

Szemcsés anyagok – csővezetékben – folyadékárammal való szállításának méretezése

1. rész: Kísérleti berendezések és modell

FAITLI JÓZSEF ■ Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet ■

ejtfaitj@uni-miskolc.hu

Érkezett: 2011. 04. 04. ■ Received: 04. 04. 2011. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2011.2>

Design of transport of particulate materials by fluid flow in pipelines

Part 1: Experimental equipment and model

Scientific field of mechanical process engineering deals with the flow of solid – liquid mixtures in pipes, called as hydraulic transport. In the construction industry the two most important applications are the underwater hydraulic sand and gravel mining and the pipe transport of the mixed concrete into the place of usage. In Hungary the longest slurry pipeline is situated in the slag – fly ash deposition system of the Mátra Power Plant. Common feature of all the mentioned three applications, that the solid phase is composed by really fine and coarse particles as well. There are many hundreds km long slurry pipelines in the world. Of course, flowing suspensions and slurries in pipes can be found in many other industries, for example in mineral processing plants with wet technologies. This paper summarizes results achieved at the Institute of Raw Materials Preparation and Environmental Processing of the University of Miskolc during the last 20 years. Perhaps the most important result was the so called fine suspension – coarse mixture flow model. The model is a hydraulic transport design method based on physical material testing and pilot scale hydraulic transport experiments. Our partner, the EGI Ltd. has designed many fly ash handling systems based on the model and our material testing. Established installations are: Jacksonville Power Plant – USA, Craiova 2, Isalnita, Rovinari, Turceni Power Plants – Románia, Mátra Power Plant, etc...

Dr. FAITLI József
(1965) egyetemi docens, a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetének oktatója. 1989-ben a Miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen szerzett bányagépész- és villamos mérnök diplomát, amelyet követően az Eljárástechnikai Tanszéken helyezkedett el és amelynek jelenleg is oktatója. Hosszabb külföldi tanulmányutakat (Louvain-la-neuve, Belgium, Tempus ösztöndíj, 7 hónap, 1991, Chicago, USA, Fulbright ösztöndíj, 12 hónap, 1993–94.) követően 1998-ban szerzett PhD oklevelet, mechanikai eljárás technika tudományterületen. Fő oktatási és kutatási területe a többfázisú áramlások, szemcsemozgás, mintavevélés, porleválasztás, stb... Tudományos publikációinak száma 75.

Bevezetés

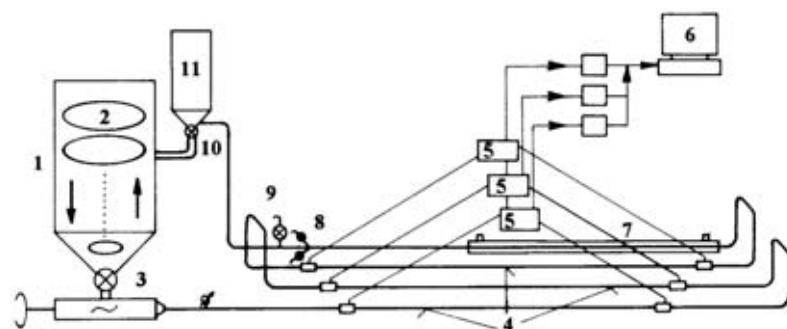
A Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében, – korábban Eljárástechnikai Tanszék – Tarján és Debreczeni alapozta meg a szilárd-folyadék keverékek áramlásának a vizsgálatát 1975–1990 között. 1989-ben kerültem a tanszékre, és azóta ez a téma az egyik fő területem. Intenzív kutatásokat folytattam Tarján Professzor úrral, majd később önállóan is. A tématerület kutatásához 2004-ben csatlakozott Gombkötő Imre, aki főleg az extrém nagy koncentráció hatását vizsgálja. Az eltelt időszakban a legtöbbet a világ számos pontjáról ideszállított (Neyveli, Ashtech és Busawal Erőművek – India, Nicola Tesla Erőmű – Szerbia, Eren Erőmű – Törökország, Mátrai, Berentei, Tatabányai, Tiszaújvárosi Erőművek, stb...), különféle szén- és lignittüzelésű erőművekből származó salak és pernye anyagokat vizsgáltuk. Végeztünk

keverékáramlási vizsgálatokat hulladékégetői pernyékkel, perlittel, homokkal - kavicszal, élővízi iszapokkal, üveghomokkal, bentonittal, különféle előkészítéstechnikai és bányászati maradványanyagokkal, pl. Gyöngyösorszi flotációs meddővel, vörösiszappal, stb...

