

PNEUMATISCHE DICHTSTROMFÖRDERUNG MIT KONTINUIERLICH ARBEITENDEM DRUCKGEFÄSSFÖRDERER

L. PÁPAI

Lehrstuhl für Strömungsmaschinen,
Technische Universität, H-1521 Budapest

Eingegangen am 29, März 1984

Summary

The paper deals with the further development of continuously operating pneumatic equipment. The delivery pipe and the pressure tank were connected with a "by-pass" conduit, by its help the equipment's regulating process can be kept well in hand.

For the calculation of the pressure drop in the pipe — starting from Pattantyús's principles [1] — equations were derived, which were supported by experiments.

Einleitung

In verschiedenen Betrieben verbreitete sich zum Flugaschen-, Zement-, Sandtransport der pneumatische Druckgefäßförderer. Die üblichen Einrichtungen mit einem Behälter (Abb. 1) eignen sich zur gestaffelten Förderung. Die Betriebsparameter (Förderleistung, Mischungsverhältnis, Luftmenge, Druck, spezifischer Energieverbrauch) einer bereits errichteten Einrichtung können

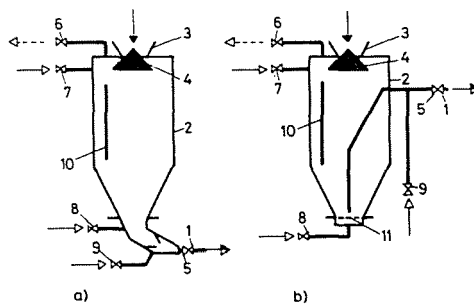


Abb. 1. Prinzipieller Aufbau pneumatischer Druckbehälter für pulverförmige Materialien. 1 — Förderrohrleitung, 2 — Druckbehälter, 3 — Guteinlauf, 4 — Einlaufverschluss, 5 — Auflaufverschluss, 6 — Entlüftung, 7 — Oberluftzuführung, 8 — Unterluftzuführung, 9 — Zusatzluftzuführung, 10 — Füllstandsanzeiger, 11 — Fluidisierboden

nur beschränkt und in engem Zusammenhang miteinander eingestellt werden. Eine kontinuierlich arbeitende Einrichtung wurde durch gemeinsam durchgeführte Forschungs- und Labor-Arbeit von der Technischen Universität Budapest und von ERŐTERV entwickelt, wobei die Werte der Parameter in breitem Bereich geregelt bzw. verändert werden können.

Kontinuierlich arbeitende und in breitem Bereich regelbare Druckgefäßförderer

Die Anordnung der im Laboratorium aufgestellten Fördereinrichtung ist in Abb. 2 veranschaulicht. Der Durchmesser des bei den Messungen angewandten Förderrohrs war $D=27, 38$ bzw. 50 mm. Die Länge der dargestellten Förderrohrleitung beträgt 45 m. Durch die Verlängerung der oberen geraden Leitungsstrecke wurden auch Messungen von einer Länge von 72 , bzw. 120 m durchgeführt. Bei Messungen mit gestaffelter Zufuhr kam der Zwischenbehälter (5) zu keiner Rolle, er wurde ständig offen gehalten. Die bei kontinuierlicher Druckgefäßförderung angewandte Anordnung und Regelung

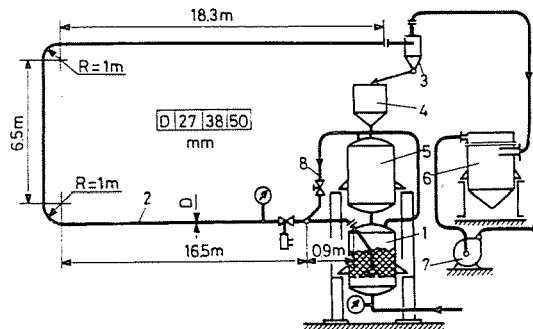


Abb. 2. Pneumatische Druckgefäßförder-Einrichtung. 1 — Druckbehälter, 2 — Förderrohrleitung, 3 — Zyklon, 4 — Pufferbehälter, 5 — Zwischenbehälter, 6 — Filter, 7 — Ventilator, 8 — Zusatzluft

ist in Abb. 3 ersichtlich. Zur Einstellung, bzw. Regelung der Betriebsparameter (Förderleistung, Mischungsverhältnis, Druck, Energieverbrauch) diente das aus der Decke des Druckbehälters herausgeführte und zum Anfang der Förderrohrleitung geführte Regelungsrohr (D). Mit den durch die Regelungsrohr strömenden Luftmengen können die Betriebsparameter in breitem

Bereich verändert werden. Die in der Regelungsrohrleitung strömende Luftmenge kann entweder durch Ventile, oder durch Austausch von verschiedenen Blenden verändert werden. (Bei Betriebsumständen ist letztere Lösung zweckmäßiger).

