

LASZLO PAPAI

Technische Universität Budapest
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

DRUCKBERECHNUNG FÜR PNEUMATISCHE DICHTSTROMFÖRDERUNG

Zusammenfassung. In den letzten Jahren hat sich die pneumatische Dichtstromförderung verbreitet. Zum Entwurf solcher Einrichtungen, die mit einem Druckbehälter ausgestattet sind, sind hauptsächlich im Falle von Förderung unbekannter Materialien auch Labor- bzw. Halbbetriebsuntersuchungen notwendig. Zur Errichtung der endgültigen Einrichtung ist sogar im Falle von Untersuchungen die schwierigste Aufgabe die Bestimmung des Druckabfalls.

Die Abhandlung beschreibt mit Inanspruchnahme von Messungsergebnissen mit Zement, Asche und Mehl durchgeführter Untersuchungen, sowohl von theoretischen Erwägungen eine Methode für Druckberechnung.

Der zusätzliche Druckverlust der Dichtstromförderung kann aus drei Teilen berechnet werden: aus der Reibung des Materials an der Rohrwand (Δp_R), aus dem Stoss des Materials an die Rohrwand (Δp_S) und aus dem Heben des Materials (Δp_H):

$$\Delta p_Z = \Delta p_R + \Delta p_S + \Delta p_H$$

Die Druckberechnungsmethode des in der langen Rohrleitung entstandenen, auch die Expansionswirkung in Betracht genommenen Drucks ergibt laut des angeführten Zahlenbeispiels ein, den Messergebnissen gut entsprechendes Ergebnis.

Einleitung

Mit der Verbreitung der pneumatischen Förderung kommen allmählich die für lange Förderstrecken bestimmten ($l > 100$ m) Fördereinrichtungen zum Vorschein. Solche werden meistens mit einer Druckbehälterspeisung ausgestattet (Abb. 1). Das durch solche erreichbare Mischverhältnis beträgt einen Wert $\mu =$ von 25 bis 200. Die Förderung fällt somit in den Bereich der Dichtstromförderung.

Beim Entwurf von mit einem Druckbehälter ausgestatteter Fördereinrichtung ist die Bestimmung des Druckabfalls der Förderung (Δp) die schwierigste Aufgabe. Dessen Gründe sind:

der physikalische Vorgang der Dichtstromförderung ist noch nicht in jeder Einzelheit geklärt,

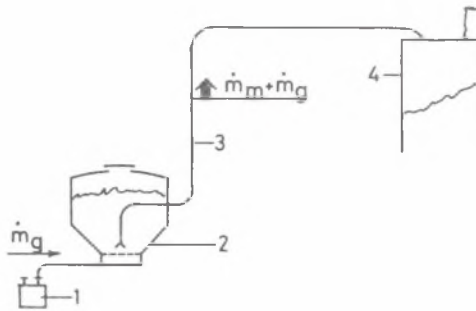


Abb. 1. Fördereinrichtung mit Druckbehälter
1. Kompressor, 2. Druckbehälter, 3. Förderrohr, 4. Silo

der auftretende Druckabfall hängt grösstenteils von der des beförderten Materials ab,

der Druckabfall wird durch die Expansion des Fördergases beeinflusst, der grossen Förderstrecke zufolge ist die Ausbildung des Förderrohres speziell geformt (z.B. Durchmesseränderung an bestimmten Stellen der Länge, Einblasen von Spülluft zur Verhinderung von Verstopfung u.s.w.).

Vorgang der Dichtstromförderung

Die Benennung Dichtstromförderung wird bei jenen Förderungen angewandt, bei welchen das Material-Volumenverhältnis mehr als 3% beträgt ($\varepsilon_m = v_m/v > 0,03$). Die dichte Mischung wird meistens durch Fluidisation zustandegebracht, wie auch bei den mit Druckbehälter versehenen Einrichtungen. Die durch Fluidisation erreichte, nahezu homogene und dichte Mischung (Abb. 2a) ordnet sich im Laufe der von der Materialart abhängenden kürzeren oder längeren Förderung in dem Förderrohr zu einer Mischung in einer Durchgangphase (Abb. 2b).



