluidizációs szállítás

Poros vagy aprószemcsés anyagot levegővel átáramoltatva (fluidizálva), keverve, az elveszti az ömlesztett anyagra jellemző tulajdonságait, hiszen a fellazult szemcsék éppen hogy érintkeznek egymással, ezért például könnyen keverhető, nincs rézsűszöge. Az anyag úgy viselkedik, mint a folyadék. Amíg a hígáramú pneumatikus szállításnál az egyes anyagszemcséket a nagy sebességű légáramból származó hajtóerő ragadja magával, addig a fluidizációs szállításnál a levegő és anyag keveréke folyadékhoz hasonló tulajdonságú keveréket alkot és a keverék (fluidum) nyomás hatására zárt csővezetékben a csővezeték vonalvezetésével megszabott irányban áramlik. A fluidizációs szállítás esetén elérhető keverési arány ($\mu = 40 - 200$) igen nagy. Az anyag feladása fluidizált rétegből történik. A fluidizált állapotot a szállítás előtt vagy folyamatosan a szállítás alatt kell létrehozni. Ehhez fluidizálható nyomótartályt használnak. A szilárd anyag térfogat koncentrációja a szállítás irányában haladva erősen csökken a szállítóközeg expanziója miatt. A szállítási állapot a cső vége felé a buckás vagy csomós és pászmás szállítási állapotba mehet át, sőt hosszú szállítóvezeték esetén a hígáramú pneumatikus szállítás tartományában végződhet. A szállítás kvázi-stacionárius, a homogén szemcseeloszlás inhomogénbe mehet át.

A fluidizációs szállítás egy további speciális esete a fluidágyas szállítás, amikor is az ömlesztett szilárd anyagot a nehézségi erő hatására egy nyitott, ferde lejtős csatornában mozgatjuk. A csatorna megfelelő kialakítás esetén enyhe emelkedéssel is működtethető. A szállítandó anyagot itt is levegő aláfúvatással folyósítják, fluidizálják. Ez a módszer nagyon finom, lisztszerű, poros anyagoknál hosszabb szállítási szakasz megvalósításához is megfelel. Az anyagrétegen átáramló és abból kilépő levegő magával ragadja a szállított anyag szemcseösszetétele szerinti porrészeket, ezért a kilépő levegőt szűrni kell. Ezen szállítási mód fajlagos energiafelhasználása rendkívül kedvező.

1.2.2. A működési elv szerint

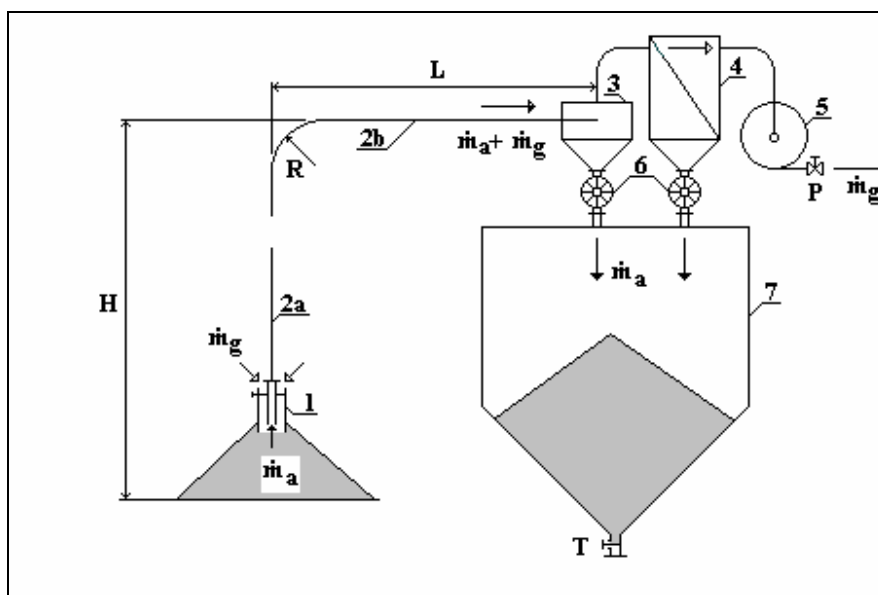
Szívóüzemű pneumatikus szállítóberendezés elvi vázlata látható az 1.3. ábrán. Az adagoló garatból a „T” jelű tolózár különböző mértékű nyitásával változtatható és bizonyos határokon belül tetszőlegesen beállítható „ \dot{m}_a ” anyag tömegáram jut a „D” belső átmérőjű szállítócsőbe. A szállítócső garat elé nyúló kezdetén lép be a légköri állapotú levegő a rendszerbe. Az ábrán „ \dot{m}_g ” a levegő tömegáramát jelöli.



1.3. ábra

A szállítócső nyomvonalát, vonalvezetését által meghatározott útvonalú szállítás után a levegő és a szállított anyag különválasztásáról kell gondoskodni. Pneumatikus szállítóberendezésnél ezt a feladatot rendszerint - mint itt az ábrán is a „C” jelű - ciklonnal oldjuk meg. A ciklon alján összegyűlt anyag folyamatos kiadagolását a légzárást is biztosító „A” jelű forgócellás adagoló végzi. Az anyag-levegő szétválasztás után a levegő - az esetleg még benne lévő portartalommal együtt - a ciklonból felül lép ki. A ciklont és a „V” jelű légszállító gépet (általában centrifugál ventilátor) összekötő „ D_u ” átmérőjű csővezetékben már csak a szállító gáz - itt levegő - áramlik.

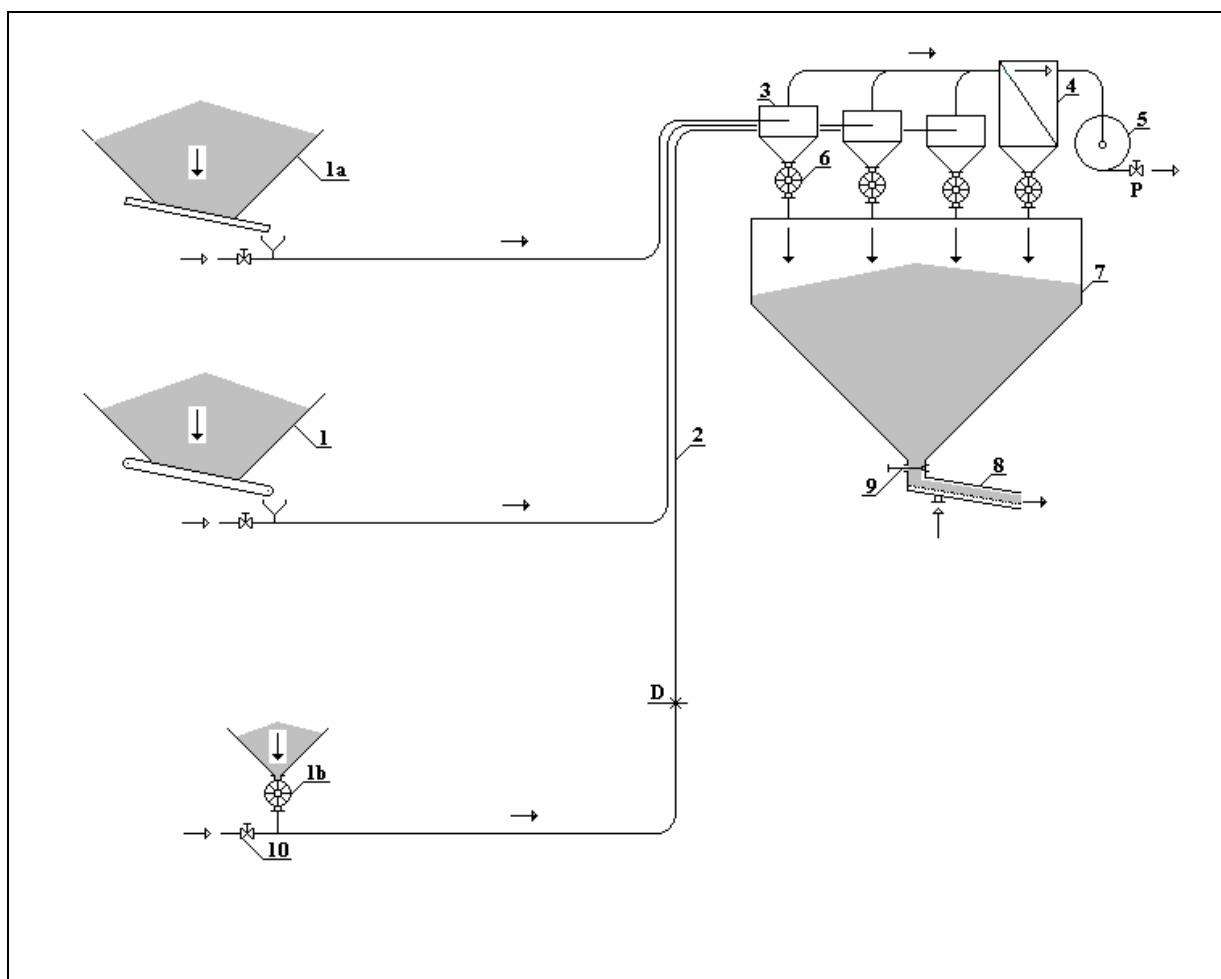
A szívóüzemű pneumatikus szállítóberendezésekben a légszállító gép az áramlási irányt tekintve mindig a rendszer végén helyezkedik el, így a szállító csőben és a ciklonban, valamint a ciklon utáni levegő vezetékben végig a légkörinél kisebb a nyomás. A légszállító gép szívóoldalán, a szállítócsőben nagy sebességű légáramot hoz létre, majd a légkörinél kisebb nyomásról – energia befektetés árán - a levegőt légköri nyomásra átemeli. A szállított anyagnak a rendszerbe történő - 1.3. ábra szerinti - beadagolása igen egyszerű a szívóüzemű pneumatikus szállítás sajátosságából adódóan. Két okból is: egyrészt mivel az anyagot a légköri nyomású adagológaratból a szállítócső egy kisebb nyomású helyére kell bejuttatni, másrészt az adagoló garatban lévő anyagrétegen keresztül létrejövő levegő beszívás egyenáramú anyag- illetve levegőáramlást jelent, ami a beadagolás szempontjából kedvező abban az esetben, ha az anyag jól ömleszthető - a garatból bolygatás nélkül kifolyik - (pl. gabonaneműk), vagy a garatba folyamatosan érkezik, úgy a fenti megoldás célravezető



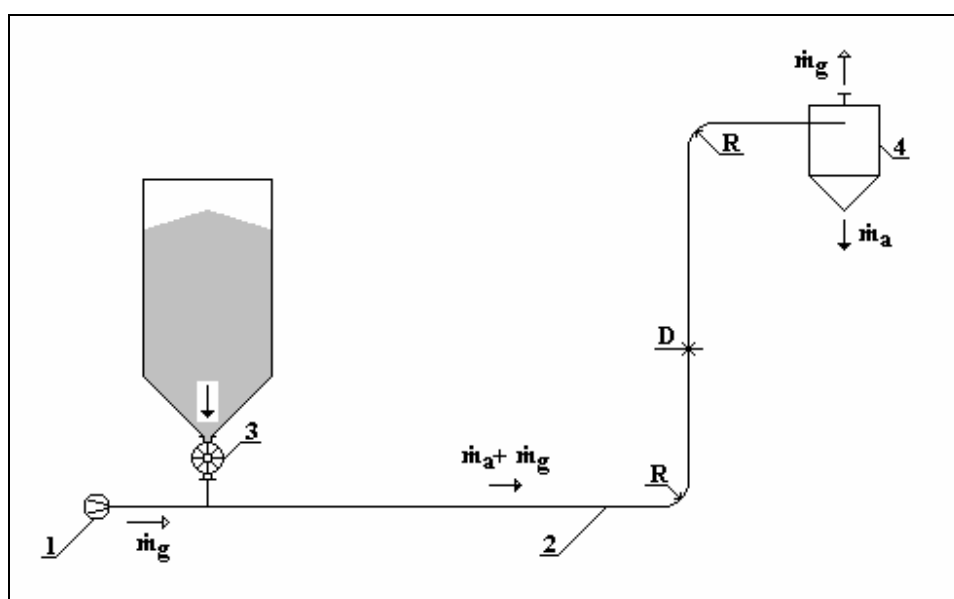
1.4. ábra

Amennyiben rosszul ömleszthető, összetapadásra hajlamos anyagot szeretnénk a szívóüzemű pneumatikus szállítóberendezésbe beadagolni, úgy az 1.4. ábra szerinti megoldás ajánlható. Itt az „1” jelű szívófej a „2a” jelű flexibilis szívónyúlvány végén helyezkedik el, így annak mozgatásával a tárolótérben lévő anyaghalmoz szívószáj közelébe eső része a mechanikus bolygatás hatására fellazul és könnyen indíthatóvá, beadagolhatóvá válik. A hígáramú, nagy sebességű keverék a továbbiakban a „2b” jelű szívócsövön keresztül jut a „3” jelű anyagleválasztó ciklonba, ahol az anyag fő tömegének és a szállító levegőnek a szétválasztása megtörténik. A le nem választott, poros vagy finomszemcsés anyag a ciklonból a légárammal együtt felül távozik és a „4” jelű utószűrőbe jut. Az „5” jelű légszállítógép a berendezés végén látható. A ciklonban és az utószűrőben leválasztott szilárd anyag a „6” jelű légzárast biztosító forgócellás adagolókon keresztül jut a „7” jelű tároló silóba.

Az 1.5. ábrán különböző anyagbeadagolású szívóüzemű szállítóberendezés látható. Miután ebben a berendezésben a „2” jelű szállítócsövek az „5” jelű légszállító gép szívóoldalán párhuzamos ágakat alkotnak, így a helyes működtetéshez igen lényeges az egyes ágakban a megfelelő anyag- illetve levegőáramok beállítása. Az előbbi az „1” jelű szalagmérleggel, az „1a” jelű rázócsatornával vagy az „1b” jelű forgócellás adagolóval, míg az utóbbi az anyagadagolási helyek előtt elhelyezett, tehát tiszta levegőoldali „10” jelű szabályozó szelepek segítségével lehetséges. A szilárd anyag a „3” jelű anyagleválasztó ciklonokból és a „4” jelű utószűrőből egyaránt a „6” jelű forgócellás adagolókon keresztül jut a „7” jelű silóba. A siló ürítését a „8” jelű pneumatikus szállítócsatorna (aerációs csatorna) végzi, amihez a megfelelő hozzáfolyás a „9” jelű tolózár segítségével állítható be. Nagyobb siló méretek esetében ez utóbbi szerelvény speciális silóürítő és rétegszabályozó szerelvény-csoport beépítésével helyettesítendő.

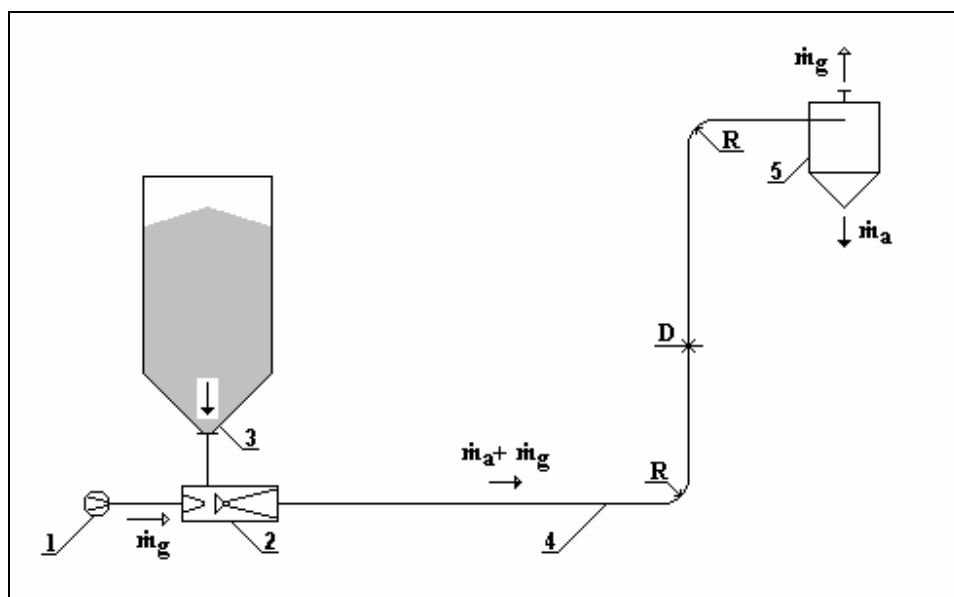


1.5. ábra



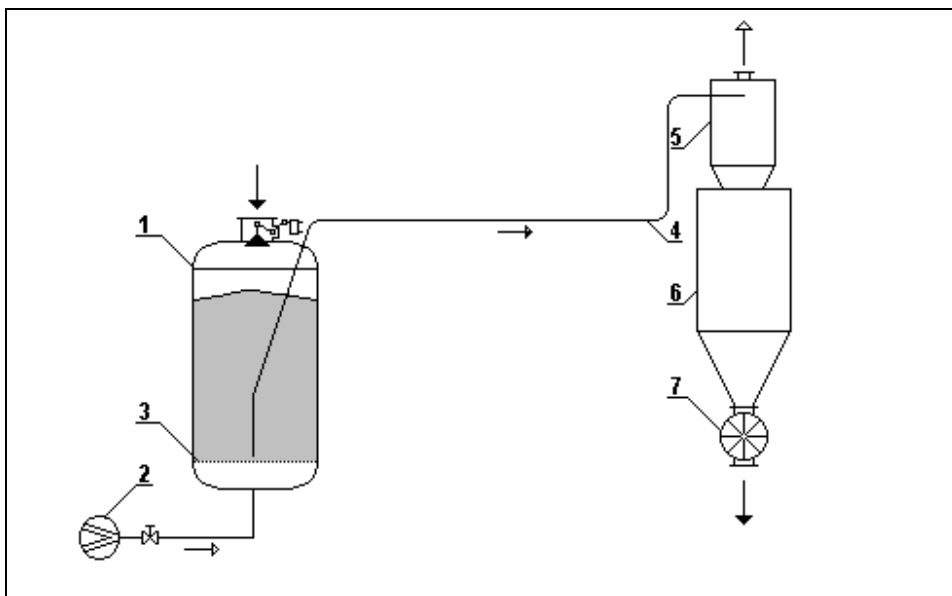
1.6. ábra

Nyomóüzemű pneumatikus szállítóberendezés elvi vázlatát mutatja az 1.6. ábra. A rendszer elején lévő „1” jelű légszállító gép a légkörből beszívott „ \dot{m}_g ” levegőt a szállításhoz szükséges nyomásra sűríti és nagy sebességgel nyomja a „2” jelű szállítócsőbe. Az anyag beadagolását ezért a légzárást biztosító „3” jelű adagolóval (itt az ábrában forgócellás adagolóval) végezhetjük. A szállítócső végén a leválasztó berendezés a „4” jelű ciklon, melynek az aljára most nem szükséges kiadagoló berendezés, de ha az anyag itt a szabadba (és nem zárt silóba) jut, a porzás elkerülésére célszerű alkalmazni. A szállítandó anyag bejuttatásához szükséges mozgó alkatrészekkel rendelkező adagoló berendezés elmaradhat - és ezzel még egyszerűbb lesz a szállítóberendezés, - ha injektoros adagolót, vagy nyomótartályt létesítünk.



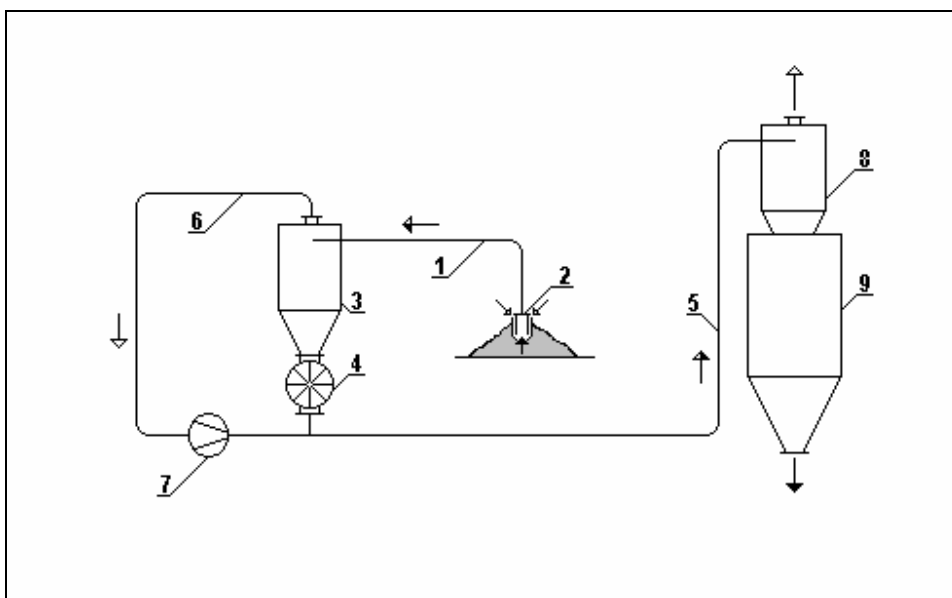
1.7. ábra

Az 1.7. ábrán injektoros adagolású berendezés látható. Az „1” jelű légszállító gépből a levegő a „2” jelű injektoros adagoló fúvókájába jut. A fúvókából kiáramló nagy sebességű légsugár közel légköri, vagy légkörinél kisebb nyomást hoz létre a beadagolásnál és a szilárd anyagot besodorja a keverőtérbe. A megfelelően tervezett injektoros adagoló csak annyi anyagot szív be a „3” jelű garatból, amennyit az önmaga által létesített túlnyomással el is tud szállítani a „4” jelű szállítócsőben. Az injektoros adagoló berendezés hátránya, hogy hatásfoka rossz, azaz a légszállító gép által létesített nyomásemelkedés jó része (általában jóval több mint a fele) adagolási veszteségnek tekintendő. E jelentős energiavesztesége ellenére egyszerű szerkezete és adagoláskor önmagát szabályozó volta miatt egyre gyakrabban alkalmazzák. A szabályozott anyagmennyiség nagy szállítási távolságnál kis anyagmennyiség, míg kis szállítási távolságnál nagyobb anyagmennyiség beszívását és így szállítását eredményezi. A szilárd anyag és a szállító levegő szétválasztását a szállítócső végén az „5” jelű ciklon biztosítja.



1.8. ábra

Az 1.8. ábrán egy nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés látható. Az „1” jelű nyomótartályt miután felülről megtöltöttük a szállítandó anyaggal, légmentesen be kell zárni. Ezután a „2” jelű légszállító gép - rendszerint kompresszor - sűrített levegőt nyom a tartály alján elhelyezett „3” jelű légelosztó, fluidizáló réteg alatti térbe. A rétegen átáramló levegő keveredve a porral fluidizálja azt, tehát a levegő és por keverék folyadékhoz hasonlóvá válik és a nyomásra hozott tartályban az anyag levegő keverék folyadékhoz hasonló módon elkezd mozogni a „4” jelű szállítócsőben. Az „5” jelű ciklonban leválasztott anyag tárolására a „6” jelű tartály szolgál, amelyből az anyag leürítését a „7” jelű forgócellás adagoló teszi lehetővé.

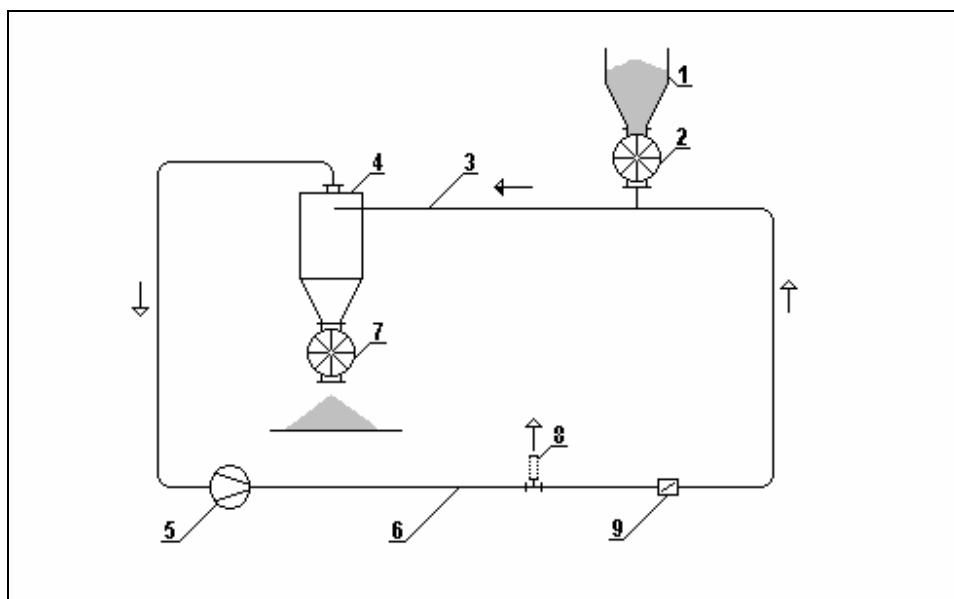


1.9. ábra

Vegyes üzemű (szívó- és nyomóüzemű pneumatikus szállítóberendezés vázlatát mutatja az 1.9. ábra. A vázolt berendezés poros vagy aprószemcsés ömlesztett anyag átrakására alkalmas. Az „1” jelű szívócső végén lévő „2” jelű szívófej biztosítja a levegőnek a szállítócsőbe jutását és az anyag egyenletes felszívását. A szívócső a „3” jelű ciklonhoz csatlakozik. Az anyag a ciklon alján lévő légzárast is biztosító „4” jelű adagolón át jut az „5” jelű nyomócsőbe, a levegő pedig a „6” jelű csővezetéken jut a ciklonból a „7” jelű légszállító géphez. A légszállító gép (itt fúvó) szívócsőnkja a ciklonon keresztül a szívóvezetékre, nyomócsőnkja pedig a nyomóüzemű pneumatikus szállítócsőre van kötve. A nyomócső végén az anyag a „8” jelű ciklonban történő leválasztás után a „9” jelű tároló tartályba jut, ahonnan szükség szerint kiadagolható.

A vegyes üzemű pneumatikus szállítóberendezés egy szívó- és egy nyomóüzemű berendezés feladatát látja el. Egyesíti ezek előnyeit, tehát a szívóüzemű berendezés esetén kialakítható egyszerű anyagbeadagolást (itt: felszívás) és lehetővé teszi a nyomócső megfelelő kialakításával a különböző helyekre történő anyagszállítást. A változtatható szállítási útvonalat ilyen berendezések flexibilis csövek beépítésével, vagy könnyen szétszedhető és összerakható lemezcsövekkel illetve állandó kiépítés esetén csőváltók használatával oldják meg.

Az eddigiekben bemutatott pneumatikus szállítóberendezésekben a szállító közeget - legtöbbször levegőt - az anyag fluidizálására illetve szállítására egyszer, a vegyes üzemű pneumatikus szállítóberendezéseknél kétszer használtuk fel, így ezek nyitott rendszerűnek tekinthetők. E rendszerekben tehát a szállító közeg és a szállított anyag érintkeztetése, majd szétválasztása után nem találkozik újra egymással.



1.10. ábra

Zárt (vagy un. recirkulációs) rendszer látható az 1.10. ábrán. Az „1” jelű tartályból a „2” jelű forgócellás adagolón át az anyag a „3” jelű pneumatikus szállítócsőbe jut. A szállítócső végén az anyagot a „4” jelű ciklonban leválasztjuk, de a szállítólevegőt az „5” jelű légszállító gép nem a szabadba fújja, hanem a „6” jelű zárt csövön a levegőben maradt kis mennyiségű finom porral együtt az adagolási helyre vezeti vissza.

Egy ilyen rendszer pneumatikus szállítócsöve akár légkörinél kisebb - (szívóüzem), akár nagyobb nyomással (nyomóüzem) dolgozhat. Ha a légköri nyomású pont helyének beszabályozásáról nem gondoskodunk, ez a pont az anyag beadagolásának helyén alakul ki, ami pedig azzal a kellemetlenséggel járhat, hogy a beadagolási helynél porzás keletkezik. Elkerülhetetlen ugyanis, hogy a rendszer szívott részén „hamis” levegő ne jusson be (pl. a ciklon alján lévő „7” jelű adagolón) és ahol ez a levegő visszajut a szabadba (pl. az anyag beadagolásánál) ott porképződés is lesz. A kellemetlen porképződés elkerülésére a rendszer nyomott részébe iktatott „8” jelű porszűrőn porzás nélkül eresztethető ki a hamis levegő. A porszűrő légkörinél nagyobb nyomás alá helyezéséről a porszűrő után elhelyezett „9” jelű pillangószelepen történő kis fojtással gondoskodhatunk. Így a pillangószeleptől az anyag beadagolásáig tartó visszavezető cső (és természetesen a pneumatikus szállítócső és a ciklon is) szívás alatt üzemel, ezért az anyag beadagolásánál por nem képződik, hanem legfeljebb ott is beszív a rendszer külső atmoszférikus állapotú levegőt.

