

MÉTHODE ITÉRATIVE POUR DÉTERMINER LE POINT DE FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES DE TRANSPORT PNEUMATIQUE A ASPIRATION

Par

G. BOGNÁR et A. VERBA

Chaire de Mécanique Chimique, Université Polytechnique de Budapest

Reçu le 15 février 1982

1. Introduction

Au cours de planification des systèmes de transport pneumatique, on trouve souvent le problème: de préciser les paramètres les plus importants du transport. Ce sont le débit massique \dot{m}_a , la vitesse d'air au début du tube v_{III} , la différence de pression d'air Δp_{IV} . Malgré les difficultés nous connaissons plusieurs méthodes pour calculer la répartition de pression demandée des différentes parties du système pneumatique, mais il nous paraît que jusqu'ici manque une méthode générale qui range les résultats existents. Ainsi jusqu'à nos jours on n'a pas pu déterminer de façon précise les données les plus importantes, sauf à l'utilisation d'un alimenteur cellulaire, qui est un appareil volumétrique.

2. La construction des systèmes de transport pneumatique à aspiration

En général la construction de ces appareils est semblable à la Fig. 1. Les différentes parties d'un système peuvent être rangées en quatre sous-systèmes:

I. Le système primaire

C'est un tuyau avec restriction à partir du commencement du tuyau jusqu'au début du tuyau de transport. (Figure 1., la partie entre les points 4 et 1)

II. Le système secondaire

C'est un réservoir d'alimentation. (Figure 1., la partie entre les points 5 et 1)

III. Le système tertiaire

C'est le tuyau de transport y compris le séparateur et le réservoir placé au bout du tube. (Figure 1., la partie entre les points 1 et 2)

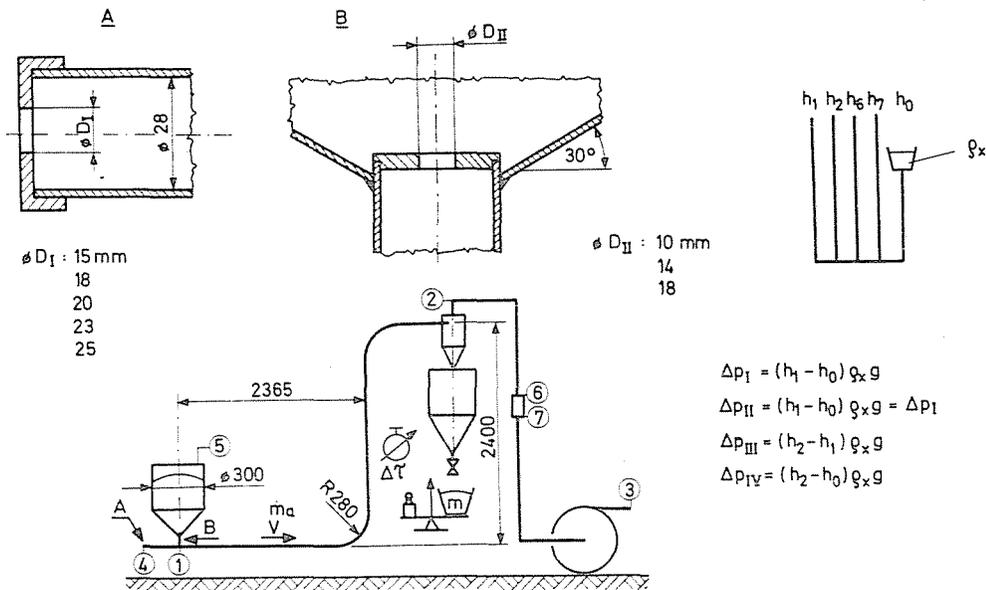


Fig. 1. Installation d'essai

IV. Le système quaternaire

C'est le ventilateur avec son tuyau. (Figure 1., la partie entre les points 2 et 3)

La connection entre les différents systèmes est présentée sur la Fig. 2. On voit bien que les deux premiers systèmes sont connectés en parallèle et les autres en série. Si on considère le ventilateur et le tuyau de transport être un seul sous-système, alors le point commun des trois systèmes est le début du tuyau de transport. Quelques données de notre installation d'essai sont présentées sur la Fig. 1.