Abb. 2. Mischungen im pneumatischem Förderrohr
a) angehend homogene Dichtstrommischung, b) Mischung im Übergangszustand (Dünn- und Dichtstrom)

Der im Förderrohr entsethende Druckabfall (Δp) hängt von dem Zustand der Mischung ab. Der Dichtstromdruckabfall (Δp) kann als Summe des Druck-

verlustes infolge reiner Luftströmung (Δp_0) und des zusätzlichen Druckverlustes (Δp_Z) berechnet werden [1]:

$$\Delta p = \Delta p_0 + \Delta p_Z \quad (1)$$

Der Druckverlust infolge reiner Fördergasströmung (dies ist meistens Luft) entsteht durch die Reibung des Fördergases an der Rohrwand:

$$\Delta p_0 = \lambda \frac{1}{D} \frac{\rho_g v^2}{2}$$

Infolge der bei Dichtstrom anwendbaren kleinen Gasgeschwindigkeit ($v_g = 5 \dots 15 \text{ m/s}$) kann der Druckverlust infolge reiner Gasströmung im Vergleich zu dem zusätzlichen Druckabfall in der Regel vernachlässigt werden ($\Delta p_0 \ll \Delta p_Z$), darum $\Delta p \approx \Delta p_Z$.

Auf Grund der Theorie über die im Förderrohr entstehenden den Kraftwirkungen [1], [2] kann nachgewiesen werden, dass der zusätzliche Druckverlust bei Dichtstromförderung aus Teilen entsteht:

$$\Delta p_Z = \Delta p_R + \Delta p_S + \Delta p_H \quad (2)$$

Die Teile des zusätzlichen Druckverlustes sind:

a) Der durch die Reibung des beförderten Materials an der Rohrwand entstandene Druckverlust:

$$\Delta p_R = k_R \Delta l \frac{\dot{m}_m g}{v_m A} \quad (3)$$

b) Der infolge des Materialstosses der Teilchen an die Rohrwand entstandene Druckverlust:

$$\Delta p_S = k_S \frac{\Delta l}{D} \frac{\dot{m}_m v_m}{A} \quad (4)$$

Der Wert dieses Druckverlustes kann vernachlässigt werden, wenn das Förderrohr so kurz ist (im allgemeinen $l < 10 \text{ m}$), dass zur Ausbildung der Mischung einer Durchgangphase noch keine Möglichkeit besteht.

c) Der zur Materialhebung erforderliche Druckverlust:

$$\Delta p_H = \Delta l \frac{\dot{m}_m g}{v_m A} \quad (5)$$

Der Vollständigkeit halber soll erwähnt werden, dass zur Bestimmung des Förderdruckabfalles ausser den obengenannten Teilen (3), (4) und (5) auch der am Anfang des Förderrohres entstehende Beschleunigungsdruckverlust in Betracht gezogen werden muss. Der Beschleunigungsdruckverlust:

$$\Delta p_d = \frac{\dot{m} v}{A} \quad (6)$$

dessen Wert bei Dichtstromförderung (im Gegensatz zur Dünnstromförderung) in der Regel vernachlässigt werden kann.

Die zur Bestimmung des zusätzlichen Druckabfalles aufgeschriebenen Zusammenhänge (3), (4) und (5) dürfen lediglich bei so kurzen Rohrstrecken verwendet werden (von der Länge Δl), binnen welchen die Veränderungen der Gas- bzw. Materialgeschwindigkeit vernachlässigt werden können, bzw. wo es keine sprunghafte Abstufungen des Durchmessersquerschnittes gibt, und keine Spülluft eingeführt wird.