Zárt rendszerű pneumatikus szállítóberendezést akkor alkalmazunk, ha a szállított anyagból nem engedhetünk semmit sem kijutni a szabadba és utóleválasztó kialakítása nehezen volna megoldható. Ugyancsak a zárt rendszer mellett szól, ha a szállítással egyidejűleg az egymással érintkező fázisok között, tehát a szállító közeg és a szállított anyag között valamilyen kémiai reakció, vagy valamilyen vegyipari művelet játszódik le, ahol az érintkeztetési időt illetve az érintkező felületek nagyságát egyaránt pontosan szabályozni kell.

1.2.3. A szállítócső helyzete szerint

A szállítócső helyzete igen jelentős, mind elméleti mind pedig gyakorlati szempontból. Az előbbi szerint a szállító közeg áramlási iránya és a nehézségi erő iránya alapvetően meghatározza az erőviszonyokat és így a többfázisú keverék áramlási viszonyait. Fentieknek megfelelően megkülönböztetünk vízszintes-, függőleges- illetve ferde helyzetű egyenes csőszakaszokat tartalmazó pneumatikus szállítóberendezéseket.

A gyakorlati szempontok: építészeti adottságok, csőmegfogások, csőalátámasztások, csőhidak kialakítása stb. az esetek többségében a vízszintes és függőleges egyenes szakaszok kialakítását eredményezik.

Az előző egyenes csőszakaszok összekötésére a pneumatikus szállítóberendezésekben elkerülhetetlen további erő, a centrifugális erő is szerepet játszik, ami az áramkép kialakulására jelentős hatással van. Az ívek osztályozása az „R/D” - görbületi sugár/csőátmérő viszony -, a középponti szög illetve az ebből adódó irányeltérítési szög, továbbá az ívek helyzete szerint szokásos. Ez utóbbi szerint a gyakorlatban legelterjedtebbek az $\alpha = \pi/2$ középponti szögű ívek lehetnek:

- vízszintes síkú illetve
- függőleges síkú: ezen belül
 - a szállítás irányában vízszintesből függőlegesbe forduló és
 - függőlegesből vízszintesbe forduló ívek.

1.2.4. A légszállító gép nyomása szerint

A pneumatikus szállítóberendezések osztályozása a szállításhoz szükséges nyomás, azaz a légszállító gép nyomása szerint az alábbi:

- | | |
|--|-----------------------------------|
| - kis nyomású berendezések esetén: | $p \leq 0,1 \text{ bar}$ |
| - közepes nyomású berendezések esetén: | $0,1 \leq p \leq 1,0 \text{ bar}$ |
| - nagy nyomású berendezések esetén: | $1 \leq p \leq 10 \text{ bar}$ |

Az első csoport, azaz a kisnyomású pneumatikus szállítóberendezések légszállító gépe a *ventilátor*.

Ventilátornak azokat a gázt szállító gépeket nevezzük, amelyek a közegét csak elhanyagolható mértékben nyomják össze. Elhanyagolhatóságon a nyomás 5-10%-os megváltozását értjük. Tehát pl. ha a gép légköri nyomású levegőt szív, azaz $p_1 = 100 \text{ kPa}$, akkor $p_2 = 105 - 110 \text{ kPa}$ nyomás értékig, azaz $\delta = p_2/p_1 = 1,1$ nyomásviszonyig ventilátorokról beszélünk.

A másik két csoportba tartozó pneumatikus szállítóberendezések légszállító gépei a *fúvók* és a *kompresszorok*.

Abban az esetben, ha a nyomás megváltozása 10%-nál nagyobb mértékű, akkor a közeg felmelegedése már jelentős lesz és így módon e gépeknél a szállító közeg állapotváltozása már nem hagyható figyelmen kívül. Fúvókról akkor beszélünk, ha a nyomásviszony: $\delta = 1,1 - 2,0$ érték között mozog.

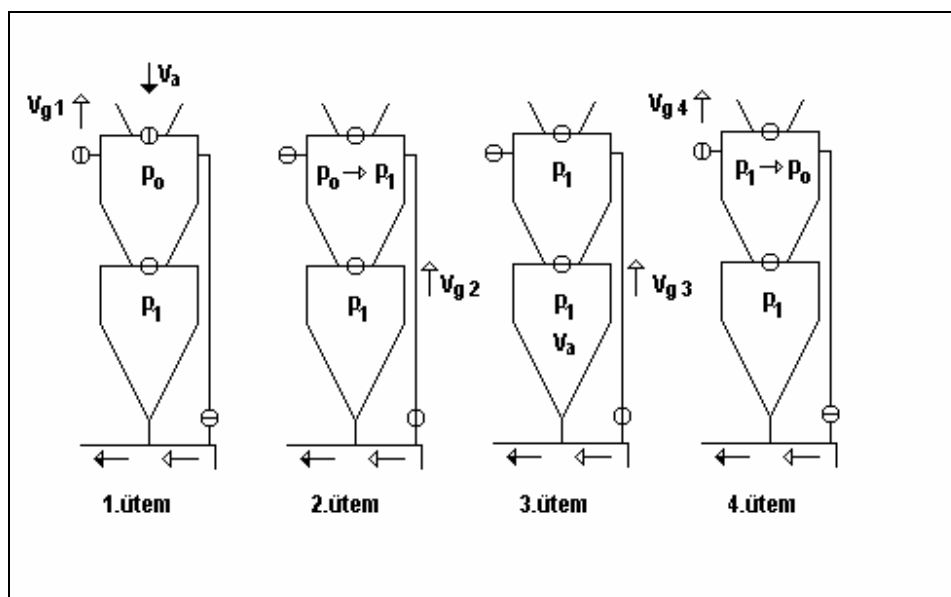
Kompresszoroknak a $\delta > 3$ nyomásviszonyt előállító gépeket nevezzük.

Fúvók és kompresszorok közti elvi különbség még az, hogy a fúvóknál a megfelelően kialakított, elegendően nagy felületek hőátadása következtében a közeg felmelegedése csak olyan mértékű, hogy külön hűtésről gondoskodni nem kell, míg a kompresszoroknál rendszerint külön hűtőt kell alkalmazni.

1.2.5. Az üzemmód szerint

Szakaszos működésű nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezést mutat az 1.8. ábra.

Folyamatos szállítás két nyomótartály megfelelő kapcsolásával valósítható meg. A folyamatos szállítás elvi működési vázlata az 1.11. ábrán látható. A két egymás fölött elhelyezett nyomótartály az ábrának megfelelő négy ciklikusan ismétlődő ütem szerinti működtetésével elérhető, hogy a szállítóvezetékben stacionárius anyagszállítás alakuljon ki.



1.11. ábra

Az első ütemben - miközben az alsó tartályból szállítunk - a felső tartály (zsiliptartály) légköri állapotú („ p_0 ” nyomású) és a szállítandó szilárd anyaggal való feltöltése folyik. A második ütemben a felső tartály nyomásra hozása következik a két tartály összenyithatósága érdekében. A harmadik ütemben az azonos nyomású tartályok összenyitása után az anyag leeresztése folyik, míg a negyedik ütemben a felső tartály légköri állapotra expandál.

1.2.6. Az automatizálás foka szerint

Kézi működtetésű pneumatikus szállítóberendezésben minden művelet (pl. légszállító gép, forgócellás adagoló, porszűrő ventilátor indítása és leállítása, a szilárd anyag be- és kiadagolása) kézi vezérléssel történik. Az ilyen berendezések üzembiztos működtetése teljes egészében a kezelő személytől függ. Anyagszállítás közben például nem szabad a légszállító gépet kikapcsolni, mivel ez a szállítócső eldugulásához vezet.

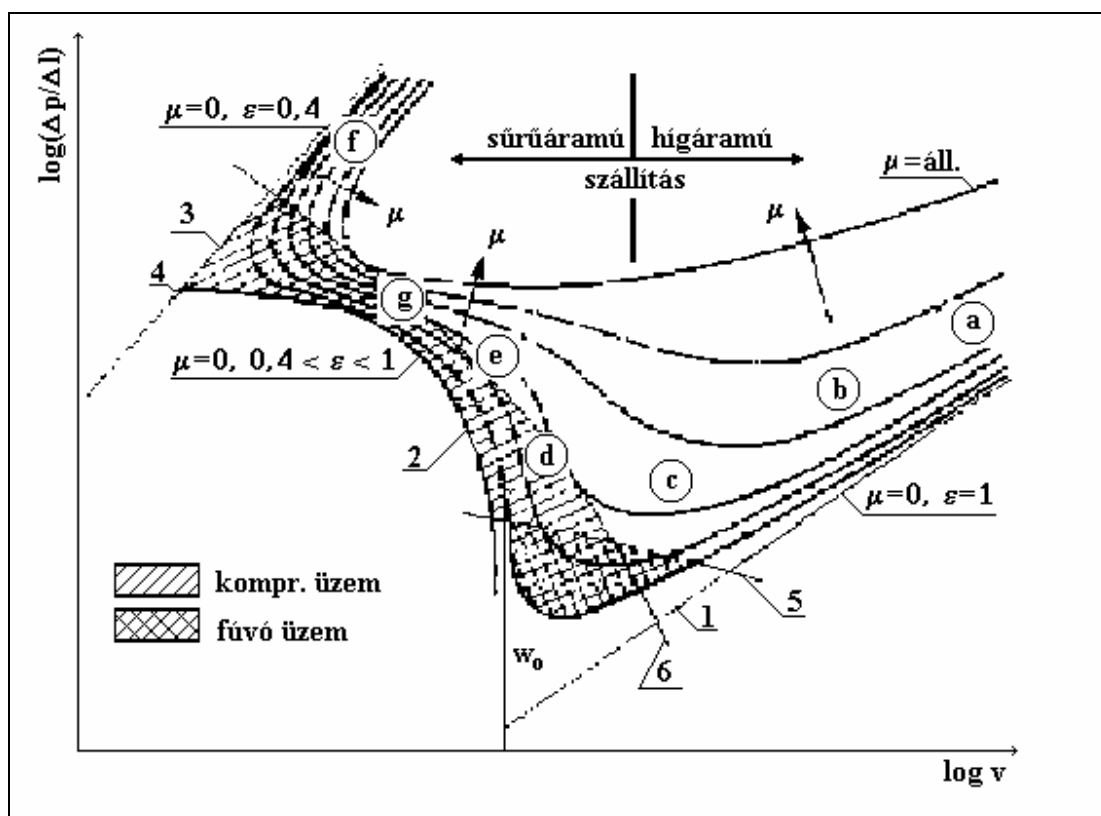
A *fél-automatikus működtetésű* pneumatikus szállítóberendezéseket éppen az üzembiztonság növelése érdekében fejlesztették ki. Ez esetben a vezérlő berendezés már tartalmaz bizonyos reteszelékeket, amelyek révén üzemzavart okozó művelet nem hajtható végre. Például egy silóba, vagy tárolótartályba nem lehet anyagot beadagolni, ha az ott beépített felső szintjelző tele jelet mutat. Ugyanígy például - amint azt a kézi működtetésnél említettük, hogy anyagszállítás közben nem szabad a légszállítógépet kikapcsolni - itt ez nem is lehetséges, ha gondoskodunk róla, hogy a légszállító gép leállításának feltétele az üresjárési nyomás elérése legyen, azaz az üresjárési nyomásnál nagyobb nyomás esetén villamosan reteszelve, tehát megakadályozható a légszállító gép kikapcsolása.

Végül a legfejlettebb műszaki színvonalú pneumatikus szállítóberendezések, teljesen automatikus működtetésűek, tehát nem csupán az üzembiztos működéshez szükséges reteszelések „élnek”, hanem az előírt vezérlési, logikai séma szerint a szükséges technológiai előírásoknak megfelelően az egész anyag előkészítő-, tároló-, szállító-, szűrő-, porelszívó rendszer kézi (emberi) beavatkozás nélkül funkcionál.

Meg kell jegyezni, hogy a nagyobb ráfordítás igény, nagyobb beruházási költségek ellenére a fejlődési trendek, sőt egyre több gyakorlati példa is ez utóbbiak létjogosultságát igazolják.

1.3. A pneumatikus szállítás állapotdiagramjai

Annak érdekében, hogy a különböző híg- és sűrűáramú szállítási állapotok egymáshoz való viszonyát megismerjük az 1.2.2. fejezetben ismertetett osztályozáson túl több szerző állapotdiagramot készített, amelyben megadja a legfontosabb szállítási paraméterek - többnyire csupán minőségi - összefüggéseit. A pneumatikus szállítási állapotdiagramokból a legtöbb poros vagy szemcsés ömlesztett anyagra megállapítható a szállítócső hosszegységére jutó nyomásesés szállítási sebességtől illetve keverési aránytól való függése, ami egyúttal arra is rámutat, hogy a pneumatikus szállítási állapotok nemcsak áramképükben, hanem energiaszükségletükben is jelentős mértékben különböznek egymástól.



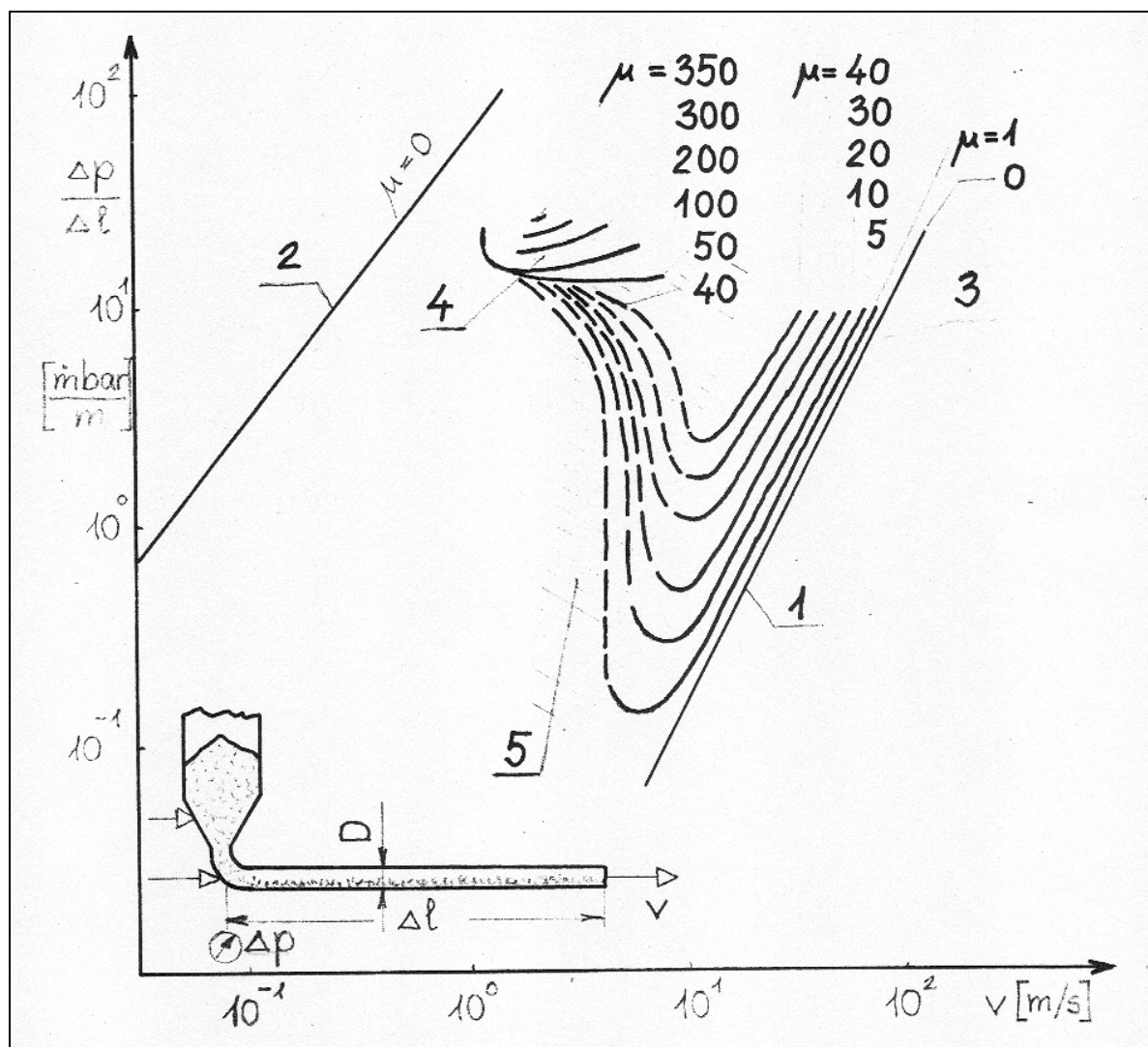
1.12. ábra

Az 1.12. ábrán - Weber munkája [13] alapján - bemutatjuk a szállításhoz szükséges hosszegységre vonatkoztatott nyomásesés és a szállítási sebesség közötti - csupán minőségi, jellegbeli - összefüggést adó függvénykapcsolatot. Mindkét tengelyen logaritmusos lépték szerepel. A görbesereg paramétere a keverési arány. Szállítás csak az 1-2-3 görbe által határolt területen belül lehetséges. Ezen határgörbéken - amint az ábrán is látható - a keverési arány $\mu = 0$,

jelűben a hosszegységre vonatkoztatott nyomásesés már nagyobb, mint a „4”-es ponthoz tartozó érték, s így az anyag már fluidizált állapotban van.

Az állandó keverési arányú - $\mu = \text{áll.}$ paraméterű - görbék kagylódiagram szerűen helyezkednek el, azaz a bejelölt nyilak irányában a nagyobb keverési arány értékhez tartozó görbék a mező belsejébe esnek.

Az „5” jelű jelleggörbe illetve a „6” jelű kompresszor jelleggörbe ismeretében kijelölhető az adott pneumatikus szállítási üzemi tartomány, amely területeket az ábrán két- ill. egy irányban vonalkázott mezők jelölik.



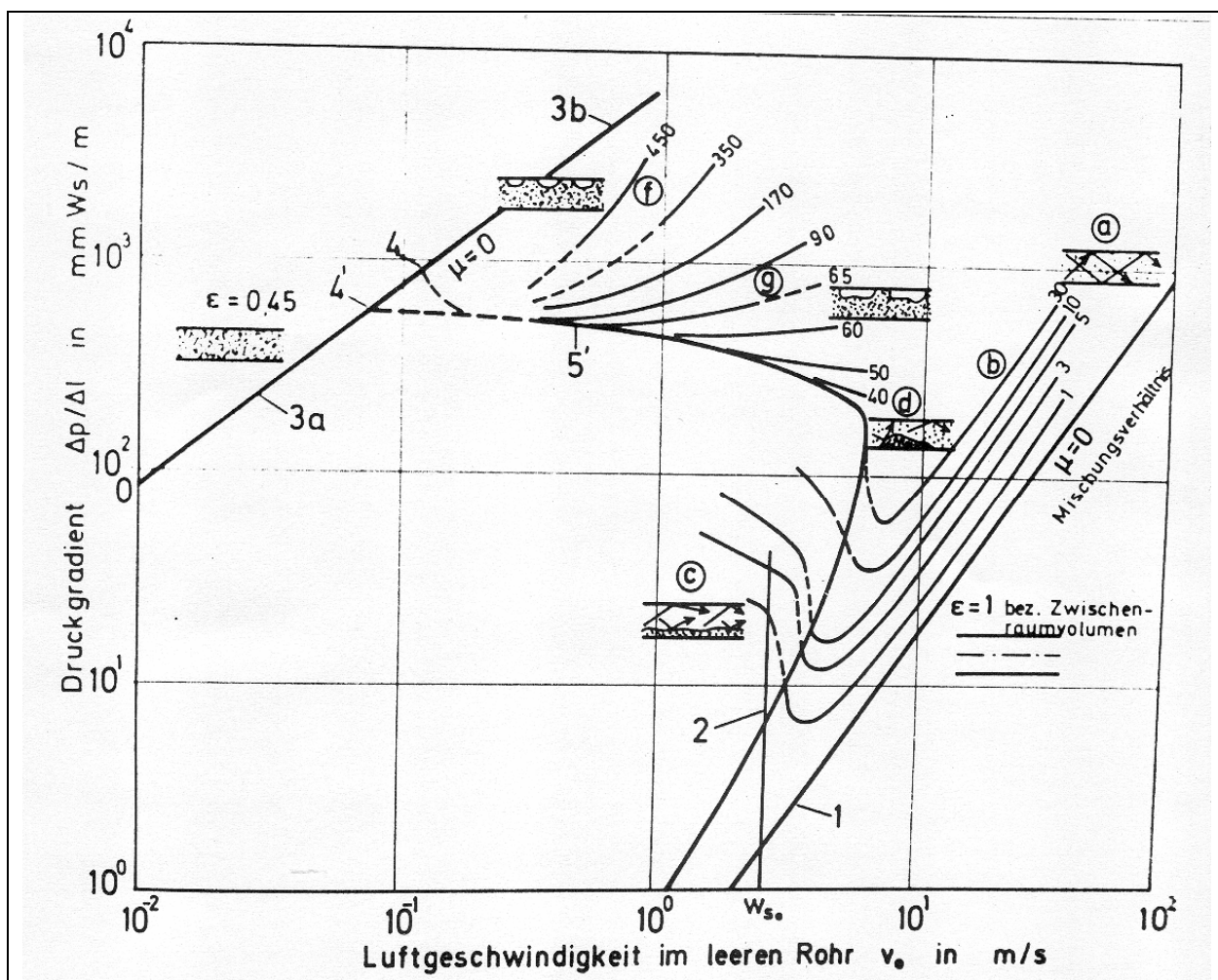
1.14. ábra

Az 1.13. ábra poros anyag függőleges szállításának állapotdiagramját mutatja, ami valamelyest különbözik a korábban leírtaktól. Mindenekelőtt a „2” jelű görbe, azaz a fluidizációs vonal, mint az alsó szállíthatósági határgörbe fut másképpen.

A két állapotdiagramon azonban bizonyos hasonlóság is felfedezhető, ugyanis a $\mu = \text{áll.}$ paraméterű (állandó keverési arányú) görbék mindkét ábrán határozott minimumot mutatnak, ami azt jelenti, hogy valamely $\mu = \text{áll.}$ görbén az állapotdiagram alapján kijelölhető egy olyan „ v_g ” levegő sebesség, ahol a szállítás nyomásszükséglete, azaz az ábra szerint a szállítócső hosszegységére jutó nyomásesés minimális.

Megjegyezzük továbbá, hogy az 1.12. és 1.13. ábra szerinti állapotdiagramok szemléletesen mutatják ugyan a különböző szállítási állapotok rendszerét, de ebben a formájukban (számértékek nélkül, logaritmikus koordináta léptékekkel), belőlük nem határozhatók meg pl. a minimális energiafelhasználást eredményező szállítási állapot paraméterei - így tájékoztató jellegű, minőségi információt hordozó diagramokként kezelendők.

Az 1.14. ábrán vízszintes pneumatikus szállítás állapotdiagramja látható. A Krambrock – Parekh [14] publikációjából származó ábra alakja, felépítése nagyon hasonló a függőleges szállításnál már bemutatottakhoz. Az „1” jelű egyenes az üres, míg a „2” jelű az anyaggal töltött szállítócső jelleggörbéje. A „3” jelű hely a nagysebességű hígáramú pneumatikus szállítás tartományát, míg a „4” jelű hely a nagyobb nyomásigényű sűrűáramú pneumatikus szállítás tartományát jelöli. A $\mu = \text{áll.}$ paraméterű görbék itt is kagylódiagram szerűen helyezkednek el. A sűrűáramú pneumatikus szállítás esetén a nagyobb keverési arány értékeknél egyre szűkebb sebességtartomány adódik, azaz az ilyen pneumatikus szállítóberendezések működési vagy üzemeltetési tartománya leszűkül. Ez utóbbit szemlélteti az ábrán $\mu = 350$ keverési arány értékhez tartozó pont is. Az „5” jelű bevonalkázott mező és az ugyanitt szaggatott vonallal rajzolt keverési arány görbék a dugulásveszélyes instabil zónát jelölik. Megállapítható, hogy a biztonságos szállítási állapot hígáramú szállítás esetén a dugulásveszélyes instabil zónától jobbra, azaz a nagyobb sebességek irányában, míg sűrűáramú szállításkor attól balra, tehát kisebb sebességeknél helyezkedik el. A koordinátatengelyeken feltüntetett logaritmikus skálabeosztások már bizonyos nagyságrendi tájékozódáshoz is segítséget nyújtanak.



1.15. ábra

Az 1.15. ábrán Weber – Scholl [13] homok vízszintes üvegcsőben történt pneumatikus szállítási mérésekor meghatározott állapotdiagramja látható.

1.4. A pneumatikus szállítás jellemző mennyiségei

A pneumatikus szállítás jellemző mennyiségei a következő csoportokba sorolhatók:

Anyagjellemzők:

- a szállított anyag jellemzői
 - szemcseméret, szemcseméret-eloszlás
 - fluidizációs jellemzők
 - jellemző anyagsűrűségek
 - természetes rézsűszög
 - csúsztatási szög
 - ömleszthetőség
 - esési sebesség
 - keménység
 - törékenység
 - nedvességtartalom
- a szállító gáz jellemzői
 - nyomás, hőmérséklet
 - nedvességtartalom

Geometriai jellemzők

Üzemtani jellemzők

1.4.1. Anyagjellemzők

1.4.1.1. A szállított anyag jellemzői

Szemcseméret, szemcseméret-eloszlás

Az ömlesztett anyagok szemcseméretének jellemzésére a lineáris méret szolgál, ami gömb esetében az átmérő, kocka esetében a kocka élének hosszúsága, szabálytalan alakú szemcse esetében valamelyik képzelt, átlagos lineáris méret lehet.

A felület a legtöbb esetben a szemcse külső felülete, ámbar soknak belső (pórus-) felülete is van. A kocka és gömb, vagy általánosabban a szabályos szemcsék felülete könnyen számítható, de a szabálytalan alakú testekét a legtöbb esetben becsülni kell.

Valamely szemcsekeverék, pl. porhalmaz a por szemcseméret-eloszlásával, a felülettel, a fajlagos felülettel és a szemcseméret tartomány szélsőértékeivel jellemezhető. A *szemcseméret-eloszlás* a porban lévő egyedi szemcsék relatív tömegének méret szerinti megoszlása. A *felület* az egyes szemcsék felületének összege, a *fajlagos felület* a tömeg- vagy térfogategységre jutó anyagszemcsék felülete. A *szemcseméret szélső értékeit* a halmazban található legnagyobb és legkisebb szemcse mérete adja. A poros vagy szemcsés halmazt legtokéletesebben a

szemcseméret-eloszlása jellemzi, amelynek meghatározásához a halmaz szemcseösszetételéről szitasorozaton végzett vizsgálat útján tájékozódunk. Az egymás alatt elhelyezett szitákon fennmaradó vagy áthulló mennyiségeket megmérve és a frakciótömegeket a teljes mennyiség tömegéhez viszonyítva képet kapunk arról, hogy az egyes szemnagyság frakciókból milyen tömegarány várható. Ha azonban nem éppen ezek lesznek a termék frakcióinak határméretei, akkor kíváncsi, hogy a vizsgálatokat lehetőleg sok szitával végezzük és a tömegeloszlásról a teljes mérettartományra képet kapjunk. Ebből a célból olyan szitákat célszerű választanunk, amelyek nyílásai szabályos számsorozatot képeznek.

Az elemzésre használt laboratóriumi sziták nyílásméretei szabványosítva vannak, s általában mértani sorozatot alkotnak, az egyes országokban eltérő hányadossal.

Néhány ország szitasorozatának szabvány elnevezése és a szomszédos szitaelemek nyílásméreteinek hányadosa a 1.2. táblázatban látható.

Az angolszász nyelvterületen az 1 hüvelykre (25,4 mm) eső csokorszámot adják meg, a német szabvány szerint közvetlenül a nyílásméretet, úgyszintén hazánkban is. Magyarországon elemzési célokra a következő nyílásméretek szabványosak:

- durvaszemcsés anyagok elemzésére: 150; 100; 80; 50; 30; 20; 10; 5; 2,8; 1; 0,5 mm

- a porokéra pedig: 1,00; 0,8; 0,63; 0,50; 0,40; 0,32; 0,20; 0,16; 0,12; 0,10; 0,09; 0,08; 0,063; 0,056; 0,05; 0,045 és 0,04 mm.

