
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI

RENDICONTI

GIANNI ASTARITA, GIUSEPPE MARRUCCI

Attrito alla parete e miscelazione assiale del liquido nel flusso bifasico gas-liquido

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 37 (1964), n.5, p. 281–288.*

Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1964_8_37_5_281_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/>

Chimica (Principi di Ingegneria Chimica). — *Attrito alla parete e miscelazione assiale del liquido nel flusso bifasico gas-liquido*. Nota di GIANNI ASTARITA e GIUSEPPE MARRUCCI, presentata (*) dal Corrisp. G. MALQUORI.

INTRODUZIONE E TEORIA.

Si consideri un condotto verticale a sezione costante, attraversato, in flusso equicorrente ascendente, da una gas e da un liquido. Per semplicità si supponga di poter ritenere la densità del gas costante nonostante la variazione di pressione assoluta che si verifica lungo l'asse del condotto. Per il sistema descritto, il bilancio della quantità di moto può scriversi:

$$(1) \quad \frac{\tau S}{A} = \Delta p - \rho_L gZ (1 - \varepsilon).$$

Definizione e unità di misura dei simboli adottati sono riportate in nomenclatura.

Nella equazione (1), il valore medio dello sforzo d'attrito alla parete solida, τ , è stato definito come positivo se agente sul sistema bifasico in direzione opposta a quella del moto.

Allorché la portata volumetrica di gas G è relativamente modesta, ambo i termini al secondo membro della (1) sono molto maggiori del termine a primo membro: in altre parole, la differenza di pressione tra i due estremi del condotto è quasi esclusivamente dovuta al carico idrostatico esercitato dal liquido. In tali condizioni, lo studio del flusso bifasico risulta grandemente semplificato, come messo in rilievo in alcuni precedenti lavori sull'argomento [1, 2].

Lo scopo di questo lavoro è stato di determinare la gamma di condizioni operative per le quali può ammettersi valida la suddetta semplificazione. La condizione che deve verificarsi può scriversi nella forma:

$$(2) \quad \left| \frac{\tau S}{A} \right| \ll \rho_L gZ (1 - \varepsilon)$$

che, relativamente ad un tubo circolare, diviene:

$$(3) \quad |K| = \left| \frac{4\tau}{\rho_L gD} \right| \ll 1 - \varepsilon.$$

Poiché il valore di ε è, per basse portate di gas, relativamente modesto (non maggiore di 0,6), la (3) può ritenersi sufficientemente soddisfatta allorché $|K| < 0,05$. È bene porre in rilievo che la condizione va espressa relativamente

(*) Nella seduta del 14 novembre 1964.

al valore assoluto di K , in quanto tale parametro può in linea di principio assumere valori negativi, e di fatto valori negativi di τ sono stati determinati sperimentalmente.

L'esistenza di un valore negativo di τ può spiegarsi soltanto ammettendo che, nelle adiacenze della parete solida, il moto del liquido abbia direzione opposta a quella del flusso medio. Ciò può verificarsi se il gas induce nel liquido stesso un moto di circolazione (in salita lungo l'asse del tubo, in discesa alla periferia) che si sovrappone al moto principale. L'esistenza di tale moto di circolazione provoca un fenomeno di miscelazione assiale del liquido stesso, fenomeno che è stato oggetto della seconda parte dell'indagine sperimentale di cui qui si riferisce.

L'ampiezza dei dati raccolti non ne consente l'esposizione sistematica e completa, per cui in questa Nota vengono forniti solo alcuni diagrammi riassuntivi. I dati originali sono riportati in alcune tesi di laurea completate presso questo Istituto [3, 4, 5].

ATTRITO ALLA PARETE.

Sono stati determinati, per una vasta gamma di condizioni operative, i valori di K , mediante la misura contemporanea ed indipendente della caduta di pressione e del grado di vuoto ε .

Il campo dei valori delle variabili operative investigato sperimentalmente è riportato in Tabella I.

TABELLA I.

Campo di condizioni operative investigato.

Sistema: aria-acqua.

$Z = 515$ cm

$D = 1,6; 2,1; 2,8; 4,2$ cm

G/A : da 2,5 a 400 cm/sec

L/A da 0 a 70 cm/sec

pressione: 1 atmosfera allo sbocco

temperatura: 20° C.