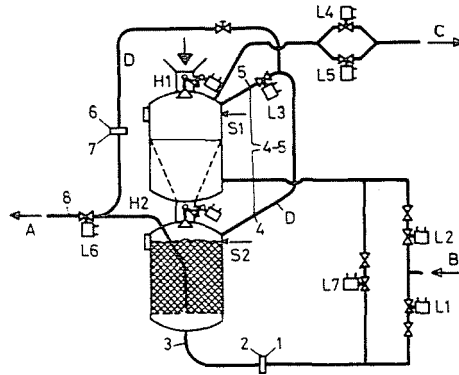


Abb. 3. Regelung pneumatischer Fördereinrichtung mit Behälterschleuse. 1 . . . 8 Kontaktmanometer, Differentialmanometer, L1 . . . L7 pneumatisch gesteuerte Ventile, H1 . . . H2 Einlaufverschlüsse (Glockenventile), S1 . . . S2 Füllstandanzeiger, A: Förderrohrleitung, B: Rohrleitung vom Kompressor, C: Rohrleitung zum Filter, D: Regulierrohr

Die kontinuierliche Förderung ist aus dem unteren Druckgefäß durchführbar. Durch das gestaffelte Auffüllen des Zwischenbehälters, sodann nach seinem Abschließen durch Einstellung des Druckes auf Förderdruck, und Durchschleusen des Förderguts in das untere Druckgefäß, kann die kontinuierliche Förderung aufrechterhalten werden. Nach der Durchschleusung muß die Luft des Zwischenbehälters in die Atmosphäre geführt werden (zweckmäßig: durch einen Staubfilter), wonach mit der Wiederbeladung begonnen werden kann.

Während der Durchschleusung geht die Luft vom Zwischenbehälter zwar ohne Arbeit in die Atmosphäre, doch ist dieser Verlust immer geringer, als der bei gestaffelter Förderung entstandene Luftverlust. Bei gestaffelter Förderung entfernt sich nämlich die Luft des Druckgefäßes — dessen Rauminhalt im allgemeinen mit dem des Zwischenbehälters identisch ist — nach der Entleerung des Gefäßes ohne Arbeit, dabei wird aber der dem Förderrohr entsprechende Rauminhalt auch zum Verlust.

Ein weiterer Vorteil der kontinuierlichen Förderung ist ferner, daß eine bereits ausgeführte Einrichtung um 50—70% mehr Fördergut transportieren

kann, als eine mit gestaffeltem Betrieb. Sie kann nämlich während der Auffüllung des Druckgefäßes, hauptsächlich aber in den instationären Betriebszuständen des gestaffelten Druckgefäßes (während Anlauf und Abstelzeit) mit kontinuierlicher Gutförderung betätigt werden.

Experimentelle Forschungsarbeit

Von den mit Flugasche (durchschnittliche Korngröße: 150 μm) durchgeführten Messungen zeigt Abb. 4 die Messeergebnisse einer gestaffelten Förderung. Durchmesser des Förderrohrs $D=27$ mm, Länge $L=45$ m, im Druckgefäß befand sich 150 kg Flugasche. Während der Messung wurden in je