A 63 µm-nél kisebb nyílásméretű laboratóriumi szitalapokon csak áramló közeg segítségével (folyadéköblítéssel vagy légelszívással) lehet szitálni.

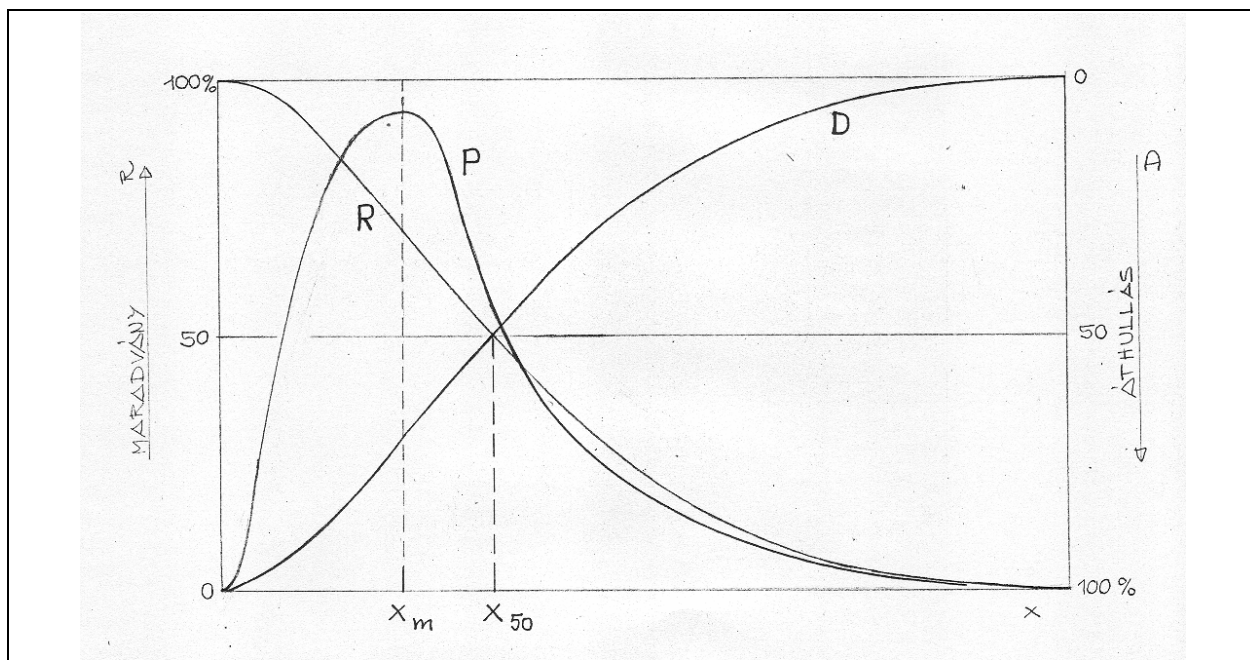
1.2. táblázat

Ország	Szita szabvány	
	jele	hányadosa
Magyarország	MSZ 6759-74	$\sqrt[20]{10}$
Franciaország	A.F.N.O.R.	$\sqrt[10]{10}$
Anglia	British Standard B.S.S. 410	-
USA	A.S.T.M. E11	$\sqrt[4]{2}$
	Tyler	$\sqrt{2}$
Németország	DIN 4188	$\sqrt[20]{10}$

A szitasorozat megválasztásától és a nyílásméretek szabályos sorozatától függetlenül magunkat, ha minden szitára az azon áthulló (vagy azon fennmaradó) teljes tömeget állapítjuk meg. A szemcseméret ill. szitanyílás ilyen körülmények között valószínűségi változónak tekinthető és a „kumulatív” értékek az 1.16. ábrán látható diagramon folytonos vonallal köthetők össze.

A „D” kumulatív áthullási - és „R” szitamaradék görbét eloszlási görbéknek is nevezik. Természetesen fennáll, hogy

$$R + D = 1 \quad (1.1)$$



1.16. ábra

Az 1.16. ábrán látható eloszlásgörbéről közvetlenül leolvasható a „ Δx ” szemcseméret-tartományba eső viszonylagos frakciótömeg

$$P = \frac{\Delta D}{\Delta x} \quad (1.2)$$

és a „ Δx ” méret elemi értékre csökkentésével

$$P = \frac{dD}{dx} = -\frac{dR}{dx} \quad (1.3)$$

Az 1.3 összefüggés az egyes „ x ” szemcseméretetek előfordulásának viszonylagos valószínűségét adja meg, ezért *gyakorisági függvénynek*, diagramban történő ábrázolását, amely a „ $D(x)$ ” vagy „ $R(x)$ ” görbe (grafikus) differenciálásával állítható elő *gyakorisági görbének* nevezik.

Minthogy az $x = 0$ méretű szemcse előfordulásának nulla a valószínűsége, a „ $D(x)$ ” és „ $R(x)$ ” görbének az $x = 0$ helyen vízszintes az érintője, a „ $P(x)$ ” gyakorisági görbe legnagyobb értékéhez pedig a „ $D(x)$ ” és „ $R(x)$ ” eloszlás görbék inflexiós pontja tartozik.

A szitamaradék és áthullás görbe egymást metszi. A metszéspont abszcisszája az „ $x(0,5)$ ” medián, amit a $D = R = 50\%$ -os értékhez tartozó szemcse nagyságnak is szokás nevezni. Ez a méret a halmaz jellemzésére használható, hiszen a szemcsés anyag fele ennél durvább ill. kisebb szemcse nagyságú. A medián a két eloszlásfüggvény metszéspontjának abszcisszája és a gyakorisági függvény alatti területet két egyenlő nagyságú részre osztja.

Az „ x_m ” módusz vagy leggyakoribb szemcse nagyság a gyakorisági függvény maximumhelyének abszcisszája. Az eloszlásfüggvények meredeksége itt a legnagyobb. Előfordul olyan gyakorisági függvény is, amelynek több maximumhelye van. Ilyen esetben a módusz ott van, ahol a gyakoriság érték a legnagyobb.

Az ipari gyakorlat szempontjából nagy jelentőségű, hogy valamely szemcsehalmaz szemcseméret-eloszlásáról előre tájékozva legyünk. Erre vonatkozó összefüggéseket részben empirikus módszerekkel, részben elméleti megfontolások alapján sokan felállítottak. A legismertebbek egyike a Rosin - Rammler - féle empirikus formula Bennet-féle írásmódja:

$$R = e^{-\left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^n} \quad (1.4)$$

vagy eredeti alakjában:

$$R = e^{-bx^n} \quad (1.5)$$

ahol „ R ” a kumulatív szitamaradékot adja meg az „ x ” szemcseméret (szitanyílás) függvényében. Ha „ x ” helyébe „ \bar{x} ”, - t , azaz az átlagos szemcseméretet helyettesítjük, úgy

$$R = \frac{1}{e} = 0,368 \quad (1.6)$$

adódik, azaz „ \bar{x} ”, az $R = 0,368$ szitamaradékhoz tartozó szemcseméret és $n = 0,5-2,0$ a finomsági szám. A szemcsehalmaz jellemzésére az európai gyakorlatban a RR eloszlás „ \bar{x} ”, átlagos szemcsemérete (fenti definíció szerinti $R = 0,368$ maradékhoz tartozó szemcseméret) használatos, míg az amerikai irodalomban az $x(0,2)$, azaz $R = 0,2$ maradékhoz tartozó szemcseméret szokásos. Megjegyezzük, hogy mindkettő önkényes és önmagában nem elegendő a szemcsehalmaz jellemzésére.

Az 1.4. összefüggést

$$\ln\left(\ln \frac{1}{R}\right) = n(\ln x - \ln \bar{x}) \quad (1.7)$$

alakban írva látszik, hogy olyan koordinátarendszerben, amelynek abszcisszája „ x ” logaritmusa szerinti és ordinátája „ $1/R$ ” kétszeres logaritmusa szerinti beosztású, az eloszlás egyenessel ábrázolható, mely egyenesnek „ n ” az iránytangense, ugyanis egy adott szemcseeloszlás esetén

„n” és „ \bar{x} ”, a halmazra jellemző állandó.

A modern mérés technika fejlődésével és az újabb kutatások révén bebizonyosodott, hogy az RRB maradványfüggvénynek több olyan alapvető hibája van, mely bizonyos funkciók betöltésére alkalmatlanná teszi. Ezen hiányosságok részben abból adódnak, hogy a függvény kis szemcseméretekre túlzott értékeket ad, részben pedig a függvény alapján az őrlési munkát sem lehet kiszámítani, amely egyes esetekben szükséges.

Mindezek ellenére az 1.4. összefüggés osztályozatlan anyagokra a legfinomabb - mikronos – nagyságrendű frakcióktól eltekintve jól használható a tömeg szerinti szemcseeloszlás leírására.

A gyakorisági függvény ismeretében kiszámítható az egyes frakciók fajlagos, egységnyi tömegre jutó „ N_i ” szemcseszáma és „ A_i ” felülete.

Legyen az „ i ”- edik szitán fennmaradt, azaz „ x_i ” és „ x_{i+1} ” méretek közötti frakció közepes szemcsemérete

$$x_{mi} = \frac{x_i + x_{i+1}}{2} \quad (1.8)$$

és a frakció tömege „ m_i ”

Egyetlen (gömbnek tekintett) szemcse felülete $x_{mi}^2 \pi$, tömege pedig $x_{mi}^3 \pi / 6 \rho_a$, ahol „ ρ_a ” a tömör anyag sűrűsége.

A frakcióban lévő gömbszemcsék száma:

$$N_i = \frac{m_i}{\frac{x_{mi}^3 \pi}{6} \rho_a} = \frac{6}{\rho_a \pi} \frac{m_i}{x_{mi}^3} \quad (1.9)$$

A frakció felülete:

$$A_i = \frac{6}{\rho_a \pi} \frac{m_i}{x_{mi}^3} x_{mi}^2 \pi = \frac{6}{\rho_a} \frac{m_i}{x_{mi}} \quad (1.10)$$

A teljes halmazra adódó felület a frakciófelületek összegezésével adódik:

$$A = \frac{6}{\rho_a} \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{x_i} \quad (1.11)$$

Ha pedig a $P(x)$ gyakorisági függvény ismeretes, úgy a teljes felület az alábbi integrál számításával adódik:

$$A = \frac{6}{\rho_a} \int_0^{\infty} \frac{P(x)}{x} dx \quad (1.12)$$

Az 1.12. összefüggés $dx/x = d(\ln x)$ helyettesítésével az alábbi alakban írható:

$$A = \frac{6}{\rho_a} \int_{-\infty}^{\infty} P(x) d(\ln x) \quad (1.13)$$

A gömbtől eltérő szemcsealak az un. alaktényező segítségével vehető figyelembe. Az alaktényező értéke durvaszemcsés anyagoknál általában nagyobb, míg finomszemcsés anyagoknál kisebb, erősen függ az anyagnak törési, hasadási tulajdonságaitól. Nagyságára különböző szerzők más-más értékeket adnak meg. Értéke leggyakrabban 1,2 – 2,0 - re vehető, míg a lemezesen ill. tű alakban hasadó anyagoknál jóval nagyobb is lehet.

A gömbtől eltérő szemcsealak esetén használatos még - különösen nagyobb szemcseméreteknél - a *redukált szemcseátmérő* és a *szemcse keresztmetszetének redukált értéke*.

Kis szemcseméret esetében (ha $x_o < 100 \mu m$) az alaktól függetlenül a szemet gömbnek tekinthetjük, nagyobb szemeknél az „ x_o ” méretet úgy értelmezzük, hogy a szem térfogatával azonos térfogatú gömböt létesítünk, és ennek az átmérőjével jellemezzük a szemet (*redukált szemcseátmérő*).

A redukált szemcseátmérőt a szem „ m_a ” tömegéből határozhatjuk meg a „ ρ_a ” tömör anyagsűrűség ismeretében

$$m_a = \frac{x_o^3 \pi}{6} \rho_a \quad (1.14)$$

és innen

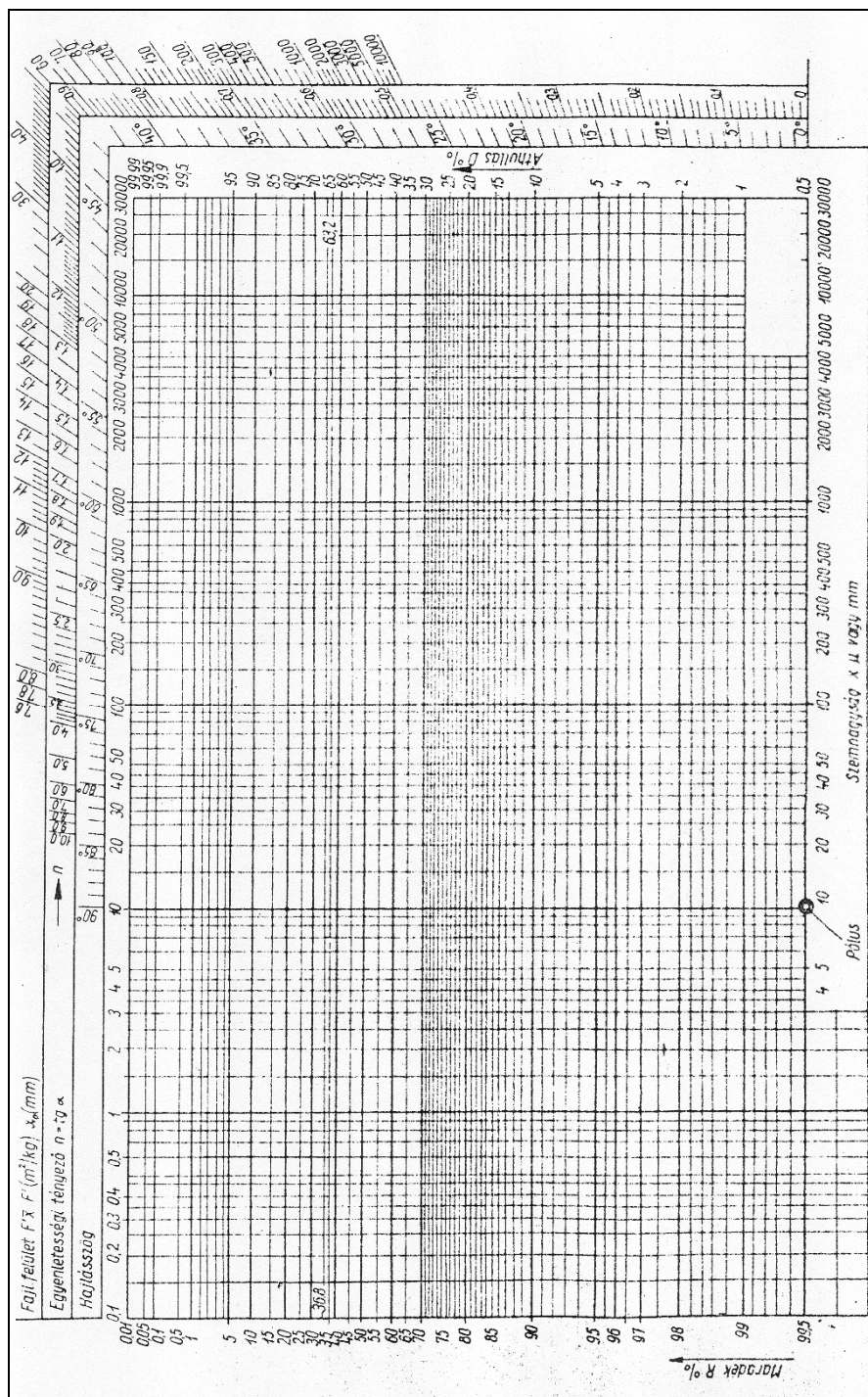
$$x_o = \left(\frac{6 m_a}{\pi \rho_a} \right)^{1/3} \quad (1.15)$$

A szemcse keresztmetszetének redukált értéke pedig:

$$A_o = \frac{x_o^2 \pi}{4} = \frac{\pi^{1/3}}{4} \left(\frac{6 m_a}{\rho_a} \right)^{2/3} \quad (1.16)$$

A fajlagos felület gyakorlati fontossága miatt egyes kutatók nagy erőfeszítéseket tettek, hogy a Rosin Rammler képletet a fajlagos felület legalább közelítő kiszámítására alkalmassá tegyék. Megpróbálták ezért az integrálási határokat $R = 0,1 \%$ és $R = 99,9 \%$ - ra korlátozni, majd az értékeket sorbafejtéssel kiszámítani. Megállapítható, hogy az „ $A' \bar{x}$ ” szorzat csak „n”-nek a

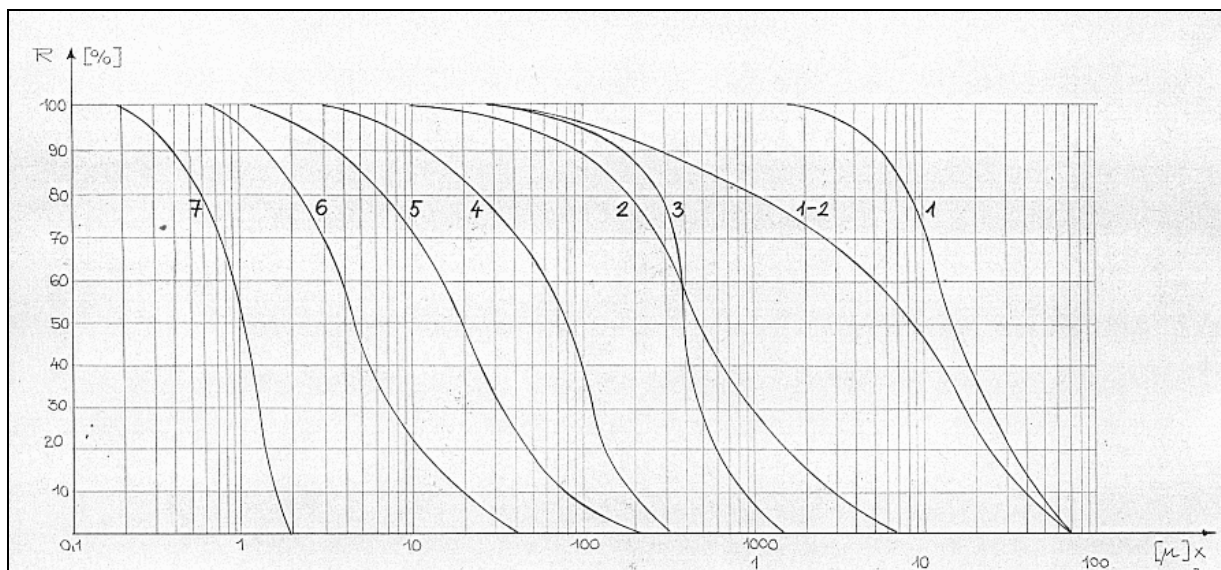
függvénye, ez pedig lehetővé teszi, hogy minden „ n ” értékhez egy „ $A' \bar{x}$ ” értéket rendeljenek. Ezt az elvet valósítja meg a DIN4190 szerint szabványosított és nálunk is elterjedt az 1.17. ábrán látható diagramháló. Az egyenes „ α ” hajlásszöge az „ n ” egyenletességi tényező és az „ $A' \bar{x}$ ” érték a szegélyléptéken leolvasható, ha az egyenessel a lap alján megadott póluson át párhuzamost húzunk.



1.17. ábra

Az így kiszámítható fajlagos felület azonban távol áll a valóságtól, így e szegélylépték használatát nem lehet javasolni.

A pneumatikus szállítás során szóba jöhető poros illetve szemcsés anyagok szemcseeloszlási görbéit mutatja az 1.18. ábra elsősorban a szemcseméret tartományok nagyságrendjének érzékeltetése céljából.



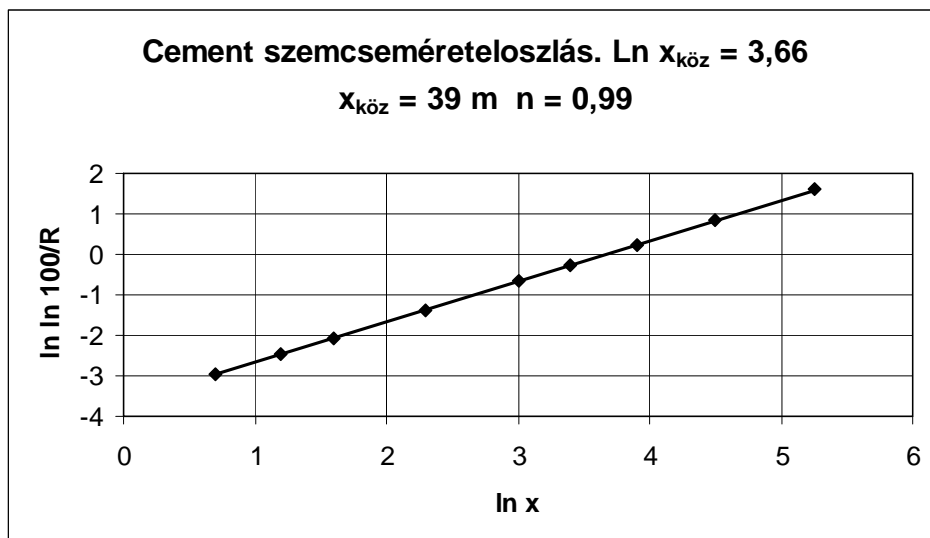
1.18. ábra

A szemcseeloszlás ábrázolás kérdése cementörleményre vonatkozó mérési adatok felhasználásával az 1.3. táblázat és az 1.19. ábra alapján világítható meg:

1.3. táblázat

Cement szemcseméreteloszlás mérési adatok

x [μ]	P [%]	R [%]	ln x	ln ln 100/R	n
200	0,7	0,7	5,3	1,60	0,98
90	9,3	10,0	4,5	0,83	0,99
50	18,0	28,0	3,9	0,24	1,02
30	18,0	46,0	3,4	-0,25	0,95
20	14,0	60,0	3,0	-0,67	1,01
10	18,0	78,0	2,3	-1,39	1,02
5	10,0	88,0	1,6	-2,06	1,00
3	4,0	92,0	1,1	-2,48	0,97
2	3,0	95,0	0,7	-2,97	1,00



1.19. ábra

Az 1.19. ábrából megállapítható, hogy az RRB függvény a megfelelően választott logaritmikus változók bevezetésével a mérési pontok elhanyagolhatóan kis szórásától eltekintve lineáris és így az ábrából az anyagra jellemző két adat, az „ n ” finomsági szám (az egyenes meredeksége $n=0,99$) és az „ \tilde{x} ”, átlagos szemcseméret ($\tilde{x}=39\mu$ az $R=36,8\%$ szitamaradékhoz tartozó szemcseméret) meghatározható.

A szemcsehalmazok eloszlásának leírására elterjedt másik összefüggés a *Gaudin-Schuhmann-Andrejev*-féle empirikus formula. Ez az eloszlásfüggvény Gaudin ama megfigyelésén alapszik, amelynek értelmében a Tyler-féle, $\sqrt{2}$ hányadosú szitasorozat egymást követő szitáin fennmaradó anyagtömegek mindkét tengelyen logaritmikus beosztású koordinátarendszerben egyenessel ábrázolhatók. Eredeti alakjában a „ D ” áthullás és az „ x ” szemcseméret kapcsolata az alábbi

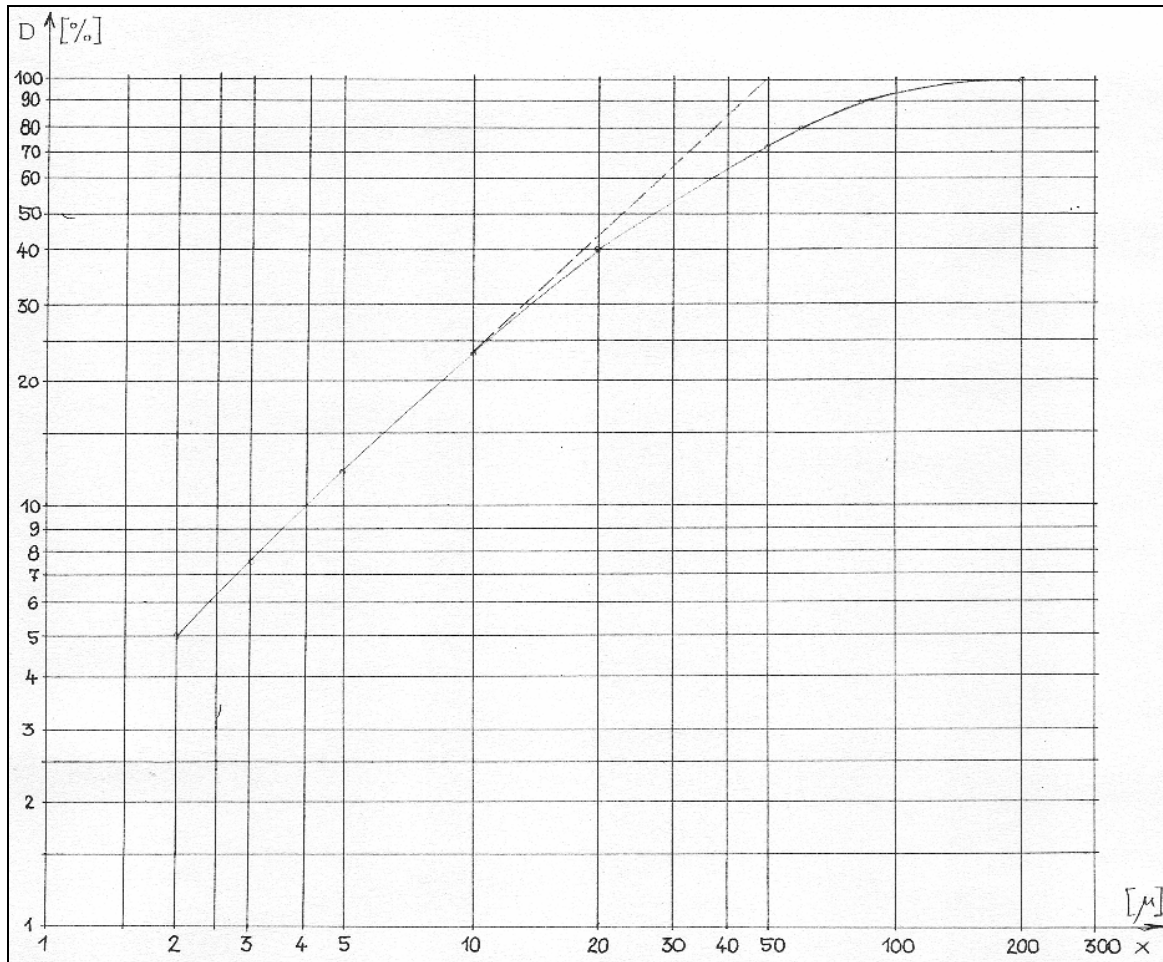
$$D = \left(\frac{x}{k} \right)^m \quad (1.17)$$

vagy logaritmálás után

$$\log D = m (\log x - \log k) \quad (1.18)$$

Az egyenes „ m ” iránytangensét Schuhmann *szórási modulus*nak, a $D=1$ (100%-os áthullás) értékhez tartozó „ k ” szemcsenagyságot pedig *méretmodulus*nak nevezi.

$D=1$ értéken túl az eloszlás értelme megszűnik, e pontban az eloszlási görbe folytonossága megszakad. Ez nem egyezhet a valósággal, mert a 100%-os áthulláshoz az eloszlási görbe csak fokozatos átmenettel és az eloszlási valószínűséget a $0-\infty$ tartományra értelmezve aszimptotikusan közeledhet.