3. Les courbes caractéristiques des différentes parties

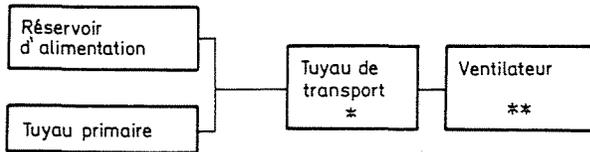
Il faut mentionner que la masse volumétrique a été considérée comme constante et égale à celle de l'environnement.

3.1 Caractéristique du tuyau primaire

La caractéristique du tuyau primaire est une caractéristique normale du tuyau « vide » (c'est à dire qu'il ne transporte que de l'air), qui s'exprime selon l'équation (1).

$$\Delta p_1 = \frac{\rho_0}{2} \frac{l_{eq}}{D} \lambda v^2 \quad (1)$$

La Fig. 3. présente ce courbe caractéristique.



* Y compris le séparateur ...

** Y compris le tuyau du ventilateur ...

Fig. 2. Diagramme de blocs d'un système de transport pneumatique à aspiration

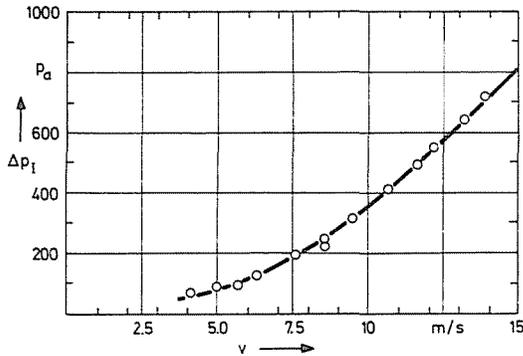


Fig. 3. Courbe caractéristique du système primaire

3.2 Caractéristique du réservoir d'alimentation

Dans ce cas les deux données fondamentales sont la différence de pression agissant sur la masse à l'intérieur du réservoir Δp_{II} , et le débit massique \dot{m}_a . Équation (2) donne la relation entre les deux:

$$\left(\frac{\dot{m}_a}{D_{II}^{2,5}} \right)^2 = A + B \frac{\Delta p_{II}}{D_{II}} \quad (2)$$

Les valeurs des constants pour le matériel DIATOMA

$$A = 1,67 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{kg/s}}{\text{m}^{2,5}} \right]^2$$

$$B = 116 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

La Fig. 4. présente cette caractéristique.

Si la résistance du système secondaire est assez élevée, on peut négliger le débit d'air secondaire. Dans ce cas $v_I = v_{III} = v_{IV}$. Lors de nos mesures le débit d'air secondaire n'a jamais dépassé le 2% de celui du primaire. Pour calculer cette caractéristique on peut trouver des données plus détaillées dans les références [2], [4], [5].

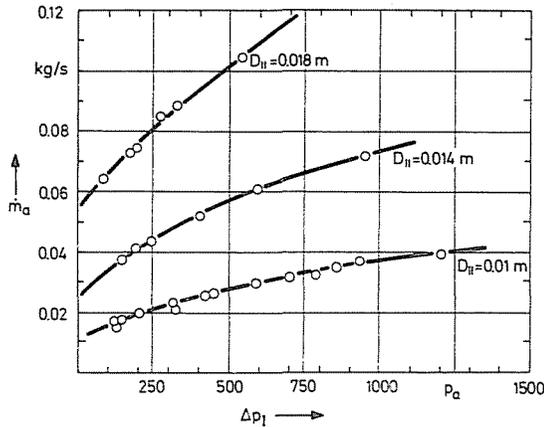


Fig. 4. Caractéristique du système secondaire

3.3 La caractéristique du tuyau de transport et ses accessoires

Les méthodes pour exprimer la perte de charge dans le tube de transport sont connues. En Hongrie la méthode la plus répandue est celle de M. Pápai [1], mais il y a d'autres méthodes bien connues aussi. [5], [6]. Selon M. Pápai la perte de charge d'un tuyau de transport se divise en deux parties

$$\Delta p_{III} = \Delta p_{IIIv} + \Delta p_{III s} \quad (3)$$

où Δp_{III} est la perte «vide». Nous calculons cette dernière selon la formule suivante:

$$\Delta p_{IIIv} = \frac{\rho_0 l_{IIIeq}}{2} \lambda v^2 \quad (4)$$

Le calcul de la perte supplémentaire $\Delta p_{III s}$ prend en considération les pertes de charge des différentes parties du tuyau de transport

$$\Delta p_{III s} = \Delta p_{Ac} + \Delta p_H + \Delta p_V + \Delta p_{CD} \quad (5)$$