L'apparecchiatura sperimentale utilizzata è stata succintamente descritta in un lavoro precedente [2], e dettagliatamente nella tesi di laurea [3]. I dati originali sono riportati in [3]; le elaborazioni necessarie alla valutazione del valore di K sono riportati in [4].

Nelle figg. 1, 2, 3 e 4 sono riportate le curve, interpolate tra i dati sperimentali, che forniscono K in funzione della velocità nominale del gas, G/A , per vari valori della velocità nominale del liquido L/A .

Dall'esame di tali figure possono rilevarsi le seguenti conclusioni:

1° nel caso del tubo da 4,2 cm, può rilevarsi una discontinuità della curva. Tale discontinuità corrisponde alla brusca transizione dalle condizioni di moto a bolle alle condizioni di moto a tempone, discontinuità rilevata sia visivamente che dai diagrammi di correlazione del grado di vuoto [3];

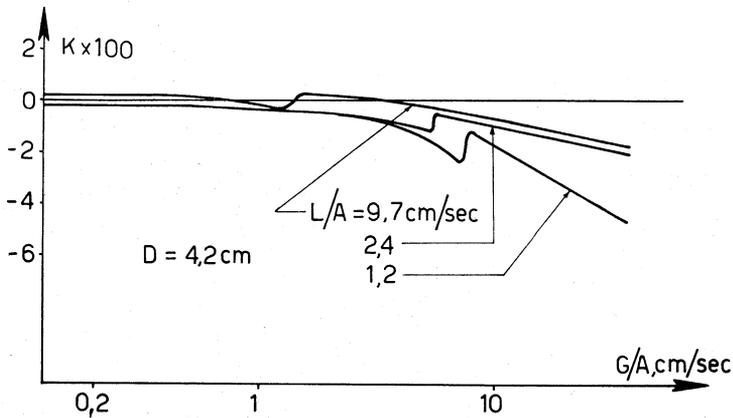


Fig. 1.

2° l'andamento delle varie curve mostra che, a parità di portata di liquido, il valore di K dapprima decresce al crescere della portata di gas, assumendo spesso valori negativi; passa poi per un minimo e quindi cresce nuovamente. Ciò sta ad indicare che, per basse portate di gas, l'effetto prepon-

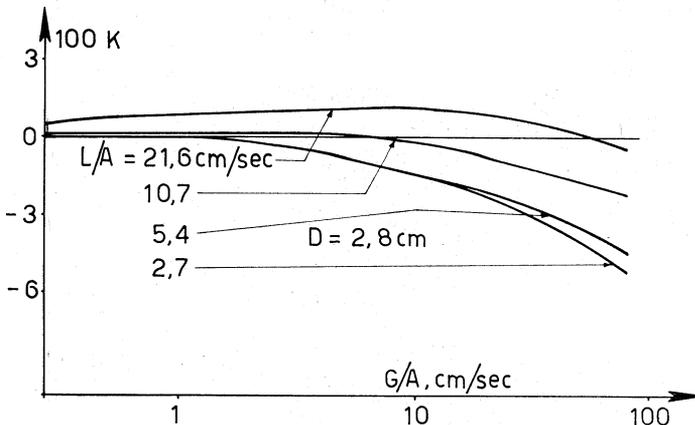


Fig. 2.

derante di un aumento di G/A è di incrementare la circolazione interna del liquido, sì da indurre, nelle vicinanze della parete solida, un moto in discesa che prevale sul moto globale (mediamente in ascesa). Allorché la portata del gas viene ulteriormente incrementata, l'effetto della aumentata velocità media del sistema bisafico prevale, e i valori di K tendono a crescere;

3° al crescere della portata di liquido, il valore di K cresce sempre. Ciò è fisicamente evidente, in quanto l'aumento della portata di liquido ha solo l'effetto di aumentare la velocità media del sistema bifasico, ma non può provocare un aumento della circolazione interna, chè anzi ne provoca presumibilmente una diminuzione;

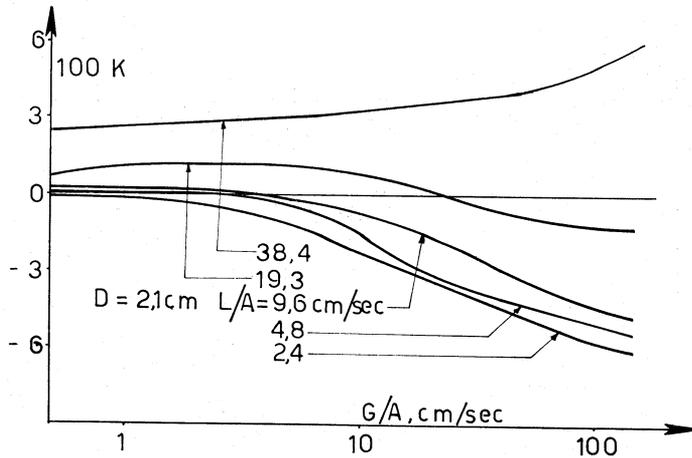


Fig. 3.

