ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1975

Seria: Mechanika z. 54 Nr kol. 438

Zbigniew Piątkiewicz
Instytut Odlewnictwa Politechniki Śląskiej

WYNIKI BADAŃ I ANALIZA PRACY TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO PIASKU I BENTONITU

Streszczenie. W pracy podano wyniki badań transportu pneumatycznego piasku i bentonitu. Na podstawie otrzymanych wyników badań przeprowadzono analizę poszczególnych składowych poboru i strat mocy w stosunku do mocy użytecznej. Ocenę ekonomiczności pracy badanego transportu dokonano na podstawie wskaźnika sprawności energetycznej i poboru mocy, niezbędnej do przemieszczania jednostki masy materiału transportowanego.

Podstawowymi kryteriami oceny ekonomiczności pracy transportu pneumatycznego są:

1. Wskaźnik sprawności energetycznej [1], określony stosunkiem mocy użytecznej P_u do mocy dostarczonej czynnikowi transportującemu P_G;

$$n = \frac{P_u}{P_G} = \frac{g \cdot \dot{M}_c \cdot x}{\dot{V}_g \cdot \Delta_p} \tag{1}$$

gdzie:

$\dot{M}_c$ [kg/s] - masowe natężenie przepływu materiału,
x [m] - droga transportu,
g [m/s^2] - przyspieszenie grawitacyjne,
Δp [N/m^2] - sumaryczny spadek ciśnienia instalacji,
$\dot{V}_G = \frac{\dot{M}_c}{\mu \cdot \rho_G}$ [m^3/s] - objętościowe natężenie przepływu masy nośnika (gazu)

$$\mu = \frac{\dot{M}_c}{\dot{M}_G} \text{ [kg/kg]} \tag{2}$$

masowa koncentracja mieszaniny
ρ_G [kg/m^3] - gęstość nośnika.

2. Wskaźnik poboru energii [2] wyrażający pracę (J, kWh) niezbędną do przemieszczania jednostki masy (kg, Mg) na daną odległość (m, km). Wskaź-

nik poboru energii, określamy stosunkiem mocy dostarczonej czynnikowi transportującemu P_G do masowego natężenia przepływu materiału $\dot{M}_c$;

$$N = \frac{P_G}{\dot{M}_c} \left[J/kg\right] \tag{3}$$

gdzie:

$$P_G = L \cdot \dot{V}_{GN} \left[W\right] \tag{4}$$

$$L = \frac{k}{k-1} \cdot p_{ap} \left[\left(\frac{p_{ak}}{p_{ap}}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right] \left[J/m^3\right] \tag{5}$$

jest jednostkową pracą przy kompresji adiabatycznej 1 m^3 gazu,

p_{ap}, p_{ak} $\left[N/m^2\right]$ - absolutne ciśnienie powietrza przed i po sprężaniu adiabatycznym,

k - 1,4 - - wykładnik adiabaty,

$\dot{V}_{GN}$ $\left[m^3/s\right]$ - - objętościowe natężenie przepływu gazu sprowadzone do warunków normalnych (T_N = 273,16 K, p_N = 760 mm Hg).

Doświadczalnie natężenie przepływu gazu wyznacza się na ogół przy pomocy zwężek mierniczych, korzystając ze wzorów:

$$\dot{V}_G = \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot A_t \cdot \sqrt{\Delta p/\varrho_G} \left[m^3/s\right] - \tag{6}$$

objętościowe natężenie przepływu gazu w warunkach pomiarów,

gdzie:

$\alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon$ - wartości odczytane z tablic,

A_t $\left[m^2\right]$ - przekrój otworu zwężki w temperaturze T = 283 K,

Δ_p $\left[N/m^2\right]$ - mierniczy spadek ciśnienia,

ϱ_G $\left[kg/m^3\right]$ - gęstość nośnika w warunkach pomiaru.

Przeliczenie zmierzonego objętościowego natężenia przepływu na stan normalny dokonujemy posługując się wzorem:

$$\dot{V}_{GN} = \dot{V}_G \left(\frac{p_a - \varphi \cdot p_{nas}}{p_N}\right) \frac{T_N}{T} \left[m^3/s\right] \tag{7}$$

gdzie:

p_a $\left[N/m^2\right]$ - ciśnienie absolutne przed zwężką,

p_{nas} $\left[N/m^2\right]$ - ciśnienie pary nasyconej w temperaturze T,

φ $\left[\%\right]$ - wilgotność względna gazu.