In langen Rohrleitungen entstehende Drücke

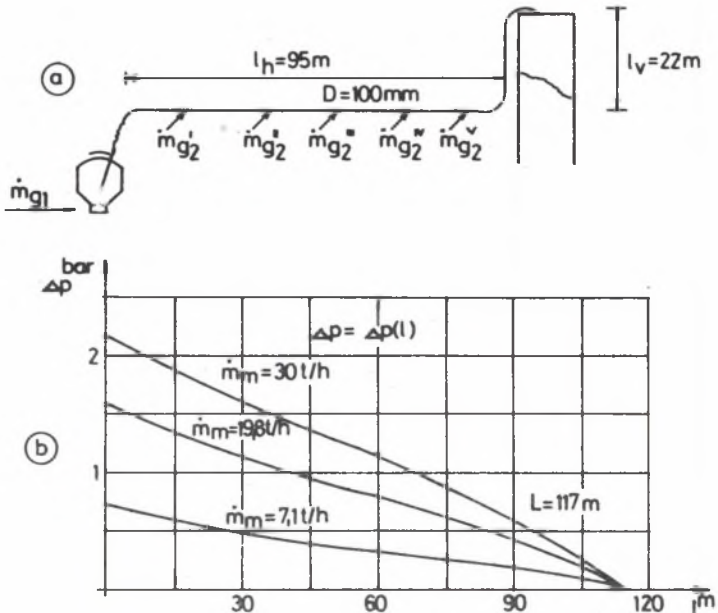


Abb. 3

a) Skizze eines Förderrohres für Zementförderung, b) Länge der Rohrleitung gemessene Drücke im Falle verschiedener Massenströme des Materials

Abb. 3 zeigt eine $l = 117 \text{ m}$ lange, zur Zementförderung dienende Rohrleitung von einem Durchmesser $D = 100 \text{ mm}$, an einen Eisenbahn-Tankwagen angeschlossen und die darin längs der Leitung durch Messen bestimmte Drücke, bzw. deren Gestaltung bei verschiedenen Massenströmen des Zements. Aus den Druckwerten ist ersichtlich, dass die Expansionswirkung nicht ausser Acht gelassen werden kann. Überdies wird in der horizontalen Leitungsstrecke - zwecks Sicherung der gleichmässigen Förderung - in Abständen von je 15 m Spülluft eingeführt.

Laut der Messungen verändert sich der Druck in Funktion der Rohrleitungslänge nicht linear. Nämlich verändert sich zufolge der Expansion die Gasdichte, dessen Folge wieder die Veränderung der Geschwindigkeit des Fördergases sowie der des Materials ist. Die Veränderung der Materialgeschwindigkeit wirkt anders auf den Druckverlust infolge der Materialreibung (Δp_R), als auf den Druckverlust infolge des Materialstosses an die Rohrwand (Δp_S).

Der Verlauf der Verhältnisse in Bezug auf eine horizontale Leitungsstrecke ist in Abb. 4 veranschaulicht. Die in der Rohrleitung verlaufende Expansion kann mit guter Näherung als isothermisch betrachtet werden, das heisst, dass die Gasdichte eine lineare Funktion des Druckes ist:

$$\rho_g = \rho_{g_0} \frac{p}{p_0}$$

wo ρ_{g_0} die Gasdichte beim bekannten Enddruck p_0 bedeutet. Somit kann die Gasgeschwindigkeit (v_g) aus der Kontinuität bestimmt werden:

$$\dot{m}_g = A v_g \rho_g$$

Wenn im Rohrdurchmesser (und somit auch im Querschnitt) keine Veränderung eintritt und Spülluft auch nicht eingeführt wird, dann ist:

$$v_g = \frac{\dot{m}_g}{A} \frac{1}{\rho_g} = \text{const} \frac{1}{p} \quad (7)$$

Als erste Näherung wird die Veränderung der Materialgeschwindigkeit als proportionell zu der der Gasgeschwindigkeit vorausgesetzt (an Abb. 4a v_m : die gestrichelte Linie).

Der Gradient des Druckes längs der Rohrlänge ergibt sich als Summe des Gradienten infolge der Materialreibung dp_R/dl und des Gradienten infolge des Materialstosses dp_S/dl (einfachheitshalber horizontales Rohr vorausgesetzt, das heisst infolge Materialhebung entstehenden Druckverlust nicht gerechnet) und mit Anwendung absoluter Werte:

$$\left| \frac{dp}{dl} \right| = \left| \frac{dp_R}{dl} \right| + \left| \frac{dp_S}{dl} \right|. \quad (8)$$

Der Wert von $\left| \frac{dp_R}{dl} \right|$ ist laut (3) am Anfang des Rohres gross, weil im Nenner von (3) die Materialgeschwindigkeit am Rohranfang klein ist.

Der Wert von $\left| \frac{dp_S}{dl} \right|$ ist laut (4) am Ende des Rohres gross, weil im Zusammenhang (4) die Materialgeschwindigkeit im Zähler am Rohrende angewachsen ist.

Das laut (8) aus Summierung der Teilgradienten entstehende Ergebnis (in Abb. 4a die strichpunktierte Linie) hat am Rohranfang und am Rohrende einen grösseren Wert, als dazwischen. Demzufolge ist (laut Abb. 4b) die Druckveränderung am Anfang und am Ende des Rohres steiler, als in der dazwischen liegenden Rohrstrecke. Dasselbe ist auch aus den durch Messen bestimmten Druck-Kurven ersichtlich (Abb. 3).