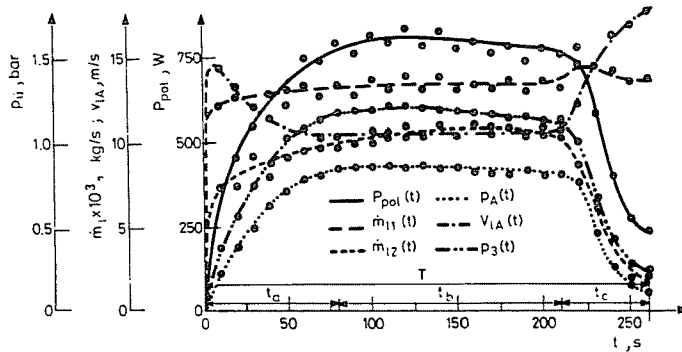


Abb. 4. Gestaffelte Flugaschenförderung mit Druckbehältereinrichtung

$\Delta t = 10$ sec die Parameter registriert: \dot{m}_{11} (die unter das Druckgefäß eingeführte Fluidisierluftmenge), \dot{m}_{12} (die Regulierluftmenge), p_3 bzw. p_A (Überdruck unter dem Druckgefäß bzw. am Anfang des Förderrohrs). In der Abb. sind auch die berechneten Daten angeführt: v_{1A} (Luftgeschwindigkeit am Anfang der Förderrohrs) und P_{pol} (die polytrophe Leistung der Förderung).

Zur Berechnung des Energiebedarfes wurde aus der polytropen Leistung ausgegangen. Diese ist:

$$P_{\text{pol}} = \frac{n}{n-1} p_0 \dot{V}_{10} \left[\left(\frac{p_3}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

wo $n \sim 1,3$ der Exponent der polytropen Zustandsveränderung; Indizes: 0 — Zustand am Förderrohrende (in der Regel atmosphärisch); 3 — dem Gefäßdruck entsprechender Zustand ist.

(Die so berechnete P_{pol} polytrope Leistung berücksichtigt weder die Verluste des Kompressors und dessen Betriebsmotors, noch die Verluste der vom Kompressor bis zum Druckgefäß führenden Röhren. Obige Formel bildet den Grund zum energetischen Vergleich der Förderung.)

In Abb. 4 ist gut ersichtlich, daß die Betriebsdauer des gestaffelt betätigten Druckgefäßes (T) aus drei Teilzeiten besteht:

t_a : Gefäßkompression (instationäre Förderung)

t_b : stationäre Förderung

t_c : Expansion des Gefäßes und des Förderrohrs (instationäre Förderung).

Der am Druckgefäßboden eingeführte Massendurchsatz der Fluidisierluft (\dot{m}_{l1}) kann während der ganzen Betriebszeit als konstant betrachtet werden. Dagegen ist der Massendurchsatz der Regulierluft (\dot{m}_{l2}) nur in der stationären Zeit konstant, und verfolgt in den instationären Zeiten die Veränderungen des in den parallelen Zweigen auftretenden Widerstandverhältnisses.

Bei kontinuierlicher Förderung (mit Hilfe der gemeinsamen Betätigung eines Zwischen- und eines Druckbehälters) entstehen die dem stationärem Zustand eines gestaffelten Betriebs entsprechenden Parameter. Der Unterschied ist nur soviel, daß sich der gesamte Luftverbrauch der Einrichtung mit dem Luftaufwand des Zwischenbehälters erweitert (\dot{m}_{l3}).

Der Mittelwert der Förderleistung eines gestaffelten Betriebes ist:

$$\dot{m}_{\text{mit}} = \frac{m_m}{T}.$$

Sie ergibt sich aus der Masse des in den Druckbehälter eingeführten Materials (m_m) und aus der gesamten Förderzeit (T).

Die Förderleistung des stationären Zustandes wurde in der Weise berechnet, indem der zur Untersuchung benützte Pufferbehälter (4 in der Abb. 2) abgewogen wurde:

$$\dot{m}_{\text{stat}} = \frac{\Delta m}{\Delta t}.$$

Abb. 5 zeigt im Bezug auf zwei verschiedene Einrichtungen den Zusammenhang zwischen der stationären und durchschnittlichen Förderleistung. Dieser beträgt in dem aus dem Gesichtspunkt der Anwendung in Frage kommenden Bereich:

$$\frac{\dot{m}_{\text{stat}}}{\dot{m}_{\text{mit}}} = 1,5 - 1,7.$$

Den großen Bereich der Einstellungs- bzw. Reguliermöglichkeit eines mit Regelungsrohr versehenen Druckgefäßförderers zeigt Abb. 6 im Falle zwei verschiedener Förderröhren. Hier ist in Funktion des Luftmassendurchsatzes (\dot{m}_{l1}) der stationäre Material-Massendurchsatz (\dot{m}_{mstat}) sichtbar, mit dem Parameter der ins Regelungsrohr eingebauten Blende (B).