A kutatási eredmények bemutatása

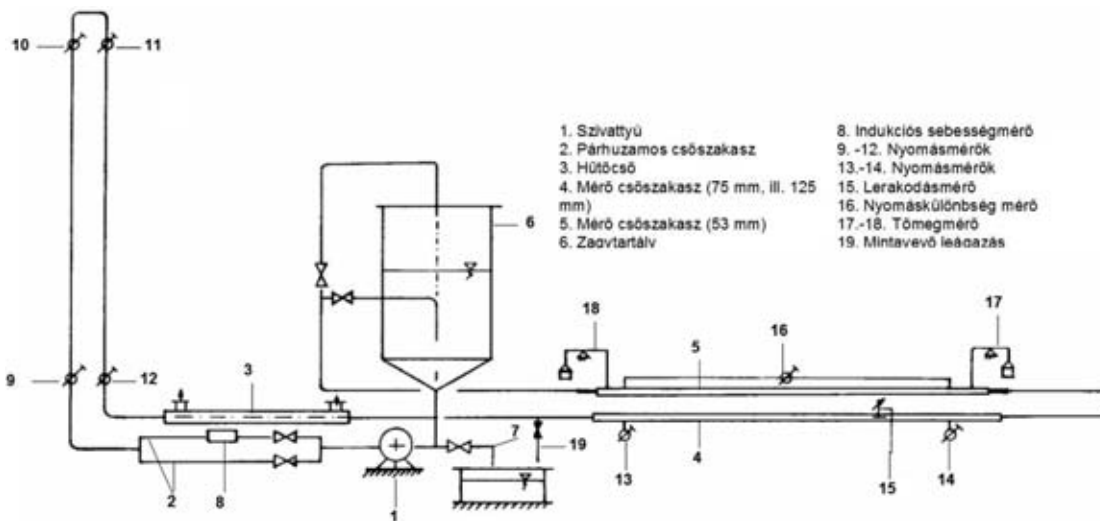
Kísérleti berendezés

Nagy kapacitású, hidraulikus, szilárd anyag - szállítási rendszerek tervezése esetén elengedhetetlen, hogy előzetesen különféle vizsgálatokat végezzünk az anyagokkal, e nélkül nem lehet felelősen megtervezni a technológiát. A finom szuszpenzióáramlás vizsgálatára kifejlesztett kísérleti berendezés a csőviszkoziméter (1. ábra).



1. Keverőtartály
2. Lyukasztott tárcsás keverők
3. Csigaszivattyú
4. Mérő csőszakaszok
5. Nyomáskülönbség-mérők
6. Mérésadatgyűjtő
7. Hűtőcső
8. Mintavevő leágazás
9. Nyomásmérő
10. Zárószerelevény
11. Tartályos térfogatáram-mérő

1. ábra A három mérőcsöves csőviszkoziméter
Fig. 1. The tube viscometer with three measuring pipes



2. ábra Félüzemi méretű hidraulikus szállítás mérőkör
Fig. 2. Pilot scale hydraulic test loop

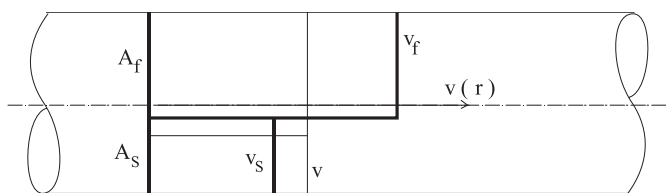
A csőviszkoziméterbe kb. 100 l szuszpenziót lehet bekeverni, amit merev karakterisztikájú csigaszivattyú (3) szállít körbe. A mérés elve az, hogy lamináris csőáramlás mellett kell az áramlási sebességet és a nyomásvesztéget mérni. A megépített kísérleti berendezésben három kb. 6 m hosszú 16, 21 és 27 mm belső átmérőjű mérőcső (4) van. Részben azért szükséges három mérőcső, mivel adott szuszpenzió térfogatáram mellett így közvetlenül három mért pont áll a rendelkezésre, amelyre háromparaméteres reológiát, pl. reáplasztikus modell, lehet illeszteni. Másrészt ellenőrzés céljából, mivel a különféle átmérőjű csövekben mért pszeudo nyírési pontoknak – a lamináris tartományon – egy görbére kell esniük. Az intézeti csőviszkoziméter már több mint 15 éves, azonban jelenleg is rendszeresen végzünk rajt méréseket a már jól bevált mérési protokoll szerint.

A durva keverékáramlás ill. a durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban vizsgálatára alkalmas – félüzemi méretű – hidraulikus szállítás mérőkört építettünk. Az évek során az adott feladatnak megfelelően a mérőkört gyakran átépítettük. A legtöbb vizsgálatot Warman forgólapátos zagyszivattyúval végeztük, azonban használtunk membrán dugattyús és csiga szivattyúkat is. Általában a vizsgálatokat úgy végeztük, hogy a folyadék betöltésével kezdődött a mérés, majd a szilárd anyagot fokozatosan adagoltuk a rendszerbe, a zagy folyamatosan körbe járt. Végeztünk úgy is méréseket, hogy a cső végén dobszítával leválasztottuk a szilárd anyagot, majd csiga segítségével újra pontos mennyiségben beadagoltuk azt. A 2. ábrán a hidraulikus mérőkör egy előnyös kialakítása látható.

A hidraulikus szállítást vizsgáló mérőkör egy felműszerezett félüzemi méretű (400 l töltési térfogat, max. 60 m³/h szállítási kapacitás), zárt körfolyamú zagyszállító berendezés, amelyben a zagyszivattyú (1) a tartályból (6) a mérő csővezetékeken (4–5) keresztül visszaszállítja a tartályba a bekevert zagyot. Az ilyen zárt körfolyamú berendezésekben a hűtésről gondoskodni kell, mivel az áramlási súrlódási veszteség felmelegíti a zagyot. Erre a célra egy egyenes duplafalú csőszakaszt (3) építettünk a rendszerbe, a külső gyűrű alakú térben pedig folyamatosan hűtővizet keringtettünk. A megépített kísérleti körök mindegyikébe építettünk mintavevő csonkokat (19). Csapok