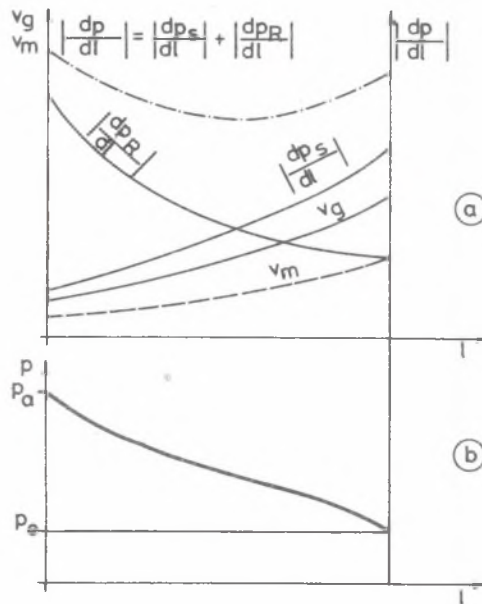


Abb. 4. Expansionswirkung

a) Veränderungen der Geschwindigkeiten (v_m , v_g) und der absoluten Werte der Druckgradienten längs der Rohrlänge. b) Druckveränderung längs der Rohrlänge

Zu den mit Zement durchgeführten Messungen vollkommen ähnliche Ergebnisse weisen auch die durch Friedrich [3] an Stärkeprodukten durchgeführte Messungen (Abb. 5) auf.

Der Lehrstuhl für Strömungsmaschinen an der Technischen Universität Budapest beschäftigt sich mit durch Labormessungen unterstützten Forschungsarbeit zwecks Bestimmung der in den Zusammenhängen (3) und (4) angeführten Koeffiziente k_R und k_S . Die mit Asche durchgeführten Experimente

zeigen, dass die Werte dieser Koeffizienten nicht nur von der Materialart des Fördergutes, sondern binnen einer Materialsorte auch von ihrem Mischungsverhältnis abhängt. (Mit einem Teil der Forschungsarbeit beschäftigt sich die Dissertation von S. Várdi [4]).

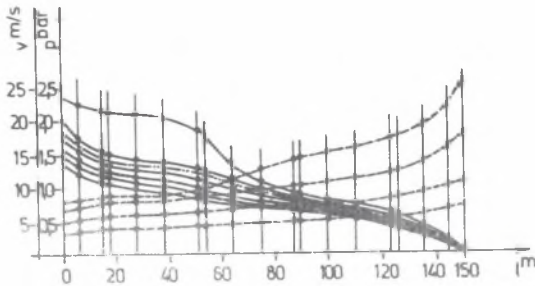


Abb. 5

Gestaltung des Drucks (p ; ausgezogene Linie) und der Mischungsgeschwindigkeit (v ; gestrichelte Linie) längs der Rohrlänge infolge der Expansion, laut Messungen von Friedrich

Rechnerische Methode zur Bestimmung des Druckabfalles

Die in folgenden beschriebene rechnerische Methode eignet sich zur Bestimmung des zusätzlichen Druckverlustes bei der Dichtstromförderung. Den Ausgangspunkt dazu bildet die aus den Kraftwirkungen berechenbare Druckverlustbestimmungsmethode, das heisst die Anwendung der Zusammenhänge (3), (4) und (5). Mit Hinsicht darauf, dass alle prinzipiellen Details der Dichtstromförderung (z.B. die Berechenbarkeit der Materialgeschwindigkeit) noch nicht geklärt sind, ergibt die Berechnungsmethode Ergebnisse von annähernder Genauigkeit.

Das Wesentliche des Berechnungsverlaufes ist, dass die Rohrleitung auf kurze Strecken zerlegt wird. Binnen dieser Strecken wird die Wirkung der Expansion vernachlässigt. Die Berechnung fängt am Ende des Förderrohrs an, weil dort der Druck bekannt ist (in der Regel atmosphärischer Druck, $p_0 = p_0 \approx 10^5 \text{ Pa}$).

