Atti Accademia Nazionale dei Lincei

Classe Scienze Fisiche Matematiche Naturali

Rendiconti

Gennaro Volpicellie Giulio Raso

Sui regimi di flusso di letti granulari attraversati da getti continui di gas

Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. **35** (1963), n.5, p. 331–337.

Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1963_8_35_5_331_0>

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

Articolo digitalizzato nel quadro del programma bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica) SIMAI & UMI
http://www.bdim.eu/

Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali. Rendiconti, Accademia Nazionale dei Lincei, 1963.

Chimica (Principi di Ingegneria Chimica). — *Sui regimi di flusso di letti granulari attraversati da getti continui di gas* (*). Nota di GENNARO VOLPICELLI e GIULIO RASO, presentata (**) dal Corrisp. G. MALQUORI.

Un letto granulare libero di espandersi, investito dal basso da getti di gas fluenti attraverso un ugello di sezione notevolmente inferiore a quella del letto, dà luogo a sistemi solido–gas con caratteristiche che li contraddistinguono sia dai letti fissi che dai letti fluidi. Quando la velocità del gas è elevata in rapporto alle dimensioni ed alla densità dei granuli, questa operazione determina i così detti letti a getto [1, 2], di promettente applicazione in quei processi nei quali la convenienza del più frequente rinnovo degli strati granulari a contatto con le pareti del recipiente prevale sugli sfavorevoli effetti della canalizzazione e della miscelazione longitudinale del gas [3, 4].

In questa Nota sono descritti i regimi di flusso del gas e del solido nei sistemi in questione e sono analizzati i meccanismi di scambio di quantità di moto tra fluido e granuli. La sperimentazione è stata effettuata con le apparecchiature dettagliatamente descritte in altro lavoro [5], usando come solido sferette di vetro di 3,1 mm di diametro e realizzando, con colonne a sezione rettangolare e di piccolo spessore, condizioni di flusso bidimensionali, in modo da riprendere cinematograficamente i getti e le traiettorie dei granuli e da rilevare la distribuzione delle pressioni istantanee in tutto il sistema.

* * *

Al variare della velocità del getto gasoso, il letto assume configurazioni diverse e, corrispondentemente, variano, da un regime all'altro, la forma dei diagrammi delle pressioni istantanee ed i valori medi di queste, come appare in figura 1, alla quale qui di seguito si fa riferimento. È appena il caso di precisare che, modificando l'altezza del letto o lo spessore della colonna, si spostano i limiti dei campi di portata nei quali si stabiliscono i vari regimi di flusso.

A bassissime portate (0–8 Kg/hr), tutti i granuli sono fermi e in ogni punto del sistema la pressione, crescente al crescere della portata, rimane costante nel tempo per un dato valore di questa.

A basse portate (8–20 Kg/hr), alla base del letto si formano due cavità, simmetricamente disposte rispetto all'asse dell'ugello e delimitate da due corone di granuli in movimento (fig. 2). Il solido, sollevato dalla corrente

(*) Lavoro eseguito negli Istituti di Chimica Industriale e di Impianti Industriali Chimici dell'Università di Napoli.

(**) Nella seduta del 9 novembre 1963.

gasosa, ricade lateralmente, e le sue linee di flusso rassomigliano a quelle di una coppia di vortici in un mezzo continuo. Si determina pertanto un getto di solido e di gas, incapsulato nella restante parte del letto in riposo; i granuli ai bordi del getto percorrono traiettorie più brevi prima di ritornare a lato dell'ugello, costituendo le linee interne dei vortici, mentre quelli muoventisi più accostati all'asse si addensano sotto la volta delle due cavità, alimentando la fascia esterna di granuli in movimento discendente. In tutto il sistema la pressione è costante nel tempo per un dato valore della portata di alimen-