4° nel campo di condizioni operative in cui si hanno valori positivi di K , questi crescono al decrescere del diametro del tubo: ciò è fisicamente evidente;

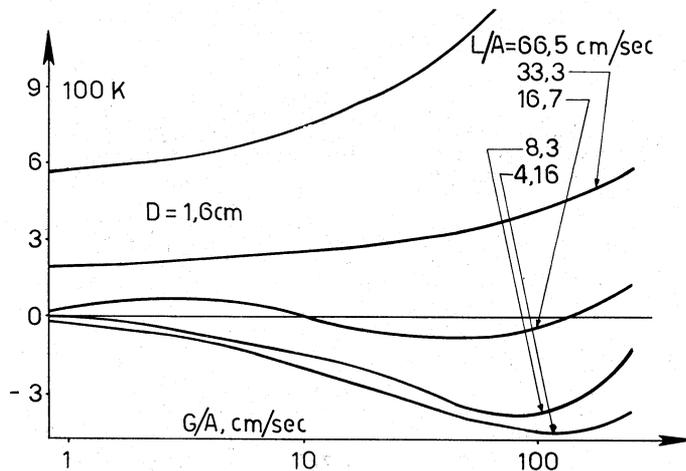


Fig. 4.

5° in tutto il campo di condizioni operative investigate, il valore di K è minore di 0,06, con l'unica eccezione della curva relativa al tubo da 1,6 cm di diametro, ed alla velocità nominale di liquido di 67 cm/sec, la quale, per velocità nominali del gas superiori a 2 cm/sec, fornisce valori di K superiori

a 0,06. Peraltro, tale curva si riferisce a condizioni estreme, specie per quanto concerne la velocità nominale del liquido. Poiché i valori di $1 - \epsilon$ misurati non erano mai inferiori a 0,3, può concludersi che, nel campo di condizioni operative corrispondenti ai regimi di moto a bolle e a tampone, la disequazione (3) è sufficientemente ben verificata.

Va al riguardo posto in rilievo che, anche quando nella equazione (1) può trascurarsi il termine $\tau S/A$, vale a dire quando la caduta di pressione è quasi integralmente dovuta al carico idrostatico esercitato dal liquido, non deve perciò desumersi che la presenza della parete solida non abbia alcun effetto sulle condizioni del flusso bifasico, in quanto essa può ancora influenzare la distribuzione di velocità in modo da determinare il valore di ϵ : ciò è confermato dal fatto che il valore di ϵ risulta, a parità di L/A e di G/A , dipendente dal diametro del tubo. Allorché la condizione (3) è verificata, le equazioni di bilancio della quantità di moto e di bilancio dell'energia risultano notevolmente semplificate, ma nella loro espressione compare ancora il grado di vuoto ϵ , il cui valore non è indipendente dalla geometria del condotto.

CIRCOLAZIONE INTERNA DEL LIQUIDO.

L'entità dei moti di circolazione interna del liquido è stata studiata mediante la determinazione della distribuzione dei tempi di permanenza del liquido stesso. Poiché il fenomeno della discontinuità nella curva di K , rilevabile dalla fig. 1, si riscontra soltanto per valori elevati dal diametro del tubo, e considerando che tali valori sono quelli di maggiore interesse pratico, le misure in questione sono state effettuate su di un tubo di 5,3 cm di diametro interno. La distribuzione dei tempi di permanenza è stata misurata rilevando la risposta, all'uscita del tubo, ad un disturbo a gradino indotto nell'alimentazione. Il disturbo stesso consisteva nella istantanea interruzione del flusso di una portata ausiliaria (trascurabile rispetto ad L) di un colorante immesso nel tubo all'altezza della piastra distributrice del gas. La concentrazione di colorante nel liquido effluente veniva rilevata mediante la misura della intensità luminosa di un fascio di raggi paralleli che attraversava la vena liquida effluente. L'intensità luminosa, rilevata da una cellula fotosensibile, veniva registrata in continuo da un potenziometro di tipo Sargent. La curva concentrazione-intensità luminosa, che è risultata pressoché lineare, è stata determinata con prove preventive di taratura. Le misure della portata di liquido e del grado di vuoto, effettuate contemporaneamente ed indipendentemente, permettevano la valutazione del tempo di permanenza medio del liquido. Una dettagliata descrizione della tecnica sperimentale e di misura, nonché i dati originali, sono riportati in [5]. Il campo di variabili operative investigato è riportato in Tabella II.