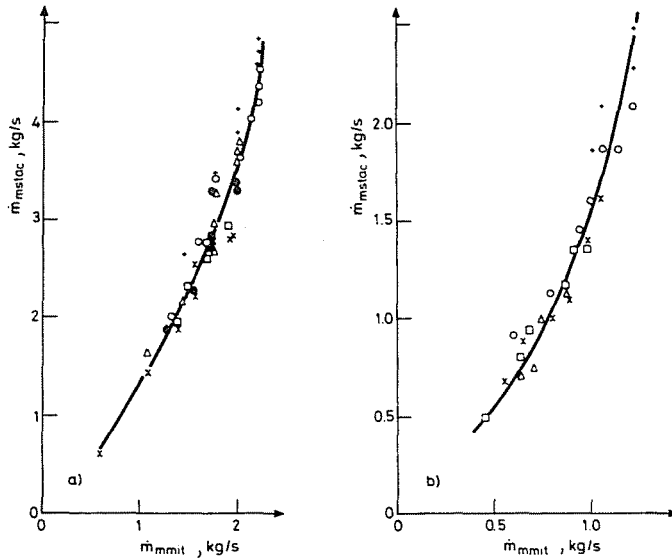


Abb. 5. Zusammenhang zwischen stationärer Förderleistung und dem Förderleistungsmittelwert. Förderrohr: a) Durchmesser $D = 38$ mm; Länge $L = 45$ m, b) Durchmesser $D = 27$ mm; Länge $L = 72$ m

Mit Anwendung des Regelungsrohr kann auch der Energiebedarf der Förderung bedeutend beeinflusst werden. Der Energiebedarf einer mit gestaffelter Einrichtung geförderten Dosis:

$$E = \int_0^T P_{pol} dt$$

und der spezifische Energiebedarf (das heißt der für die Förderung von 1 kg Material auf die Entfernung von 1 m notwendige Energiebedarf in J):

$$e = \frac{E}{m_m \cdot L} \quad (\text{J/kg} \cdot \text{m})$$

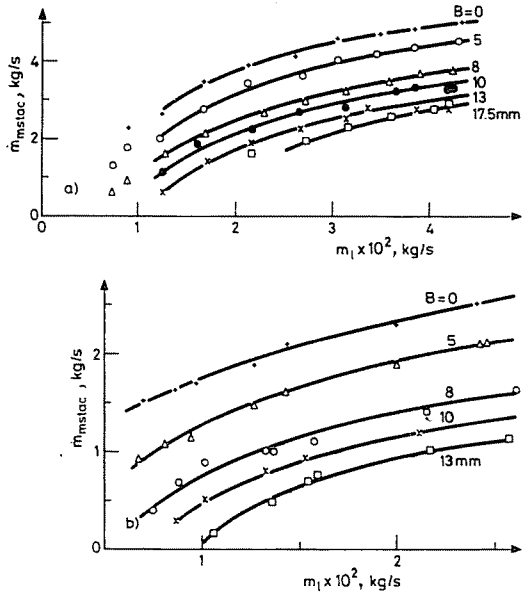


Abb. 6. Veränderung der Förderleistung in Funktion des Luftmassendurchsatzes. Förderrohr: a) $D = 38$ mm; $L = 45$ m, b) $D = 27$ mm; $L = 72$ m. Parameter ist die in das Regelungsrohr eingebaute Blende (B)

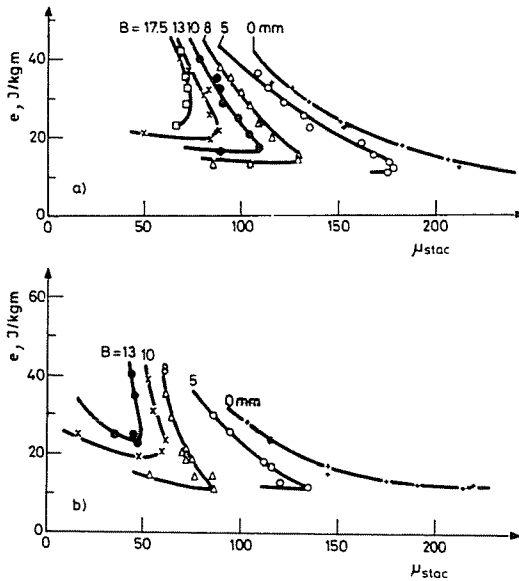


Abb. 7. Spezifischer Energieverbrauch der Förderung in Funktion des Mischungsverhältnisses. Parameter ist die in das Regelungsrohr eingebaute Blende (B). Förderrohr: a) $D = 38$ mm; $L = 45$ m, b) $D = 27$ mm; $L = 72$ m