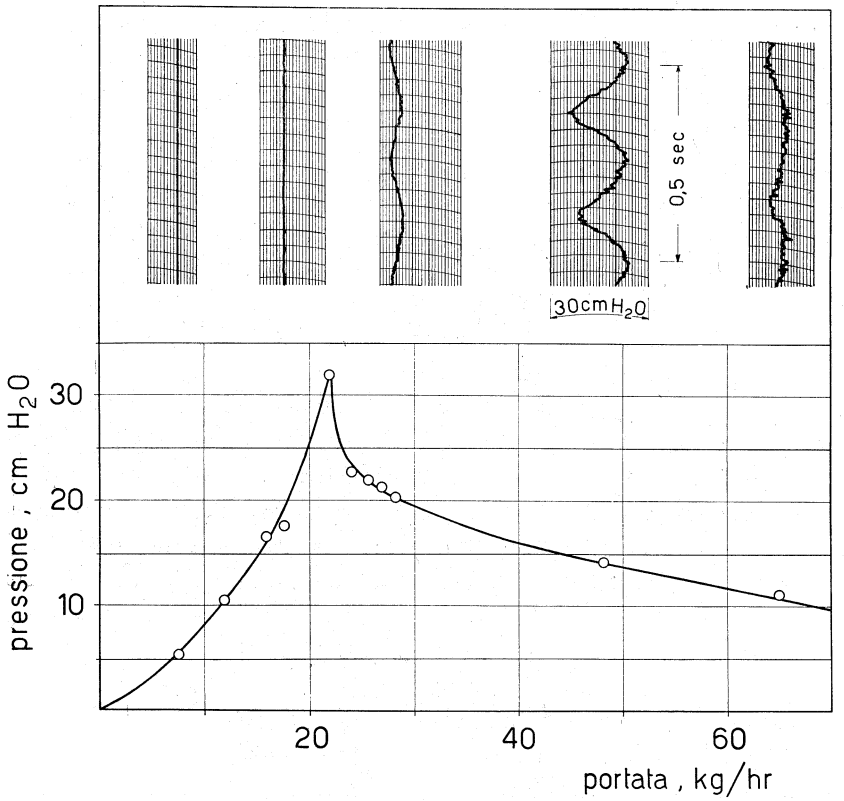


Fig. 1. – Pressioni medie e diagrammi delle pressioni istantanee, rilevate a 4 cm di distanza dalla base del letto sull'asse dell'ugello, al variare della portata della corrente gasosa.

Altezza del letto fisso = 22 cm.

tazione, ad eccezione della zona in prossimità dell'ugello, nella quale si registrano gli sbalzi dovuti alla discontinuità degli scambi energetici tra il gas ed i granuli periodicamente catturati dal getto. La pressione media alla base del letto continua a crescere all'aumentare della portata, con una legge che risente dei contrapposti effetti di due fenomeni: la estensione della superficie attraverso la quale il gas si distribuisce nella porzione del letto con solido fermo, individuabile nella volta anzidetta, e l'addensamento dei granuli al disopra di questa a seguito della resistenza opposta agli spostamenti verso l'alto dalle forze peso e di attrito.

A portate intermedie (20–50 Kg/hr), l'aumento della velocità del gas non dà luogo ad ulteriori estensioni della cavità e della zona del letto interessata al movimento vorticoso del solido ; il letto si rompe in un punto di minore resistenza e si forma una canalizzazione più o meno tortuosa, le cui anse spesso si ostruiscono di solido, cosicché, per piccole variazioni della portata del gas, la pressione alla base del letto può raggiungere il valore massimo del picco o scendere a valori considerevolmente più bassi. Questa condizione di flusso, essenzialmente instabile ed irregolare, sfocia in una periodica successione di aperture e chiusure della canalizzazione, raddrizzatasi rispetto all'asse dell'ugello; corrispondentemente, la pressione alla base del letto oscilla periodi-