Rozpatrując bilans energetyczny na prostym odcinku przewodu transportowego (przy założeniu że ruch jest ustalony i prędkość na tej drodze nie

zmienia się) można stwierdzić, że podczas przepływu solgazu moc dostarczona czynnikowi transportującemu jest sumą mocy niezbędnej do pokonywania oporów przepływu [3];

$$P_G = F_{GR} \cdot w + F_{Ch} \cdot c + F_{CR} \cdot c + F_{CC} \cdot c + (F_{Ch} + F_{CR} + F_{CC})(w-c) \qquad (9)$$

gdzie:

w, c [m/s] - średnia prędkość gazu i materiału wzdłuż osi przewodu transportowego,

F [N] - siły tarcia; indeksy = GR - gazu o ścianki rurociągu, Ch- podnoszenia materiału, GR - materiału o ścianki rurociągu, CC - tarcia i wzajemnych zderzeń cząstek materiału.

Siła tarcia między przepływającym gazem i ściankami przewodu wyraża się zależnością:

$$F_{GR} = A \cdot \Delta p_{GR} = A \cdot \lambda_{GR} \cdot \frac{x}{d} \cdot \frac{\varrho_G \cdot w^2}{2} \; [N] \qquad (9)$$

Wprowadzając do równania (9) zależności:

$$\dot{M}_G = \varrho_G \cdot w \cdot A = const, \; \mu = \frac{\dot{M}_c}{\dot{M}_G}; \quad w = F_{rG} \sqrt{g \cdot d};$$

i uporządkowując, otrzymuje się:

$$F_{GR} = \lambda_{GR} \cdot \frac{F_{rG}^2}{2 \cdot \mu \cdot w} \cdot g \cdot \dot{M}_c \, , \; x \; [N] \qquad (10)$$

gdzie:

$F_{rG} = w/\sqrt{g \cdot d}$ - liczba Frouda,

λ_{GR} - liczba tarcia przepływającego gazu przez rurociąg.

Przy przepływie gazu przez rurociągi hydrauliczne gładkie, do których można zaliczyć rurociągi transportu pneumatycznego po krótkim czasie pracy, liczba tarcia jest funkcją liczby Reynoldsa. Dla przepływu burzliwego liczbę tarcia wyznacza się z zależności podanej przez Prandtla [4, 5]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{GR}}} = 2 \cdot \lg(R_e \cdot \sqrt{\lambda_{GR}}) - 0,8 \qquad (11)$$

gdzie:

$$R_e = \frac{d \cdot w \cdot \varrho_G}{\eta} \text{ - liczba Reynoldsa,} \tag{12}$$

d [m] - średnica rurociągu transportowego,
η [N.s/m^2] - dynamiczny współczynnik lepkości gazu.

S i ł a t a r c i a, w y n i k a j ą c a z e z m i a n e n e r g i i p o t e n c j a l n e j p o d c z a s p o d n o s z e n i a m a t e r i a ł u

Siła tarcia wywołana ciężarem własnym cząsteczki, działająca w kierunku osi rurociągu, wynosi:

$$F_{Ch} = m_c \cdot g \cdot \sin\alpha, \tag{13}$$

gdzie:
m_c [kg] - masa cząsteczki,
α - kąt pochylenia osi rurociągu w stosunku do płaszczyzny poziomej.

W warunkach ruchu ustalonego przy założeniu, że prędkość solgazu na drodze nie zmienia się oraz występuje równomierny rozkład cząstek w rurociągu, można napisać że:

$$m_c = \dot{\varrho}_c \cdot x_h \cdot A; \quad \dot{M}_c = \dot{\varrho}_c \cdot c \cdot A,$$

a stąd:

$$m_c = \frac{\dot{M}_c \cdot x_h}{c}$$

Wówczas zależność (13) otrzymuje postać:

$$F_{Ch} = \frac{\sin\alpha}{c} \cdot g \cdot \dot{M}_c \cdot x_h \text{ [N]} \tag{14}$$