segítségével a teljes zagyáram, vagy a csőbe épített vízszintes elválasztó lemez segítségével a cső felső ill. alsó felében lévő zagyáram a mintavevő edénybe juttatható. A szemcsesűrűség ismeretében, – amelyet előzőleg piknométerben kell megmérni – a szállítási koncentráció (szilárd anyag térfogatáram / zagy térfogatáram) a minta térfogata és tömege alapján meghatározható. A mérő csőszakaszba épített tappancsok (15) segítségével a lerakódott anyagréteg vastagságát tudtuk mérni. A nyomásvesztés mérésére holttér nélküli túlnyomás távadókat (13–14) alkalmaztunk. A keresztmetszeti átlagsebesség mérésére indukciós áramlásmérőt (8) építettünk be. Az indukciós áramlásmérő elektródái közt áramló töltések hatására indukálódik jel a műszerben, azaz az áramló közegben töltéssel rendelkező részeknek (elektronok – ionok) kell lenniük. Ezért desztillált víz sebességének a mérésére nem alkalmas az indukciós áramlásmérő, normal csapvízre azonban már igen. A mérési elvből az következik, hogy az indukciós áramlásmérő csak a víz (folyadék) fázis sebességét méri, ami csak abban az esetben egyezik meg a zagy sebességével, ha a szemcsék pontosan a folyadék sebességével mozognak, azaz nincs szlip. Vízszintes csővezetékben a nagyobb szemcsék a tehetetlenségük miatt lemaradhatnak a folyadékhoz képest, míg függőleges csőben, – lefelé irányuló áramlásban – pedig előre siethetnek. Ennek megfelelően, – adott pillanatban – a csőben a helyi koncentráció megnőhet, vagy lecsökkenhet a csővégi kifolyáshoz képest, meg kell különböztetni az un. szállítási (C_T) és helyi (C_U) koncentrációkat. Nyugalomban lévő szilárd-folyadék keverékek esetén a szemcsék relatív mennyiségét, azaz a koncentrációt térfogatok, tömegek ill. kevert mennyiségek arányaként is megadhatjuk. A tudományos életben a térfogati koncentráció (szilárd anyag térfogata / zagy térfogata) használatos, míg az iparban inkább a tömegkoncentrációt alkalmazzák. A szállítási- és helyi térfogati koncentráció a következőképp írható fel.

$$Av = A_s v_s + A_f v_f \quad C_T = \frac{A_s v_s}{Av} = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}} \quad C_U = \frac{A_s}{A} \quad (1)$$



3. ábra A szállítási- és helyi koncentráció
Fig. 3. The transport and in - situ concentrations

Az 1. egyenletben három ismeretlen szerepel. A hidraulikus szállítási kísérleti berendezésben az az érdekes eset állhat elő, hogy annak ellenére, hogy a beépített indukciós áramlásmérő méri a folyadék fázis sebességét, ha a szliról nincs információ, nem tudjuk a zagy áramlási sebességét, a mérés kiértékelhetetlen. A megoldás az, hogy mérni kell a szállítási- és a helyi koncentrációt is. A szállítási koncentráció a kifolyásból mérőhengerrel vett minta térfogatának és tömegének a mérése alapján a szemcsesűrűség ismeretében meghatározható. Ez nem on-line folyamatos, hanem szakaszos mérési módszer és a mérésadatgyűjtő rendszer sem érzékeli, azonban mindenféleképp érdemes időnként elvégezni ellenőrzés céljából. A helyi koncentráció mérésére alkalmazhatók a kereskedelmi forgalomban kapható izotópos sűrűségmérő eszközök, azonban ezek drágák és veszélyesek. A következő eszközöket fejlesztettük ki a szállítási- ill. a helyi koncentráció mérésére.

On-line szállítási koncentráció – mérő berendezés



4. ábra A szállítási koncentráció mérése 4 db nyomás távadóval
Fig. 4. Measurement of the transport concentration by 4 pressure transducers

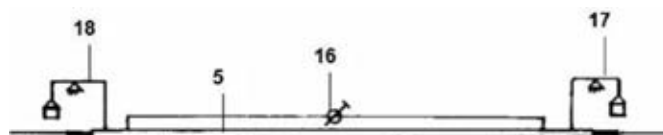
A kísérleti berendezésbe függőleges csőszakaszokat építettünk, amelyekbe 4 db holttér nélküli, rozsdamentes acél membránú túlnyomás távadót szereltünk. Nyugalomban lévő, de felkevert zagy aljába, ha ilyen nyomásmérőt helyezünk, az a zagy hidrosztatikai nyomását, közvetve a zagy átlagos sűrűségét méri. A jelenséget a függőleges fel- ill. leáramlás esetén az bonyolítja, hogy felfelé áramlásnál a szemcsék lemaradnak a helyi koncentráció növekszik, míg leáramlásnál a szemcsék előre sietnek a helyi koncentráció csökken. Mindezek alapján úgy gondoltuk, hogy a két hatás átlagként a helyi koncentráció, azaz adott időpillanatban a csőben tartózkodó zagy átlagos sűrűségével arányos mennyiség lesz a négy túlnyomás értékéből számított összes nyomáskülönbség. Az elvégzett

szisztematikus mérések és elméleti megfontolások alapján [8] azonban bebizonyítottuk, hogy nagyon kis hibával ez az eszköz a szállítási koncentrációt méri. A szállítási térfogati koncentrációt a következő összefüggés segítségével határozhatjuk meg:

$$C_T = \frac{(p_1 - p_2) - (p_3 - p_4) - 2\rho_f gH}{2\rho_f gH \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right)} \quad (2)$$

On-line helyi koncentráció – mérő berendezés

A korábbiakban beláttuk, hogy az általában acél csövekben áramló zagyok átlagos sebességének a meghatározására – az indukciós áramlásmérő mellett – szükség van olyan eszközre, ami külön képes a folyadék és a szilárd anyag sebességének, vagy a szállítási- és a helyi koncentrációnak a mérésére. A helyi koncentráció mérésére fejlesztettük ki azt a mérőberendezést, amely a mérő csőszakasznak a tömegét méri a benne lévő zaggal együtt, amiből az áramló zagy sűrűsége, közvetve a helyi koncentráció meghatározható.