La perte de charge qui se produit à cause de l'accélération de la matière est:

$$\Delta p_{AC} = k_{AC} \frac{\dot{m}_a v_{aH}}{F} \quad (6)$$

La différence de pression de transport horizontal est:

$$\Delta p_H = \frac{\dot{m}_a l_H}{F} \left[k_{CL} \frac{v_{aH}}{D} + (k_p + k_{FR})_H \frac{g}{v_{aH}} \right] \quad (7)$$

La vitesse de la matière passant dans un tube horizontal est:

$$v_{aH} = \frac{v - w \sqrt{(k_p + k_{FR})_H \left[1 + \frac{k_{CL}}{gD} \left(\frac{v^2}{k_p + k_{FR}_v} - w^2 \right) \right]}}{1 - k_{CLH} \frac{w^2}{gD}} \quad (8)$$

Il faut déterminer la perte de charge de transport vertical conformément aux équations (7) et (8). Mais il faut noter que $(k_p + k_{FR})_V \approx 1$.

La perte de charge supplémentaire d'un coude est:

$$\Delta p_{CD} = \frac{l_{CD} \dot{m}_a}{DF} \cdot v_{aH} \cdot K_{CD} \quad (9)$$

La perte de charge d'un cyclone avec matière est plus faible que celle sans matière. Ainsi nous ne présentons pas ici une équation particulière pour la calculer, mais nous mettons cette perte sur le compte de la longueur équivalente du tuyau.

Alors pour pouvoir déterminer la caractéristique du tuyau selon M. Pápai [1], il est nécessaire de connaître les paramètres k_{AC} , k_{CLH} , $(k_p + k_{FR})_H$, k_{CLV} et la vitesse de chute du granule w , pour prendre en considération les propriétés de la matière. On peut trouver les paramètres ci-dessus des quelques matériaux dans l'étude de M. Pápai [1].

L'application de la méthode Barth demande l'emploi des équations décrites par M. Weber [5]. La perte de charge du tuyau horizontal:

$$\Delta p_H = \beta \mu \rho \frac{v}{v_{aH}} g l_H + \mu \lambda_z^* \frac{\rho}{2} v \cdot v_{aH} \frac{l_H}{D} \quad (10)$$

La vitesse permanente des particules dans le tuyau horizontal se forme selon l'équivalence:

$$\frac{3c_w}{4d} \rho(v - v_{aH}) |v - v_{aH}| = \rho_a \lambda_z^* \frac{v_{aH}^2}{2D} + \mu \rho \frac{v}{v_{aH}} g\beta \quad (11)$$

La perte de charge supplémentaire du tuyau vertical:

$$\Delta p_v = \mu \rho \frac{v}{v_{av}} g l_v + \mu \lambda_z^* \frac{\rho}{2} v \cdot v_{av} \frac{l_v}{D} \quad (12)$$

La vitesse permanente des particules dans le tuyau vertical se forme selon l'équation:

$$\frac{3c_w}{4d} \rho(v - v_{av}) |v - v_{av}| = \rho_a \left(g + \lambda_z^* \frac{v_{av}^2}{2D} \right) \quad (13)$$

On peut trouver la valeur de λ_z^* dans le livre de M. Weber [5], pour quelques matériaux. Dans l'étude de M. Stegmayer [6], il y a une équation pour déterminer la perte de charge. Pour faire des calculs avec cette équation, il suffit de connaître ρ , w , d , μ , les données géométriques du tuyau.

Quelque soit la méthode, nous pouvons déterminer la perte de charge supplémentaire en fonction de la vitesse d'air. Sur la base des équations (3) . . . (13) la fonction

$$\frac{\Delta p_{\text{MS}}}{\dot{m}_a} = f(v) \quad (14)$$

est déjà donnée pour le système complet.

Pour le système présenté sur la Fig. 1. la fonction (14) a été déterminé par moyen expérimental. La Fig. 6. présente les résultats de ces mesures.

Nous pouvons tirer la perte de charge supplémentaire pour le système à l'aide de l'équation (15) et de la fonction présentée dans Fig. 6.:

$$\Delta p_{\text{MS}} = \left(\frac{\Delta p_{\text{MS}}}{\dot{m}_a} \right) \dot{m}_a \quad (15)$$

La caractéristique « vide » du tuyau peut être calculée à l'aide de l'équation (4). Cette caractéristique pour notre système est présentée sur la Fig. 5.