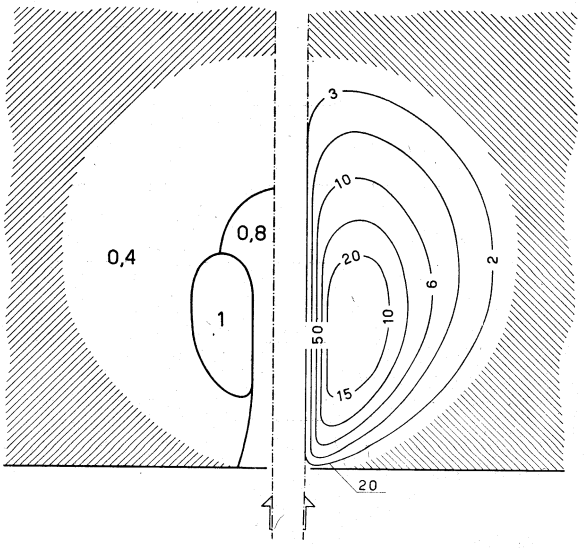


Fig. 2. – Letto con coppia di vortici: ripartizione in zone a diverso grado di vuoto dello spazio occupato dalla coppia di vortici (a sinistra), e linee di flusso e velocità dei granuli all'interno di questa (a destra).

La zona tratteggiata indica la parte del sistema con granuli fermi. I numeri indicano, rispettivamente, i gradi di vuoto e le velocità dei granuli in cm/sec.
Altezza del letto fisso = 11 cm. Portata del gas 16 Kg/hr. Altezza della coppia di vortici = 7 cm.

camente tra un massimo ed un minimo, raggiunti nell'istante in cui l'apertura sta per ripristinarsi con l'espulsione dei granuli e quando questi cominciano a bloccarla di nuovo. In questo campo di portate, riducendosi via via, al crescere della velocità di ingresso del gas, la quantità di granuli che intasa la canalizzazione, la pressione media a valle dell'ugello si riduce e l'ampiezza dell'oscillazione, raggiunto un massimo, va anch'essa smorzandosi.

Ad alte portate (50–80 Kg/hr), il getto di solido e di gas fluente nella canalizzazione si sviluppa pienamente, gli intasamenti mancano del tutto e le pressioni medie e le periodiche oscillazioni di questa nel tempo vanno ulteriormente riducendosi, mentre vanno accentuandosi gli sbalzi delle pressioni istantanee dovuti agli scambi di energia tra gas e particelle captate dal getto.

Ad altissime portate (maggiori di 80 Kg/hr), il flusso del solido diventa nuovamente instabile; accidentali disuniformità nella ricaduta dei granuli tendono ad esaltarsi rapidamente, cosicché il getto si inclina fino ad urtare le pareti laterali della colonna. Una considerevole quantità di materiale va allora a gravare sulla corrente fluida di alimentazione, con conseguente accumulo di gas, finché la pressione non raggiunge valori tali da sollevare in blocco il letto.