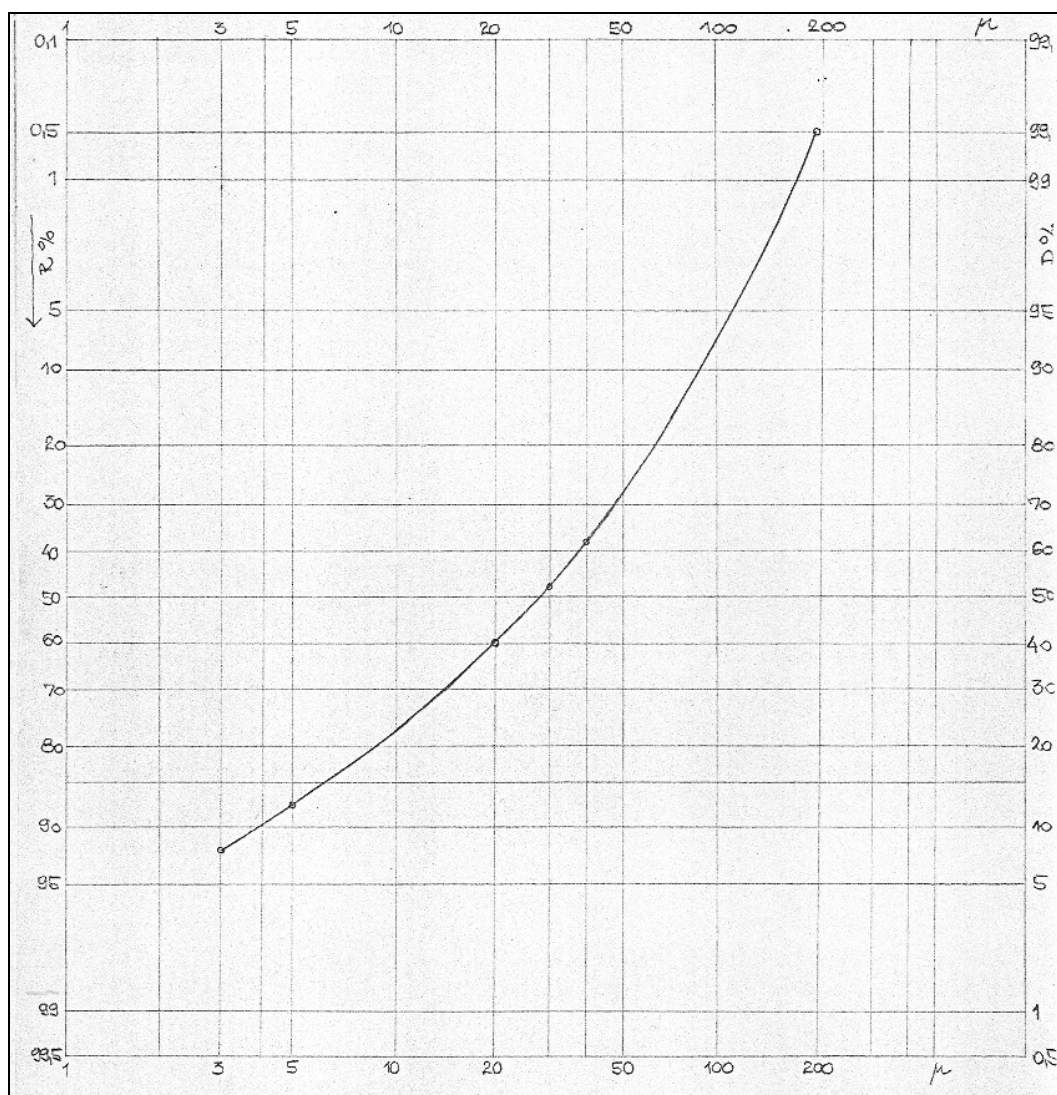
1.20. ábra

Az 1.20. ábrán az előbbi cementörlemény Gaudin-Schuhmann-Andrejev eloszlása látható. Mivel az 1.17. ill. 1.18. összefüggés két állandót tartalmaz, az eloszlást tehát két pontja (pl. két szitanyílásra vonatkozó maradék) meghatározza. Az egyenestől való eltérés a nagyobb szemcsék tartományában jelentős, ami egyúttal az összefüggés használhatóságának korlátjait is mutatja.

A két eloszlásfüggvény hasonlít egymásra. A Rosin-Rammler-Bennett empirikus kétparaméteres eloszlásfüggvény az „R” szitamaradékra, míg a Gaudin-Schuhmann-Andrejev függvény a „D” áthullásra vonatkozik.

Az 1.21. ábrán látható logaritmikus normális (lognormál) eloszlás az előzőekkel szemben elméleti eredetű. A. N. Kolmogorov és Rényi Alfréd levezetése alapján a szemcseszám szerinti megoszlás gyakorisága

$$N'(x) = \frac{1}{bx\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \ln a)^2}{2b^2}\right] \quad (1.19)$$



1.21. ábra

és a tömegeloszlás gyakorisága

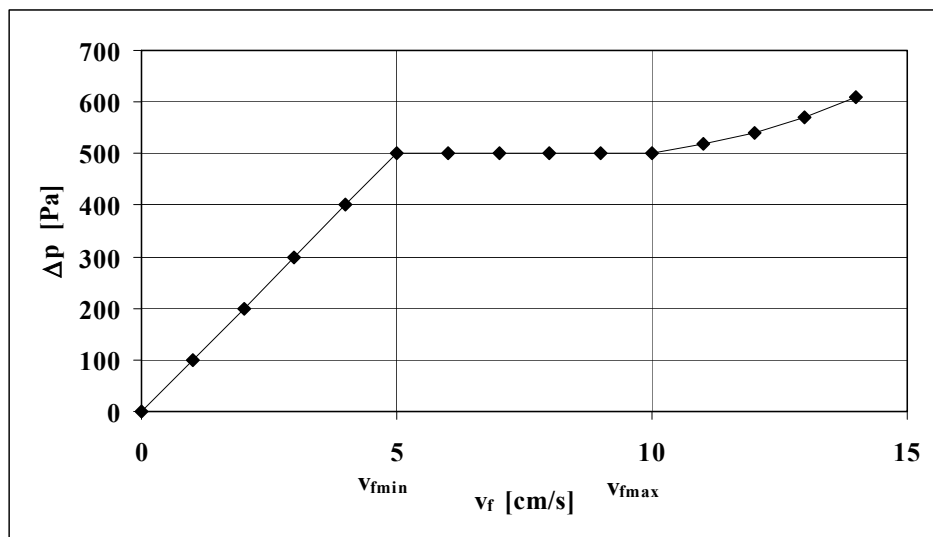
$$P(x) = D'(x) = \frac{x^2}{\sqrt{2\pi} a^3 b \exp\left(\frac{9b^2}{2}\right)} \exp\left[-\frac{(\ln x - \ln a)^2}{2b^2}\right] \quad (1.20)$$

Az 1.19. és 1.20. összefüggésekben „ a ” és „ b ” állandó paraméterek, amelyek közül „ a ” a szemcseszám szerinti logaritmikus normális eloszlás középvértéke, dimenziója hosszúság (szemcseméret), „ b ” pedig az eloszlás szórása (dimenzió nélküli szám).

A logaritmikus normális megoszlás eredeti alakjában nem írja le a valóságot, a fiktív osztályozásnak megfelelő korrekcióval a tömeg szerinti megoszlást is, a fajlagos felületet is elfogadható közelítéssel megadja.

Fluidizációs jellemzők

A pneumatikus szállítás több területén lényeges művelet a fluidizáció, azaz a poros ill. apró szemcsés szilárd anyag fluidummal (gáz, többnyire levegő) történő átáramoltatása. Ha valamilyen légeosztó rétegen nyugvó finomszemcsés (általában 0,005-1,0 mm átmérőjű szemekből álló) anyaghalmozaton alulról gázt áramoltatnak át, akkor egy jellemző, az anyag szemcsenagyságától és sűrűségétől függő gázsebesség - az ún. „ v_{fmin} ” minimális fluidizációs sebesség fölött a porréteg kiterjed, az egyes szemcsék lebegésbe jönnek, a lebegés révén éppen csak érintik egymást, majd az egész réteg „forrásban” lévő folyadékhoz hasonló állapotot vesz fel. Innen az állapot neve: fluidumhoz hasonló.



1.22. ábra

Az 1.22. ábra mutatja az anyaghalmozaton átáramló gáz miatt adódó „ Δp ” nyomásesés és a „ v_g ” gázsebesség közötti összefüggést idealizált ábrázolásban. A $v_g < v_{fmin}$ gázsebesség-tartományban a rétegben lévő anyagszemcsék megmaradnak a helyükön és a nyomásesés egyenesen arányos a gázsebességgel. Egészen kicsiny szemcseméreteknél ($x < 10 \mu m$) ez a törvényszerűség már nem érvényes. Az anyagréteg fellazulása a töréspontnál, pontosabban a töréspont közelében megkezdődik. A nyomásesés ugyanitt egyenlő az egységnyi keresztmetszetre jutó szemcsék súlyával

$$\Delta p = \frac{V_a(\rho_a - \rho_g)g}{A} = \frac{(1-\varepsilon)V(\rho_a - \rho_g)g}{A} = (1-\varepsilon)(\rho_a - \rho_g)gh \quad (1.21)$$

Az összefüggésben

A	[m ²]	- a fluidizált réteg teljes keresztmetszete
h	[m]	- az anyagréteg magassága
V	[m ³]	- az anyagréteget burkoló henger térfogata
ρ_a	[kg/m ³]	- a tömör anyag sűrűsége
ρ_g	[kg/m ³]	- a gáz sűrűsége
ε	[-]	- a hézagtérfogat-arány vagy porozitás, ami definíció szerint:

$$\varepsilon = \frac{V_g}{V} = \frac{V_g}{V_a + V_g} \quad (1.22)$$

g	[m/s ²]	- a gravitációs gyorsulás
---	---------------------	---------------------------

A minimális fluidizációs sebességnél adódó „ ε_{fmin} ” porozitás értéke az anyagréteg fellazulása, kiterjedése miatt nagyobb, mint a nyugvó halmazé.

A gázsebesség további növelésével a nyomásesés az ideálisan fluidizálható szemcséknél nem változik a $v_{fmin} < v_g < v_{fmax}$ tartományban, majd a maximális fluidizációs sebességnél megkezdődik az anyagszemcsék kihordása.

A minimális fluidizációs sebességet, mint a gázzal átáramoltatott szemcsés anyaghalmoz egyik jellemző tényezőjét lehetőleg kísérleti úton kell megállapítani. Amennyiben ez nem lehetséges, akkor a M. Leva [16] nevéhez fűződő legelterjedtebb számítási mód használata a célravezető

$$G_{mf} = \left[\frac{d_e \varphi^{3-n} (\rho_a - \rho_f) \varepsilon_{mf}^3 g_c}{2 f_m \rho_g (1 - \varepsilon_{mf})^{2-n}} \right]^{1/2} \quad (1.23)$$

Ahol

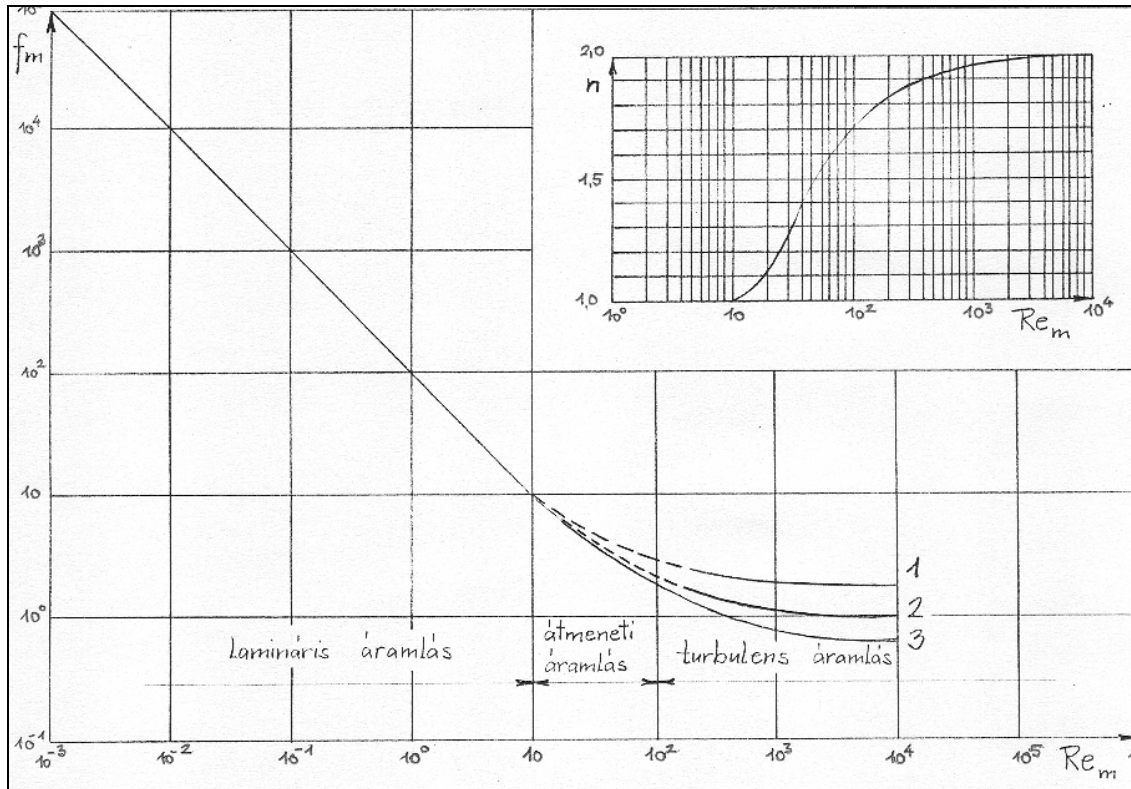
G_{mf}	- a fluidum tömegsebessége minimális fluidizációnál
d_e	- egyenértékű szemcseátmérő (a szemcsével azonos térfogatú gömb átmérője)
φ	- alaktényező (szfericitás), az azonos térfogatú gömb és a tetszőleges alakú szemcse felületének aránya
ρ_a	- a tömör anyag sűrűsége
ρ_f	- a fluidum sűrűsége
f_m	- módosított (Fanning-féle) súrlódási tényező amely a „ Re_m ” módosított Reynolds-szám függvénye: $f_m = f(Re_m)$

$$Re_m = \frac{d_e v_g}{\nu_g} = \frac{d_e v_g \rho_g}{\eta_g} \quad (1.24)$$

g_c - konverziós tényező

G_{mf} értéke az „ n ” kitevő feltüntetésével az alábbiak szerint számítható:

$n = 1,$	lamináris áramlásnál	$Re_m \leq 10$	$f_{mlam} = 100/Re_m$
$1 \leq n \leq 2,$	az átmeneti zónában	$10 \leq Re_m \leq 100$	(lásd az 1.23. ábrát)
$n = 2,$	a turbulens tartományban	$Re_m \geq 100$	$f_{mturb} \approx 1$



1.23. ábra

Mivel a poros és aprószemcsés anyagok gázzal történő átáramoltatásakor a fluidizáció többnyire $Re_m \leq 10$ tartományban, azaz lamináris áramlásnál megkezdődik, így az 1.23. összefüggésbe az $n = 1$ és $f_m = 100/Re_m$ értékeket helyettesítve a minimális fluidizációs tömegsebességre az alábbi

$$G_{mf} = \frac{0,005 d_e^2 g_c \rho_f (\rho_a - \rho_f) \varphi^2 \varepsilon_{mf}^3}{\eta (1 - \varepsilon)} \quad (1.25)$$

összefüggés adódik.

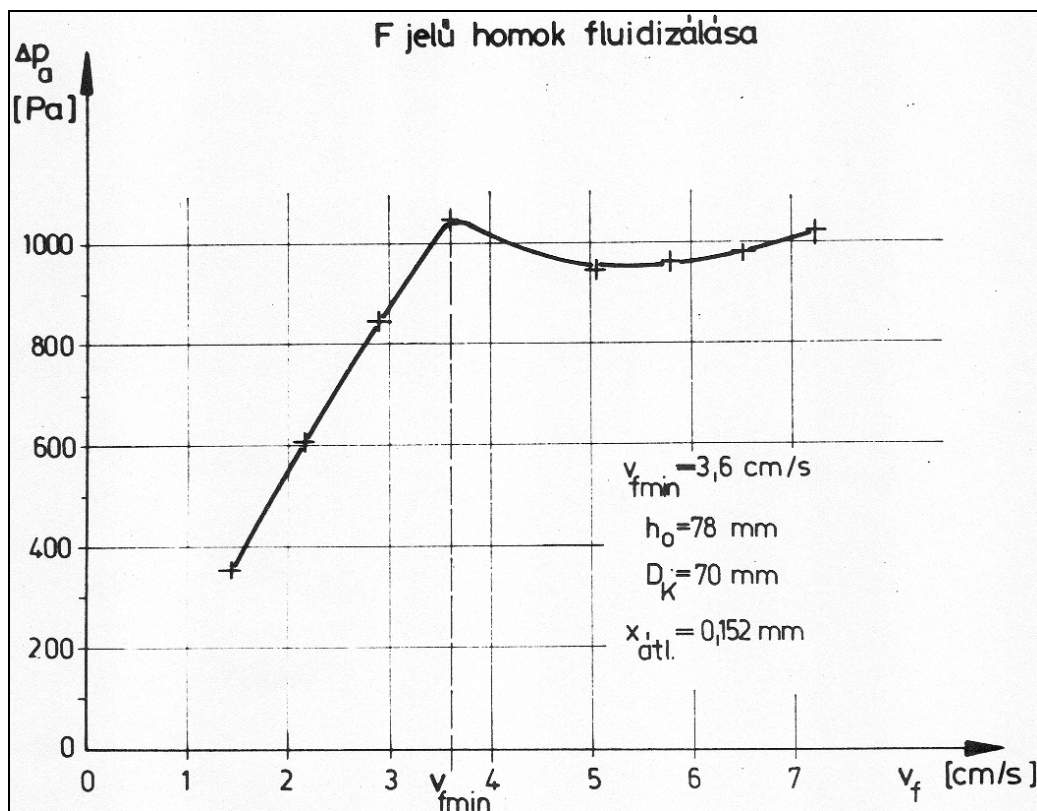
Az 1.25. összefüggés használatához ismerni kell a minimális fluidizációs sebességhez tartozó „ ε_{mf} ” porozitást és a „ φ „ alaktényezőt. Kísérleti úton azt találták, hogy ezek a „ Re_m ”

függvényében kifejezhetők. $Re_m < 5$ esetén a K dimenziótlan mennyiség számítására az alábbi összefüggés érvényes:

$$K = 0,005 \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \varphi^2 = 0,0007 Re_m^{-0,063} \quad (1.26)$$

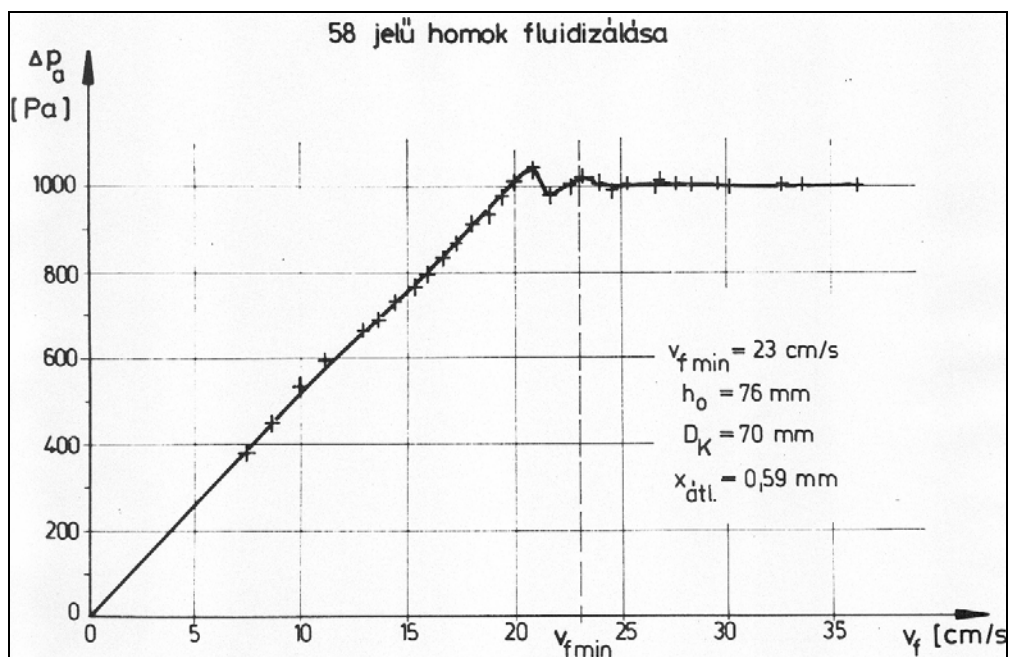
amiből a minimális fluidizációs tömegsebesség számítható:

$$G_{mf} = \frac{688 d_e^{1,82} [\rho_f (\rho_a - \rho_f)]^{0,94}}{\eta^{0,88}} \quad (1.27)$$

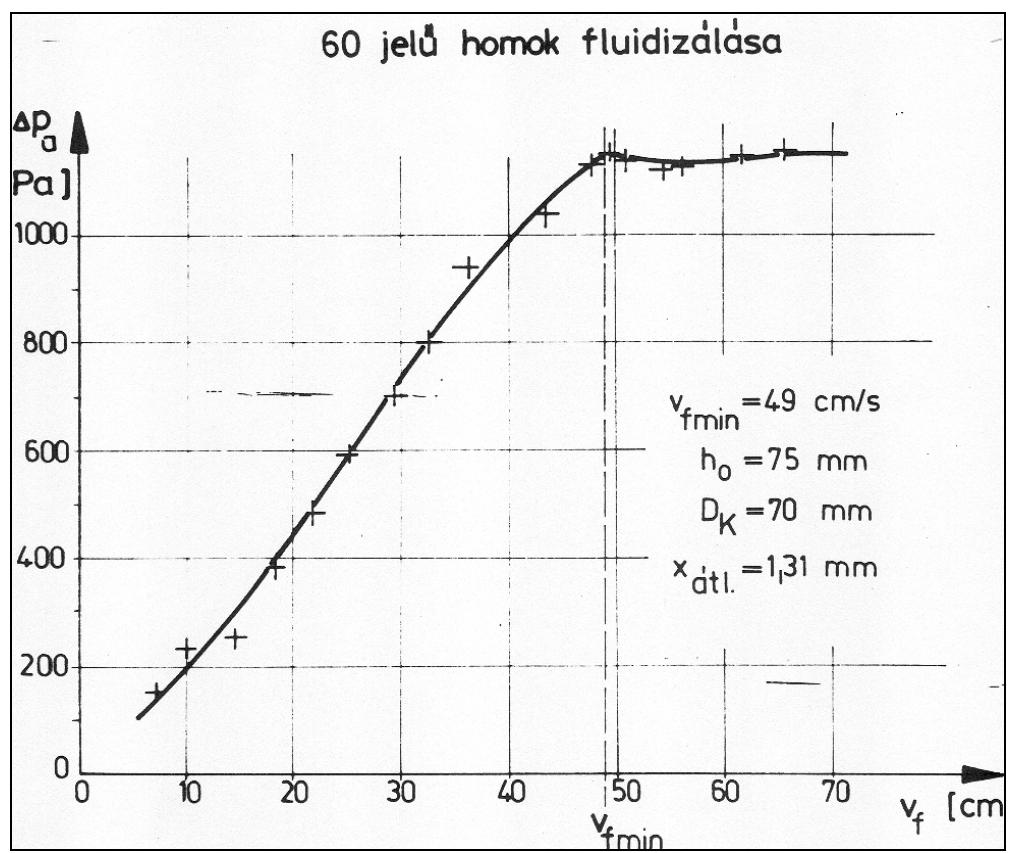


1.24. ábra

Az 1.27. összefüggés szerint a minimális fluidizációs sebesség jelentősen függ a szemcsemérettől. Erre mutatnak kísérleti úton meghatározott fluidizációs jelleggörbék feltüntetésével példákat az 1.24. - 1.26. ábrák. Az ábrákból megállapítható, hogy azonos anyagfajta - esetünkben homok - fluidizációs tulajdonságai (így pl. a minimális fluidizációs sebesség értéke) jelentősen függenek a szemcseszerkezettől, azaz a durvább szemcsészetű anyag fluidizálásához nagyobb levegősebesség tartozik a többi paraméter („ h_0 ” - nyugalmi anyag rétegmagasság, „ D_k ” - a fluidizációs készülék átmérője) állandósága esetén.



1.25. ábra



1.26. ábra

Megjegyezzük, hogy a fluidizáció vizsgálatával foglalkozó kutatók közül többen a minimális fluidizációs sebesség helyett jellemzőbbnek tartják a „ h/h_0 ” anyag rétegmagasság - viszony határhelyzetét ($h/h_0 \geq 1$). Kísérleti tapasztalataink szerint mindkét mennyiség jól használható az anyag fluidizálhatóságának jellemzésére, értékeik az általunk vizsgált anyagoknál összhangban vannak.

A fluidizáció a pneumatikus szállítás szempontjából nagy jelentőségű a silók ürítésénél, a nyomótartályokból való anyagindításnál, valamint az aerációs ill. réselt lemezes csatornával történő szállításnál, míg tágabb értelemben a fluidizáció megnöveli az anyagátbocsátást és a hőátadást, ez utóbbi jelenségek vizsgálata viszont már nem tartozik e könyv témakörébe.

Jellemző anyagsűrűségek

A poros, szemcsés anyagokkal végzett különböző műveletek-, szállítási és tárolási állapotok közben többféle sűrűség definiálása szükséges.

Tömör anyagsűrűségnek nevezzük a porszemcse anyagának sűrűségét, azaz a pórusmentesnek képzelt porszemcse egységnyi térfogatra jutó tömegét. A tömör anyagsűrűség méréssel csak akkor határozható meg, ha a porhalmazból, anyag- és kristályszerkezeti változás nélkül - belső zárványmentes - olvadék készíthető. Az olvadék sűrűsége, az előző feltételek teljesülése esetén, azonos a halmaz tömör sűrűségével.

A *látszólagos sűrűség* a porszemcse tömegének és belső pórusaival együtt mért térfogatának hányadosa. A részecskehalmaz látszólagos sűrűségének meghatározása piknométerrel történik. A hitelesített térfogatú piknométerbe port töltenek és megméri a tömegét. Ismert sűrűségű és a port jól átnedvesítő folyadék hozzáöntése után a sűrű homogén szuszpenziót összekeverik, és a piknométert ismét mérlegelik.

Az üres piknométer tömege „ m_p ”, a poré „ m_s ”, a folyadékot és port tartalmazó piknométeré pedig „ $m_p + m_s + m_f$ ”. Ha a folyadék sűrűsége „ ρ_f ”, térfogata „ V_f ” (mely térfogat a piknométerben lévő por térfogatán felüli térfogat), akkor a piknométer „ V_p ” térfogata ismeretében meghatározható a por „ V_s ” térfogata is:

$$V_s = V_p - V_f = V_p - \frac{(m_p + m_s + m_f) - (m_p + m_s)}{\rho_f} \quad (1.28)$$

Ezzel a por „ m_s ” ismert tömegéből és „ V_s ” térfogatából a látszólagos sűrűség

$$\rho_l = \frac{m_s}{V_s} \quad (1.29)$$

számítható.

A fenti piknométeres sűrűségmérési módszer feltételezi, hogy a piknométerben nem

marad levegőbuborék és a mérőfolyadék a részecskéknek minden pórusába behatol, ez azonban gyakran nem valósítható meg, még rázással és melegítéssel sem. Az így meghatározott sűrűség azután kisebb a ténylegesnél.

Ha a porrészecskék a folyadékban átnedvesedés után megduzzadnak, a sűrűség levegő ill. gáztöltésű piknométerrel határozható meg. Még ez utóbbi módszer sem küszöböli ki a por sűrűségmérésének hibáját, amelyet az egyes részecskék szűk pórusa okoz.

S. J. Gregg mérései szerint antracit esetén különböző folyadékokkal és héliummal mért sűrűségek a következők (lásd az 1.4. táblázatban):

1.4. táblázat

Antracit különböző mérőközegben mért sűrűsége

Anyag	hélium	CH ₃ OH	H ₂ O	C ₆ H ₁₄	C ₆ H ₆
Sűrűség [kg/m ³]	1645	1700	1630	1497	1518

Térfogatsűrűség a porszemcse belső zárt és nyitott pórusaival együtt mért térfogategységnyi tömege értendő.

Ömlesztett sűrűség vagy *laza halmazsűrűség* névvel illetik a porhalmaz térfogategységnyi tömegét közvetlenül a mérőedénybe való betöltés után mérve. Az ömlesztett sűrűség meghatározására számos különböző módszer ismeretes, ám ezek csak abban térnek el egymástól, hogy milyen módon viszik az ömlesztett anyagot a mérőedénybe, és egészítik ki a pontos térfogatra.