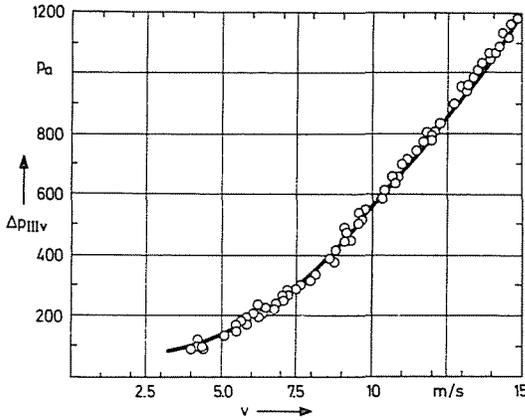


Fig. 5. Caractéristique du système tertiaire

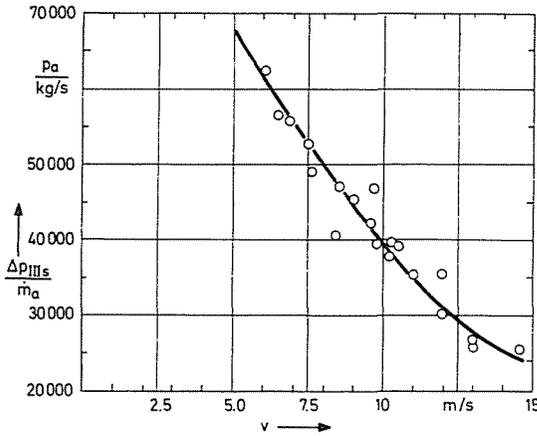


Fig. 6. Perte de charge supplémentaire du système tertiaire

3.4 La caractéristique du ventilateur

La courbe caractéristique d'aspiration du ventilateur doit être diminuée par la perte de charge « vide » du tuyau (dont la valeur on peut calculer de la même façon que l'équation (1)). Pour notre système la caractéristique du ventilateur pour un nombre de tours fixes est représentée sur la Fig. 7.

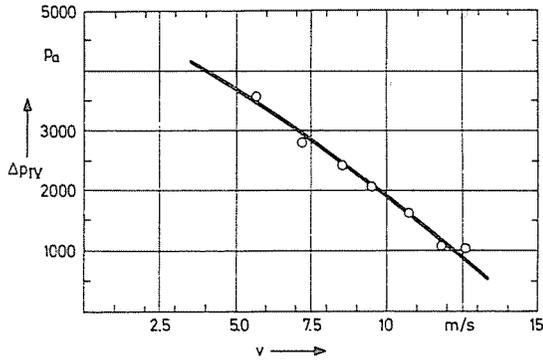


Fig. 7. Caractéristique du ventilateur

4. Détermination du point de fonctionnement à l'aide d'une méthode itérative

Le principe de cette méthode consiste à déterminer tels points de fonctionnement où les sous-systèmes ainsi que tout le système fonctionnent stablement. Pour bien démontrer l'itération nous la faisons avec les valeurs tirées des Fig. 3—7. Ainsi on peut comparer les valeurs déterminées par l'itération, et celles qui sont venues de mesure. Mais l'itération peut être exécutée sur l'ordinateur selon les pas de calcul suivants:

Les pas d'itération:

1. Choisir une vitesse v dans l'intervalle estimée du transport.
2. Déterminer la perte de charge du système primaire à l'aide de la Fig. 3., ou de l'équation (1).
3. En sachant que la pression au bout du tube primaire est égale à celle qui règne sous le réservoir d'alimentation la Fig. 4. ou bien l'équation (2) nous permettent de déterminer le débit massique \dot{m}_a .
4. En connaissance de la vitesse v on peut préciser la perte de charge « vide » du tuyau Δp_{IIIv} , à l'aide de la Fig. 5. ou de l'équation (4).
5. On peut déterminer la valeur de $\Delta p_{IIIv}/\dot{m}_a$ à l'aide de la Fig. 5. ou de l'équation (14).
6. En connaissance du courant massique \dot{m}_a on peut préciser la perte de charge supplémentaire du tuyau de transport Δp_{IIIv} .
7. On doit contrôler si la somme des pertes de charge $\Delta p_1 + \Delta p_{IIIv} + \Delta p_{IIIv}$ au niveau de la vitesse v choisie se situe sur la courbe caractéristique du ventilateur (Fig. 7.). Si la somme tombe au dessous de la courbe, il faut augmenter la vitesse et inversement et *refaire les calculs* à partir du point 2. On arrête les calculs, si la somme est suffisamment proche de la courbe.