5. ábra A helyi koncentráció mérése a mérőcsőszakasz mérlegelésével
Fig. 5. Measurement of the in - situ concentration by weighting of the measuring pipe

A mérő csőszakaszt gumi közcsövek közé kell építeni. A gumi rugalmassági modulusa legalább 3 nagyságrenddel eltér az acélétól. A cső két végére olyan mérlegkarokat (17–18) kell építeni, amelyek egyik karja a csövet tartja, a másik karja pedig erőmérő távadón keresztül egy-egy fix ponthoz van rögzítve. A mérőcsőnek pontosan egytengelyűnek kell lennie a csatlakozó csőszakaszokkal, azért hogy a be- és kilépő zagyáram impulzus ereje ne okozzon hibát. Ezt a hibát egyébként tiszta vízzel végzett kalibráló mérés alapján a számítógépes mérésadatgyűjtő segítségével korrigálni is lehet. Mivel a mérlegkarok mindkét karja pontosan ki van egyenlítve és a nyúlásmérő bélyeges erőmérő cellák igen kicsi elmozdulás mellett érzékelik az erőt, a mérőcső mindig egytengelyű pozíciójú. A mérőcső belső térfogata (V), azaz a benne elférő zagy térfogata adott. A berendezés kalibrálásakor tiszta folyadékkal kell a mérőcsövet feltölteni és ebben az állapotban kell az erőmérőket kinulázni, így tényleges méréskor a folyadékot kiszorító nagyobb sűrűségű szilárd anyag miatti (Δm) tömeg különbséget méri a berendezés, amelyből a helyi koncentráció a következőképp számítható:

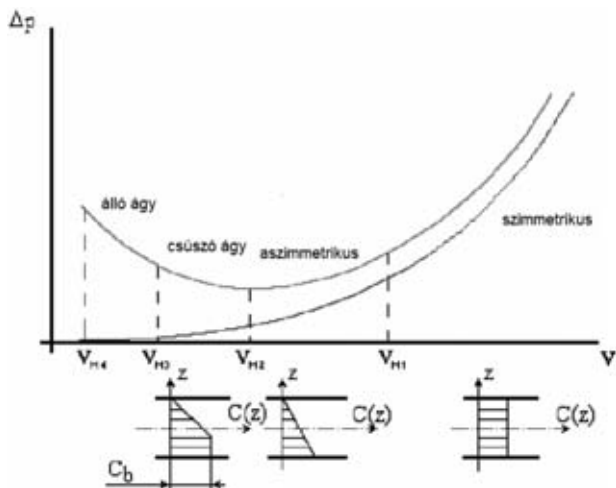
$$C_u = \frac{\Delta m}{(\rho_s - \rho_f) V} \quad (3)$$

Modell: A finom szuszpenzió - durva keverékáramlás modell

A nyugati szakirodalomban elterjedt modell a cső függőleges tengelye menti koncentráció eloszlás alapján osztályozni a szilárd-folyadék többfázisú áramlást. Amennyiben a koncentráció eloszlása szimmetrikus homogén keverékáramlásról, amennyiben aszimmetrikus heterogén keverékáramlásról beszélnek, és eszerint választják meg a nyomásvesztés számítására szolgáló összefüggéseket is.

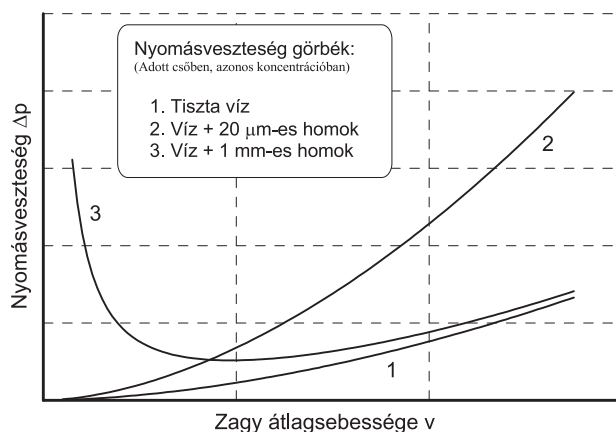
Még nagyméretű szemcsék esetén is, – ha a keresztmetszeti átlagsebesség elegendően nagy (nagyobb, mint v_{M1}) – a szemcséket szuszpendálja a nagy turbulencia, az anyag szimmetrikus koncentráció eloszlás mellett szállítható (homogén keverékáramlás). Csökkenő sebességnél először a koncentráció eloszlás aszimmetrikussá válik, majd előbb megjelenik a csúszó

ágy, még kisebb sebességeknél az álló ágy, végül bekövetkezik a dugulás. A PhD értekezésemben szűk üveghomok frakciók különböző koncentrációjú keverékeit, azaz a szemcseméret hatását vizsgáltam szisztematikusan, csőviszkóziméterben. A kísérletek alapján megállapítottam, hogy adott anyag, adott méretű csőben, azonos folyadék és üzemi paraméterek mellett a szemcsenagyság függvényében egészen eltérően viselkedik. Például a vizsgált közel monodiszperz homok, ha egyszer 20 μm majd 1 mm nagyságú, a nyomásvesztés gőrbék alakja jellegzetesen más.