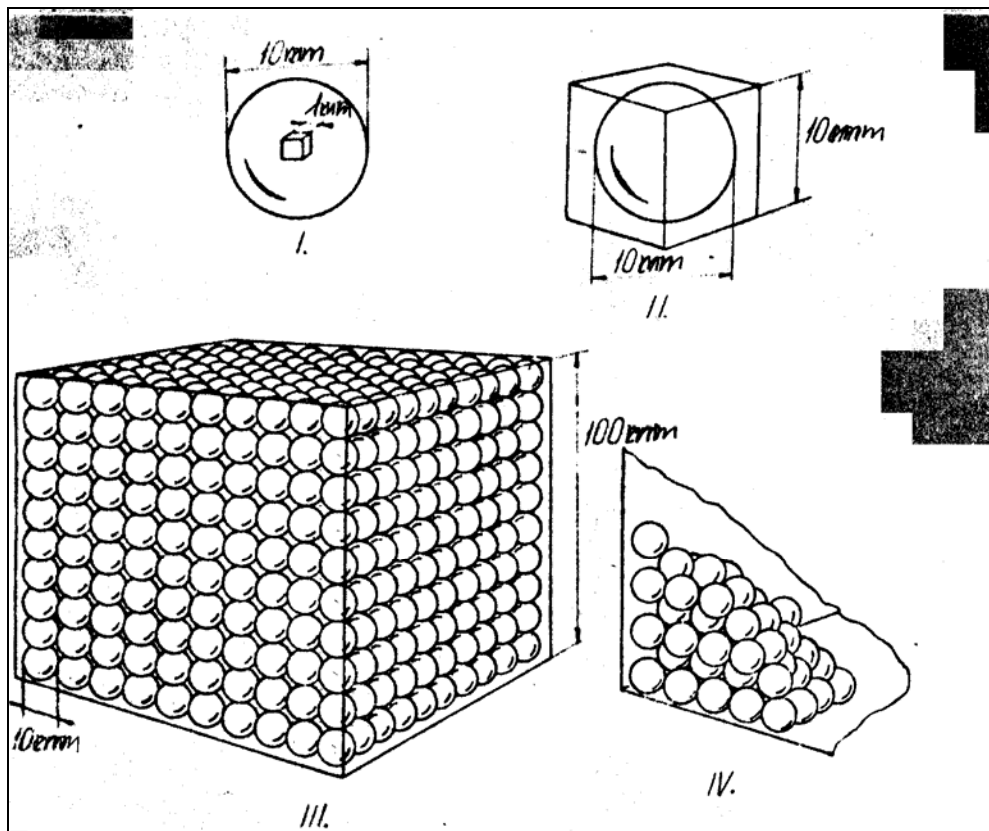
A por mérőedénybe juttatásának módja igen jelentős. Minél lassabban és minél alacsonyabbról adagolják a port, annál kisebb az ömlesztett sűrűség értéke, mert az anyag erőszakos rázása nem következik be. Az egyes szerkezetek (pl. Gary-féle készülék, Böhme-féle készülék) állandó magasságról adagolják a mérőedénybe a port.

Számoljuk ki különböző elrendezésű azonos méretű alumínium ill. acélgolyók ömlesztett sűrűségét, azaz a térfogategységben elhelyezhető anyag tömegét.

Látni fogjuk, hogy az ömlesztett szilárd anyagoknál a sűrűség értéke attól is függ, hogy a szilárd anyag darabjaihoz, szemcséihez viszonyítva mekkorára választjuk a térfogategységet. Például $d = 10$ mm átmérőjű golyókat vizsgálva az 1.27. ábrán az I. jelű esetben a térfogategység 1 mm élű kocka (1mm³). Az alumínium kockára (miután a tömör alumínium sűrűsége $\rho_a = 2,7$ kg/dm³ = 2,7 g/cm³) $\rho_I = 0,0027$ g/mm³ és acélkockára (lévén a tömör acél sűrűsége $\rho'_a = 7,5$ kg/dm³ = 7,5 g/cm³) $\rho'_I = 0,0075$ g/mm³ ömlesztett sűrűséget kapunk, mely értékek a golyók tömör anyagsűrűségével azonosak.

A II.-vel jelölt esetben a térfogategység 10 mm élű kocka (1 cm³), viszont az anyag a teret csak a golyó térfogatában tölti ki teljesen, s ez

$$V_{II.} = \frac{d^3 \pi}{6} = 0,524 \text{ cm}^3$$



1.27. ábra

tehát az alumíniumgolyóra

$$\rho_{II.} = 0,524 \rho_a = 1,41 \text{ kg/dm}^3$$

és az acélgolyóra

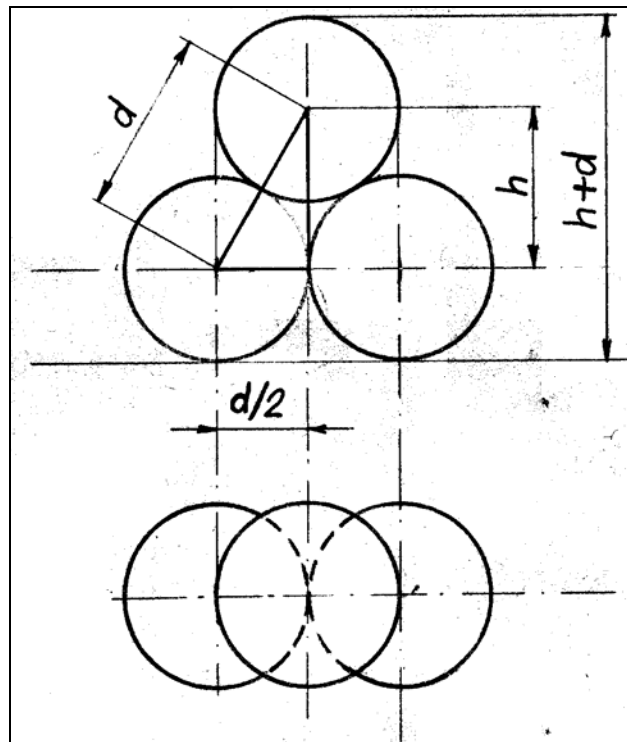
$$\rho_{II.}' = 0,524 \rho_a = 3,93 \text{ kg/dm}^3$$

A III. - mal jelölt esetben a térfogategység 100 mm él-hosszúságú kocka (1 dm^3). A kocka egyik éle mentén 10 db egymással érintkező golyót lehet elhelyezni, s a kocka alapján 10 sort, amelynek golyói a megelőző sor golyóival érintkeznek. Így az alsó rétegben 100 golyó van. A következő rétegben a golyókat többféleképpen lehet elhelyezni. Ha minden golyó legmagasabb pontjával érintkezik a következő rétegben lévő golyók legalsó pontja, úgy minden rétegben 100-100 golyó van, s tíz réteg fér a 100 mm él-hosszúságú kockába. Tehát az a térfogat, ami anyaggal ki van töltve, az összes golyó térfogatával egyenlő:

$$V_{III.} = \frac{d^3 \pi}{6} 10^3 = 524 \text{ cm}^3$$

A kockában lévő golyók száma 1000, tehát alumíniumgolyóra $\rho_{III.} = 524 \rho_a = 1414 \text{ kg/m}^3 \cong 1,41 \text{ kg/dm}^3$ és acélgolyóra $\rho_{III.}' = 524 \rho_a' = 3927 \text{ kg/m}^3 \cong 3,93 \text{ kg/dm}^3$. Itt tehát ugyanazokat az értékeket kaptuk, mint az előző (II. jelű esetben).

A IV.-gyel jelölt esetben az alsó réteg közeibe helyezzük a felette lévő réteg golyóit.



1.28. ábra

Az 1.28. ábrán két nézetben ábrázoltuk az alsó és a felette elhelyezett második réteg golyóinak egy csoportját. Ebből látható, hogy az egymás fölötti rétegek távolsága „ h ” és $h < d$

$$h^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 = d^2 \quad (1.30)$$

$$h = \sqrt{d^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = 0,866d \quad (1.31)$$

Vagy az „ y ” magasságú kockában elhelyezhető rétegek száma:

$$p_{IV.} = \frac{y-d}{0,866d} + 1 = 1,15 \frac{y}{d} - 0,15 \quad (1.32)$$

Az y/d a 0,15-höz viszonyítva nagy érték (pl. 1 dm³-es kockában elhelyezett 10 mm-es golyóknál $y/d=10$), tehát nem követünk el nagy hibát, ha a - 0,15 tagot elhanyagoljuk:

$$p_{IV.} \approx 1,15 \frac{y}{d} \quad (1.33)$$

Ha összehasonlítjuk a III. és IV. helyzetben elhelyezett golyókat, akkor a következő megállapításokat tehetjük:

$$p_{III.} = \frac{y}{d} < p_{IV.} \approx 1,15 \frac{y}{d} \quad (1.34)$$

Egy-egy y - y nagyságú rétegben elhelyezett golyók száma:

$$r = \frac{y}{d} \frac{y}{d} \quad (1.35)$$

és az „ y ” él-hosszúságú kockában elhelyezett összes golyók száma:

$$s_{III.} = \left(\frac{y}{d}\right)^3 < s_{IV.} = 1,15 \left(\frac{y}{d}\right)^3 \quad (1.36)$$

A golyók által elfoglalt térfogat:

$$V_{III.} = s_{III.} \frac{d^3 \pi}{6} = \frac{y^3 \pi}{6} = 0,524 y^3 \quad (1.37)$$

$$V_{IV.} = s_{IV.} \frac{d^3 \pi}{6} = 1,15 \frac{y^3 \pi}{6} = 0,6 y^3 \quad (1.38)$$

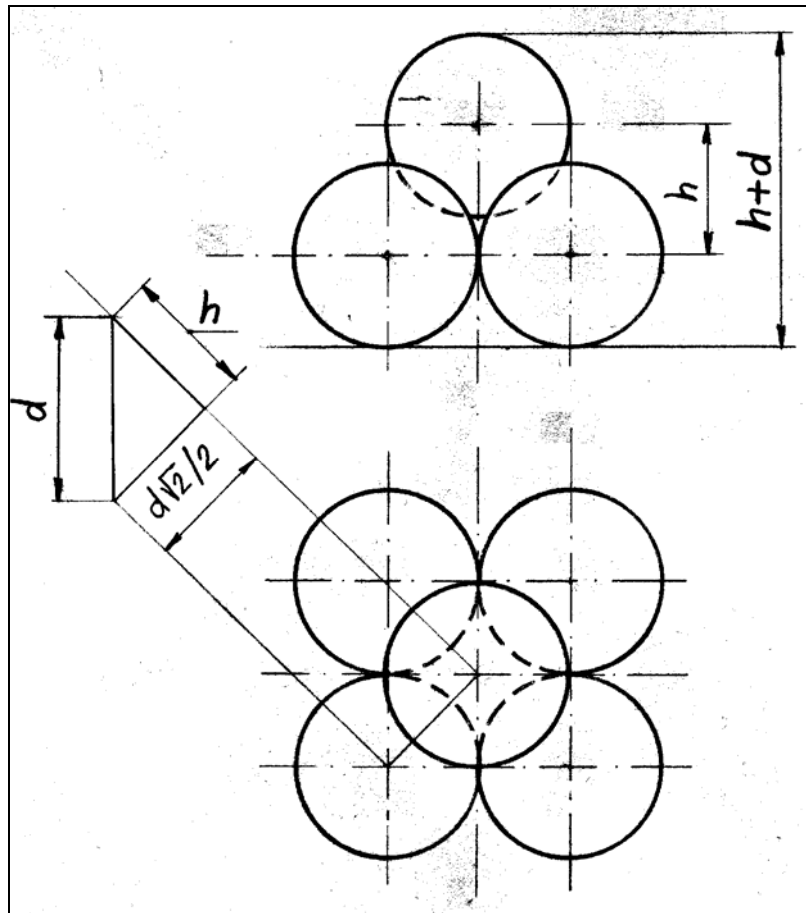
Példánkban $V_{IV.} = 600 \text{ cm}^3$. Az ömlesztett sűrűség alumíniumgolyó esetében $\rho_{IV.} = 600 \rho_a = 1620 \text{ kg/m}^3 = 1,62 \text{ kg/dm}^3$ és acélgolyók esetében $\rho_{IV.}' = 600 \rho_a' = 4500 \text{ kg/m}^3 = 4,50 \text{ kg/dm}^3$.

Az 1.29. ábrán két nézetben megrajzoltuk az V. jelű golyóelrendezést, amely szerint az alsó réteg közeibe úgy helyezzük el a felette lévő réteg golyóit, hogy egy golyó négyre támaszkodik.

Ezzel

$$h^2 + \left(\frac{d\sqrt{2}}{2} \right)^2 = d^2 \quad (1.39)$$

$$h = \sqrt{d^2 - \left(\frac{d\sqrt{2}}{2} \right)^2} = 0,707d \quad (1.40)$$



1.29. ábra

Így az „y” magasságú kockában elhelyezhető rétegek száma:

$$p_{V.} = \frac{y-d}{0,707d} + 1 = 1,41 \frac{y}{d} - 0,41 \quad (1.41)$$

Az y/d a 0,41-hez viszonyítva nagy érték, így közelítőleg:

$$p_{V.} \approx 1,41 \frac{y}{d} \quad (1.42)$$

Az „y” él-hosszúságú kockában elhelyezett összes golyók száma:

$$s_{V.} \approx 1,41 \left(\frac{y}{d} \right)^3 \quad (1.43)$$

A golyók által elfoglalt térfogat:

$$V_{V.} = s_{V.} \frac{d^3 \pi}{6} = 1,41 \frac{y^3 \pi}{6} = 0,74 y^3 \quad (1.44)$$

Példánkban $V_{V.} = 740 \text{ cm}^3$. Az ömlesztett sűrűség alumíniumgolyó esetében $\rho_{V.} = 740 \rho_a = 1999 \text{ kg/m}^3 = 2,0 \text{ kg/dm}^3$ és acélgolyók esetében $\rho_{V.}' = 740 \rho_a' = 5554 \text{ kg/m}^3 = 5,55 \text{ kg/dm}^3$.

Látható tehát, hogy az I.-V. helyzetekben más és más ömlesztett sűrűségek adódtak. Ezeket összesíti az 1.5 táblázat.

1.5. táblázat

Az I.-V. golyóelrendezés eseteiben az ömlesztett sűrűség értékei [kg/dm³]-ben

A golyók anyaga	I.	II.	III.	IV.	V.	Tömör anyag sűrűség
	helyzetben					
alumínium	2,70	1,41	1,41	1,62	2,00	2,70
acél	7,50	3,93	3,93	4,50	5,55	7,50

Néhány anyag ömlesztett sűrűségének értéke az 1.6. táblázatban található.

1.6. táblázat

Ömlesztett sűrűség értékek

Anyag	Ömlesztett sűrűség [t/m ³]	Anyag	Ömlesztett sűrűség [t/m ³]
Antracit, darabos és légszáraz	0,82-0,90	Formázóhomok	1,15-1,60
Apró szén, d<20mm	0,80-0,85	Kavics, száraz	1,70-1,90
Szén, darabos és légszáraz	0,72-0,86	Kavics, nedves	1,90-2,10
Barnaszén, darabos és légszáraz	0,65-0,78	Kavicsos homok, száraz	1,50-1,65
Lignit	0,65-0,85	Kavicsos homok,	1,60-1,80

		nedves	
Tőzeg, száraz	0,32-0,41	Dolomit	1,20-1,50
Tőzeg, nedves	0,41-0,65	Gránit, zúzott	1,80-2,50
Koksz, darabos és légszáraz	0,40-0,55	Mészkeő, zúzott	1,50-1,80
Fejtett szén (aknaszén)	0,70-0,95	Homokkő	1,30-1,50
Széntüzelés salakja	0,65-0,85	Pala	1,80-2,80
Granulált kohósalak	0,60-1,00	Vasérc	1,75-3,00
Széntüzelés hamuja, száraz	0,55-0,90	Kvarc	2,30-2,80
Falazótégla	1,40-1,55	Búza	0,70-0,80
Klinkertégla	1,60-2,00	Rozs	0,68-0,80
Mész, égetett, darabos	1,00-1,40	Árpa	0,65-0,72
Portlandcement, lazán öntve	1,10-1,45	Zab	0,40-0,55
Salakcement, lazán öntve	0,90-1,10	Kukorica, morzsolt	0,70-0,80
Beton, plasztikus vagy földnedves	1,80-2,45	Liszt	0,65-0,72
Föld, száraz	1,10-1,60	Cukorrépa	0,57-0,65
Föld, nedves	1,60-1,80	Cukor, darabos	0,75-1,00
Agyag, száraz	1,20-1,60	Kősó	1,50-2,20
Agyag, nedves	1,60-2,10	Finom só	0,65-1,50
Homok, finom és száraz	1,10-1,65	Csont	0,80-1,15
Homok, finom és nedves	1,65-2,10	Műtrágya	0,85-1,00
Homok, durva	1,40-1,60	Fűrészpor	0,30-0,35

Tárolt sűrűség a tárolt porhalmaz nyugalmi állapotban állandósult térfogategységnyi tömege. Meghatározása kalibrált mérőedény segítségével történik. A mérőedénybe töltött anyagoszlop magassága az edény átmérőjéhez viszonyítva legalább 3-szorosa kell legyen. A mérést akkor kell befejezettnak tekinteni, ha a halmaz térfogata egy héten keresztül nem változik.

Rázott sűrűség vagy tömörített halmazsűrűség a porhalmaz rázott állapotban állandósult térfogategységnyi tömege. A rázás történhet kézzel, mechanikus ill. elektromágneses úton. Mivel a rázott sűrűség a rázás módjától, idejétől függ, ezért a reprodukálható, anyaghalmazra jellemző rázott sűrűség meghatározásához a rázást térfogat állandóságig kell folytatni.

Mind az ömlesztett, mind a rázott sűrűség függ a szemcsék alakjától. Minél jobban eltér a szemcse a gömbalaktól annál kisebbek a fenti sűrűség értékek. Fontos a részecskék szemcseméret eloszlása is, de a részecskék nagyságával (különösen a nagyon finom porok esetén) együtt járhat agglomerálódásuk is. Pontos összefüggés a szemcseméret eloszlás és az ömlesztett sűrűség között nem állapítható meg. Itt ui. nem lehet a térnek porrészecskékkal való egyenletes kitöltéséről beszélni, hanem a részecskék véletlen kölcsönös összeállásáról van szó. Ennek következtében gyakran megakad a részecske vagy részecskecsoport és üregek, boltozatok keletkeznek. A

durvább szemcsézetű porok tömege rendszerint nagyobb, mint a nagyon finom poroké.

A „ ρ_δ ” ömlesztett és a „ ρ_r ” rázott sűrűség között többnyire az alábbi összefüggés érvényes:

$$\rho_r = (1,2 - 1,5) \rho_\delta \quad (1.45)$$

Természetes rézsűszög

A portechnikai alapfogalmakat összefoglaló szabvány definíciója szerint az „ α_r ” rézsűszög a vízszintes síkra öntött kúp alakú porhalmaz alkotójának a vízszintessel bezárt szöge. Meghatározásához olyan készüléket használnak, amelyben egy változtatható nyílásméretű tölcserből úgy ömleszthető ki az anyag egy vízszintes síklapra, hogy a tölcser kiömlőnyílása mindig a kialakuló porkúp csúcsa közelében legyen. Az ömlesztést akkor kell befejezni, ha az anyag halmaz a „ D ” átmérőjű vízszintes síklapot teljesen befedi. Az „ α_r ” rézsűszög értéke ebben a helyzetben vagy közvetlenül szögméréssel, vagy a kúp „ H ” magasságának mérésével határozható meg. Ez utóbbi esetben a rézsűszög az

$$\alpha_r = \arctg \frac{2H}{D} \quad (1.46)$$

összefüggés alapján számítható.

Az ömlesztett kúp alakja és így a rézsűszög függ a részecskék közötti súrlódási viszonyoktól, a részecskék alakjától, méretétől sűrűségétől és nedvességtartalmától. Mindenekelőtt a részecskék alakját kell idesorolni, minél szabályosabbak, azaz minél inkább gömb alakúak a részecskék, a rézsűszög értéke annál kisebb. A szemcseméret hatása általában olyan, hogy a finomabb szemcse összetételű anyag ömlesztési rézsűszöge nagyobb; kivételt képeznek azonban a nagyon finom és összetapadásra hajlamos porok, mert ezekben a részecskék többnyire nem különülnek el egymástól, hanem csomóba tapadnak össze.

Csúszási szög

A portechnikai szakirodalom alapvetően kétféle csúszási szöget definiál, az egyik a porhalmaz csúszását saját anyagából készült síklapon vizsgálja, míg a másik eltérő anyagú lapot használ. Az első értéke elméletileg egyenlő a rézsűszöggel.

A csúszási szöget olyan készülékkel mérjük, amelyben egy vízszintes tengely körül billenthető lap helyezkedik el, amely lap vízszintessel bezárt szögét szögmérő mutatja. A lapot három oldalról 2 mm magas oldalfal határolja. A mintát minimális magasságból a vízszintes helyzetű lapra folytatjuk, majd a felszínét elsimítjuk - miközben ügyelni kell arra, hogy a port ne nyomjuk össze -, majd a lemezt lassan emeljük. Amikor az anyag halmaz, vagy annak jelentős része megmozdul, leolvassuk a csúszási szöget.

Az ismertetett módszer tájékoztatást nyújt arról, hogy a mérésre használt lap és a vizsgált por között milyen adhéziós erő lép fel. Ezen csúszási szög tehát a porrészecskék és az alátét

lemez közötti súrlódástól, vagyis az alátét felületének anyagától és felületi minőségétől függ. Függ ezen kívül - a rézsűszöghöz hasonlóan - a por tulajdonságaitól. A csúszási szög (azonos felület esetén) általában annál nagyobb, minél finomabb a por és minél kevésbé gömb alakúak a részecskék.

- Ömleszthetőség

A porok ömleszthetősége összetett fogalom, igen sok tényező függvénye. Hermann [20] az általa bevezetett ömlesztési tényezővel a porhalmazok ömleszthetőségét a vízhez viszonyítva adta meg. A víz ömleszthetőségét 100-nak véve, a különböző porhalmazokkal különböző kifolyónyílásoknál összehasonlító méréseket végzett és például homokra 33,5, kősóra 17,6, különböző száraz koks és szénporra 9-12 közötti ömlesztési tényező értékeket határozott meg. A legjobban ömleszthetők a sima felületű gömbszerű szemcsés anyagok, így például a homok és egyéb kristályok. Az ömleszthetőség jelentősen függ a szemcsemérettől is. A növekvő szemcsemérettel az anyagok egyre jobban ömleszthetők, különösen jó példa erre a szénpor. Az igen finom porok (60 μm alatt) már nehezen ömleszthetők. A finom szemcsék eltávolításával és ezzel egyidejűleg a kisebb szemcseméret tartomány kialakításával, azaz egyenletesebb anyaghalmaz esetén javul az ömleszthetőség is. Ezzel szemben hosszabb tárolási idő alatt az anyag tömörödése, a porszemcsék erősebb összetapadása miatt romlik az ömleszthetőség.

A napi tartályokban, bunkerekben, silókban tárolt poros anyagok kifolyását jelentősen befolyásolja a kúpos, vagy gúla alakú fenékrészek, tölcsérek kialakítása. Általában gravitációs tartályürítéshez a csúszási szögnél jóval nagyobb hajlásszöget kell alkalmazni, míg fluidizációs fenékkialakítással lényegesen kisebb lejtés is megfelelő.

A porok általában hajlamosak az ún. beboltozódásra. Ez azt jelenti, hogy a kifolyócsőből szabadon lefolyik ugyan az anyag, de a tölcsérben már boltozatot képez, amely a szemcsék összetapadásából keletkezik.

A boltozat két széle a tölcsér falára támaszkodik és általában hiperboloid formát vesz fel. A 120 μm -nél nagyobb szemcsézetű száraz szénporral megtöltött tölcsérből pl. az anyag zavartalanul kifolyik. A finomabb porok viszont boltozatot képeznek, amely mechanikus bolygatás után növekszik egy bizonyos határig, majd a kiömlőnyílás fölött azonos méretű függőleges csatornában indul meg a porhalmaz mozgása. Ez a csatorna kisebb - nagyobb mértékben bővül, maximálisan mintegy 30%-os nyílásszöggel.

Összerázott, összetömörödött porral a boltozatképződés még hamarabb előáll és további rázás esetén csak a boltozatnak egy része szakad le anélkül, hogy teljesen megindulna a kiömlés.

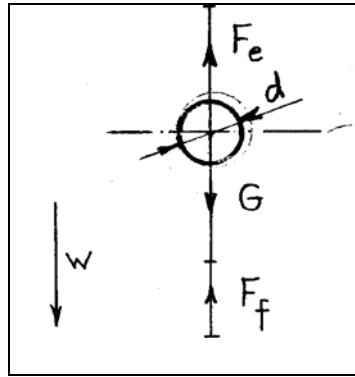
Esési sebesség

Az esési sebesség a szilárd anyagrészecskének az az állandó sebessége, amely meghatározott állapotú áramlásmentes közegben (gázban vagy folyadékban) rövid úthosszon át tartó gyorsulás után a felhajtóerővel csökkentett nehézségi erő és a közegellenállás hatására alakul ki.

A gömbszemcsére ható erőegyensúly az 1.30. ábra alapján

$$G - F_e - F_f = 0$$

(1.47)



1.30. ábra

ahol „ G ” a súlyerő „ F_e ” a közegellenállás és „ F_f ” a felhajtó erő. Az erőket a „ ρ_a ” anyagsűrűséggel, „ ρ_g ” gáz (levegő sűrűséggel és a „ d ” szemcseátmérővel kifejezve a

$$\frac{d^3 \pi}{6} \rho_a \frac{dv_a}{dt} = \frac{d^3 \pi}{6} \rho_a g - C_e \frac{d^2 \pi}{4} \frac{\rho_g}{2} w^2 - \frac{d^3 \pi}{6} \rho_g g = 0 \quad (1.48)$$

összefüggés adódik, ahol

g [m/s ²]	- a nehézségi gyorsulás
v_a [m/s]	- az anyagsebesség
w [m/s]	- a megfúvási sebesség, azaz a szemcse relatív sebessége a gázáramhoz képest
C_e [-]	- a szemcse áramlásra merőleges keresztmetszetére vonatkozó ellenállás tényező

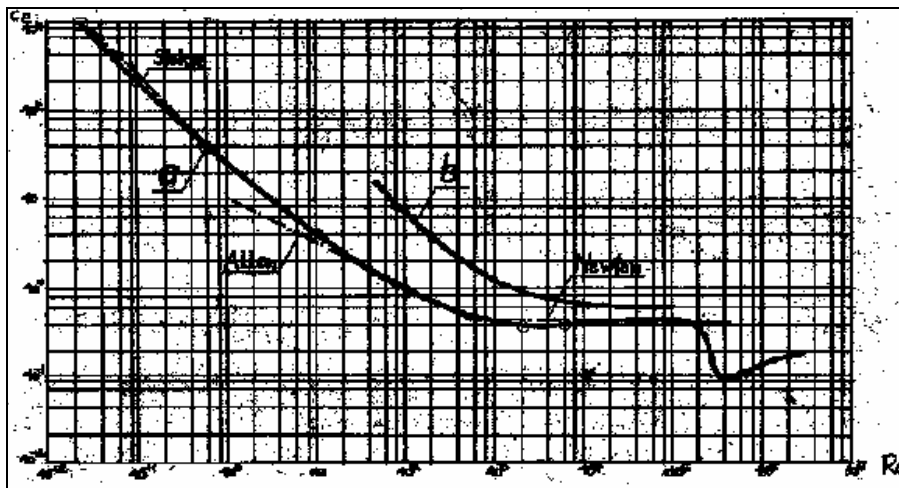
A közegellenállás általában két részből tevődik össze: az egyik része az áramlási leválások, örvényképződések stb. által okozott impulzusvesztések, a másik pedig a fellépő súrlódó erők eredője. Az 1.48. összefüggésben az összellenállás szerepel.

A szemcsére ható ellenálláson túl a „ C_e ” ellenállástényező is függ az áramlás jellegétől, azaz a szemcse „ d ” átmérőjével, a „ w ” megfúvási sebességgel és a „ ν_g ” gáz kinematikai viszkozitással definiált „ Re ” szám értékétől. Két áramlás hasonló, ha a jellemző kritérium a „ Re ” szám azonossága teljesül. A „ Re ” szám definíciója

$$Re = \frac{d w}{\nu_g} = \frac{d w \rho_g}{\eta_g} \quad (1.49)$$

ahol $\nu_g = \frac{\eta_g}{\rho_g}$ a gáz kinematikai viszkozitása

η_g - a gáz dinamikai viszkozitása



1.31. ábra

Gömb alakú szemcse „ C_e ” ellenállástényezőjének „ Re ”-számtól való függése az 1.31. ábrán látható. A görbét három jellegzetes szakaszra lehet felosztani. Igen kis „ Re ” -szám esetén, lamináris áramlásra a közegellenállás első része elhanyagolható, csak a súrlódási ellenállásra vagyunk tekintettel. Itt a Stokes-törvény érvényes, azaz a görbe ezen szakaszát - a $Re < 1$ tartományban - az alábbi összefüggéssel helyettesítjük:

$$C_e = \frac{24}{Re} \quad (1.50)$$

ezzel a közegellenállás

$$F_e = 3\pi \mu_g dw \quad (1.51)$$

A turbulens tartományban ($Re > 500$) a Newton-törvény érvényes, azaz a közegellenállás a megfúvási sebesség négyzetével arányos, hiszen az ellenállástényező az ellenállásgörbe e szakaszán a gyakorlati számításokban állandónak vehető:

$$C_e = 0,43 \quad (1.52)$$

és

$$F_e = C_e \frac{d^2 \pi \rho_g}{4} \frac{w^2}{2} \quad (1.53)$$

Az átmeneti szakaszon ($1 < Re < 500$) az ellenállástényező értéke a kísérleti úton megállapított folytonos görbe szerint változik. Általában az Allen - féle összefüggés használatos:

$$C_e = \frac{10}{\sqrt{Re}} \quad (1.54)$$

Az átmeneti szakasszal több kutató (Oseen, Dellavalle, Schiller, Neumann, Langmuir, Blodgett, Widell...) is foglalkozott, amelyről a hazai szakirodalomban [19] jó áttekintés található. Az 1.31. ábra pontvonallal rajzolt görbéi a Stokes-, Allen-, és Newton-összefüggés szerint számított ellenállástényező értékeket mutatják.