Równanie (14) pomnożone przez $\frac{2 \cdot F_{rc}^2 \cdot A}{2 \cdot F_{rc}^2 \cdot A}$ po uwzględnieniu zależności: $\dot{M}_c = \dot{\varrho}_c \cdot c \cdot A$; $F_{rc} = c/\sqrt{g \cdot d}$; i uporządkowaniu, otrzymuje postać:

$$F_{Ch} = A \cdot \Delta p_{Ch} = A \cdot \lambda_{Ch} \cdot \frac{x_h}{d} \cdot \frac{\dot{\varrho}_c \cdot c^2}{2} \text{ [N]}, \tag{15}$$

gdzie:
A [m^2] - przekrój rurociągu transportowego,
Δp_{Ch} [N/m^2] - spadek ciśnienia wywołany zmianą energii potencjalnej podczas podnoszenia materiału,

x_h [m] – droga transportu na odcinku pionowym,

c [m/s] – średnia prędkość materiału wzdłuż osi rurociągu,

$\dot{\varrho}_c = \frac{\dot{M}_c}{c \cdot A}$ [kg/m³] – średnia gęstość masy unoszących cząstek w rurociągu,

$\lambda_{Ch} = \frac{2 \cdot \sin\alpha}{F_{rc}^2}$ – współczynnik oporów przepływu wywołany przez podnoszenie materiału. Zależy on przede wszystkim od liczby Frouda $F_{rc} = c/\sqrt{g \cdot d}$; oraz od kąta α – nachylenia rurociągu w stosunku do płaszczyzny poziomej.

S i ł a t a r c i a m i ę d z y t r a n s p o r t o w a n y m m a t e r i a ł e m a ś c i a n k a m i r u r o c i ą g u

Cząstki materiału przemieszczane strumieniem powietrza uderzają o wewnętrzne powierzchnie rurociągu transportowego. W punktach styku ze ścianką rurociągu powstają siły tarcia, hamujące ruch cząsteczek. Siłę tarcia wywołaną uderzeniami cząstek o ścianki z uwzględnieniem kąta pochylenia, określa zależność;

$$F_{CR} = \lambda_{CR} \cdot m_c \cdot g \cdot \cos\alpha = \lambda_{CR} \cdot \frac{\cos\alpha}{c} \cdot g \cdot \dot{M}_c \cdot x \ [N] \qquad (16)$$

Równanie (16) pomnożone przez $\frac{2 \cdot F_{rc}^2 \cdot A}{2 \cdot F_{rc}^2 \cdot A}$ po uwzględnieniu zależność; $\dot{M}_c = \dot{\varrho}_c \cdot c \cdot A = const$; $F_{rc} = c/\sqrt{g \cdot d}$; oraz uporządkowaniu, sprowadza się do postaci:

$$F_{CR} = A \cdot \Delta p_{CR} = A \cdot \lambda^*_{CR} \cdot \frac{x}{d} \cdot \frac{\dot{\varrho}_c \cdot c^2}{2} \ [N] \qquad (17)$$

gdzie:

Δp_{CR} [N/m²] – spadek ciśnienia wywołany tarciem materiału o wewnętrzne powierzchnie rurociągu transportowego,

$\lambda^*_{CR} = \frac{2 \cdot \lambda_{CR} \cdot \cos\alpha}{F_{rc}^2}$ – współczynnik oporów, wywołany tarciem materiału o wewnętrzne powierzchnie rurociągu transportowanego.

Zależy on przede wszystkim od liczby Frouda F_{rc} współczynnika tarcia λ_{CR} i kąta pochylenia rurociągu α.

Współczynnik tarcia λ_{CR}, tj. tarcia transportowanego materiału o wewnętrzne ścianki rurociągu, uwzględnia prędkość przepływu materiału i częstotliwość uderzeń cząstek o ścianki rurociągu.