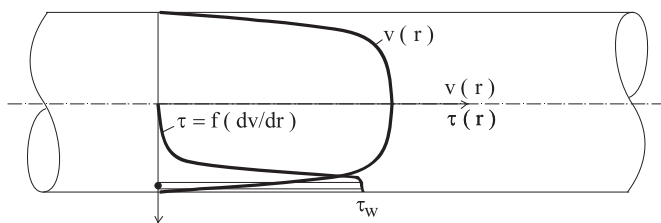
6. ábra A koncentráció eloszlása a sebesség függvényében
 Fig. 6. Concentration distribution as function of the velocity

A tiszta víz nyomásvesztés gőrbéje kis sebességek esetén, a lamináris tartományon egyenes ($Re < 2320$), a meredekség a viszkozitással arányos. Ipari méretű csővezetékben ehhez nagyon kicsi sebességek tartoznak, olyannyira, hogy az üzemi sebességtartományban ábrázolva a nyomásvesztés a lineáris szakasz szinte nem is látszik. Turbulens áramlásban és sima falú csőben a nyomásvesztés a sebességnek közel a második hatványával arányos, a nyomásvesztés görbe hatványfüggvény. Amennyiben a szilárd anyagot kis szemcseméretben (pl. 20 μm -es homok) keverjük be, az így képzett kétfázisú keverék nyomásvesztés gőrbéje teljesen hasonló a vízéhez, csak nagyobb meredekségű a nagyobb viszkozitással arányosan (2. görbe a 7. ábrán). Abban az esetben, ha az azonos mennyiségű szilárd anyagot nagyméretű szemcsék formájában (pl. 1 mm-es homok) keverjük be, a nyomásvesztés görbe tipikus Durand függvény [4] alakú (3. görbe a 7. ábrán). Egészen nagy sebességek esetén a folyadékáram képes a finom és a durva szemcséket is szuszpendálni, mindkét esetben szimmetrikus a koncentráció eloszlás, a korábbi minősítés szerint mindkettő homogén keverékáramlás, azonban egyértelmű hogy a két eset teljesen eltérő jellegű. Érdekes az, hogy nagy sebességek mellett ugyanannyi szilárd anyag lényegesen kisebb energiával szállítható nagyobb szemcseméret formájában. Kis sebességek esetén a helyzet éppen ellentétes, a nagyobb szemcsék esetén az ülepedés elkezdi dominálni és megjelenik az aszimmetrikus koncentráció eloszlás esetleg a csúszó ill. az álló anyagágy. Kis sebességeknél a kisebb szemcseméretű szilárd anyag szállítható kisebb energiával.



7. ábra Tipikus nyomásvesztés gőrbék
 Fig. 7. Typical pressure loss curves

Az elvégzett kísérleti munka és elméleti megfontolások alapján új modellt vezettünk be, amelyet finom szuszpenzió – durva keverékáramlás modellnek nevezünk el. Adott szilárd anyag és folyadék ill. csővezeték esetén meghatározható egy olyan határ szemcseméret, amelynél, ha finomabb szemcsékből készítünk szuszpenziót, az finom szuszpenzióáramlásban fog a csőben mozogni függetlenül az áramlási sebesség nagyságától ($v > 0$). Ilyen esetben ez a szuszpenzió önálló egyfázisú folyadéknak tekinthető, saját folyási viselkedéssel és sűrűséggel, másképp fogalmazva, – áramlási szempontból – azaz mozgás közben ez az anyag egyfázisú kontinuumként viselkedik. Nyugodalomban természetesen előbb-utóbb a folyadéknál nagyobb sűrűségű szemcsék leülepednek, akkor újra célszerű kétfázisú keverék-ként kezelni. A jelenség magyarázatára a következő hipotézist állítottam fel. Turbulens csőáramlásban a fal mellett kialakul a lamináris határreteg, amelyben az erősen nyírt folyadékréteg sebességprofilja lineáris, vagyis a nyírófeszültség konstans. Ha a szemcse olyan kicsi, hogy belefér ebbe a határretegbe, azonos (közel azonos) nyíró feszültség és sebesség veszi körül és nem alakul ki olyan erő, amely a faltól szeretné eltaszítani, így a helyzeténél fogva a lamináris határretegben nagyobb fal menti nyíró feszültséget, azaz nagyobb áramlási súrlódási veszteséget okoz.