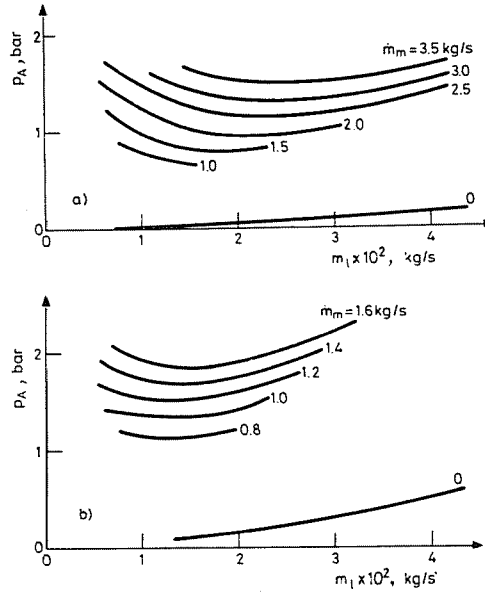


Abb. 8. Überdruck am Förderrohranfang in Funktion des Luftmassendurchsatzes. Parameter ist die Förderleistung. a) $D=38$ mm; $L=45$ m, b) $D=27$ mm; $L'=0-45$ m, $D'=38$ mm; $L=45-72$ m

Der spezifische Energiebedarf der kontinuierlichen Einrichtung:

$$e = \frac{P_{\text{pol stat}}}{\dot{m}_{m \text{ stat}} \cdot L} \quad (\text{J/kg} \cdot \text{m})$$

Spezifische Energiewerte des kontinuierlichen Betriebes (dies entspricht den momentan erreichbaren Werten in dem stationären Zeitintervall der gestaffelten Förderung) zeigt Abb. 7 in Funktion des Mischungsverhältnisses. Parameter: die in das Regelungsrohr eingebaute Blende (B).

Abb. 8 zeigt die Überdrücke am Förderrohranfang (p_A) in Funktion des Massendurchsatzes (\dot{m}_{11}) der Luft. Parameter: die mit der ins Regelungsrohr eingebauten Blende veränderbare Förderleistung. Die Werte des Druckabfalls im Leerlauf ($\dot{m}_m = 0$) sind unbedeutend.

Berechnung der Drücke

Mit der pneumatischen Druckgefäß-Fördereinrichtung wird Dichtstromförderung durchgeführt ($\mu > 30$). Bei solcher Förderung entsteht im Förderrohr dem atmosphärischen Druck bedeutend überlegener Druck,

darum ist im Rohr die Expansion der Luft auch bedeutend. Längs der Rohrlänge muß mit der Druckveränderung auch die Veränderung der Luftgeschwindigkeit und der Luftdichte berücksichtigt werden. Abb. 9 zeigt längs der Förderrohrlänge gemessene Druckwerte bei Flugaschenförderung.

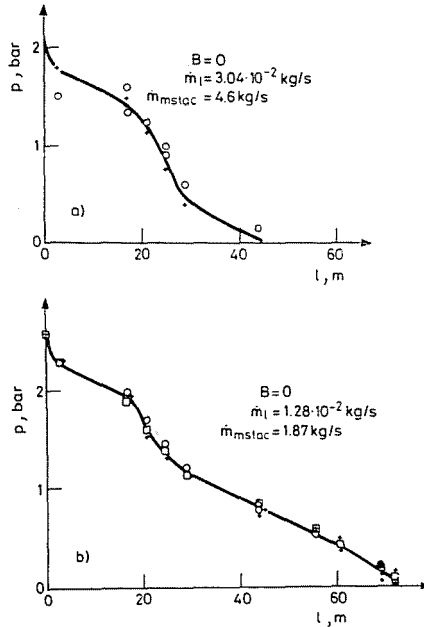


Abb. 9. Die längs der Förderrohrlänge gemessenen Drücke (Überdruck) a) $D = 38$ mm; $L = 45$ m, b) $D = 27$ mm; $L' = 0 - 45$ m; $D' = 38$ mm; $L = 45 - 72$ m