S i ł ę t a r c i a i w z a j e m n y c h z d e r z e ń c z ą s t e c z e k p o d c z a s i c h p n e u m a t y c z n e g o p r z e m i e s z c z a n i a o k r e ś l a z a l e ż n o ś ć:

$$F_{CC} = \lambda_{CC} \cdot m_c \cdot g = \frac{\lambda_{CC}}{c} \cdot g \cdot \dot{M}_c \cdot x \ [N] \qquad (18)$$

Równanie (18) pomnożone przez $\frac{2 \cdot F_{rc}^2 \cdot A}{2 \cdot F_{rc}^2 \cdot A}$ po uwzględnieniu zależności: $\dot{M}_c = \dot{\varrho}_c \cdot c \cdot A = const.$; $F_{rc} = c/\sqrt{g \cdot d}$; oraz uporządkowaniu, otrzymuje postać:

$$F_{CC} = A \cdot \Delta p_{cc} = A \cdot \lambda^*_{cc} \cdot \frac{x}{d} \cdot \frac{\dot{\varrho}_c \cdot c^2}{2} \; [N] \tag{19}$$

gdzie:

Δp_{cc} $[N/m^2]$ – spadek ciśnienia wywołany przez tarcie i wzajemne uderzenie cząsteczek,

$\lambda^*_{cc} = \frac{2 \cdot \lambda_{cc}}{F_{rc}^2}$ – współczynnik oporów, wywołany tarciem i wzajemnymi zderzeniami cząsteczek.

Wartość współczynnika oporów λ^*_{cc} w ogólnej postaci można wyrazić: $\lambda^*_{cc} = f(F_{rc} \cdot \frac{d}{d_c}$, własności materiału) i jest wyznaczana doświadczalnie.

W równaniach (10), (14), (16), (18) wartości $g \cdot \dot{M}_c \cdot x$ wyrażają moc użyteczną, zużywaną na przemieszczanie materiału. We wzorze (8) składnik mocy $(F_{Ch} + F_{CR} + F_{CC}) \cdot (w-c)$ określa stratę mocy na pokonywanie sił tarcia między przepływającym gazem i transportowanym materiałem $(w > c)$ i wynika z różnicy całkowitej mocy $(F_{Ch} + F_{CR} + F_{CC}) \cdot w$ – zużywanej na przemieszczanie materiału i mocy $(F_{Ch} + F_{CR} + F_{CC}) \cdot c$ – bezpośrednio przekazywanej materiałowi transportowanemu. Stosunek mocy P_G dostarczonej czynnikowi transportującemu do mocy użytecznej Pu, po uwzględnieniu równań (10), (14), (16) i (18) wynosi;

$$K = \frac{P_G}{P_u} = \lambda_{GR} \cdot \frac{F_{rG}^2}{2 \cdot \mu} + \sin\alpha + \lambda_{CR} \cdot \cos\alpha + \lambda_{cc} +$$

$$+ (\sin\alpha + \lambda_{CR} \cdot \cos\alpha + \lambda_{cc}) \cdot (w - c) \tag{20}$$

Wartość K określa sumę współczynników oporów podczas stabilnego przepływu solgazu, bez uwzględnienia lokalnych strat w instalacji.

Analiza wyników badań transportu pneumatycznego tłoczącego

Wyniki badań i obliczeń zasadniczych parametrów podano w tablicy 1, na podstawie których przeprowadzono analizę na przykładzie transportu piasku.

Tablica 1

Wyniki badań transportu piasku i bentonitu

Materiał badany	d mm	x/x_z mm	V m^3	$\dot{M}_c$ kg/s	M_{c1} kg/s	M_{c1} Mg/h	$\dot{M}_G$ kg/s	$\dot{V}_{GN}$ m^3/s	μ kg/kg	V_N m^3/Mg	P_{n1} 10^5 N/m^2	P_{n2} 10^5 N/m^2	P_{n3} 10^5 N/m^2	Uwagi
Piasek kwarcowy o frakcji głównej 40/50/70	100	110/190	2,5	9,58	9,33	33,6	0,469	0,362	20,4	38,8	3,43	2,26	0,18	Urządz. załad. podajnik kom. 5 łuków 90° R=1,0 m 6,5 m odc. pionowy
Bentonit jugosłowiański	100	110/190	2,5	16,94	16,11	58,0	0,516	0,378	32,8	23,5	3,38	2,45	0,15	"