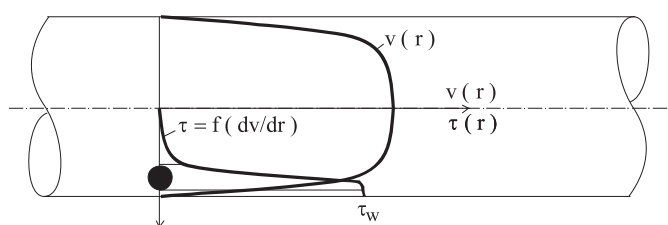
8. ábra A finom szuszpenzióáramlás elvi magyarázata
 Fig. 8. Theoretical explanation of fine suspension flows

A megnövekedett nyomásvesztés annak a következménye, hogy a csőfal menti határretegben a finom szemcsék és a víz alkotta finom szuszpenzió reológiai viselkedése megváltozik a vízhez képest, a viszkozitás megnő, sőt akár a folyási jelleg is megváltozik és nem-Newtoni folyási viselkedést mutatnak ezek az áramló szuszpenziók. A felállított modelltől már következik, hogy a finom szuszpenzióáramlás nyomásvesztését a közeg folyási viselkedését jellemző folyási modell (tipikusan:

Newtoni, Bingham – plasztikus, Hatványfüggvénnyel leírható és Reálpasztikus) és az abban szereplő reológiai paraméterek alapján számíthatjuk.

A határ szemcseméretnél nagyobb szemcsékből készített szilárd-folyadék keverékek csőáramlása esetén az áramlás jellege egészen más, mint az előzőkben leírt finom szemcsék esetében. Ebben az esetben a durva szemcse, jellemzően nem fér bele a lamináris határrétegbe. A szemcse csőfalhoz közeli felén a nyírófeszültség nagy, a sebesség pedig kicsi, a belső felén pedig épp ellentétesen a nyírófeszültség kicsi és a sebesség nagy. Ha ezt az aszimmetrikus feszültség eloszlást kiintegráljuk a durva szemcse felületére egy erőt kapunk, amely a szemcsét a faltól eltaszítja.

$$F_i = \int_A \tau dA \quad (4)$$



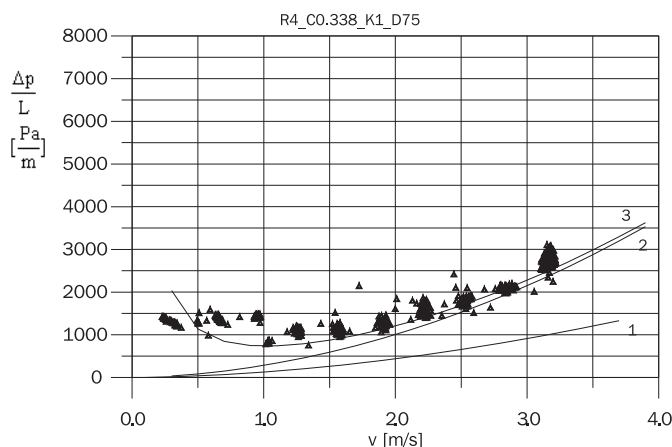
9. ábra A durva keverékáramlás elvi magyarázata
Fig. 9. Theoretical explanation of coarse mixture flows

Nagyobb sebességek esetén ez az erő egyre nagyobb, azaz a szemcse egyre kevésbé tud a fallal sűrűlődni. Ez a hipotézis magyarázatot ad arra a sokszor mért tényre, hogy – nagy sebességek esetén – a durva szemcsés zagyot szinte pontosan akkora energia befektetésével lehet a csőben szállítani, mint ha csak vizet szivattyúznánk. Kisebb sebességek esetén ez a faltól eltaszító erő egyre kevésbé játszik szerepet, ekkor az ülepedés elkezd dominálni és a durva szemcsék mechanikai kontaktusba kerülnek a csőfallal. A szemcsék és a csőfal között mechanikai súrlódó erő ébred, amely a testeket normál irányban összeszorító erőtől és a súrlódási tényezőtől függ, és nem függ a testek közötti sebességtől. Ezzel ellentétben a csőfal mellett ébredő áramlási súrlódási veszteség függ a sebességtől, sima falú csőben, turbulens vízáramlásban a nyomásvesztés egy a sebesség közel második hatványával arányos. Ezek alapján a durva szemcsékből bekevert zagyok csőáramlását durva keverékáramlásnak neveztük el. Ez egy valóban kétfázisú (szilárd-folyadék) mechanikai rendszer, amelyben valójában csak a folyadék áramlásáról beszélhetünk, és amelyben a szemcsék mechanikai erők hatására mozognak. Amikor a folyó görgeti a sziklákat, jól érzékelhető ez a modell. Akkor viszont, amikor adott csővezetékben, adott sebesség mellett, állandó nyomásvesztéssel, stabil üzemben szállítjuk a durva szemcsés anyagot, megtévesztő a helyzet. Olyan mintha a zagy áramolna, ráadásul a nyomásvesztéséből könnyen meghatározhatunk egy látszólagos zagy viszkozitás értéket is. A finom szuszpenzió – durva keverékáramlás modell alkalmazása megmutatja, hogy ez a megközelítés hibás, célszerű ezt a rendszert úgy tekinteni, hogy a folyadék áramlik a folyási viselkedése által meghatározott módon és ez szállítja a szemcséket, amelyek mozgását mechanikai erők határozzák meg. A nyomásvesztés meg-

tározása elméleti úton ezért rendkívül nehéz, tulajdonképp nincs ilyen a szakirodalomban. Ami viszont igen, az a rendkívül nagyszámú mérési eredmény és az azokra illesztett empirikus összefüggés. Ezeket az összefüggéseket nevezhetjük Durand típusú összefüggéseknek, mivel az eltérő anyagokkal és méreteken elvégzett hidraulikus szállítási vizsgálatok eredményeire meghatározott összefüggések közül az elsőt Durand publikálta. A Durand egyenletben két konstans található. A Froude szám kitevője 3, ami a görbe „görbületét” határozza meg, és egy szorzó konstans, ami a görbe magasságát határozza meg, ami 81. Az eltelt több mint 20 évben elvégzett mérések alapján a durva keverékáramlás nyomásvesztésének a számítására jó közelítéssel alkalmaztuk a Durand egyenletet, azzal a különbséggel, hogy a két konstans ($n = 3$ és $K = 81$) anyagtól függő paraméternek tekintettük, és az egyenletet módosított Durand egyenletnek neveztük. Az n és K anyagi paraméterek meghatározására, – adott anyagokra – félüzemi méretű hidraulikus szállítási vizsgálatokat kell végezni.