Die Zerlegung auf Strecken soll so vorgenommen werden, dass die Krümmen, die Rohrquerschnitt-Veränderungen, die Spülluft-Einführungen auf die Streckengrenzen fallen. Zur Berechnung müssen die in (3), bzw. (4) angeführten Beiwerte (k_R , k_S) mittels Labor-, bzw. Halbbetriebs- oder Betriebs-Messungen bekannt sein. Laut unseren Messungen hängen diese Beiwerte nicht bloss von dem Material ab, sondern haben auch in horizontalen, bzw. vertikalen Rohren verschiedene Werte. Zuzufolge unserer Detail-Messungen sind sie auch von dem Mischungsverhältnis abhängig.

Im Laufe der Berechnungen wird der zwischen der Materialgeschwindigkeit und Gasgeschwindigkeit bestehende Unterschied vernachlässigt, und wird mit den Werten $v = v_g = v_m$, das heisst mit der Mischungsgeschwindigkeit gerechnet. Die Verengung des Rohrleitungsquerschnittes des Materialstromes ist mit dem Material-Volumenverhältnis identisch (ϵ_m). Dessen Wert beträgt bei Dichtstromförderungen $\epsilon_m = 0,03 \dots 0,3$, aber bei den meisten Fällen $\epsilon_m = 0,05 \dots 0,1$. Darum wird kein grosser Fehler begangen, wenn bei der Geschwindigkeitsberechnung der Mischung mit dem aus (7) bestimmbar Geschwindigkeitswert gerechnet wird. Weiterhin werden auch die Krümmen-Wirkungen vernachlässigt, nämlich unterscheiden die sich kaum von dem Druckverlust der geraden Rohren im Falle von Dichtstromförderung.

Der Verlauf der Berechnung wird in Bezug auf die in Abb. 3 geschilderte Rohrleitung einer Einrichtung für Zementförderung vorgeführt; Massenstrom: $\dot{m}_m = 30 \text{ t/h} = 8,33 \text{ kg/s}$. Angaben der Rohrleitung: Durchmesser $D = 100 \text{ m}$, Querschnittsfläche $A = 0,0078 \text{ m}^2$, Länge $L = 117 \text{ m}$, davon vertikal $l_v = 22 \text{ m}$, horizontal $l_h = 95 \text{ m}$. Spüllufteinführung: in den Druckbehälter $\dot{m}_{g1} = 0,15 \text{ kg/s} = 430 \text{ m}^3/\text{h}$ (auf normalen Zustand umgerechneter Volumenstrom), sowie nach der ersten, $L_1 = 20 \text{ m}$ langen horizontalen Teilstrecke an 5 Stellen von je $\Delta l = 15 \text{ m}$ langen Teilstrecken, insgesamt $\dot{m}_{g2} = 5 \times 0,014 \text{ kg/s} = 0,07 \text{ kg/s}$, das heisst $5 \times 40 \text{ m}^3/\text{h} = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ Spülluft. Im horizontalen Rohr: $k_{Rh} = 0,9 \dots 1,1$; $k_{Sh} = 0,004 \dots 0,006$; im vertikalen Rohr: $k_{Rv} = 0,8 \dots 1,0$; $k_{Sv} = 0,006 \dots 0,008$; (bei der Berechnung wurde mit den Mittelwerten der oben angeführten Werte gerechnet; ferner wurden die Veränderungen dieser Werte längs der Rohrlänge nicht berücksichtigt, weil das Mischungsverhältnis von seinem Anfangswert $\mu_m = 55,5$ infolge der Spüllufteinführung bloss auf $\mu_m = 38$ gesunken ist).

Dem Berechnungsverlauf kann aufgrund der Tafel I nachgefolgt werden.

Tafel I

Lau- fen- den Zahl	m	kg/s	kPa	kg/m ³	m/s	kPa	kPa	kPa	kPa
	Δl_i	\dot{m}_g	p_{ei}	ρ_g	v	Δp_R	Δp_S	Δp_H	Δp_Z
1	117-106	0,22	100	1,25	22,5	4,65	18,5	5,15	28,3
2	106- 95	0,22	128,3	1,6	17,6	5,95	14,5	6,55	27
3	95- 80	0,22	155,3	1,94	15,3	10,3	12,2	-	22,5
4	80- 65	0,206	177,8	2,22	11,9	13,2	9,5	-	22,7
5	65- 50	0,192	200,5	2,5	9,8	16,05	7,85	-	23,9
6	50- 35	0,178	224,4	2,8	8,2	19,2	6,5	-	25,7
7	35- 20	0,164	250,1	3,13	6,7	23,5	5,3	-	28,8
8	20- 0	0,15	278,9	3,48	5,5	38,2	5,9	-	44,1
$p_a = 323 \text{ kPa}$						$\sum \Delta p_Z = 223 \text{ kPa}$			