d - średnica rurociągu transportowego; X - droga transportu na odcinkach prostych; X_z - droga transportu z uwzględnieniem łuków; V - objętość użyteczna podajnika komorowego; $\dot{M}_c$ - masowe natężenie przepływu materiału podczas pracy instalacji; $\dot{M}_{c1}$ - masowe natężenie przepływu materiału z uwzględnieniem rozruchu i przedmuch instalacji; $\dot{M}_G$ - masowe natężenie przepływu powietrza podczas pracy instalacji; $\dot{V}_{GN}$ - objętościowe natężenie przepływu powietrza podczas pracy instalacji sprowadzone do warunków normalnych; μ - masowa koncentracja mieszaniny; V_N - zużycie powietrza (sprowadzone do warunków normalnych) na megagram przetransportowanego materiału; p_n - nadciśnienia; indeksy; 1 - ciśnienie zasilania tj. przed podajnikiem komorowym, 2 - na początku rurociągu transportowego, 3 - na końcu rurociągu transportowego.

1. Moc użyteczna

$$P_u = g \cdot \dot{M}_c \cdot x_z = 9{,}81 \cdot 9{,}58 \cdot 1{,}90 = 17{,}856 \cdot 10^3 \text{ W}$$

2. Moc dostarczona czynnikowi transportującemu (4) dla

$\dot{V}_{GN} = 0{,}362 \text{ m}^3/\text{s}$; $p_{ap} = 1{,}01 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$:

2.1. Sumaryczna moc pobierana przez całą i stalację przy

$p_{a1} = 4{,}44 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ wynosi $P_G = 67{,}44 \cdot 10^3$ W,

2.2. Moc pobierana wskutek przepływu solgazu przez rurociąg transportowy, przy

$p'_{a2} = p_{a2} - p_{a3} = 2{,}08 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ wynosi $P'_G = 29{,}3 \cdot 10^3$ W,

2.3. Moc pobierana wskutek przepływu samego powietrza przez rurociąg transportowy:

- spadek ciśnienia wskutek przepływu powietrza (9) bez uwzględnienia ekspansji

$$\Delta p^*_{GR} = \lambda_{GR} \cdot \frac{X_z}{d} \cdot \frac{\varrho_{G2} \cdot w_2^2}{2} = 0{,}13 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2,$$

gdzie:

ϱ_{G2} – gęstość powietrza na początku układu transportowego dla $p_{a2} = 3{,}27 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$,

$\varphi = 93\%$, $T_2 = 287$ K, $p_{nas} = 1597{,}4 \text{ N/m}^2$,

$\varrho'' = 0{,}0012 \text{ kg/m}^3$, $\varrho_N = 1{,}276 \text{ kg/m}^3$,

$p_N = 1{,}01 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, $T_N = 273{,}16$ K,

wynosi:

$$\varrho_{G2} = \varrho_N \left(\frac{p_{a2} - \varphi \cdot p_{nas}}{p_N}\right) \frac{T_N}{T_2} + \varphi \cdot \varrho'' = 3{,}867 \text{ kg/m}^3 \tag{21}$$

w_2 – prędkość powietrza na początku rurociągu dla $\dot{M}_G = 0{,}469$ kg/s, $A = 78{,}54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ wynosi:

$$w_2 = \frac{\dot{M}_G}{A \cdot \varrho_{G2}} = 15{,}4 \text{ m/s} \tag{22}$$

λ_{GR} - liczba tarcia (11) dla $\eta_t = 16,749 \cdot 10^{-6}$ Ns/m^2, $R_e = 318776$ (12) wynosi: $\lambda_{GR} = 0,015$.

Stosunek spadku ciśnienia bez uwzględnienia ekspansji powietrza do ciśnienia na początku rurociągu transportowego:

$$\frac{\Delta p^*_{GR}}{p_{n2}} = \frac{0,13 \cdot 10^5}{2,26 \cdot 10^5} = 0,0575$$

Stosunek rzeczywistego spadku ciśnienia, tj. z uwzględnieniem ekspansji powietrza do ciśnienia na początku rurociągu transportowego:

$$\frac{\Delta p_{GR}}{p_{n2}} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta p^*_{GR}/p_{n2}} = 0,06$$

Całkowity spadek ciśnienia wskutek przepływu powietrza, tj. z uwzględnieniem ekspansji, wynosi

$$\Delta p_{GR} = 0,06 \cdot p_{n2} = 0,1356 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Wartość Δp_{GR} jest większa o około 4,3% od wartości Δp^*_{GR}, obliczonej bez uwzględnienia strat ciśnienia w wyniku ekspansji.