Az iparban előforduló szemcsés anyagok, – amelyeket csővezetékben szállítanak folyadékáramban – valójában mindig polidiszperzek, azaz szemcseméret-, szemcsealak- és szemcsesűrűség-eloszlásról kell beszélnünk. A szállított szilárd anyag tartalmazhat finom és durva szemcséket egyaránt. Wasp [10] a homogén – heterogén keverékáramlási modell alkalmazásával dolgozta ki az ún. „vehicle” (szállítójármű) modellt. Ennek az a lényege, hogy adott keverékáramlási sebesség mellett a cső legfelső pontjában kialakuló pillanatnyi, helyi koncentrációnak megfelelő zagy hordozó közegként viselkedik és a szimmetrikus koncentráció eloszláson kívüli szemcséket ez a zagy szállítja. A korábbiakban erős kritikával illettük a homogén – heterogén osztályozási rendszert, azonban a „szállítójármű” koncepció briliáns. Elvi megfontolások alapján kidolgoztuk a durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban modellt. A PhD értekezésemben kidolgozott modellt, számos diszkrét szemcsEFRakcióra bontotta a szilárd anyagot és a nyomásvesztésüket a szemcsEFRakciók által külön-külön okozott veszteségek összegeként határozta meg, így kezelni tudta, akár a széles szemcseméret tartományt ill. az eltérő, homogén-heterogén viselkedést is. Az időközben elvégzett újabb vizsgálatok alapján alakult ki, az azóta már rutinszerűen alkalmazott durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban modell. Eszerint csak két frakcióra érdemes bontani a szilárd anyagot: finom és durva frakcióra. A határ szemcseméretet szisztematikus vizsgálatokkal kell meghatározni adott anyagra. Az anyagból közel monodiszperz szemcsEFRakciókat kell készíteni szitálással, majd ezeket a csőviszkóziméterbe különböző koncentrációban bekeverve a nyomásvesztésük görbéket kell mérésrel meghatározni. A nyomásvesztés görbék matematikai elemzése alapján (következő fejezet) a keverékáramlási jelleg és így a határ szemcseméret meghatározható. A két legfontosabb anyagra, szénerőművi pernye-salakokra (kb. $160 \mu\text{m}$) és homokra (kb. $50 \mu\text{m}$) ezeket a vizsgálatokat elvégeztük. A modell szerint a határszemcsénél kisebb szemcsék a hordozó folyadékkal a csőáramlásban finom szuszpenziót alkotnak és ez a finom szuszpenzióáramlás – nem pedig a folyadékáramlás – fogja a durva szemcséket durva keverékáramlás formájában szállítani. A finom szuszpenzióáramlás nyomásvesztésének a számításához a finom szuszpenzió

sűrűségének, a folyási viselkedésének és az annak megfelelő reológiai paramétereknek az ismeretére van szükség, és nincs szükség a szemcsés anyag jellemzőire, mint pl. szemcseméret-eloszlás, hiszen a modell szerint ez egy egyfázisú folyadék. A durva keverékáramlás nyomásvesztésének számítására a módosított Durand egyenletet használjuk. A durva szemcsék okozta mechanikai súrlódás jelentősen függ a szemcsék süllyedési sebességétől, a durva szemcsefrakció fizikai tulajdonságait figyelembe kell venni. A durva szemcse frakció jellemzésére az x_{D80} -as (a határszemcseméretnél nagyobb durva frakció 80%-a kisebb, mint x_{D80}) szemcsét választottuk. A biztonság érdekében való tévedés érdekében választottunk nagyobb szemcsét, de csak annyira, ami még jól mérhető. A szemcsehalmozatot egy jellemző szemcsével jellemezni a számításban, természetesen jelentős egyszerűsítés. Azonban, a módosított Durand egyenletben szereplő n és K anyagi paramétereket a nagy hidraulikus körön elvégzett félüzemi mérésekkel határozzuk meg, amikor a függvényillesztést úgy végezzük el, hogy a szítással meghatározott x_{D80} alapján számítjuk ki a süllyedési végsebességet és az ellenállástényezőt (egy db x_{D80} szemcse süllyed a finom szuszpenzióban), vagyis a jellemző 80%-os szemcsére kalibráljuk a modellt. Ez a modell így sokkal egyszerűbb és pontosan kalibrálható, szemben a nagyobb szemcsék sok frakcióra való bontásával. A durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban modellel az elmúlt 20 évben elvégzett vizsgálatok közül több is empirikus bizonyítékul szolgált, továbbá a partnerünk az EGI Engineering Ltd. a modell alapján tervezett számos pernyekezelő rendszert a világ több pontján (Jacksonville – USA, Craiova 2, Isalnita, Rovinari, Turceni – Románia, Mátrai Erőmű, stb...).