Az esési sebesség, vagy más néven lebegtetési határsebesség az ellenállástényező figyelembevételével az 1.48. egyensúlyi egyenletből lamináris áramlás esetére

$$w_o = \frac{d^2 g (\rho_a - \rho_g)}{18 \eta_g} \quad (1.55)$$

turbulens áramlás esetére

$$w_o = K \sqrt{\frac{d(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} \approx 5,5 \sqrt{\frac{d(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (1.56)$$

ahol az állandó $K = 5,5 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ (az SI mértérendszerben)

átmeneti áramlás esetére az 1.54. összefüggés behelyettesítésével

$$w_o = 1,196 d \sqrt[3]{\frac{(\rho_a - \rho_g)^2}{\rho_g \eta_g}} \quad (1.57)$$

ahol az állandó $K = 1,196 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-4/3}$ (az SI mértérendszerben)

1. példa

Meghatározandó a $d = 2 \text{ mm}$ átmérőjű gömbalakú, $\rho_a = 1060 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű sztirolit szemcse esési sebessége. Az ülepítési kísérlet során vízben mért ellenállástényező értéke $C_e = 1,7$; definíciója Kaszatkín szerint

$$C_e = \frac{18,5}{Re^{0,6}} \quad (1.58)$$

A víz kinematikai viszkozitása $\nu_v = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Az ellenállástényező definíciójából következik, hogy a feladat az átmeneti áramlási tartományba esik, azaz a „Re” szám értéke: $1 < Re < 500$, ami a megoldás végén ellenőrizendő.

Az egyenletesen ülepedő szemcsére ható erők egyensúlya

$$C_e \frac{d^2 \pi}{4} \frac{\rho_v}{2} w_v^2 = \frac{d^2 \pi}{6} (\rho_a - \rho_v) g \quad (1.59)$$

ahol $\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3$ a víz sűrűsége.

Átrendezés után az esési sebességre a következő összefüggés adódik

$$w_v = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_a - \rho_v}{\rho_v} \frac{g d}{C_e}} \quad (1.60)$$

azaz

$$w_v = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1060 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,002 \text{ m}}{1,7}} \cong 0,03 \text{ m/s}$$

Tehát a szemcse vízben mért esési sebessége kb. 3 cm/s.

Ellenőrzésként a „Re” szám definíció szerint

$$Re = \frac{d w_v}{\nu_v} = \frac{0,002 \text{ m} \cdot 0,03 \text{ m/s}}{1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 55,3$$

értékre adódik, ami igazolja, hogy az átmeneti áramlási tartományba esik a feladat.

Végül az ellenállástényező ellenőrzéseként

$$C_e = \frac{18,5}{Re^{0,6}} = \frac{18,5}{55,3^{0,6}} = 1,67 \approx 1,7 \text{ érték adódik, ami jól egyezik az induló értékkel.}$$

A fenti esési sebesség igen pontosan mérhető vízzel töltött függőleges helyzetű üvegcsőben $l = 1 \text{ m}$ -es útszakaszon elektromos stopperrel. A mért idő

$$t = \frac{l}{w_v} = \frac{1 \text{ m}}{3 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}} = 32,91 \text{ s}$$

Ugyanezen szemcse esési sebessége légköri állapotú $\rho_g = 1,25 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű, $\nu_g = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ kinematikai viszkozitású levegőben az egyensúlyi egyenletből

$$w_v = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_g} \frac{g d}{C_e}} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1060 \text{ kg/m}^3 - 1,25 \text{ kg/m}^3}{1,25 \text{ kg/m}^3} \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,002 \text{ m}}{C_e}} = \frac{4,707 \text{ m/s}}{\sqrt{C_e}}$$

Az iteráció első lépésében vegyük fel „ C_e ” korábbi értékét, azaz $C_e = 1,67$. Ezzel a sebesség

$$w_g = \frac{4,707 \text{ m/s}}{\sqrt{1,67}} = 3,64 \text{ m/s}$$

A Re szám értéke

$$Re = \frac{w_g d}{\nu_g} = \frac{3,64 \text{ m/s } 0,002 \text{ m}}{15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 485,7$$

az átmeneti áramlási tartományba esik, azaz az ellenállástényező

$$C_e = \frac{18,5}{Re^{0,6}} = \frac{18,5}{485,7^{0,6}} = 0,45$$

A további iteráció adatai

$$w_g = 7,00 \text{ m/s} \quad Re=933 \quad C_e=0,43$$

$$w_g = 7,18 \text{ m/s} \quad Re=957 \quad C_e=0,43$$

$$w_g = 7,18 \text{ m/s}$$

Tehát a fenti légköri állapotú levegőben a szemcse esési sebessége $w_g = 7,18 \text{ m/s}$ értékre adódik.

2. példa

Búzát tárolunk silóban. A búzaszemek sűrűsége $\rho_a = 1300 \text{ kg/m}^3$, a légköri állapotú levegő sűrűsége $\rho_g = 1,2 \text{ kg/m}^3$. 1 kg búzában a szemek száma: $n = 27000 \text{ db/kg}$. Egy búzaszem tömege átlagosan:

$$m_a = \frac{1}{n} = \frac{1 \text{ db}}{27000 \text{ db/kg}} = 37 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$$

A redukált szemcseátmérő 1.15. szerint:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 m_a}{\pi \rho_a}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 37 \cdot 10^{-6} \text{ kg}}{\pi \cdot 1300 \text{ kg/m}^3}} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3,8 \text{ mm}$$

A redukált keresztmetszet

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{(3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 \pi}{4} = 11,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Az eső szemek Reynolds-számának kiszámításához az esési sebességet $w = 10$ m/s értékre becsülve, a $\nu_g = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ kinematikai viszkozitású levegőben

$$Re = \frac{w d}{\nu_g} = \frac{10 \text{ m/s } 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 2533 \quad \text{adódik.}$$

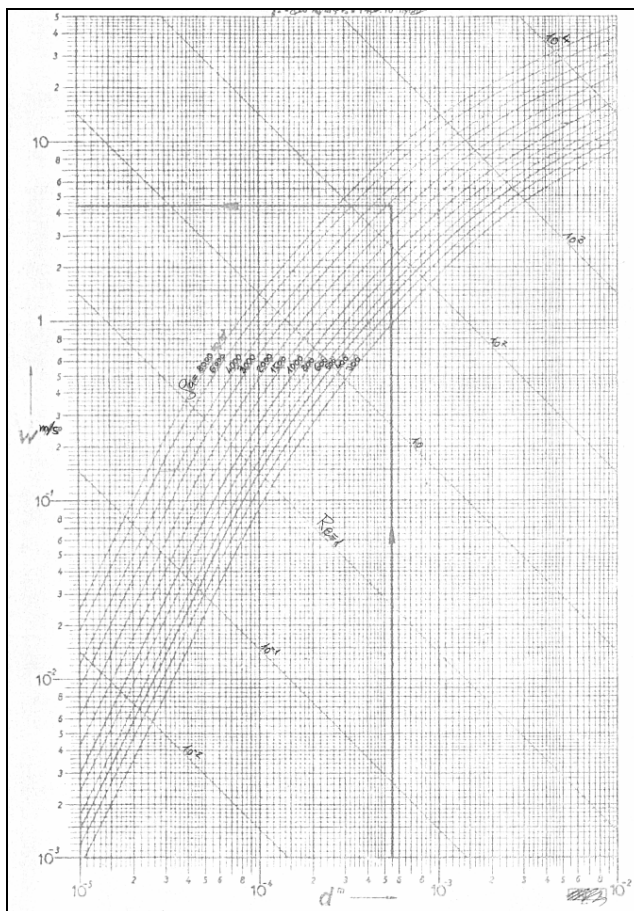
Ehhez a Reynolds-számhoz tartozó ejtési kísérletekkel meghatározott ellenállástényező értéke: $C_e = 0,57$; amivel az esési sebesség a $\rho_a - \rho_g \approx \rho_a$ egyszerűsítéssel számítható:

$$w \cong \sqrt{\frac{4 \rho_a g d}{3 \rho_g C_e}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1300 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{3 \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,57}} = 9,7 \text{ m/s}$$

Ugyanez az eredmény adódik az erőegyensúly következő (más alakban felírt) összefüggéséből is:

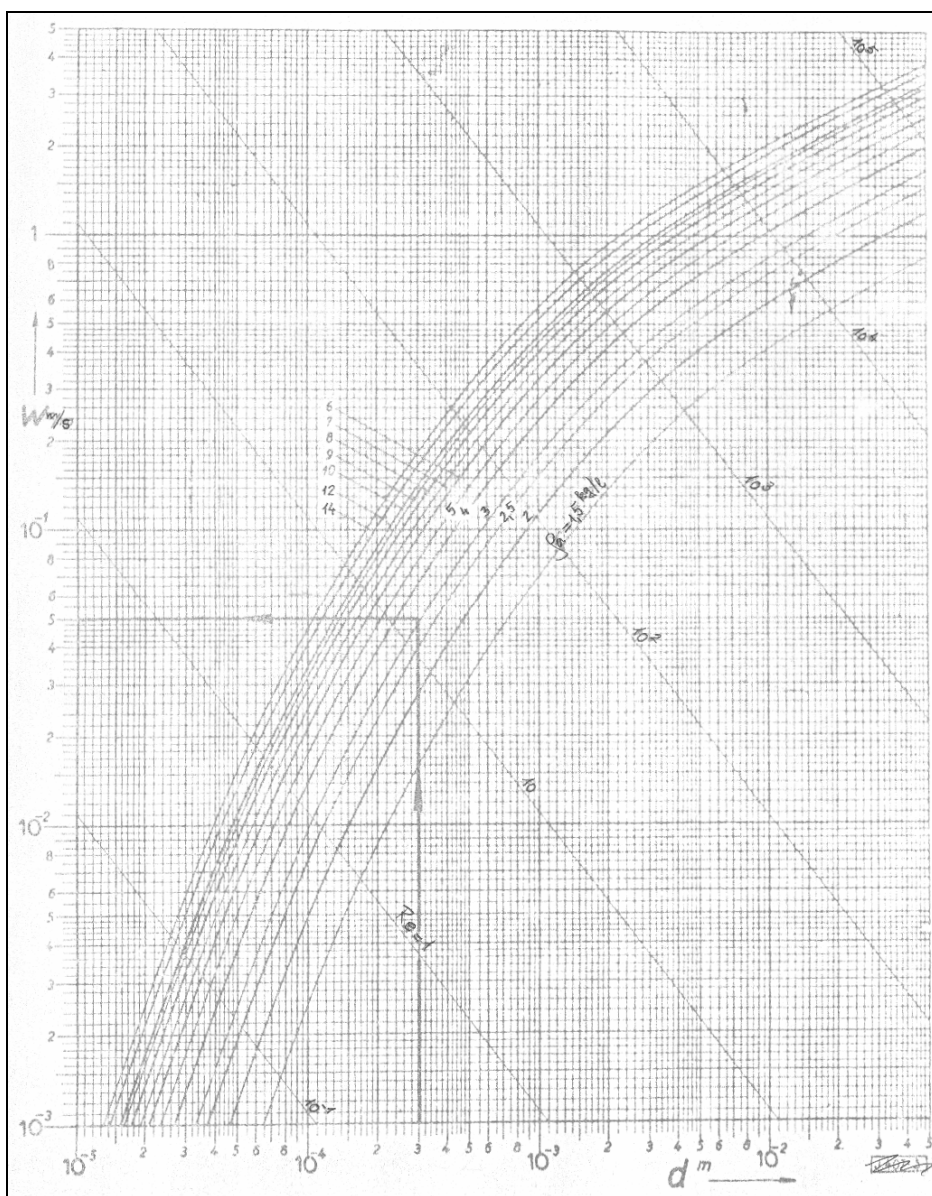
$$m_a g \cong C_e A \frac{\rho_g}{2} w^2 \quad (1.61)$$

Mivel a kiszámított esési sebesség jól egyezik az előre felvett értékkel, így a „Re” szám és a hozzá tartozó „ C_e ” értékét tehát nem kell korrigálni.



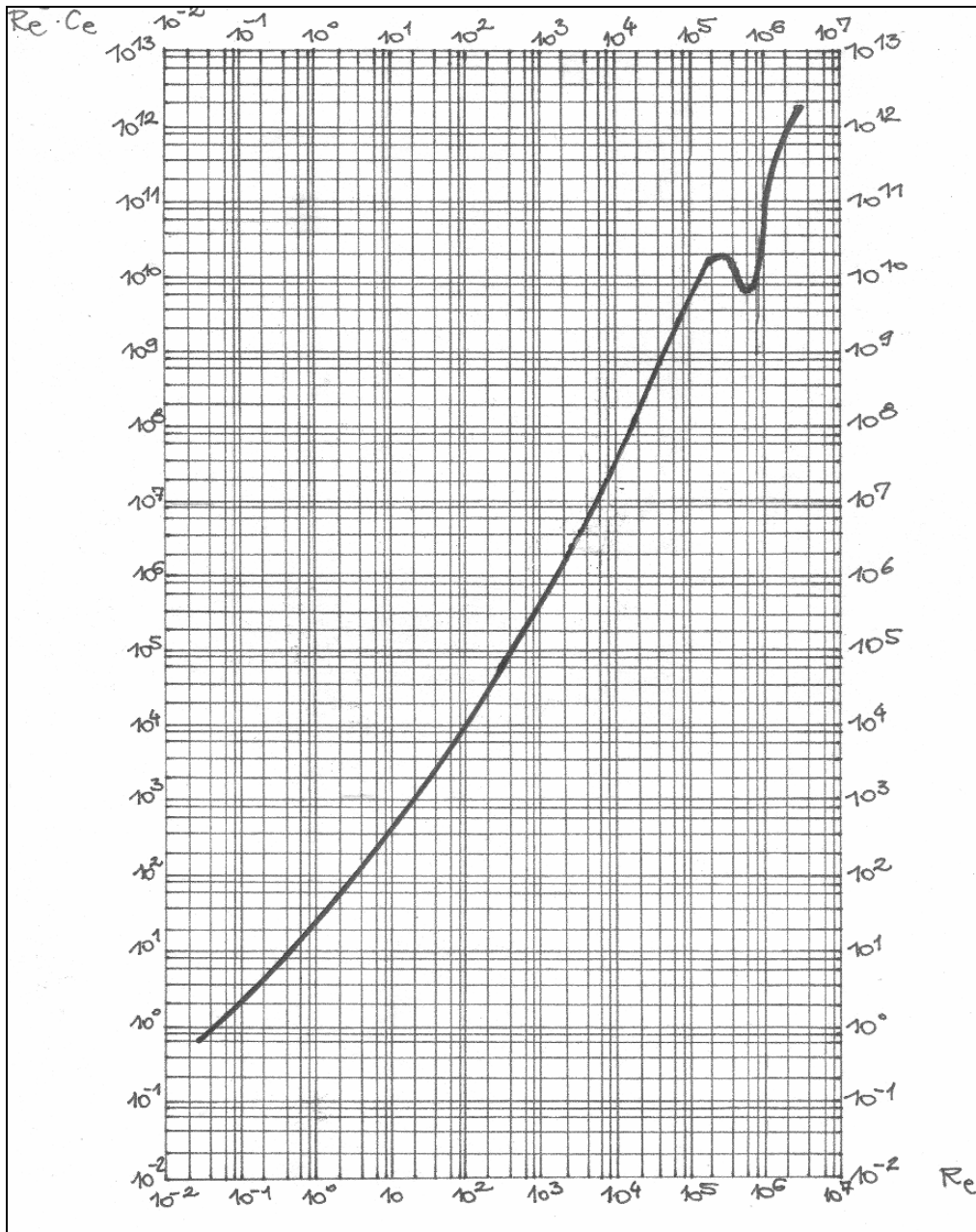
1.32. ábra

Mivel leggyakrabban a levegőben, vagy vízben süllyedő (lebegő) szilárd szemcse határsebességének ismerete szükséges, így az 1.32. ábrán látható nomogrammban $\rho_{go} = 1,23 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű és $v_{go} = 14,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ kinematikai viszkozitású, nagy kiterjedésű levegőben, $\rho_a = 300 - 8000 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű gömb alakú szilárd szemcse esési sebességét, valamint a Reynoldsszám közelítő értékét ábrázoltuk.



1.33. ábra

Ugyanígy az 1.33. ábra a $\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű és $\nu_v = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ kinematikai viszkozitású ($t \cong 16^\circ\text{C}$) vízben $\rho_a = 1500 - 14000 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű gömb alakú szilárd szemcse esési sebességét és a Re szám közelítő értékét tartalmazza.



1.34. ábra

Amennyiben a közeg jellemzőinek - sűrűségének, viszkozitásának - értéke az 1.32. és 1.33. ábrák nomogramjainak érvényességi körén kívül esik, úgy az esési sebesség számítása az 1.34. ábra segítségével lehetséges, ugyanis az 1.44. összefüggést gáz (levegő) közegre felírva és a Re szám kifejezését felhasználva írható:

$$C_e Re^2 = \frac{4}{3} \frac{g d^3}{\nu_g^2} \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} - 1 \right) \quad (1.62)$$

Ezzel a $C_e Re^2$ szorzat ismeretében az 1.34. ábrából a Re szám adódik és így az esési sebesség számítható:

$$w = \frac{Re \, \nu_g}{d} \quad (1.63)$$

A gömbtől eltérő alakú szemcsék ellenállástényezői a gömb ellenállástényezőjénél nagyobbak, amint az például az 1.31. ábrán búzaszem esetében is megfigyelhető. Az eltérés formatényező és felületi érdességi tényező bevezetésével volna korrigálható, a gyakorlatban azonban erre nincs szükség, sőt a „ C_e ” ellenállástényező és a vele együtt szereplő „ A ” áramlásra merőleges keresztmetszet különválasztására sincs szükség.

Az ellenállástényező meghatározására irányuló kísérleteknél - akár lebegési, akár nyugvó közegben ejtési kísérletekkel végezzük - az „ AC_e ” szorzat adódik közvetlenül. Szétválasztásuk nem szükséges, mert a szorzat felhasználásuknál is együttesen szerepel.

Keményiség

A poros ill. szemcsés anyagok keménységének vizsgálata elsősorban a pneumatikus szállítóberendezések elemeinek (ívek, váltók, ciklonok...) szállítás közbeni koptatóhatásból származó élettartam meghatározása céljából válik szükségessé.

A keménységet az 1 - 10 közötti Mohs - skálával jellemzik, mely skála értékei a következő anyagokra vonatkoznak:

Mohs-féle keménységi táblázat és a Mohs-keménységi értékeknek megfelelő Brinell-keménységi szám

Mohs-keménység	Anyag	HB
1	talk, zsírkő (szteatit)	5
2	kősó, gipsz	20
3	kalcit, mészpát	92
4	fluorit	110
5	apatit	237
6	földpát	253
7	kvarc	308
8	topáz	525
9	korund	1150
10	gyémánt	-

A keménység meghatározása nem közvetlenül a poros ill. szemcsés anyag vizsgálata alapján történik, hanem ún. viszonylagos keménység meghatározásra kerül sor összehasonlító karcolás (pl. kerámia felületen) útján.

Néhány anyag Mohs - skála szerinti keménységét az 1.7. - 1.8. táblázatok tartalmazzák.

1.7. táblázat

Fluidizálható ásványi és vegyi termékek keménysége

megnevezés	keménység
alumíniumoxid	8
agyag	1
őrölt mészkő	1
könnyű nátriumkarbonát	1
feketeszen	1
szállóhamu	3-6
szénpor	3-6
cement	2-5
mészipor	2
dolomit	4
magnéziumkarbonát	2
őrölt foszfát	4-7
gipsz	2
polietilén por	1

PVC por	1
folypát	1-3
zsírkő	1-2

1.8. táblázat

Nem fluidizálható ásványi és vegyi termékek keménysége

megnevezés	keménység
cellulózacetát	1
nehéz nátriumkarbonát	1-2
katalizátorok	1-9
szemcsés égetett mész	2-4
szemcsés szén	1-5
granulált műtrágyák	1-5
apró kavics	7
sörét	4-6
vasoxidok	4-7
nyersfoszfát	4-7
szemcsés polietilén	1
szemcsés PVC	1
homok	2
nátriumsulfát	2

Törékenység

A törékenység részben a keménységgel összefüggő fogalom, önmagában nem mérhető mennyiség, de olyan ömlesztett terméket jellemez, aminek morfológiája pneumatikus szállítás közben, különösen a nagy sebességtartományú hígáramú pneumatikus szállítás közben könnyen megváltozik. A törékenységet indirekt módon csupán a pneumatikus szállítás előtti és utáni szemcseeloszlások összehasonlításával határozhatjuk meg.

Nedvességtartalom

Ömlesztett anyagok nedvességtartalmán az anyagoknak azt a víztartalmát értik, amely melegítéssel az anyagból eltávolítható.

A nedvességtartalom - elsősorban a felületi nedvességtartalom - függvényében jelentősen változhatnak a szállított anyag jellemzői (pl. a halmazsűrűség, rézsűszög...) és a legújabb kutatási eredmények szerint a pneumatikus szállítás üzemtani jellemzői is.

A nedvességtartalom közvetlen meghatározásakor az anyagmintát elektromosan fűthető, hőfokszabályozóval és hőmérővel ellátott, szellőztethető szárítószekrényben szárítják, előtte és utána analitikai mérlegen mérleget. A szárítási tömegvesztéseget tömeg-százalékban adják meg.

Közvetett nedvesség meghatározáskor a szilárd anyagok ellenállását mérik az anyagba beszúrt, egymástól adott távolságra levő tűszerű elektródok között. Porok esetében lap elektródokat használnak és a köztük lévő anyagot szabványban előírt módon tömörítik. Az ellenállás Wheatstone - hídba köthető és műszeren leolvasható. Ez a módszer ismert nedvességtartalmú anyagokhoz történő kalibrálással együtt használható.

A közvetett nedvesség meghatározás másik módszere a dielektromos állandó mérése. Mivel a víz dielektromos állandója 15 - 20 -szorososa az egyéb anyagokénak, a víztartalom kis megváltozása viszonylag nagymértékű dielektromos állandó változással jár együtt. Mért tömegű anyagot helyeznek be a mérőkondenzátorba, a mérőáramkör rezgési frekvenciáját beállítják a mintafrekvencia értékének megfelelően, amelyet egy második, kristályvezérlésű rezgőkörben állítottak elő. A műszer nulla-helyzete megfelel a nedvességtartalomnak. Főleg magok, szemcsés anyagok és por alakú vegyszerek esetében használatos.

1.4.1.2. A szállító gáz jellemzői

A pneumatikus szállítási ill. porleválasztási feladatokban előforduló szállító közeg (gáz) többnyire levegő. Jellemző tulajdonságai alapvetően két csoportba sorolhatók: anyagjellemzők és állapotjellemzők.

Az anyagjellemzők az anyag - esetünkben levegő - olyan fizikai tulajdonságai, amelyek a levegő anyagi mivoltára jellemzők, de nem állapotjellemzők. Ilyenek a „ c_v ” - állandó térfogaton vett fajhő, a „ c_p ” - állandó nyomáson vett fajhő, a „ c_p/c_v ” - fajhőviszony, az „ R ” - gázállandó, a „ T_{krit} ” - kritikus hőmérséklet és „ p_{krit} ” -nyomás, a „ λ ”, - hővezetési tényező...stb.

Itt csupán a pneumatikus szállításhoz kapcsolódó legfontosabbak ismertetésére kerül sor.

Állandó térfogaton vett fajhő

Azt a hőmennyiséget, amely állandó térfogaton való melegítéskor egységnyi tömegű gáz hőmérsékletének 1 fokkal történő emeléséhez szükséges, állandó térfogaton mért fajhőnek nevezzük. Jele: „ c_v ”. Mértékegysége: [J/kgK]. Értéke levegőre: $c_v = 715 \text{ J/kgK}$, $t = 0^\circ\text{C}$ hőmérsékleten.

Állandó nyomáson vett fajhő

Azt a hőmennyiséget, amely állandó nyomáson való melegítéskor egységnyi tömegű gáz hőmérsékletének 1 fokkal történő emeléséhez szükséges, állandó nyomáson mért fajhőnek nevezzük, jele: „ c_p ”. Értéke levegőre: $c_p = 1009 \text{ J/kgK}$ $t = 0^\circ\text{C}$ hőmérsékleten.

A gázok állandó nyomáson mért fajhője az állandó térfogaton mért fajhő értékénél mindig nagyobb.

A fajhő-viszony $\kappa = c_p/c_v$, ami az állapotváltozásokban fordul elő, a fentiek alapján egynél nagyobb dimenziótlan szám, értéke levegőre $\kappa = 1,4$.

A fajhő függ a hőmérséklettől. Száraz levegő állandó nyomáson mért fajhője például az alábbi összefüggéssel számítható:

$$c_p [J / kgC^o] = 1009 + 0,1532 t [C^o] \quad (1.64)$$

A pontos számításoknál a fajhő $c = f(t)$ hőmérséklet-függésének ismeretében a t_2-t_1 hőmérséklet-tartományra a „ $c_{köz}$ ” közepes fajhő az alábbi

$$c_{köz} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c(t) dt \quad (1.65)$$

összefüggéssel határozható meg.

Az „ R ” gázállandó az illető gázra jellemző állandó szám, értéke független a gáz állapotától. Fizikai tartalma az a munka, amelyet 1 kg tömegű gáz állandó nyomáson térfogat-növekedésével végez, miközben hőmérsékletét hő közléssel 1 fokkal emeljük. Mértékegysége: [J/kgK]. A levegő gázállandója: $R = 287,1$ J/kgK.

A mólnyi mennyiségre vonatkoztatott gázállandót általános vagy univerzális gázállandónak nevezzük, mivel értéke nemcsak a gáz állapotától, hanem anyagi minőségétől, fajtájától is független. Fizikai tartalma az a munka, amelyet 1 kmól gáz állandó nyomáson végez térfogat-növekedésével, miközben hőmérsékletét 1 fokkal emeljük.

Az „ R ” gázállandó és az „ R_a ” általános gázállandó összefüggése:

$$R_a = MR \quad (1.66)$$

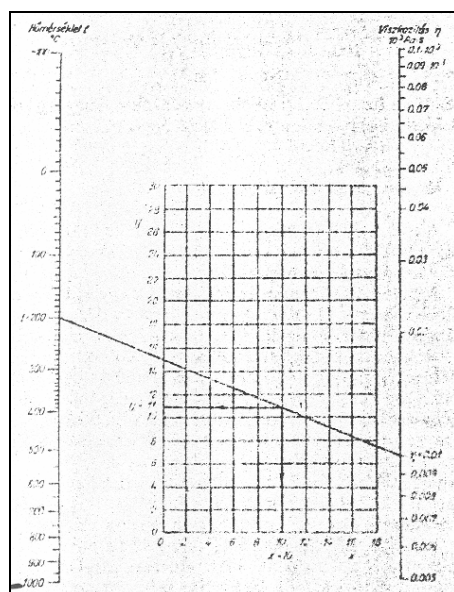
ahol „ M ” az illető gáz „kmól” mennyiségének tömege, „kg/kmól”. Az általános gázállandó értéke $R_a = 8315$ J/kmólK.

A viszkozitás áramló folyadékok ill. valóságos gázok egymáshoz képest elmozduló részecskéi közötti belső súrlódás mértékét jellemzi.

Száraz levegő dinamikai viszkozitása – 50 + 35 °C hőmérséklet-tartományban számítható:

$$\eta_g [Pas] = (0,05639 t + 17,279) 10^{-6} \quad (1.67)$$

ahol „ t ” a levegő hőmérséklete, [°C].