Moc pobierana wskutek przepływu samego powietrza przez rurociąg transportowy z uwzględnieniem ekspansji:

przy $p_{ak} = (0,1356 + 1,01)10^5 = 1,1456 \cdot 10^5$ N/m^2

wynosi $P''_G = 4,73 \cdot 10^3$ W.

3. Moc pobieraną przez materiał transportowany P'''_G wyrażamy różnicą mocy pobieranej wskutek przepływu solgazu P'_G a mocą pobieraną wskutek przepływu samego powietrza P''_G;

$$P'''_G = P'_G - P''_G = (29,3 - 4,73) \cdot 10^3 = 24,57 \cdot 10^3 \text{ W}.$$

4. Stosunek mocy dostarczonej czynnikowi transportującemu P_G do mocy użytecznej P_u (20) oraz strata mocy $P_s = P_u (K-1)$;

4.1. dla całej instalacji:

$$K = \frac{P_G}{P_u} = \frac{67,44 \cdot 10^3}{17,856 \cdot 10^3} = 3,777;$$

$$P_s = P_u (K-1) = 17,856 \cdot 10^3 (3,777 - 1) = 49,584 \cdot 10^3 \text{ W},$$

4.2. dla rurociągu transportującego przy przepływie solgazu:

$$K' = \frac{P'_G}{P_u} = 1{,}64; \quad P'_s = P_u(K' - 1) = 11{,}444 \cdot 10^3 \text{ W},$$

4.3. dla rurociągu transportowego przy przepływie samego powietrza:

$$K'' = \frac{P''_G}{P_u} = 0{,}265; \quad P''_s = P_u(K'' - 1) = 4{,}73 \cdot 10^3 \text{ W}.$$

5. Stosunek mocy dostarczonej materiałowi transportowemu P'''_G do mocy użytecznej P_u oraz strata mocy $P'''_s = P_u(K''' - 1)$:

$$K''' = \frac{P'''_G}{P_u} = 1{,}376; \quad P'''_s - P_u(K''' - 1) = 6{,}714 \cdot 10^3 \text{ W}.$$

6. Średnia prędkość powietrza i wartość liczby Frouda w rurociągu transportowym:

$$w_{śr} = \frac{\dot{M}_G}{A \cdot \varrho_{śr}} = \frac{0{,}469}{78{,}54 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}635} = 22{,}6 \text{ m/s},$$

gdzie:

$\varrho_{śr} = 2{,}635$ kg/m^3 – średnia gęstość powietrza w rurociągu transportowym przy: $2p_{śr} = p_{a2} + p_{a3} = 4{,}46 \cdot 10^5$ N/m^2, $\varphi = 93\%$; $T = 287$ K,

$$Frw_{śr} = w_{śr}/\sqrt{g \cdot d} = 22{,}8$$

7. Zużycie powietrza (sprowadzone do warunków normalnych) na megagram przetransportowanego materiału:

dla $\dot{M}_{c1} = 9{,}33$ kg/s; $\dot{V}_{GN} = 0{,}362$ m^3/s; $V_N = 28{,}8$ m^3/Mg.

8. Wskaźnik poboru energii (3):

8.1. dla całej instalacji

$$N = \frac{P_G}{\dot{M}_{c1}} = \frac{67{,}44 \cdot 10^3}{9{,}33} = 7{,}228 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot 190 \text{ m} = 2{,}008 \text{ kWh/Mg} \cdot 190 \text{ m},$$

8.2. dla rurociągu transportowego przy przepływie solgazu:

$$N' = \frac{P_G}{\dot{M}_c} = \frac{29,3 \cdot 10^3}{9,58} = 3,058 \cdot 10^3 \text{ J/kg.190 m} = 0,849 \text{ kWh/Mg.190 m}$$

9. Wskaźnik sprawności energetycznej (1):

9.1. dla całej instalacji:

$$n = \frac{P_u}{P_G} = \frac{17,856 \cdot 10^3}{67,44 \cdot 10^3} = 0,265,$$

9.2. dla rurociągu transportowego przy przepływie solgazu:

$$n' = \frac{P_u}{P'_G} = \frac{17,856 \cdot 10^3}{29,3 \cdot 10^3} = 0,609.$$

Korzystając z danych w tablicy 1, analogiczne parametry wyznaczono dla transportu bentonitu. Wyniki podano w tablicy 2 i 3.