Die Berechnung des Drucks — ausgehend von Pattantyús' Prinzipien [1] — kann auf Grund der auf die Feststoffwolke wirkenden Kräfte [2], [3] erfolgen. Demzufolge kann der auf die elementare Länge des Förderrohrs (dl) fallende Druckabfall als Summe des Leerlaufdruckabfalls und des bei der Förderung entstandenem zusätzlichen Druckabfalls berechnet werden:

$$dp = dp_0 + dp_z.$$

Der Leerlauf-Druckabfall:

$$dp_0 = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{v_l^2}{2} \cdot \rho_l \cdot dl.$$

Sein Wert ist im Verhältnis zum zusätzlichen Druckabfall in der Regel vernachlässigbar.

Der zusätzliche Druckabfall ergibt sich aus dem Heben, dem Stoß und der Reibung der Feststoffwolke, [3]:

$$dp_z = dp_h + dp_s + dp_r.$$

Die Druckanteile längs der elementaren Rohrlänge:
Druckabfall zum Heben des Feststoffgewichtes:

$$dp_h = k_h \frac{\dot{m}_m g}{v_m A} dl.$$

Im Falle des vertikalen Förderrohrs ist der Hebebeiwert $k_h = 1$, im Falle des horizontalen Förderrohrs aber $k_h = 0$.

Der Druckabfall zufolge des Stoßes:

$$dp_s = \frac{k_s}{D} \frac{\dot{m}_m v_m}{A} dl,$$

wobei k_s Stoßbeiwert ein Materialkennzeichen ist.

Der durch Reibung entstandene Druckabfall:

$$dp_r = k_r \frac{\dot{m}_m g}{v_m A} \cdot dl,$$

wobei k_r Reibungsbeiwert, ebenfalls Materialkennzeichen.

Aus den längs der Rohrlänge entstandenen Drücken ausgegangen, isothermische Expansion vorausgesetzt, weiterhin angenommen, daß die Geschwindigkeit des Feststoffes mit der Luftgeschwindigkeit identisch ist ($v_m = v_l = v$), ferner den Leerlauf-Druckabfall und den zur Beschleunigung des Feststoffes notwendigen Druckabfall vernachlässigt, kann der Druck am Anfang des Förderrohrs berechnet werden (p_A):

$$p_A = p_E \sqrt{(a+1) e^{bL} - a}$$

wo: p_E = der Enddruck des Förderrohrs

$a = Fr_E^2 \cdot k_s / (k_r + k_h)$, zusammengesetzter Ausdruck

$Fr_E = v_E / \sqrt{gD}$: Froude-Zahl aus der Luftgeschwindigkeit (v_E) am Ende des Förderrohrs berechnet,

$b = 2(k_r + k_h) g \mu \rho_{lE} / p_E$, zusammengesetzter Ausdruck

ρ_{lE} = Luftdichte am Ende des Förderrohrs

k_h, k_r, k_s : das Fördergut kennzeichnende Beiwerte, deren Werte in Bezug auf Flugasche laut unserer Experimenten:

$k_s = 0,001 - 0,002$ bei horizontalem Rohr;

$k_s = 0,003 - 0,005$ bei vertikalem Rohr.

$k_r = 0,3 - 0,5$

$k_h = 1$ bei vertikalem Rohr; $k_h = 0$ bei horizontalem Rohr.

Der im Förderrohr entstehende Druck kann mittels obigem Druckberechnungs-Zusammenhang so in Labor-Einrichtungen, wie auch im Falle bei Förderröhren von Betriebsgrößenordnungen ermittelt werden. Bei der Anwendung des Zusammenhanges kann aus dem bekannten Enddruck des Förderrohrs ausgegangen werden (dies ist in der Regel der atmosphärische Druck) und die Berechnung kann auf horizontale, vertikale, bzw. auf durch Querschnittveränderungen abgesonderte Teilstrecken auf die in ihren Anfangspunkten notwendigen Drücke bezogen werden.