1.35. ábra

A gyakrabban előforduló gázok és a levegő „ η_g ” - dinamikai viszkozitását a hőmérséklet függvényében az 1.35. ábra segítségével lehet meghatározni. Az ábrán látható nomogram koordinátáit az 1.9. táblázatban tüntettük fel. Az x-y koordinátarendszerben az adott gázhoz rendelt „x” és „y” koordinátáknak megfelelő pontot és a baloldali hőmérsékletskála megfelelő pontját összekötő egyenes a jobboldali skálán meghatározza a dinamikai viszkozitás értékét a megfelelő hőmérsékleten.

1.9. táblázat

Gáz	x	y	Gáz	x	y
Acetilén	9,8	14,9	Hidrogén-bromid	8,8	20,9
Aceton	8,9	13,0	Hidrogén-cianid	9,8	14,9
Ammónia	8,4	16,0	Hidrogén-jodid	9,0	21,3
Argon	10,5	22,4	Hidrogén-klorid	8,8	18,7
Benzol	8,5	13,2	Hidrogén-szulfid	8,6	18,0
Bróm	8,9	19,2	Higany	5,3	22,9
Bután	9,2	13,7	Jód	9,0	18,4
Butilén	8,9	13,0	Kén-dioxid	9,6	17,0
Ciklohexán	9,2	12,0	Klór	9,0	18,4
Dicián	9,2	15,2	Kloroform	8,9	15,7
Ecetsav	7,7	14,3	Levegő	11,0	20,0
Etán	9,1	14,5	Metán	9,9	15,5
Etil-acetát	8,5	13,2	Metil-alkohol	8,5	15,6
Etil-alkohol	9,2	14,2	Nitrogén	10,6	20,0
Etil-éter	8,9	13,0	Nitrogén(I)-oxid	8,8	19,0
Etil-klorid	8,5	15,6	Nitrogén(II)-oxid	10,9	20,5
Etilén	9,5	15,1	Nitrogén-oxi-klorid	8,0	17,6
Fluor	7,3	23,8	Oxigén	11,0	21,3

Freon 11	10,6	15,1	Pentán	7,0	12,8
Freon 12	11,1	16,0	Propán	9,7	12,9
Freon 21	10,8	15,3	Propil-alkohol	8,4	13,4
Freon 22	10,1	17,0	Propilén	9,0	13,8
Freon 113	11,3	14,0	Szén-dioxid	9,5	18,7
3 H ₂ O + 1 N ₂	11,2	17,2	Szén-diszulfid	8,0	16,0
Hélium	10,9	20,5	Szén-monoxid	10,0	20,0
Hexán	8,6	11,8	Toluol	8,6	12,4
Hidrogén	11,2	12,4	2,3,3-Trimetil-bután	9,5	10,5
			Víz	8,0	16,0
			Xenon	9,3	23,0

A kinematikai viszkozitás a dinamikai viszkozitás és a sűrűség hányadosa:

$$\nu_g = \frac{\eta_g}{\rho_g} \quad (1.68)$$

mértékegysége: [m²/s].

A légköri állapotú levegő kinematikai viszkozitását az 1.10. táblázat tartalmazza.

1.10. táblázat

p [torr]	730	735	740	745	750	755	760	765	770	775	780
t [°C]											
0	13,8	13,7	13,6	13,5	13,4	13,3	13,2	13,2	13,1	13,0	12,9
2	14,0	13,9	13,8	13,7	13,6	13,5	13,4	13,3	13,2	13,1	13,1
4	14,2	14,1	14,0	13,9	13,8	13,7	13,6	13,5	13,4	13,3	13,3
6	14,4	14,3	14,2	14,1	14,0	13,9	13,8	13,7	13,6	13,5	13,4
8	14,6	14,5	14,4	14,3	14,2	14,1	14,0	13,9	13,8	13,7	13,6
10	14,7	14,7	14,6	14,5	14,4	14,3	14,2	14,1	14,0	13,9	13,8
12	14,9	14,8	14,7	14,6	14,5	14,4	14,3	14,2	14,1	14,0	14,0
14	15,1	15,0	14,9	14,8	14,7	14,6	14,5	14,4	14,3	14,2	14,1
16	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9	14,8	14,7	14,6	14,6	14,4	14,3
18	15,5	15,4	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9	14,8	14,7	14,6	14,5
20	15,7	15,6	15,5	15,4	15,3	15,2	15,1	15,0	14,9	14,8	14,7
22	15,9	15,8	15,7	15,6	15,5	15,3	15,3	15,1	15,0	14,9	14,8
24	16,1	16,0	15,9	15,8	15,7	15,5	15,4	15,3	15,2	15,1	15,0
26	16,3	16,2	16,1	16,0	15,8	15,7	15,6	15,5	15,4	15,3	15,2
28	16,5	16,4	16,3	16,1	16,0	15,9	15,8	15,7	15,6	15,5	15,4
30	16,7	16,6	16,4	16,3	16,2	16,1	16,0	15,9	15,8	15,7	15,6
32	16,9	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,1	16,0	15,9	15,7
34	17,1	16,9	16,8	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,0	15,9
36	17,3	17,1	17,0	16,9	16,8	16,7	16,6	16,5	16,4	16,2	16,1
38	17,5	17,3	17,3	17,1	17,0	16,9	16,8	16,7	16,6	16,4	16,3
40	17,7	17,5	17,4	17,3	17,2	17,1	17,0	16,9	16,8	16,6	16,5

A gázok állapotjellemzői

A gázok pillanatnyi mechanikai állapotának egyértelmű jellemzéséhez bizonyos fizikai tulajdonságaiknak megadása szükséges. Ezeket a fizikai tulajdonságokat a gáz állapotjellemzőinek nevezzük.

Különbféle gázok térfogategységre vonatkozó adatai a normál állapot figyelembevételével hasonlíthatók össze. A gázok normál állapotát megállapodásszerűen rögzített hőmérséklet és nyomás határozza meg. A fizikai normál állapot hőmérséklete 0°C , nyomása 1,013 bar (760 torr). A műszaki gyakorlatban használatos ún. technikai normál állapot hőmérséklete 20°C , nyomása 0,98 bar (735,559 torr).

A száraz (vízgőzt nem tartalmazó) levegő állapota általában messze esik a telítési görbétől, ezért a gázokra vonatkozó törvényszerűségek a levegőre is jó közelítéssel érvényesek.

A fentieken túl a pneumatikus szállítási és porleválasztási feladatokban jelentős szerepe van még a levegő nedvességtartalmának, mivel ez lényegesen befolyásolhatja a szállítandó poros anyagok szállítási, tárolási tulajdonságait, illetve ömleszthetőségüket.

A száraz szállítólevegő előállítására általában kétféle szárító használható:

- Hűtve szárító
- Adszorpciós szárító

A hűtve szárítóban a meleg sűrített levegőt az ellenáramban kiáramló hideg sűrített levegő előhűti. Ennek két előnye van: egyrészt az energiafelhasználás csökken, másrészt pedig azzal, hogy a hideg levegő a hálózatba jutáskor felmelegszik, így nem képződik páralecsapódás a csővezeték külső felületén. Ezzel az eljárással az elérhető nyomás alatti harmatpont $+3^{\circ}\text{C}$, $+7^{\circ}\text{C}$, $+10^{\circ}\text{C}$.

Az adszorpciós szárító működési elve szerint lehet hideg- ill. meleg-regenerálású, ez utóbbi a regeneráláshoz felhasználhat külső- vagy belső levegőt. Az adszorpciós szárító két párhuzamosan elrendezett kamrával dolgozik. Mialatt az egyik kamra a levegőt szárítja, a másik részleges légáramban regenerálja a szárítóközeget. Ezt követően (az átkapcsolás után) az eljárás fordítva megismétlődik. Ezzel az eljárással az elérhető nyomás alatti harmatpont: -20°C , -40°C , -70°C ill. -80°C .

1.4.2. Geometriai jellemzők

A geometriai jellemzők között makro-méretekben a szállítóberendezés illetve a szállítóberendezés elemeinek geometria méretei említhetők, amelyek között a legfontosabbak a

- D [m] szállítócső átmérő
- L [m] szállítási távolság ill. egyenes csőszakasz hossza
- H [m] emelési magasság
- D_c [m] leválasztó ciklon átmérő
- D_t [m] tároló tartály ill. siló átmérő

- V_t [m] tároló tartály ill. siló térfogat
- α [°] csatorna lejtési szöge ill. garatok csúcshöze
- R [m] ívek görbületi sugara
- R/D [-] görbületi sugár-csőátmérő viszonya
- L/D [-] egyenes csőszakasz hosszúság-átmérő viszonya
- H_t/D_t [-] tároló tartály magasság-átmérő viszonya
- b [m] csatorna szélességi mérete

Mikro-méreteken a geometriai jellemzők közé sorolhatók a szállítandó anyagok szemcseméreteinek, ill. szemcseméret-eloszlásának jellemző adatai.

1.4.3. Üzemeltetési jellemzők

Az üzemeltetési jellemzők az anyagjellemzők és a geometriai jellemzők megfelelő összhangjából származnak. Közülük a legfontosabbak: a nyomás, nyomáskülönbség ill. nyomásviszony, a hőmérséklet, az anyag- ill. levegő tömegáram, a keverési arány, az anyag- ill. levegősebesség, az anyag- ill. levegőszűrősség, fajlagos energiaszükséglet stb.

A szakirodalomban előforduló sokféle jelölés igazolásául az 1.36. ábrán összefoglalva bemutatjuk a keverési arány, a szilárdanyag koncentráció, a szállítóközeg koncentráció, illetve a keverékszűrősség definíciós lehetőségeit [21] alapján.

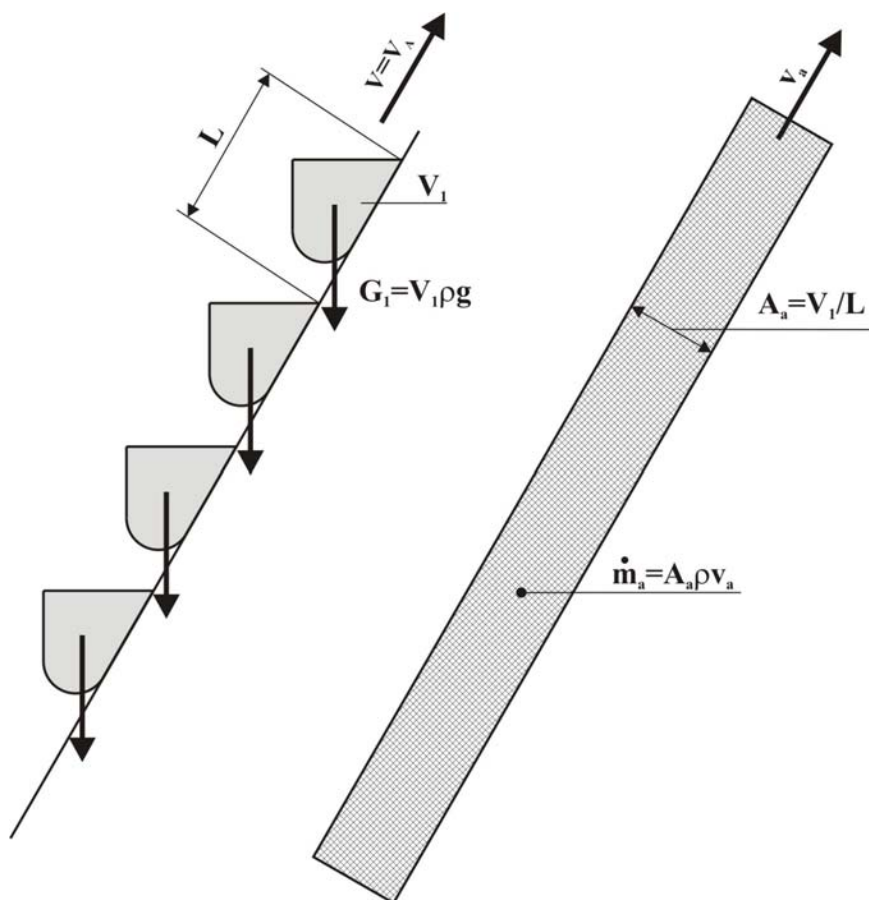
	térfogat viszony	tömeg viszony	tömeg- térfogat viszony
Keverési arány (μ)	$\frac{V_a}{V_g}$	$\frac{m_a}{m_g}$	$\frac{m_a}{V_g}$
	$\frac{\dot{V}_a}{\dot{V}_g}$	$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_g}$	$\frac{\dot{m}_a}{\dot{V}_g}$
Koncentráció (ρ)	$\frac{V_a}{V_a + V_g}$	$\frac{m_a}{m_a + m_g}$	$\frac{m_a}{V_a + V_g}$
	$\frac{\dot{V}_a}{\dot{V}_a + \dot{V}_g}$	$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a + \dot{m}_g}$	$\frac{\dot{m}_a}{\dot{V}_a + \dot{V}_g}$
Szilárd anyag -hányad (ϵ_a)	$\frac{V_a}{V_a + V_g}$	$\frac{m_a}{m_a + m_g}$	$\frac{m_a + m_g}{V_a + V_g}$
	$\frac{\dot{V}_a}{\dot{V}_a + \dot{V}_g}$	$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a + \dot{m}_g}$	$\frac{\dot{m}_a + \dot{m}_g}{\dot{V}_a + \dot{V}_g}$

1.36. ábra

Ez a könyv az 1.36. ábrán bekeretezett jelöléseket használja, így a „ μ ” keverési arány az egységnyi levegő tömegáramra jutó anyag tömegáramot, míg az „ $\varepsilon=1-\varepsilon_a$ ” az ömlesztett anyag hézagterfogatát jelenti, amint azt már korábban az 1.22. összefüggés bemutatta.

Az üzemtani jellemzők alakulását, egymás közötti kapcsolatát az ömlesztett anyag mozgására felírható törvények szabják meg.

A mechanikai elven működő vontatóelemes szállítóberendezések közös jellemzője például az, hogy az anyagáram alakjában szállított anyag „ v_a ” sebességét a vontatóelem sebessége szabja meg. Az anyagáram a vontatóelem (pl. szállítószalag, serleges elevátor) sebességével viszonylagos elmozdulás nélkül halad előre.



1.37. ábra

Pneumatikus szállítás esetében a „ D ” átmérőjű („ A ” keresztmetszetű) és „ L ” hosszúságú szállítócsőben (lásd az 1.37.ábrát) a „ v_g ” [m/s] sebességű gázáram az időegységenként beadagolt „ \dot{m}_a ” [kg/s] mennyiségű ömlesztett anyagot még a stacionárius szállítási állapotban is csupán a gázsebességnél kisebb $v_a = v_g - w$ anyagsebességgel továbbítja. Az anyag

$$w = v_g - v_a \quad (1.69)$$

„ w ” viszonylagos (relatív) sebességgel a gázáramhoz képest visszamarad.

A „ w ” relatív sebesség szolgáltatja az anyag szállításához szükséges „hajtóerőt”, nagysága tehát a zérusnál mindig nagyobb, aminek viszont az a következménye, hogy pneumatikus szállításnál a megcsúszási vagy másnéven az ún. szlipvesztések nem kerülhetők el.

A megcsúszás, vagy szlip (az anyagáram viszonylagos visszamaradása a gázáramhoz képest):

$$s = \frac{v_g - v_a}{v_g} = 1 - \frac{v_a}{v_g} \quad (1.70)$$

A szlip segítségével a szállított anyag sebessége így fejezhető ki:

$$v_a = (1 - s)v_g \quad (1.71)$$

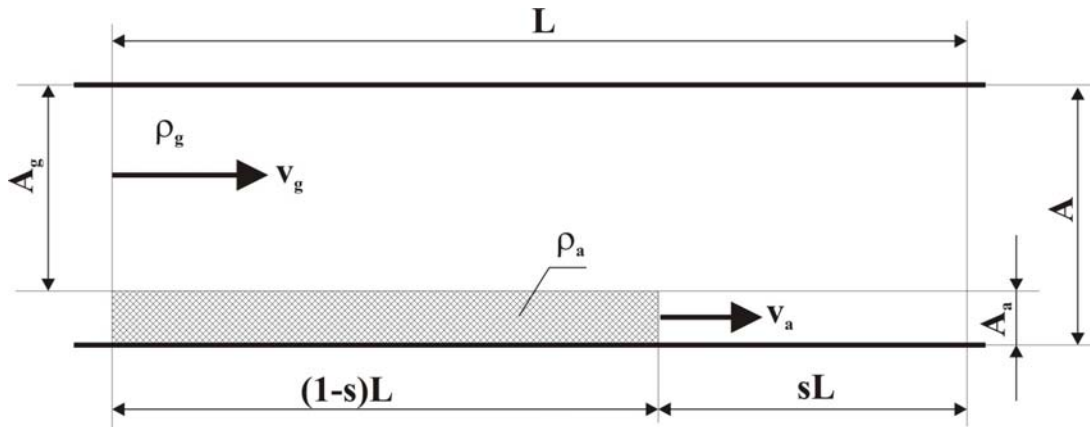
Az anyagáram viszonylagos visszamaradása - a szlip - az adagolási viszonyokhoz képest a csőben szállított keverék összetételét megváltoztatja. A keverési arány tulajdonképpen a szállítócsőbe beadagolt anyagtömegáram és levegőtömegáram viszonyát, tehát az adagolási tömegarányt vagy súlyarányt fejezi ki, azaz megmutatja, hogy egy kilogramm levegő hány kilogramm anyag elszállítását végzi. A keverési arány definíciója tehát

$$\mu = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_g} \quad (1.72)$$

ahol „ \dot{m}_g ” [kg/s] a szállítást végző gáz (ami a legtöbbször levegő) másodpercenkénti tömege.

$$\dot{m}_g = \rho_g \dot{V}_g = A \rho_g v_g \quad (1.73)$$

itt „ ρ_g ” [kg/m³] a szállítógáz sűrűsége
 „ \dot{V}_g ” [m³/s] a szállítógáz térfogatárama



1.38. ábra

A szállítócsövet egyidejűleg kitöltő keverék „m” tömegarányát az 1.38. ábra szerint úgy határozhatjuk meg, hogy a „v_a” sebességgel továbbított ömlesztett anyagot egy „A_a” keresztmetszetű összefüggő (tömör) áramcsőbe zárt anyagárammá egyesítve képzeljük, amely párhuzamosan halad a teljes csőkeresztmetszethez képest leszűkített A_g = A - A_a keresztmetszetű és „v_g” sebességű gázárammal.

A szállítócső egységnyi hosszúságára eső „q_a” anyagtömeg az alábbiak szerint számítható:

$$q_a = \frac{\dot{m}_a}{v_a} = \frac{\dot{m}_a}{(1-s)v_g} = A_a \rho_a \quad (1.74)$$

ahol „ρ_a” [kg/m³] a tömör anyagsűrűséget jelenti, nem pedig a halmazsűrűséget.

A gázáram egy méterre eső tömege pedig:

$$q_g = \frac{\dot{m}_g}{v_g} = A_g \rho_g \quad (1.75)$$

A két folyóméret-tömeg (1.74. és 1.75.) hányadosa a csőben egyidejűleg jelenlevő keverék tömegarányát fejezi ki

$$m = \frac{q_a}{q_g} = \frac{\dot{m}_a}{(1-s)\dot{m}_g} = \frac{\mu}{1-s} \quad (1.76)$$

Az anyag „ε_a” viszonylagos térfogataránya a szállított anyag térfogathányada a cső térfogatához képest

$$\varepsilon_a = \frac{V_a}{V} = \frac{A_a}{A} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a v_a A} \quad (1.77)$$

Hígáramú pneumatikus szállításnál „ A_g ” jó közelítéssel a cső keresztmetszetével azonosnak vehető (vagyis nem számolunk az anyag keresztmetszetszűkítő hatásával):

$$\varepsilon_a \approx \frac{\dot{m}_a}{\rho_a v_a A_g} = \frac{\dot{m}_a \rho_g}{(1-s)\dot{m}_g \rho_a} = \frac{\mu}{1-s} \frac{\rho_g}{\rho_a} = m \frac{\rho_g}{\rho_a} \quad (1.78)$$

A keverék sűrűsége (tökéletes keveredésre):

$$\rho_k = \frac{q_a + q_g}{A} = \frac{A_a \rho_a + A_g \rho_g}{A} \quad (1.79)$$

A keveréksűrűség hígáramú pneumatikus szállításnál az $A_g = A$ helyettesítéssel az alábbi formában írható:

$$\rho_k = \left(\frac{\mu}{1-s} + 1 \right) \rho_g = (m+1) \rho_g \quad (1.80)$$

A gázzal szállított szilárd anyag sűrűsége (tömör anyagsűrűség) általában több nagyságrenddel nagyobb a gáz sűrűségénél ($\rho_a \gg \rho_g$), ezért az anyagáram „ A_a ” keresztmetszete hígáramú pneumatikus szállításnál olyan kicsi, hogy az a gázáram számára a csőkeresztmetszetet gyakorlatilag nem szűkíti, vagyis $A_g \approx A$, tehát a gáztömegáramot a hígáramú pneumatikus szállítási tartományban igen jó közelítéssel számolhatjuk az 1.73. összefüggésből, mint ahogy az a 3. példa adataiból is kitűnik.

3. példa.

Egy vízszintes szívóüzemű pneumatikus szállítóberendezés $D = 125$ mm átmérőjű csőben $\rho_a = 1300$ kg/m³ sűrűségű búzát szállít $v_g = 32$ m/s sebességű és $\rho_g = 1,1$ kg/m³ sűrűségű légáramban. A szlip mérések szerint vízszintes gabonaszállítás esetében: $s = 0,4 = 40\%$. A szállítócső keresztmetszete:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{0,125^2 \pi}{4} = 0,01227 \text{ m}^2$$

A szállítólevegő tömegárama:

$$\dot{m}_g = A \rho_g v_g = 0,01227 \text{ m}^2 1,1 \text{ kg/m}^3 32 \text{ m/s} = 0,432 \text{ kg/s}$$

$\mu = 7,5$ -es keverési aránnyal (adagolási tömegaránnyal) az anyagtömegáram:

$$\dot{m}_a = \mu \dot{m}_g = 7,5 0,432 \text{ kg/s} = 3,24 \text{ kg/s} = 11,66 \text{ t/h}$$

Az anyag sebessége:

$$v_a = (1 - s)v_g = (1 - 0,4)32 \text{ m/s} = 19,2 \text{ m/s}$$

Az anyagáram folyómétertömege a szállítócsőben:

$$q_a = \frac{\dot{m}_a}{v_a} = \frac{3,24 \text{ kg/s}}{19,2 \text{ m/s}} = 0,169 \text{ kg/m}$$

Az anyagáram keresztmetszete tehát:

$$A_a = \frac{q_a}{\rho_a} = \frac{0,169 \text{ kg/m}}{1300 \text{ kg/m}^3} = 0,0001298 \text{ m}^2$$

azaz mindössze 1,06 %-a a szállítócső keresztmetszetének. A fentiekből következik, hogy amennyiben a szállító levegő számára rendelkezésre álló keresztmetszetet a cső keresztmetszetével azonosnak vesszük, csupán 1,06 %-os hibát követünk el. Ez a hiba kisebb a csővezeték gyártásánál adódó keresztmetszeti egyenlőtlenségeknél.

A csővezetékben egyidejűleg jelenlevő keverék tömegaránya a $\mu = 7,5$ -es keverési aránynál:

$$m = \frac{\mu}{1 - s} = \frac{7,5}{1 - 0,4} = 12,5$$

Az anyag viszonylagos térfogataránya:

$$\varepsilon_a = m \frac{\rho_g}{\rho_a} = 12,5 \frac{1,1 \text{ kg/m}^3}{1300 \text{ kg/m}^3} = 0,0105 = 1,05\%$$

A keverék sűrűsége:

$$\rho_k = (m + 1)\rho_g = (12,5 + 1)1,1 \text{ kg/m}^3 = 14,85 \text{ kg/m}^3$$

4. példa.

Egy nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés $D = 38 \text{ mm}$ átmérőjű vízszintes egyenes szállítócsőszakaszában $\rho_a = 970 \text{ kg/m}^3$ tömör anyagsűrűségű lisztet szállítanak. A szállítócső $p = 2,4 \text{ bar}$ túlnyomású helyén $\dot{m}_a = 1,64 \text{ kg/s}$ anyagtömegáram szállításakor $v_a = 4,76 \text{ m/s}$ anyagsebesség adódik. A szállítólevegő tömegárama $\dot{m}_g = 0,016 \text{ kg/s}$.

A keverési arány:

$$\mu = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_g} = \frac{1,64 \text{ kg/s}}{0,016 \text{ kg/s}} = 102,5$$

értéke alapján látható, hogy a példa a sűrűáramú pneumatikus szállítás tartományába esik.

Az anyagáram folyómétertömege:

$$q_a = \frac{\dot{m}_a}{v_a} = \frac{1,64 \text{ kg/s}}{4,76 \text{ m/s}} = 0,345 \text{ kg/m}$$

A szállítócső keresztmetszete:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{0,038^2 \pi}{4} = 0,01134 \text{ m}^2$$

Az anyag viszonylagos térfogataránya:

$$\varepsilon_a = \frac{A_a}{A} = \frac{\dot{m}_a}{A \rho_a v_a} = \frac{1,64 \text{ kg/s}}{0,01134 \text{ m}^2 \cdot 970 \text{ kg/m}^3 \cdot 4,76 \text{ m/s}} = 0,313$$

Tehát az anyag a szállítócső keresztmetszetének közel az egyharmadát (31,3 % -át) elfoglalja, ami már nem elhanyagolható.

Az adott helyen a szállítólevegő sűrűsége izotermikus állapotváltozás esetén:

$$\rho_g = \rho_{go} \frac{p}{p_o} = 1,19 \text{ kg/m}^3 \frac{3,4 \text{ bar absz.}}{1 \text{ bar absz.}} = 4,046 \text{ kg/m}^3$$

Ha a szállítólevegő sebességét az adott nyomásmérési helyen az 1.73. összefüggés szerint számítanánk, tehát az „A” teljes keresztmetszetre vonatkoztatva:

$$v_g = \frac{\dot{m}_g}{A \rho_g} = \frac{0,016 \text{ kg/s}}{0,01134 \text{ m}^2 \cdot 4,046 \text{ kg/m}^3} = 3,49 \text{ m/s}$$

irreális érték adódik, hiszen a szállításhoz pozitív „hajtóerő”, azaz $v_g > v_a$ szükséges, ami itt nem teljesül.

A valóságban tehát a levegősebesség számításánál a sűrűáramú pneumatikus szállítás tartományában az anyag keresztmetszetszűkítő hatását is figyelembe kell venni:

$$v_g = \frac{\dot{m}_g}{(1 - \varepsilon_a) A \rho_g} = \frac{0,016 \text{ kg/s}}{(1 - 0,313) 0,01134 \text{ m}^2 \cdot 4,046 \text{ kg/m}^3} = 5,08 \text{ m/s}$$

Ezzel most már az anyagáram viszonylagos visszamaradása a gázáramhoz képest, azaz a szlip is számítható:

$$s = \frac{v_g - v_a}{v_g} = 1 - \frac{v_a}{v_g} = 1 - \frac{4,76 \text{ m/s}}{5,08 \text{ m/s}} = 0,063 = 6,3 \%$$

A csőben egyidejűleg jelenlevő keverék tömegaránya pedig:

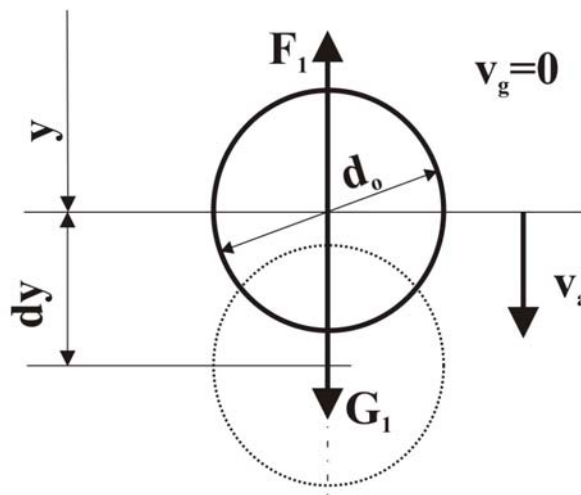
$$m = \frac{\mu}{1-s} = \frac{102,5}{1-0,063} = 109,4$$

A tökéletes keveredésre adódó keveréksűrűség:

$$\rho_k = \frac{A_a \rho_a + A_g \rho_g}{A} = \frac{0,000355 \text{ m}^2 \cdot 970 \text{ kg/m}^3 + 0,000779 \text{ m}^2 \cdot 4,046 \text{ kg/m}^3}{0,001134 \text{ m}^2} = 306,4 \text{ kg/m}^3$$

1.5. Gravitációs erőterben, nyugvó légtérben elejtett szem mozgása

Az 1.39. ábrában egy nyugvó térben elejtett szemre ható erőket ábrázoltuk a mozgás során megtett „y” tetszőleges úthossz esetén és jelöltük a „d_o” átmérőjű gömb alakú szem elemi lépés utáni pozícióját.