Tablica 2

Parametry transportu piasku i bentonitu

Materiał badany	w_2 m/s	$w_{śr}$ m/s	F_{rw} –	$Frw_{śr}$ –	N kWh/Mg 190m	N' kWh/Mg 190m	n –	n' –
Piasek kwarcowy o frakcji głównej 40/50/70	15,4	22,6	15,5	22,8	2,008	0,849	0,265	0,609
Bentonit jugosłowiański	16,05	24,0	16,2	24,2	1,202	0,769	0,430	0,640

Uwaga! W tablicy 3 wartości podane w liczniku ułamka dotyczą transportu piasku, a wartości w mianowniku transportu bentonitu. wprowadzone oznaczenia $P_{G(ZR)} = P_{s(ZR)}$ w tablicy 3, oznaczają moc zużywaną przez urządzenie załadowcze i rozładowcze transportu pneumatycznego.

Tablica 3

Procentowe udziały mocy przy transporcie piasku i bentonitu

Rodzaj mocy			Składowe mocy					
Oznaczenie	%	$10^3 \cdot w$	Oznaczenie	%	$10^3 \cdot W$	Oznaczenie	%	$10^3 \cdot W$
$P_G = P_u + P_s$	100	$\frac{67,44}{69,75}$	P_u	$\frac{26,5}{43,0}$	$\frac{17,856}{30,027}$	P_s	$\frac{73,5}{57,0}$	$\frac{49,584}{39,723}$
$P_G = P'_G + P_{G(ZR)}$			P'_G	$\frac{43,3}{67,.}$	$\frac{29,3}{46,9}$	$P_{G(ZR)} = P_G - P'_G$	$\frac{56,6}{32,7}$	$\frac{38,14}{22,85}$
$P'_G = P''_G + P'''_G$	100	$\frac{29,3}{46,9}$	$P''_G = P''_S$	$\frac{16,1}{12,0}$	$\frac{4,73}{5,61}$	$P'''_G = P'_G - P''_G$	$\frac{83,9}{88,0}$	$\frac{24,57}{41,29}$
$P_s = P_G - P_u$ $P_s = P'_s + P_{s(ZR)}$	100	$\frac{49,584}{39,722}$	P'_s	$\frac{23,0}{42,4}$	$\frac{11,444}{16,872}$	$P_{S(ZR)} = P_s - P'_s$	$\frac{77,0}{57,6}$	$\frac{38,14}{22,85}$
$P'_s = P''_s + P'''_s$	100	$\frac{11,444}{16,87}$	$P''_s = P''_G$	$\frac{41,3}{33,2}$	$\frac{4,73}{5,61}$	$P'''_s = P'_s - P''_s$	$\frac{58,7}{66,8}$	$\frac{6,714}{11,26}$

Wnioski

Z przeprowadzonych badań i analizy transportu pneumatycznego piasku i bentonitu wynika:

Procentowy udział poszczególnych składników mocy, a w szczególności:

- w całej instalacji: przyjmując za 100% całkowitą moc P_G dostarczoną czynnikowi transportującemu wówczas:

$$P_{G(100\%)} = P_u\left(\frac{26,5\%}{43,4\%}\right) + P_s\left(\frac{73,5\%}{57,0\%}\right) = P'_G\left(\frac{43,4\%}{67,3\%}\right) + P_{G(ZR)}\left(\frac{56,4\%}{32,7\%}\right) -$$

przy transporcie $\left(\frac{\text{piasku}}{\text{bentonitu}}\right)$,

- w rurociągu transportowym: przyjmując za 100% C moc P'_G pobieraną wskutek przepływu solgazu wówczas:

$$P'_{G(100\%)} = P_G\left(\frac{16,1\%}{12,0\%}\right) + P_G\left(\frac{83,9\%}{88,0\%}\right) - \text{przy transporcie } \left(\frac{\text{piasku}}{\text{bentonitu}}\right).$$