10. ábra Durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban
Fig. 10. Coarse mixture flow in the fine suspension flow

A 10. ábrán a Mátrai Erőműből származó R4 nevű receptúra szerint összekevert salak-pernye-víz 33,8% térfogati szállítási koncentrációjú keverék, 75 mm-es belső átmérőjű csőben való áramlásának mért nyomásvesztés görbéje látható. A háromszöggel jelölt pontok a mért pontok. A diagramban a fizikai és reológiai anyagvizsgálatok és a modell alapján számított görbéket is ábrázoltam. Az (1) jelű görbe a tiszta víz számított nyomásvesztés görbéje az adott csőben. Az anyagvizsgálatok eredményei (finom szuszpenzió koncentrációja, sűrűsége, reológiai) alapján számítottam ki a finom szuszpenzióáramlás (2) nyomásvesztés görbéjét. Majd az empirikusan megha-

tározott n és K segítségével a durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban modellel segítségével adódott a mérésre vonatkozó elméleti nyomásvesztés görbe (3). Az empirikus bizonyítékot az jelenti, hogy nagy sebességek esetén a mért pontok nem a víz (1) görbéjéhez tartanak, hanem egy olyan görbéhez, a finom szuszpenzióáramlás görbéjéhez (2), amelyet más eszközökön elvégzett külön mérések (szítálás, piknométeres sűrűségmérés, csőviszkoziméteres reológiai mérések) eredményei alapján a modell szerint számítottam.

Hivatkozások

- [1] Bóhm J. – Debreczeni Á. – Fajtli J. – Gombkötő I. – Meggyes T.: *High-concentration hydraulic transport of tailings*. In Land Contamination and Reclamation, Vol.15 Num. 2; p. 195–217, ISSN:0967-0513, 2007.
- [2] Gombkötő I. – Fajtli L.: *Application of paste technology for tailings handling*. In Proceedings of XXIV International Mineral Processing Congress, p. 3522–3529, XXIV International Mineral Processing Congress, Beijing 2008, ISBN: 978-7-900249-54-8/TD.1, 2008.
- [3] Govier, G. W. – Aziz, K.: *The flow of complex mixtures in pipes*. Van Nostrand Reinhold, 1972.
- [4] Durand R. – Condolios E.: *Deuxième Journée de l'hydraulique*. Soc. Hyd. de France, Grenoble. 1952.
- [5] Hanks R.W.: *Low Reynolds number turbulent pipeline flow of pseudohomogeneous slurries*. Hydrotransport 5, Hannover BHRA Fluid Engineering. 1978.
- [6] Tarján I.: *A mechanikai eljárás technika alapjai*. Miskolci Egyetemi Kiadó. 2006.
- [7] Tarján I. – Debreczeni E.: *A hidraulikus szállítás és hidromechanizáció vizsgálata és bányászati alkalmazása*. (Examination of the hydraulic transport and hydromechanization and applications in mining) Doctoral Thesis Miskolc. 1989.
- [8] Tarján, I. – Fajtli, J.: *The Measurement of the Transport Concentration of Suspension Flows by Pressure Measurements on Vertical Pipes*. Mineral Economy Journal (Gospodarka Surowceni Mineralnymi) Tom 11 - Zeszyt 4, pp. 467–478. 1995.
- [9] Tarján I. – Fajtli J.: *The Distinction of the Fine Suspension Flow from the Coarse Mixture Flow by Measuring of the Pressure Loss on a Horizontal Pipe*. Mineral Economy Journal (Gospodarka Surowceni Mineralnymi) Volume 14 – Number 3, page 61–71. 1998.
- [10] Wasp, E. J. – Kenny, J. P. – Gandhi, R. L.: *Solid-liquid flow Slurry Pipeline Transportation*. Trans. Techn. Publications, Clausthal, 1977.
- [11] Gombkötő I.: *Környezetbarát meddőanyag kezelés*. Bányászati és Kohászati Lapok. 2007. 140. évfolyam 3. szám. pp. 20-25.
- [12] Fajtli J.: *Calculation Process for the Determination of Head Loss of Steady-state Solid Liquid Mixtures Flow in Horizontal Pipelines*. PhD értekezés, Miskolc, pp.1–148. 1998.
- [13] Fajtli J.: *Pressure Loss Calculation Model for Well-Graded Solid-Liquid Pipe Flows on the Basis of Systematic Pilot Plant Investigations*. Intellectual Service for Oil and Gas Industry: Analysis, Solution, Perspectives Co-Proceedings of Ufa State Petroleum Technical University and University of Ufa Miskolc, Ufa. 2000.
- [14] *Mátrai Erőműi salak – pernyék csővezeték szállításának kísérleti vizsgálata*. Műszaki szakértői tanulmányok. 1996. 1997. 1998.
- [15] *Astech pernyeminta reológiai vizsgálata*. Műszaki szakértői tanulmány. 2009.
- [16] *Török pernyeminta fizikai anyagvizsgálata*. Műszaki szakértői tanulmány. Miskolc. 2011.

Ref.: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2011.2>

Fajtli József: *Szemcsés anyagok – csővezetékben – folyadékárammal való szállításának méretezése*. 1. rész: *Kísérleti berendezések és modell*. Építőanyag, 63. évf. 1–2. szám (2011), 10–15. p.