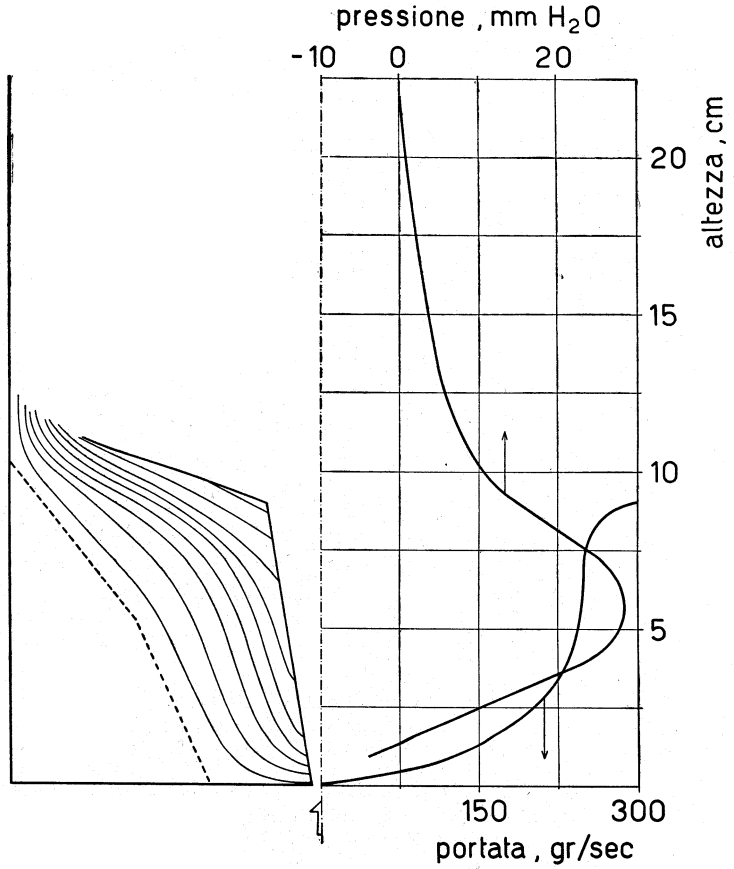


Fig. 3. – Letto a getto: linee di flusso dei granuli nella frazione con solido raddensato (a sinistra), e portata del solido e distribuzione delle pressioni lungo il getto (a destra).
Altezza del letto fisso = 11 cm. Portata del gas = 40 Kg/hr.

In fig. 3 sono riportati i dati rilevati in una prova con letto a getto. Le linee di flusso muoventi dalla sommità del letto indicano in qual modo si chiude il circuito del solido tra le frazioni diluita e raddensata del sistema. I granuli in prossimità del bordo superiore del canale sono subito ripresi dal getto e in un certo senso cortocircuitati rispetto agli altri che, cadendo lungo le pareti, prendono varie direzioni. La disuniforme alimentazione del canale che appare dall'addensamento delle linee di flusso in prossimità dell'ugello si spiega tenendo conto della depressione che ivi si determina per l'allarga-

mento della sezione di passaggio della corrente gasosa. A distanza dalla zona in depressione, lo scorrimento del solido ha luogo per azione della sola forza di gravità e si sviluppa con lo stesso andamento che caratterizza il movimento di solidi in tramogge; in prossimità dell'ugello, il solido è trascinato lateralmente dal gas che rifluisce nel getto e, mancando o riducendosi il sostegno degli strati sottostanti, vi è un generale spostamento verso il basso delle traiettorie dei granuli, che è massimo alla base del letto e va smorzandosi verso l'alto.

* * *

I regimi di moto descritti dànno luogo a condizioni di flusso del solido e del gas stabili ed instabili, queste ultime caratteristiche delle portate alle quali si passa dal flusso con coppia di vortici a quello con canalizzazioni e di quelle alle quali non è più possibile l'operazione con letto a getto. Le condizioni stabili si differenziano in quelle a regime periodico, con fluttuazioni delle velocità, delle pressioni e dei gradi di vuoto in ogni punto del sistema, ed in quelle a regime stazionario; ed a loro volta queste ultime si distinguono nei due casi in cui vi è solo movimento di gas o insieme di gas e di solido.

I regimi di flusso di più facile inquadramento teorico sono quelli stazionari, e di questi quelli con solo movimento del fluido sono riconducibili alla filtrazione del gas in un mezzo poroso omogeneo; tale può essere difatti considerato, in prima approssimazione, l'assieme degli strati di granuli costituenti l'intero letto, nel campo delle bassissime portate, o il letto a meno dello spazio occupato dalla coppia di vortici, nel campo delle basse portate. Se il moto del gas tra i granuli è laminare, e cioè se il gradiente di pressione dp/dn è proporzionale alla velocità del gas u_n lungo la generica direzione di flusso n:

$$\frac{dp}{dn} = \mathrm{K} u_n \tag{1}$$

la distribuzione delle pressioni e delle velocità nel sistema è calcolabile integrando il sistema di equazioni differenziali formato dalla (1) e dalla equazione di Laplace del potenziale di flusso $\varnothing = p/\mathrm{K}$:

$$\nabla^2 \varnothing = \nabla^2 p = 0 \tag{2}$$

quando sia stato delimitato con linee di flusso ed equipotenziali il campo di integrazione ed assegnate le pressioni in corrispondenza di due isobare o la pressione di un'isobara e la portata di gas che la attraversa [5].