Procentowy udział poszczególnych składników strat mocy:

- w całej instalacji: przyjmując za 100% całkowitą stratę mocy P_s wówczas:

$$P_{s(100\%)} = P'_s\left(\frac{23,0\%}{42,4\%}\right) + P_{s(ZR)}\left(\frac{77,0\%}{57,6\%}\right) - \text{przy transporcie } \left(\frac{\text{piasku}}{\text{bentonitu}}\right),$$

- w rurociągu transportowym: przyjmując za 100% stratę mocy P'_s przy przepływie solgazu wówczas:

$$P'_{s(100\%)} = P''_s\left(\frac{41,3\%}{33,2\%}\right) + P'''_s\left(\frac{58,7\%}{66,8\%}\right) - \text{przy transporcie } \left(\frac{\text{piasku}}{\text{bentonitu}}\right).$$

Wskaźnik sprawności energetycznej, określony stosunkiem mocy użytecznej P_u do mocy dostarczonej czynnikowi transportującemu P_G, wynosi:

- dla całej instalacji: $n = \frac{0,265}{0,430}$ przy transporcie $\frac{\text{piasku}}{\text{bentonitu}}$,
- dla rurociągu transportowego przy przepływie solgazu $n' = \frac{0,609}{0,640}$ przy transporcie $\frac{\text{piasku}}{\text{bentonitu}}$.

Wskaźnik poboru energii, określany stosunkiem mocy dostarczonej transportującemu P_G do masowego natężenia przepływu materiału $\dot{M}_c$ wynosi:

- dla całej instalacji: $N = \frac{2,008\ \text{kWh/Mg.190 m}}{1,202\ \text{kWh/Mg.190mm}}$ przy transporcie $\frac{\text{piasku}}{\text{bentonitu}}$
- dla rurociągu transportowego przy przepływie solgazu: $N' = \frac{0,849\ \text{kWh/Mg.190 m}}{0,769\ \text{kWh/Mg.190 m}}$ przy transporcie $\frac{\text{piasku}}{\text{bentonitu}}$.

Prędkość powietrza $w_2 = \frac{15,4\ \text{m/s}}{16,05\ \text{m/s}}$ i liczba Frouda $Frw_2 = \frac{15,5}{16,2}$ przy transporcie $\frac{\text{piasku}}{\text{bentonitu}}$, są wartościami minimalnymi, zapewniającymi stabilność przepływu solgazu przez unoszenie, przy ciężarowej koncentracji mieszaniny $\mu = \frac{20,4\ \text{kg/kg}}{32,8\ \text{kg/kg}}$ przy transporcie $\frac{\text{piasku}}{\text{bentonitu}}$.

LITERATURA

1. Dziadzia A.M.: Pnewmaticzeskij transport na zernopererabatywajuszicł predpiatiach. Moskwa, 1961.
2. Razumow J.M.: Psewdoożiżenie i pnewmotransport sypuczich materiałów, Moskwa, 1972.
3. Buhrhe H.: Hebezeuge und Fördermittel. 13, 7, 1973.
4. Kalinuszkin M.P.: Pnewmaziczeskij transport w stroitelstwe, Moskwa, 1961.
5. Barth W.Z.: Chemie-Ing.-Techn. 29, 9, 1957.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И АНАЛИЗ РАБОТЫ ПНЕВМОТРАНСПОРТА ПЕСКА И БЕНТОНИТА

Р е з ю м е

В работе приводятся результаты исследований пневмотранспорта песка и бентонита. На основании полученных результатов исследований был произведен анализ отдельных составляющих затребования и потери мощности в соотношении к полезной мощности. Оценку экономии работы иследуемого транспорта провели на основании показателя энергетической производительности и потребляемой мощности необходимой для перемещения единицы массы транспортируемого материала.

INVESTIGATION RESULTS AND OPERATION ANALYSIS OF THE PNEUMATIC HANDLING OF SAND AND BENTONITE

S u m m a r y

In the elaboration are given investigation results on pneumatic handling of sand and bentonite on the basis of the obtained results. On analysis has been made of the particular components of pawer input and loss in relation to power output. The economic ossessment of the tested handling system has been done on the basis of the watt hour efficiency index and power input necessary for accomodating material mass unit.