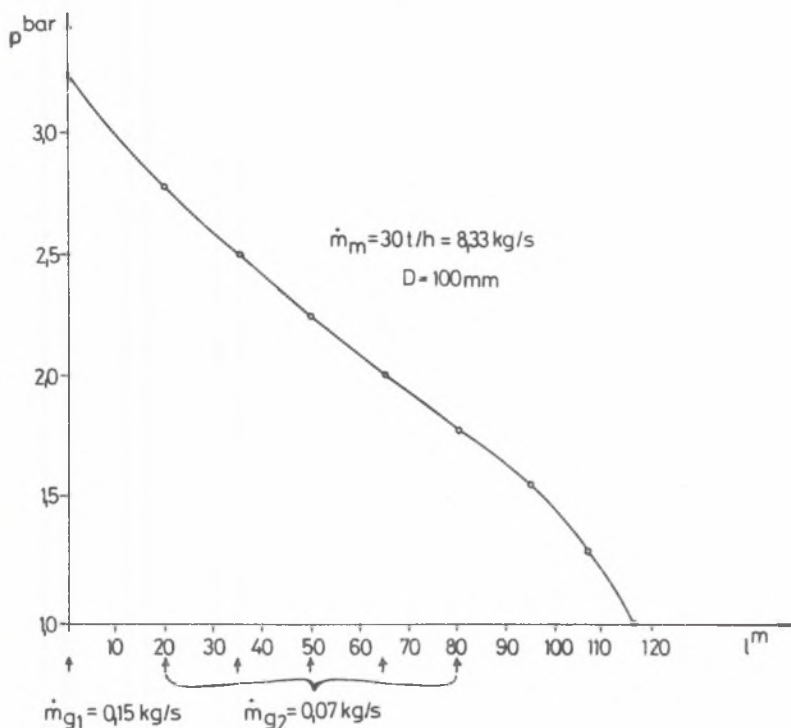


Abb. 6

Mittels Berechnung bestimmte Druckveränderungen in Funktion der Rohrlänge

Die sich aus der Berechnung ergebende Kurve $p(l)$ ist in Abb. 6 sichtbar und sie weist auf eine gute Übereinstimmung mit der durch Messen bestimmten Druckveränderungen auf (Abb. 3b).

Der zur reinen Luftströmung und zur Beschleunigung des Materiale notwendige Druckverlust ergibt zusammen kaum einen Wert von 10 kPa also wurde durch seine Vernachlässigungen kein bedeutender Fehler begangen.

Im Bezug auf die vorgeführte Berechnung soll erwähnt werden, dass anstatt der im Zahlenbeispiel sichtbaren Rohrteilstrecken mit Längen von 11-20 m, kann mit Inanspruchnahme einer Rechenmaschine auch auf ganz kurze Strecken getrennt vorgegangen werden. Mit der maschinellen Rechnungsweise wird die Genauigkeit der Berechnung nur vorgetäuscht, weil die angewandten Material-Kennwerte (k_R , k_S) bedeutend mehr Ungewissheit enthalten, als die aus grossen Längen herrührende Näherung.

Übrigens kann die Berechnung des zusätzlichen Druckverlustes anstatt mit der Methode der Teilstrecken auch in einer Stufe, durch Lösung der

aus den elementaren Druckveränderungen aufgeschriebenen Differentialgleichung vorgenommen werden. Die Lösung kann in expliziter Form aufgeschrieben werden:

$$p_a = p_e \sqrt{\left(\frac{k_R}{k_S} Fr_e^2 + 1 \right) \cdot e^{\frac{2k_R}{P_e} \frac{\mu g \rho_g g_e (L-1)}{P_e}} - \frac{k_S}{k_R} Fr_e^2} \quad (9)$$

wo

$$Fr_e = v_{ge} / \sqrt{g D}$$

Mit Hilfe solcher p(1) Gleichung kann nur in solchem Rohr entstandener Druck berechnet werden, in welchem weder Krümmer, noch Querschnittsflächen-Veränderungen oder Spüllufteinführungen vorkommen (z.B. ein horizontales Rohr). In dem Zahlenbeispiel geschilderten Rohr könnte mit Anwendung von (9) anstatt mit 8 mit bloss 7 Teilstrecken gerechnet werden.