Gli integrali esatti del sistema di equazioni (1) e (2) forniti dalla letteratura [6] sono applicabili nel campo delle bassissime portate, quando il solido è fermo in tutto il letto, se il sistema è tanto esteso che le linee equipotenziali diventino parallele all'interno di esso. Nel caso più complesso dei letti con coppia di vortici il problema può comunque essere risolto con una integrazione approssimata del sistema in questione, ad esempio col metodo di rilassamento, assumendo come una delle isobare la linea che racchiude la zona del sistema

con granuli in movimento [5]. Con questi procedimenti sono state calcolate le distribuzioni delle pressioni in letti fissi, con e senza coppie di vortici, il cui scarto dai valori sperimentali non supera il 10 %.

L'inquadramento dell'altra condizione di flusso stazionario, quella con getto pienamente sviluppato, implicherebbe lo studio simultaneo del moto del gas e del solido nel canale e nella frazione raddensata del sistema, per la interazione tra questa ed il getto. L'indagine è resa complicata dalla mancanza di informazioni sulle resistenze di attrito nella frazione raddensata fra strati di granuli fluenti a diverse velocità, oltre che dalle interferenze tra caduta del solido per gravità e trasporto per trascinamento. È tuttavia possibile restringere l'analisi al solo getto quando siano sperimentalmente accertabili o ipotizzabili la ripartizione geometrica del sistema nelle due frazioni e gli scambi di materia e di energia tra queste. In tal caso il problema si riduce a quello del moto di un mezzo discontinuo formato da gas che trascini particelle solide in un tubo verticale a sezione variabile con contorno permeabile ad entrambe le fasi.

Questo tipo di flusso è rappresentabile a mezzo delle equazioni:

$$\frac{d\,[E_g\,(u_g\,,\,p)\,G_g]}{dh} + \frac{d\,[E_s\,(u_s\,,\,h)\,G_s]}{dh} = Q \tag{3}$$

$$F = \frac{u_s\,d\,(m\,u_s)}{dh} \tag{4}$$

$$G_g = u_g\,A\,\varepsilon\rho_g \tag{5}$$

$$G_s = u_s\,A\,(1 - \varepsilon)\,\rho_s \tag{6}$$

nelle quali: $E_g\,(u_g\,,\,p)$ è l'energia cinetica e di pressione della massa unitaria di gas, $E_s\,(u_s\,,\,h)$ l'energia cinetica e di posizione della massa unitaria di solido, Q la velocità di dissipazione o di sviluppo di energia per unità di altezza del tubo, F la risultante della forza peso corretta della spinta statica $\frac{\pi D^3}{6}(\rho_s - \rho_g)g$ e della spinta dinamica $\frac{\pi D^2}{4} C_D\,(u_g - u_s)^2\,\rho_g$ esercitata dal fluido sul granulo di massa m; G_g e G_s, u_g e u_s, ρ_g e ρ_s sono, rispettivamente, le portate, le velocità e le densità del gas e del solido, A è la sezione del canale ed ε il grado di vuoto alla distanza h dall'ugello.