Nous avons fait les mesures de telle façon que la longueur équivalente du tuyau primaire changeait toujours, à cause des diaphragmes de diamètre différent branché au bout du tuyau. De même façon nous avons intercalé des diaphragmes de diamètre différent sous le réservoir d'alimentation.

En ce qui suit nous présentons une série de calculs rangée dans les tableaux pour un seul cas choisi. Ici on a utilisé un diaphragme de diamètre de 0,02 m au bout du tuyau primaire, et un autre de diamètre de 0,014 m sous le réservoir d'alimentation.

Numero	1	2	3	4	5	6	7	8
signe	v	Δp_I	\dot{m}_a	Δp_{III}	$\frac{\Delta p_{III}}{\dot{m}_a}$	Δp_{III}	Δp_{IV}	v
unité	m/s	Pa	kg/s	Pa	$\frac{\text{Pa}}{\text{kg/s}}$	Pa	Pa	m/s
1	12,0	525	.055	800	31 000	1 705	3 030	6,8
2	6,8	150	.040	200	56 000	2 240	2 590	8,5
3	8,5	240	.042	420	48 000	2 016	2 676	8,5

Dans le cas présenté les valeurs mesurées étaient les suivantes:

le débit massique $\dot{m}_a = 0,039 \text{ kg/s}$

la différence de pression dans le système de ventilateur $\Delta p_{IV} = 2413 \text{ Pa}$,

la vitesse d'air $v = 8,5 \text{ m/s}$

On peut voir que les données mesurées et les données calculées sont en accord. Il y a une différence faible à cause des simplifications et des imprecisions de mesure.

Résumé

On présente dans l'étude une méthode à l'aide de laquelle on peut calculer les points de fonctionnement des sous-systèmes qui permet de calculer le point de fonctionnement de tout le système. Pour vérifier la méthode, on a comparé les résultats calculés et les résultats mesurés. Les résultats présentent une concordance satisfaisante. Par généralisation de la méthode présentée, on peut déterminer en connaissance de quelques caractéristiques les données les plus importantes aux autres domaines du transport pneumatique.

6. Symboles

A	$\left(\frac{\text{kg/s}}{\text{m}^{2.5}}\right)^2$	Coefficient d'échappement (1)
B	kg/m^3	Coefficient d'échappement (2)
c_w	—	Coefficient de résistance
d	m	Diamètre de particule
D	m	Diamètre de tube
F	m^2	Surface de section de tube
g	m/s^2	Accélération due à la pesanteur
k	—	Constant de transport
l	m	Longueur
m	kg	Masse
\dot{m}_a	kg/s	Débit massique
Δp	Pa	Différence de pression
v	m/s	Vitesse (sans indice, vitesse d'air)
w	m/s	Vitesse de chute de particule
β	—	Coefficient correspondant à l'effet du poids
λ	—	Coefficient de la perte de charge
λ_{Σ}^*	—	Coefficient de la perte de charge considérant la collision de particules
μ	—	Facteur de mixation
ρ	kg/m^3	Masse volumétrique

7. Géod indices

I	Primaire	AC	Accélération
II	Secondaire		
III	Tertiaire	H	Horizontal
IV	Quaternaire	V	Vertical
o	Atmosphérique	CD	Coude
a	solide	CL	Collision
v	Vide	P	Portance
s	Supplémentaire	FR	Friction
eq	Équivalent	X	Eau

8. Références

- PÁPAL, L.: Pneumatikus és fluidizációs anyagmozgatás. BME Továbbképző Intézet, Budapest 1975. 4864.
- VERBA, A.—BOGNÁR, G.: Wirkung des Druckdifferenzen auf den Ausfluß von Luft und Schüttgut aus einem Behälter Magdeburg 1979. 2. Tagung Strömungsmechanik.
- VERBA, A.—BOGNÁR, G.: Prediction of Operational Point of Injector Feeders, Proceedings of VI. Conference on Fluid Machinery, Budapest, 1979.
- JENIKE, A. W.: Storage and Flow of Solids. Buletin of the University of Utah, № 26 November 1964. Salt Lake City, USA.
- WEBER, M.: Strömungsfördertechnik. Krausskopf Verlag, Mainz, 1974.
- STEGMAYER, W.: Zur Berechnung der horizontalen pneumatischen Förderung feinkörniger Feststoffe. Fördern und Heben 28. 363—366 1978.

Dr. Géza BOGNÁR }
 Dr. Attila VERBA } H-1521 Budapest