È ben noto che una apparecchiatura reale può spesso essere assimilata, nella analisi della distribuzione dei tempi di permanenza, a una successione di n miscelatori ideali in serie [6, 7, 8]. Il valore di n può essere ricavato dal

confronto tra la curva sperimentalmente determinata con una serie di curve, calcolate teoricamente, e relative ai vari valori di n . Il valore così ricavato è un indice dell'entità della circolazione interna: infatti, i due casi-limite di flusso a pistone e di miscelatore ideale sono identificati rispettivamente dai valori $n = \infty$ ed $n = 1$; più alto è il valore di n , più modesta è la circolazione interna del liquido.

TABELLA II.

Condizioni operative nelle misure delle distribuzioni di tempi di permanenza.

Sistema: aria-acqua

$Z = 187$ cm

$D = 5,3$ cm

G : da 16 a 530 cm^3/sec

L : da 2,5 a 130 cm^3/sec

pressione: 1 atmosfera allo sbocco

temperatura: 20° C

Nella fig. 5 sono riportati, per due valori della portata di liquido, i valori di n in funzione della portata di gas. I valori di n non interi si riferiscono a condizioni per le quali la curva sperimentalmente era intermedia fra due curve teoriche. Evidentemente, la equivalenza con una serie di n miscelatori ideali non va intesa in senso stretto.

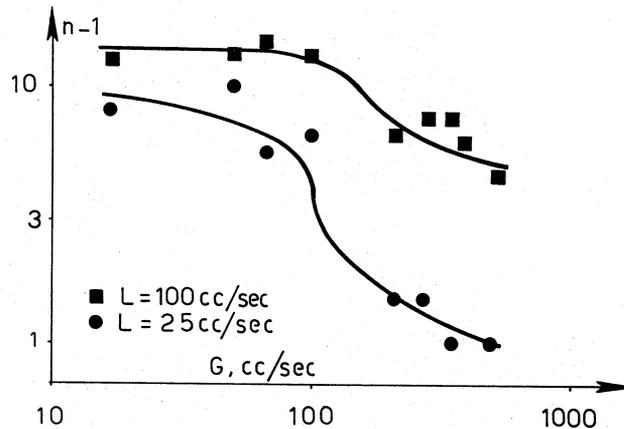


Fig. 5.

Per evitare questo controsenso, peraltro solo formale, si potrebbe usare, per caratterizzare la miscelazione, il numero di Bodenstein, invece del valore di n . Il numero di Bodenstein andrebbe definito come:

$$(4) \quad \text{Bo} = \frac{L}{A(1-\epsilon)} \frac{Z}{D_a}$$

dove D_a è la diffusività assiale equivalente. Per n intero maggiore di 10, vale comunque la relazione $\text{Bo} = 2n$ (9).

Dall'esame della fig. 5 possono desumersi le seguenti conclusioni:

1° la discontinuità nella curva di K in funzione di G/A si riflette in una analoga discontinuità della curva di n in funzione di G : ciò sta ad indicare la attendibilità della interpretazione dei valori di K sulla base dei fenomeni di circolazione interna del liquido;

2° l'entità della circolazione interna è piuttosto notevole (bassi valori di n), e va crescendo al crescere della portata di gas (valori di n decrescenti). Allorché dal regime di moto a bolle si passa al regime di moto a tampone, la circolazione interna del liquido aumenta bruscamente.