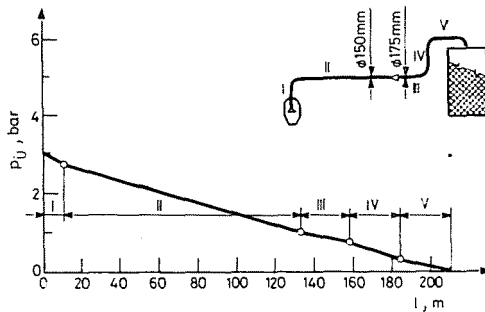


Abb. 10. Der Druck in Funktion der Förderrohrlänge bei Betriebseinrichtungen

Abb. 10 stellt die Druckwerte längs der Förderleitung einer Betriebseinrichtung von $D = 150$ mm Durchmesser und $L = 132$ m Länge dar, welche sich in ihrer Fortsetzung auf $D = 175$ mm Durchmesser erweitert, bzw. auf eine Gesamtlänge von $L = 210$ m verlängert. Die berechneten Druckwerte übereinstimmen mit den gemessenen Werten gut.

Angewandte Bezeichnungen

A (m ²)	Querschnitt des Förderrohrs
B (mm)	Durchmesser der ins Regelungsrohr eingebauten Blendeöffnung
D (m)	Durchmesser des Förderrohrs
E (J)	Energie
e (J/m · kg)	spezifischer Energieverbrauch
$Fr = v/\sqrt{gD}$	Froud'sche Zahl

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	Gravitationsbeschleunigung
k_h, k_r, k_s	Hebungs-, Reibungs-, Stoßbeiwert
$L, l \text{ (m)}$	Förderentfernung
$m_m \text{ (kg)}$	Fördergutmasse
$\dot{m}_i \text{ (kg/s)}$	Luftdurchsatz
$\dot{m}_m \text{ (kg/s)}$	Materialdurchsatz (Förderleistung)
n	Exponent der polytropen Zustandsveränderung
$P \text{ (W)}$	Leistung
$p \text{ (Pa)}$	Druck
$t, T \text{ (s)}$	Zeit
$\dot{V}_i \text{ (m}^3\text{/s)}$	Volumendurchsatz der Luft
$v_i \text{ (m/s)}$	Luftgeschwindigkeit
$v_m \text{ (m/s)}$	Materialgeschwindigkeit
λ	Rohrwandreibungsbeiwert
$\mu = \dot{m}_m / \dot{m}_i$	Mischungsverhältnis
$\rho_i \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Luftdichte

Zusammenfassung

Mit der Weiterentwicklung des gestaffelt arbeitenden Druckgefäßförderers wurde eine kontinuierlich arbeitende und mit einem Regulierrohr ausgestattete Fördereinrichtung entwickelt. Zur Berechnung des im Förderrohr entstandenen Druckabfalls — ausgehend von Pattantyús' Prinzipien [1] — wurde ein durch experimentelle Forschungsergebnisse gerechtfertigter, allgemein anwendbarer Zusammenhang aufgeschrieben.

Literatur

1. PATTANTYÚS, Á. G.: Pneumatic Conveying. Acta Technica 8, 129 (1954).
2. PÁPAI, L.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der pneumatischen Förderung. Period. Polytechn. Mech. Eng. 19, 23 (1975).
3. PÁPAI, L.: Pneumatikus és fluidizációs anyagmozgatás. BME Továbbképző Intézet, Budapest, 1977.
4. PÁPAI, L.—VÁRADI S.: Regulierungsmöglichkeiten bei pneumatischen Behälterschleusen. Wissenschaftliche Zeitschrift der T. H. Magdeburg. 25, 77 (1981).
5. PAJER, G., KUNT, H., KUHR, F.: Stetigförderer. Berlin, 1976.
6. VÁRADI, S.: Nyomótartályos pneumatikus szállítóberendezés szabályozása. Dissertation. Budapest, 1981.
7. PÁPAI, L.: Druckberechnung für pneumatische Dichtstromförderung. Period. Polytechn. Mech. 26, 91 (1982).

Prof. Dr. László PÁPAI 1521 Budapest