1.39. ábra

A szemre ható erők egyensúly alapján az alábbi mozgásegyenlet adódik:

$$G_1 - F_1 = m_1 a \quad (1.80)$$

Az Newton formulával számolható „ F_l ” aerodinamikai erőt behelyettesítve

$$m_1 g - C_e A_o \frac{\rho_g}{2} v_a^2 = m_1 \frac{d v_a}{dt} \frac{dy}{dy} = m_1 v_a \frac{d v_a}{dy} \quad (1.81)$$

valamint a szem súlyát az esési határsebességgel kifejezve

$$C_e A_o \frac{\rho_g}{2} w_o^2 - C_e A_o \frac{\rho_g}{2} v_a^2 = m_1 v_a \frac{d v_a}{dy} \quad (1.82)$$

átalakítások és a változók szétválasztása után az alábbi differenciálegyenlet adódik:

$$dy = \frac{v_a}{g} \frac{d v_a}{1 - \frac{v_a^2}{w_o^2}} \quad (1.83)$$

Bevezetve az esési határsebesség-magasság alábbi fogalmát

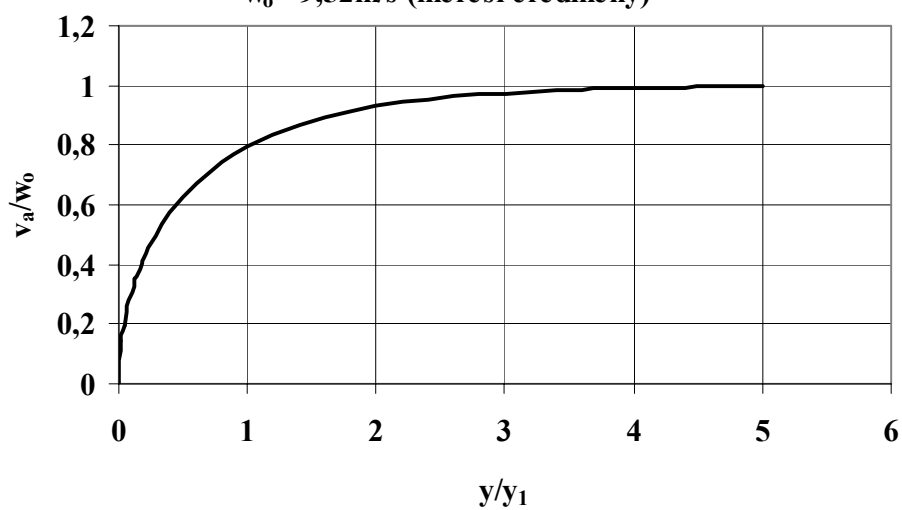
$$y_1 = \frac{w_o^2}{2g} = \frac{2}{3} \frac{\rho_a}{\rho_g} \frac{d_o}{C_e} \quad (1.84)$$

Integrálás után az anyagsebesség a dimenziótlan úthossz függvényében az alábbiak szerint számítható

$$v_a = w_o \sqrt{1 - e^{-y/y_1}} \quad (1.85)$$

Búza dimenziótlan esési sebessége.

$w_o = 9,52 \text{ m/s}$ (mérési eredmény)



1.40. ábra

A függvény alakjának bemutatása érdekében egy búzaszem dimenziótlan esési sebességét az 1.40. ábrán mutatjuk be a dimenziótlan úthossz függvényében:

Az 1.40. ábra alapján megállapítható, hogy a szem sebessége kb. $3y/y_l$ dimenziótlan úthossz megtétele után közelítőleg megegyezik az esési határsebesség értékével.

Hasonló eredményre jutunk, ha a szem mozgási energiájának elemi lépés alatti megnövekedését egyenlővé tesszük a szemre ható erők elemi úthosszon végzett munkájával:

$$E_k = \frac{m_1 v_a^2}{2} \quad dE_k = m_1 v_a dv_a \quad dW = (G_1 - F_1)dy \quad dW = dE_k$$

$$(G_1 - F_1)dy = m_1 v_a dv_a \quad (1.86)$$

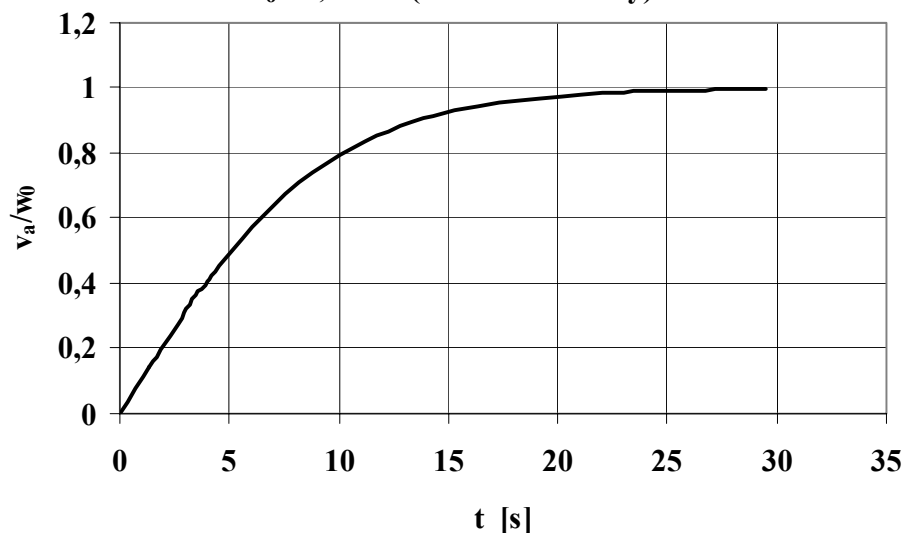
Amennyiben a szem mozgását az idő függvényében kívánjuk leírni, úgy a mozgásegyenlet eredeti alakjából kell kiindulni:

$$m_1 g - C_e A_o \frac{\rho_g}{2} v_a^2 = m_1 \frac{dv_a}{dt} \quad (1.87)$$

A változók szétválasztása után az alábbi differenciálegyenlet adódik:

$$dt = \frac{1}{g} \frac{dv_a}{1 - \frac{v_a^2}{w_o^2}} \quad (1.88)$$

Búza dimenziótlan esési sebessége.
 $w_o = 9,52\text{m/s}$ (mérési eredmény)



1.41. ábra

Integrálás után az anyagsebesség az idő függvényébe az alábbi összefüggéssel számítható:

$$v_a = w_o \tanh \frac{gt}{w_o} \quad (1.89)$$

Az 1.89. összefüggés inverzének felhasználásával az esési idő közvetlenül számítható:

$$\frac{gt}{w_o} = \operatorname{Arth} \frac{v_a}{w_o} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \frac{v_a}{w_o}}{1 - \frac{v_a}{w_o}} \quad (1.90)$$

$$t = \frac{w_o}{2g} \ln \frac{1 + \frac{v_a}{w_o}}{1 - \frac{v_a}{w_o}} \quad (1.91)$$

Az 1.89. összefüggés integrálásával az eső szem által megtett út is számolható:

$$y = \int v_a dt = \frac{w_o^2}{g} \ln \left(\cosh \frac{gt}{w_o} \right) \quad (1.92)$$

1.6. A szállítócső ellenállása tiszta gázáram esetén. (Üresjárás)

A D átmérőjű és L hosszúságú egyenes cső áramlási veszteségét üresjárásnál – amikor a gázáram szilárd anyagot nem szállít – a csőszakaszt határoló szelvények (a nyomásmérési helyek) között mért nyomáscsökkenés szabja meg (lásd az 1.42. ábrát):

$$\Delta p_{csőo} = p_1 - p_2 \quad (1.93)$$

Az 1.42. ábrában egy szívóüzemű pneumatikus szállítóberendezés szállítócsövében kialakuló nyomáscsökkenés görbe látható. A „ Δp_b ” belépési nyomáscsökkenés az alábbi összefüggéssel számolható:

$$\Delta p_b = (1 + \zeta_b) \frac{\rho_g}{2} v_g^2 \quad (1.94)$$

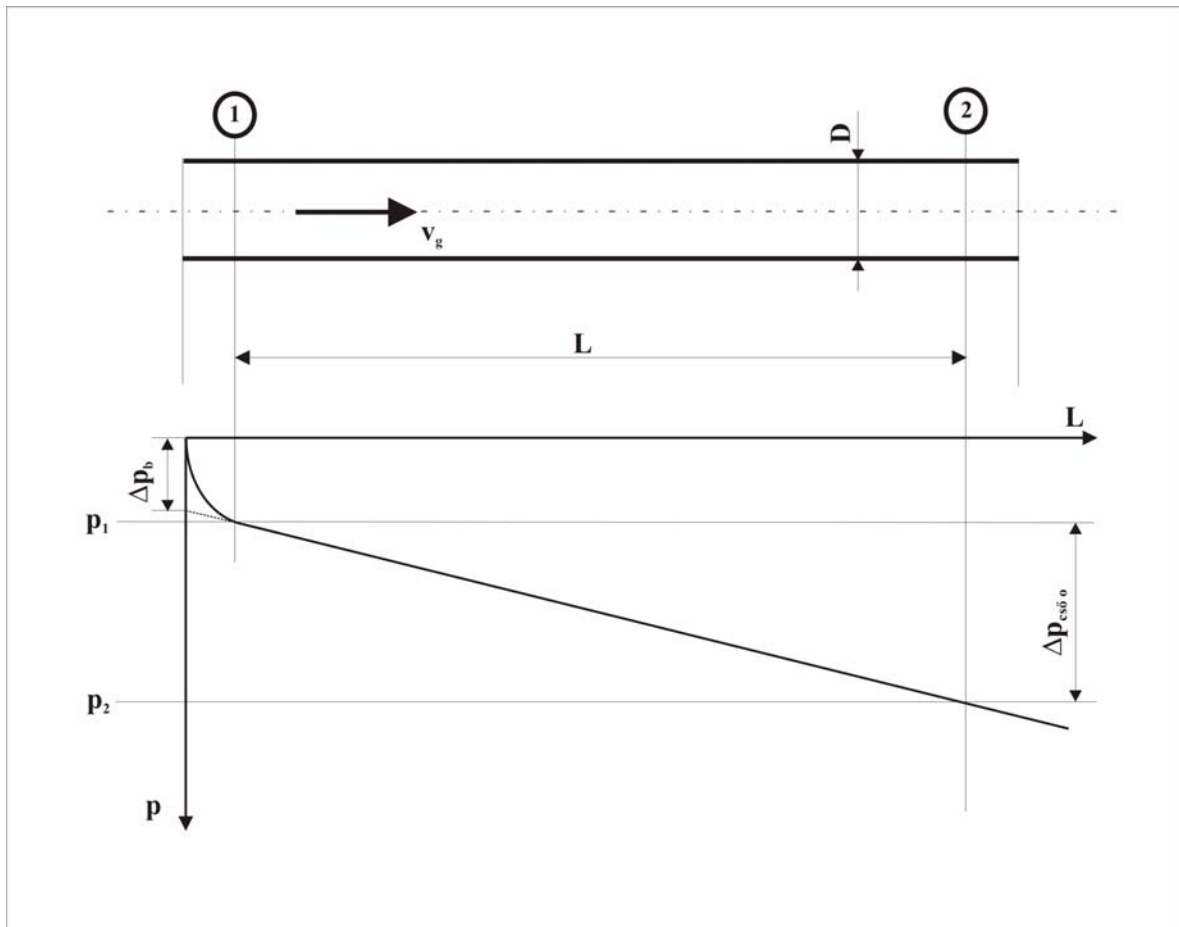
Ahol a „ ζ_b ” belépési ellenállás-tényező értéke a csővezeték belépő szelvényének kialakításától függően változik. Szokásos értéke: $\zeta_b = 0.05-0.3$

Az egyenes csőszakasz üresjárási nyomáscsökkenése olyan rövid „ L ” hosszúság esetén, amikor a szállító közeg (gáz, levegő) sűrűségének változása elhanyagolható:

$$\Delta p_{csőo} = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho_g}{2} v_g^2 \quad (1.95)$$

A „ λ ” csőúrlódási tényező elsősorban a csőben kialakult áramlásra vonatkozó Reynolds-számtól függ, amelynek definíciója

$$Re = \frac{D v_g}{\nu_g} \quad (1.96)$$



1.42. ábra

Pneumatikus szállítás Reynolds szám tartománya: $Re=10\,000-400\,000$: A szállító közeg (levegő) „ v_g ” kinematikai viszkozitása a nyomás és hőmérséklet függvényében az alábbi összefüggés szerint változik:

$$\nu_{lev} = \frac{p_n}{p} * (10^6 * \nu_{levn} + 0.1 * t) * 10^6 \quad (1.97)$$

ahol az „n” index jelölés a fizikai normál állapotra utal:

$$\nu_{levn} = 13.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

a levegő kinematikai viszkozitása fizikai normál állapotban

$$b = 760 \text{ mmHg}$$

$$T_n = 273 \text{ K}$$

$$\rho_{gn} = 1.293 \text{ kg/m}^3$$

$$p_n = 101.36 \text{ kPa} \quad \text{nyomás normál állapotban}$$

$$t_n = 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{hőmérséklet normál állapotban}$$

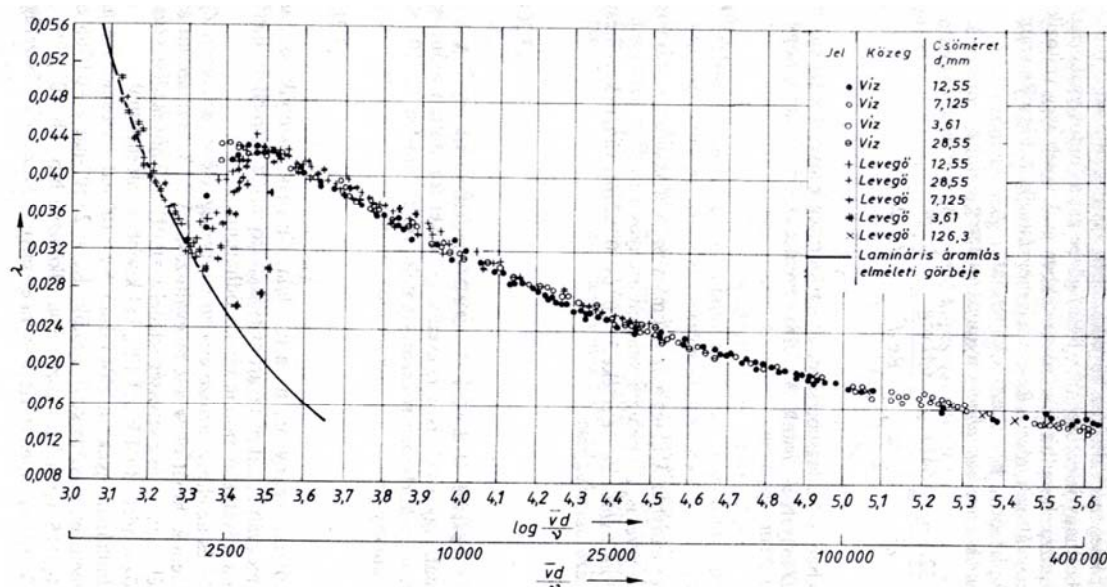
normál állapotú levegő hőmérséklete

Pneumatikus szállításakor, ha a szállított anyag kemény (pl.: búza, pernye stb.) a szállítócső belső fala rövid időn belül simára kopik. Ilyenkor a sima csövekre érvényes összefüggésekből számolhatjuk a csősúrlódási tényező értékét. Hidraulikailag simának tekinthető az a cső, amelynél az érdesség miatti méretváltozás a lamináris határreteg alatt marad. Az 1.43. ábrában bemutatjuk a csősúrlódási tényező változását a Reynolds szám függvényében [22] szerint.

A sima csövek csősúrlódási tényezőinek számítására érvényes Nikuradze-féle képlet helyett, az ezzel azonos eredményt adó, de könnyebben kezelhető Filonyenko-féle összefüggés használható:

$$\lambda = \left[\frac{0.55}{\log(\text{Re}/8)} \right]^2 \quad (1.98)$$

Ha a szállított anyag nem kemény, sőt esetleg nagy nedvességtartalmú (pl.: cukorrépa szelet, egyes malmi féltermékek), a szállítócső fala még hosszabb szállítási időtartam alatt sem kopik simára. Ilyenkor a csősúrlódási tényező értéke és emiatt az üresjárási nyomásesés is nagyobb, mint a sima cső esetében.



1.43. ábra

A szállító közeg (gáz, levegő) sűrűsége a „p” nyomás és „T” hőmérséklet ismeretében a gáztörvényből számítható:

$$\rho_g = \rho_{gn} \frac{p}{p_n} \frac{T_n}{T} \quad (1.99)$$

5. példa

Egy $D=125\text{mm}$ átmérőjű $L=20\text{m}$ hosszú egyenes csőszakaszban a légáram sebessége $v_g=25\text{m/s}$. A szívóüzemben beáramló $t=22^\circ\text{C}$ hőmérsékletű levegő sűrűsége a $p=99\text{kPa}$ nyomáson

$$\rho_g = \rho_{gn} \frac{p}{p_n} \frac{T_n}{T} = 1.293 * \frac{99}{101.36} \frac{273}{295} = 1.169 \text{ kg/m}^3$$

A levegő kinematikai viszkozitása

$$\nu_{lev} = \frac{p_n}{p} * (10^6 * \nu_{levn} + 0.1 * t) * 10^6 = \frac{101.36}{99} * (13.3 + 0.1 * 22) * 10^{-6} = 15.9 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

A Reynolds szám

$$\text{Re} = \frac{0.125 * 25}{15.9 * 10^{-6}} = 196541$$

A csőszűrlődési tényező

$$\lambda = \left[\frac{0.55}{\log(\text{Re}/8)} \right]^2 = \left[\frac{0.55}{\log(196541/8)} \right]^2 = 0.0157$$

A csőszakasz üresjárási nyomáscsökkenése

$$\Delta p_{csőo} = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho_g}{2} v_g^2 = 0.0157 * \frac{20}{0.125} * \frac{1.169}{2} * 25^2 = 918 \text{ Pa}$$

A csőszakasz végén adódó nyomás

$$p_2 = p_1 - \Delta p_{csőo} = 99000 - 918 = 98082 \text{ Pa}$$

A végnyomás a kezdőnyomástól nem egészen 1%-kal tér el, ami azt jelenti, hogy a sűrűség kiszámításánál is csak akkora hibát követtünk el.

Anyagszállítás esetében, vagy hosszú csővezeték üresjárásakor a nyomáscsökkenés a fenti példában látottnál jóval nagyobb lehet. Ilyenkor első közelítésként célszerű például a szállítócsőben kialakuló közepes nyomásból számolni a levegő sűrűségét. Így számolva, ha a „ Δp ” nyomáscsökkenés nem haladja meg a kezdeti (abszolút) nyomás 10%-át, az elkövetett hiba legfeljebb 5%.

Az állandó sűrűséggel bemutatott számítás a $\frac{\Delta p_o}{p_o} < 0.1$ tartományban használható.

1.7. Hosszú csővezeték ellenállása. (Az expanzió figyelembe vétele)

Hosszú csővezeték esetén a „ Δp ” nyomásesés akkor lehet, hogy a légáram sűrűségének változása már nem hagyható figyelmen kívül, mert a levegő expanziója következtében a „ v_g ” áramlási sebesség megnövekszik és az áramlási veszteség már nem marad arányos a csőhosszal.

Az 1.43. ábra a vízszintes szívóüzemű hosszú csővezetékben a nyomásesés alakulását mutatja. A csővezeték elején, az 1-es szelvényben a gáz sebessége: „ v_{g1} ”, sűrűsége „ ρ_{g1} ”. E kezdő értékből az expanzió figyelembe vétele nélkül az 1.95 összefüggéssel kiszámolható „ Δp ” nyomásesésnél nagyobb $\Delta p^* > \Delta p$ adódik, amelynek értéke a következőképpen határozható meg:

Az 1 jelű belépő keresztmetszettől „ l ” távolságban az elemi „ dl ” csőhosszon a nyomásesés:

$$-dp = \lambda \frac{\rho_g}{2D} v_g^2 dl \quad (1.100)$$

Az 1.100 differenciálegyenletbe a kontinuitásból $v_g = v_{g1} \frac{\rho_{g1}}{\rho_g}$ valamint izotermikus

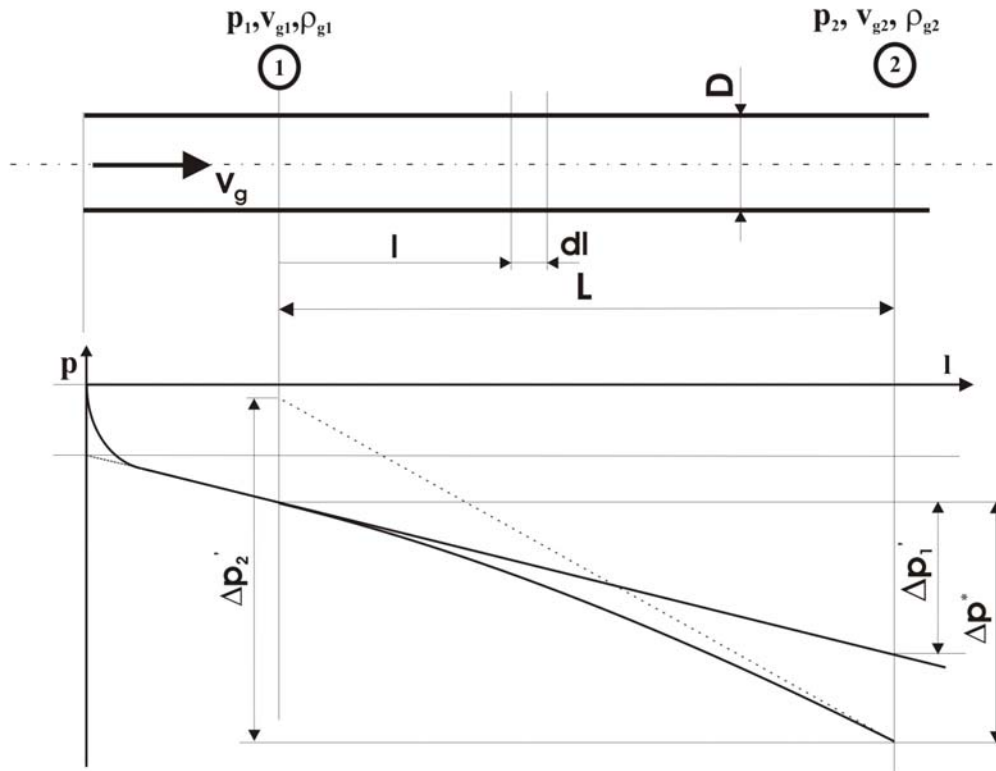
állapotváltozást feltételezve $\rho_g = \rho_{g1} \frac{p}{p_1}$ értékeket helyettesítve, a változók szétválasztása és

integrálás után az expanzió figyelembe vételével adódó $\Delta p^* = p_1 - p_2$ nyomásesésre a következő összefüggés adódik:

$$\Delta p^* = p_1 - \sqrt{p_1^2 - 2 \Delta p_1' p_1} \quad (1.101)$$

ahol „ p_1 ” az „ L ” hosszúságú csőszakasz 1 jelű belépő szelvényében kialakuló abszolút nyomás, $\Delta p_1'$ az 1-es indexű sebességgel és sűrűséggel számítható, az expanziót figyelmen kívül hagyó,

1.95 összefüggéssel kiszámolható nyomásesés ($\Delta p_1' = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho_{g1}}{2} v_{g1}^2$).



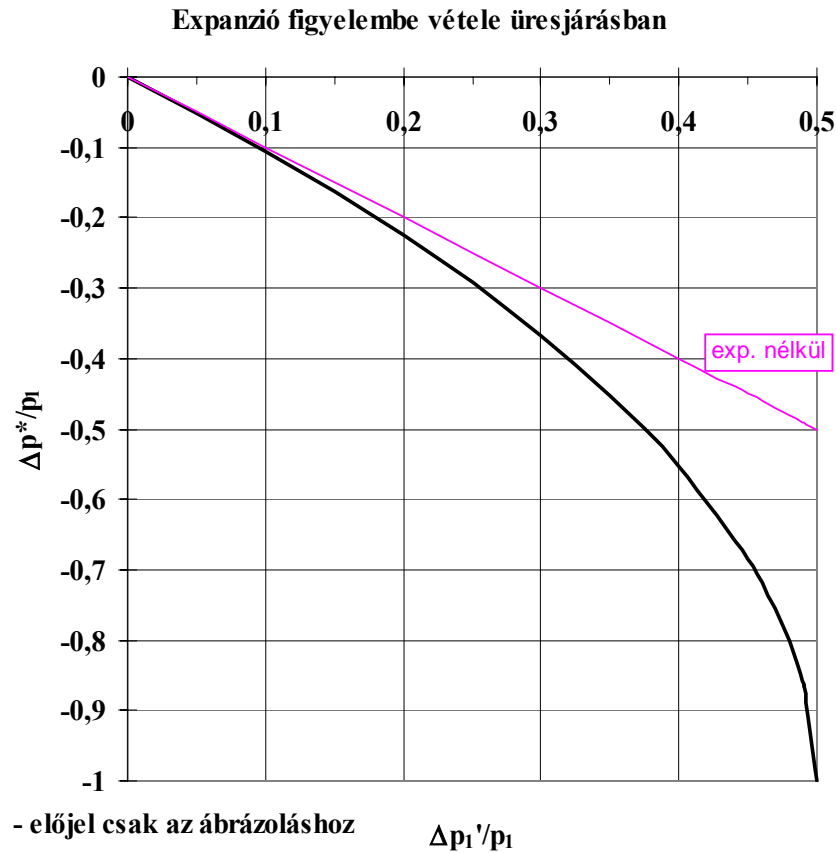
1.43. ábra

Bevezetve a dimenziótlan nyomáskereső fogalmát az 1.101 összefüggés az alábbi alakban írható:

$$1 - \frac{\Delta p^*}{p_1} = \sqrt{1 - 2 \frac{\Delta p_1'}{p_1}} \quad (1.102)$$

Az 1.44. ábrában bemutatott 1.102. összefüggést szemléltető függvény az egyébként egyszerű numerikus számítást is feleslegessé teszi. E görbe alakjából kiolvasható, hogy viszonylag kis nyomáskereső az expanzió figyelmen kívül hagyásával számíthatók, viszont $\Delta p_1' / p_1 = 0.5$ határértéknél a görbe értelmezése megszűnik, mert ezen a helyen Δp^* nyomáskereső valóságos értéke eléri a p_1 kezdőnyomás értékét.

A fenti számítás hiányossága, hogy nem veszi figyelembe az expanzió miatt folyamatosan növekvő légáram gyorsításához szükséges nyomáskereső. Ennek elhanyagolása azonban – mint azt Pattantyús [23] kimutatta – a gyakorlatban előforduló esetekben alig vezet számszerűen érzékelhető hibára.



1.44. ábra

6. példa

Az 5. példában tárgyalt $D=125$ mm átmérőjű csőben a nyomásesés $\Delta p_{csőo}=918$ Pa volt, $L=20$ m csőhossz, $\lambda=0.0157$ csőszűrlődési tényező és $v_{g1}=25$ m/s, $\rho_{g1}=1.169$ kg/m³ és $p_1=99$ kPa kezdő értékek esetén. Ha a cső hossza $L_1=300$ m, akkor a kezdőértékekből az expanzió figyelmen kívül hagyásával számítható nyomásesés ($\Delta p_1'$) a cső hosszának növekedésével arányosan nő:

$$\Delta p_1' = \frac{L_1}{L} \Delta p_{csőo} = \frac{300}{20} * 918 = 13770 \text{ Pa}$$

Ez a nyomásesés már meghaladja a kezdő nyomás 10%-át:

$$\frac{\Delta p_1'}{p_1} = \frac{13770}{99000} = 0.139 > 0.1 = 10\%$$

Azaz az expanzió elhanyagolása már jelentős hibát okoz. Az expanzió következtében jelentkező nyomásesés az 1.101. összefüggés alapján:

$$\Delta p^* = p_1 - \sqrt{p_1^2 - 2 \Delta p_1' p_1} = 99000 - \sqrt{99000^2 - 2 * 13770 * 99000} = 14890 \text{ Pa}$$