Bezeichnungen

$A = D^2 \pi/4, [m^2]$	- Querschnittsfläche des Rohres
$D, [m]$	- Rohrdurchmesser,
$Fr_e = v_g / \sqrt{g D}$	- Froude'sche Zahl
$g = 9,81 m/s^2$	- Gravitations-Beschleunigung,
k_R	- Materialreibungskoeffizient
k_S	- Stosskoeffizient
$L, [m]$	- gesamte Förderrohrlänge
$l, [m]$	- Förderentfernung,
$l_h, [m]$	- horizontale Rohrlänge
$l_v, [m]$	- vertikale Rohrlänge
$\dot{m}_g, [kg/s]$	- Massenstrom des Fördergases
$\dot{m}_m, [kg/s]$	- Massenstrom des Materials
$p, [Pa]$	- Druck
$p_a, [Pa]$	- Anfangsdruck
$p_e, [Pa]$	- Enddruck (am Ende der Rohrleitung)
$\Delta p, [Pa]$	- Druckabfall in der Rohrleitung
$\Delta p_o, [Pa]$	- Druckverlust infolge reiner Luftströmung ($\dot{m}_m = 0$)
$\Delta p_H, [Pa]$	- Druckverlust infolge der Materialhebung
$\Delta p_R, [Pa]$	- Druckverlust infolge der Materialreibung
$\Delta p_S, [Pa]$	- Druckverlust infolge des Materialstosses
$\Delta p_Z, [Pa]$	- zusätzlicher Druckverlust
$V, [m^3]$	- Volumen der Rohrteilstrecke
$V_m, [m^3]$	- Materialvolumen in der Rohrteilstrecke
$v, [m/s]$	- Mischungsgeschwindigkeit
$v_g, [m/s]$	- Gasgeschwindigkeit

v_m , [m/s]	- Materialgeschwindigkeit
$\epsilon_m = v_m/V$	- Material-Volumenverhältnis
λ	- Druckverlustbeiwert bei reiner Luftströmung
$\mu = \dot{m}_m/\dot{m}_g$	- Mischungsverhältnis
ρ_g , [kg/m ³]	- Gasdichte
ρ_m , [kg/m ³]	- Materialdichte

LITERATUR

- [1] Papai L.: Experimentelle und Theoretische Untersuchungen der pneumatischen Förderung. Periodica Polytechnica M 19/1, 1975.
- [2] Papai L.: Pneumatikus és fluidizációs anyagmozgatás (Pneumatische und Fluidisations-Materialförderung) BME Továbbképző Intézete, Budapest, 1975.
- [3] Friedrich: Eigenschaften und Förderarten von Stärkeprodukten. Die Stärke, 1962, Nr 10.
- [4] Váradi S.: Nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés szabályozása (Regulierung einer mit Druckbehälter versehenen pneumatischen Förder-einrichtung). Doktorendissertation, Budapest, 1981.

OBLICZANIE STRAT CIŚNIENIA PRZY TRANSPORCIE PNEUMATYCZNYM

S t r e s z c z e n i e

W opracowaniu zaproponowano metodę obliczeń straty ciśnienia przy transporcie pneumatycznym. Straty te wyrażają się sumą trzech składników:

- tarcia materiału o ściankę rurociągu,
- uderzenia materiału o ściankę,
- podnoszenia materiału.

Wyniki obliczeń tą metodą są zgodne z wynikami badań eksperymentalnych, przeprowadzonych w czasie transportu pneumatycznego cementu.

РАСЧЁТЫ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ

Р е з ю м е

В работе предложен метод расчётов потерь давления при пневматическом транспорте. Потери эти суть сумма трёх слагаемых:

- трения материала о стенку трубопровода,
- удара материала о стенку,
- подъёма материала.

Результаты расчётов упомянутым методом согласуются с результатами экспериментальных исследований проведённых во время пневматического транспорта цемента.

COMPUTATION OF PRESSURE LOSSES IN PNEUMATIC CONVEYING**S u m m a r y**

A computational technique is proposed to find pressure losses in pneumatic conveying. They consist of three components:

- material friction against a pipeline wall,
- material blows against a wall,
- material lifting.

Results of computations using the technique are compatible to experimental results of the tests made during the pneumatic conveying of cement.