L'unica limitazione posta dalle equazioni (3–6) è nella monodirezionalità del moto che, peraltro, appare verosimile in considerazione della limitata divergenza del tubo. Questa ipotesi implica però che ad ogni livello abbiano luogo numerosi urti che uniformizzino la velocità del solido fluente nel tubo e di quello in arrivo lateralmente. Va pure precisato che in Q sono conglobabili sia eventuali apporti di energia delle portate laterali di solido e di gas, sia le perdite per l'anelasticità degli urti tra i granuli e per gli attriti che si destano alle pareti del canale; ed a questo proposito va rilevato la particolarità del sistema in esame, nel quale vi è una continua asportazione degli strati di solido sui quali le forze di attrito si generano. Infine, nel coefficiente di trascinamento C_D si possono includere le correzioni per tener conto dell'effetto

dell'addensamento [7] e di quello delle accelerazioni e delle decelerazioni dei granuli [8].

Il sistema di equazioni (3–6) è stato integrato per differenze finite tenendo conto degli andamenti delle sezioni del tubo e delle portate di alimentazione laterale di solido al variare della distanza dall'ugello. Per quanto riguarda l'alimentazione del gas si sono considerati i due casi limiti del canale a pareti impermeabili e del richiamo del gas che si avrebbe se il getto effluente dall'ugello si immettesse in atmosfera libera [9], e non vi fosse resistenza al trasferimento del fluido contenuto nella frazione raddensata del sistema. Benché le calcolazioni effettuate riguardino un limitato numero di condizioni di lavoro, è emerso un buon accordo tra i valori delle velocità dei granuli e dei gradi di vuoto nel tubo calcolati e quelli direttamente rilevati, con scarti non superiori al 20 %. Meno soddisfacente è il confronto tra le pressioni in quanto il calcolo di queste a mezzo della (6) risente delle imprecisioni insite nella valutazione del termine Q, e maggiore è il peso degli errori nella determinazione delle sezioni del tubo. È apparso comunque che il moto del mezzo discontinuo costituente il getto può ben essere inquadrato dalle equazioni (3–6) che esprimono il trasporto pneumatico di solido in condotti verticali, con la complicazione della variabilità della sezione e della permeabilità delle pareti. Va anzi rilevato che, quando le condizioni di moto dei granuli in tutto il sistema sono tali da determinare degli eccessivi afflussi di solido nel canale si verifica nei letti a getto l'inconveniente dell'ingolfamento del condotto caratteristico di trasporti pneumatici con eccessiva alimentazione di solido, e i periodici cambiamenti del regime di moto del solido: dal flusso in sospensione raddensata al flusso in sospensione diluita, che si verificano in queste operazioni [10], corrispondono alle fluttuazioni rilevate nelle pressioni e negli addensamenti dei granuli alla sommità del letto nel campo delle portate intermedie.

BIBLIOGRAFIA.

[1] K. B. MATHUR e P. E. GISHLER, «A. I. Ch. E. Journal», *1*, 159 (1955).
[2] H. A. BECKER, «Chem. Eng. Sc.», *13*, 245 (1961).
[3] K. B. MATHUR e P. E. GISHLER, «J. Appl. Chem.», *5*, 624 (1955).
[4] H. A. BECKER e H. R. SALLANS, «Chem. Eng. Sc.», *13*, 97 (1961).
[5] G. VOLPICELLI, G. RASO e L. SACCONE, «La Chimica e l'Industria», *45*, 1362 (1963).
[6] H. R. VALLENTINE, *Applied Hydrodynamics*, pp. 183–196, Butterworths, London 1959.
[7] P. N. ROWE e G. A. HENWOOD, «Trans. Instn Chem. Engrs», *39*, 43 (1961).
[8] C. T. CROWE, J. A. NICHOLLS e R. B. MORRISON, 9th Symposium on Combustion, New York, August 27 to September 1, 1962.
[9] J. F. TAYLOR, H. L. GRIMMETT e E. W. COMINGS, «Chem. Eng. Prog.», *47*, 175 (1951).
[10] W. K. LEWIS, E. R. GILLILAND e W. C. BAUER, «Ind. Eng. Chem.», *41*, 1104 (1949).