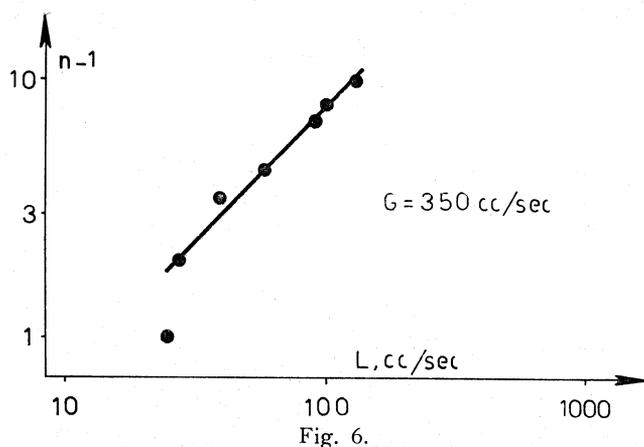


Fig. 6.

Infine, nella fig. 6 è riportato l'andamento dei valori di n al variare della portata di liquido. Da tale figura risulta chiaramente l'effetto di diminuzione della circolazione interna che si riscontra allorché la portata di liquido viene incrementata.

CONCLUSIONI.

L'andamento dei valori di K , riportato nelle figg. da 1 a 4, dimostra che la circolazione interna del liquido è sufficientemente intensa da far sì che la direzione del moto nelle adiacenze della parete solida possa essere contraria alla direzione del moto globale; ciò è confermato dall'analisi diretta del fenomeno di circolazione interna.

Nel campo delle condizioni operative per cui si realizzano i regimi di moto a bolle e a tampone, la caduta di pressione è dovuta essenzialmente al carico idrostatico esercitato dal liquido, per cui possono adottarsi, nell'analisi di problemi di flusso bifasico, le forme semplificate delle equazioni di bilancio della quantità di moto e dell'energia. Ciò non implica, peraltro, che il grado di vuoto sia indipendente dalla geometria del condotto.

Ringraziamento. — Ci è gradito ringraziare l'ing. Luigi Nicodemo per l'assistenza prestata nella rilevazione e correlazione dei dati sperimentali. Ringraziamo altresì gli allievi interni sigg. Ambrosio, Cirocco, Gargiulo, Novello e Russo per la loro collaborazione.

NOMENCLATURA

M: massa; L: lunghezza; T: tempo

| | | |
|--------------|--|------------------|
| A, | sezione trasversa del condotto | L^2 |
| D, | diametro del condotto, | L |
| D_a , | diffusività assiale equivalente | $L^2 T^{-1}$ |
| g , | accelerazione di gravità | $L T^{-2}$ |
| G, | portata di gas | $L^3 T^{-1}$ |
| K, | vedi equazione (3), | — |
| L, | portata di liquido | $L^3 T^{-1}$ |
| n , | numero di miscelatori ideali in serie che forniscono la stessa distribuzione di tempi di permanenza, | — |
| Δp , | caduta di pressione, | $ML^{-1} T^{-2}$ |
| S, | superficie della parete, = πDZ | L^2 |
| Z, | lunghezza del condotto, | L |
| Bo, | numero di Bodenstein, | — |
| ϵ , | grado di vuoto, | — |
| ρ_L , | densità di liquido | ML^{-3} |
| τ , | sforzo d'attrito alla parete, | $ML^{-1} T^{-2}$ |

BIBLIOGRAFIA.

- [1] G. MARRUCCI, F. GIOIA, «Chim. Ind.», 5, 1205 (1963).
- [2] G. ASTARITA, G. MARRUCCI, L. NICODEMO, «Chim. Ind.», in stampa.
- [3] F. AMBROSIO, L. NICODEMO, Tesi in Ingegneria Chimica, Napoli 1964.
- [4] G. RUSSO, A. CIROCCO, Dati di laboratorio, Ist. Chim. Ind., Napoli 1964.
- [5] A. NOVELLO, G. GARGIULO, Dati di laboratorio, Ist. Chim. Ind., Napoli 1964.
- [6] P. NAOR, R. SHINAR, «Ind. Eng. Chem. Fund.», 2, 78 (1963).
- [7] D. WOLF, W. RESNICK, «Ind. Eng. Chem. Fund.», 2, 287 (1963).
- [8] N. VAN LOCKEREN CAMPAGNE, III Europ. Symp. Chem. React. Eng., Amsterdam 1964.
- [9] H. KRAMERS, K. R. WESTERTERP, *Elements of Chemical Reactor Design and Operation*, Amsterdam 1963.