

Stefan LUBAŃSKI

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy
Budownictwa Górniczego "BUDOKOP"

BADANIA TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO
MOKRYCH MIESZANEK BETONOWYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono badania dotyczące pneumatycznego transportu poziomego mieszanek betonowych o małych zawartościach wody.

Scharakteryzowano warunki gwarantujące prowadzenie transportu bez zatykań przy równoczesnym zachowaniu wysokiej jakości układanego betonu.

Podano sposoby dobierania optymalnych parametrów transportu mieszanek betonowych o konsystencjach wilgotnych i gęstoplastycznych przy wykonywaniu betonu natryskowego.

Wprowadzenie

W Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Budownictwa Górniczego BUDOKOP sprawy pneumatycznego transportu mieszanek betonowych związane są bezpośrednio z wykonywaniem konstrukcji monolitycznych oraz betonu natryskowego w budownictwie podziemnym.

W ostatnich latach na coraz szerszą skalę stosuje się w budownictwie podziemnym pneumatyczny transport mokrych mieszanek betonowych, tzn. zawierających odpowiednią ilość wody zarobowej wymieszanej ze składnikami betonu przed transportem. Należy tu zaznaczyć, że ilość wody w mieszance betonowej jest tak dobierana, aby przy umiarkowanym zużyciu cementu otrzymać wysoką wytrzymałość betonu. Ilość wody w mieszance ma podstawowe znaczenie dla prawidłowej hydratacji cementu oraz dużej przyczepności w przypadku wykonywania betonu natryskowego. W praktyce do wykonywania betonu natryskowego stosuje się mieszanki betonowe o konsystencjach wilgotnych i gęstoplastycznych. Determinowane wymogami wytrzymałościowymi betonu własności mieszanek betonowych stwarzają istotne problemy związane z realizacją pneumatycznego transportu bez zatykań rurociągu.

Badania prowadzone przez OBR-BG wykazały jednak, że przy odpowiednio dobranych parametrach transportu pneumatycznego (ciśnienie początkowe, masowa koncentracja transportu), średnicach rurociągu oraz własnościach transportowanej mieszanki (skład ziarnowy, wilgotność) i odpowiednim obiegu sprężonego powietrza w układzie transportowym istnieją pełne możliwo-

ści wykonywania pneumatycznego transportu mieszanek betonowych o małych zawartościach wody, a więc umożliwiających wykonywanie betonu natryskowego.

Wyniki badań stanowiskowych [7], [8], [9] są aktualnie z powodzeniem wykorzystywane przy transporcie poziomym mokrych mieszanek betonowych zarówno w budownictwie podziemnym, jak i budownictwie przemysłowym i mieszkaniowym [11].

Charakterystyka przepływu pneumatycznego mokrych mieszanek betonowych

Problemy dotyczące pneumatycznego transportu rurowego mieszanek betonowych poruszane są w stosunkowo niewielu opracowaniach [4], [5], [18], przy czym należy zaznaczyć, że problemy te dotyczyły mieszanek o stosunkowo dużych ilościach wody, która zmniejsza opory przepływu, jednak z kolei w sposób istotny obniża jakość betonu po transporcie.

Obniżenie jakości betonu wynika zarówno z faktu dużej zawartości wody, jak i występującego w rurociągu tłocznym zjawiska rozwarstwienia mieszanki [5].

W szeregach konstrukcjach betonowych nie dopuszcza się obniżenia jakości betonu, które może wystąpić na skutek zastosowania transportu mieszanek betonowych rurociągami. Z tego względu problem transportu pneumatycznego mokrych mieszanek betonowych objęty został odpowiednimi badaniami. Badania wstępne wykazały, że przy konsystencjach wilgotnych i gęstoplastycznych, przy średnicach rurociągu do 100 mm, przy odpowiednio dobranych recepturach rozwarstwienie mieszanek po transporcie jest niewielkie, a spadek wytrzymałości betonu po transporcie jest minimalny [9].

Przy transporcie pneumatycznym mokrych mieszanek betonowych, podobnie jak innych materiałów, rozróżnia się trzy modele przepływu [15]:

- transport unoszony,
- transport pchany porcjowy,
- transport pchany ciągły.

W rzeczywistości najbardziej zbliżony do modelu przepływu jest transport pchany ciągły. Przy tego rodzaju transporcie sprężone powietrze wywołując nacisk na czołową powierzchnię mieszanki w całym przekroju poprzecznym rurociągów powoduje jej przemieszczanie w kierunku wylotu. Transport ten ze względu na bardzo duże opory przepływu jest w przypadku przepływu mieszanek betonowych o małych zawartościach wody rzadko stosowany.

Przy transporcie unoszonym ruch ziarn mieszanki odbywa się wskutek aerodynamicznego ich opływu przez strumień powietrza. Transport unoszony charakteryzuje się dużą niezawodnością przy materiałach sypkich i przy wysokim zużyciu sprężonego powietrza. Trzeba zaznaczyć, że przy transporcie unoszonym część ziarn przesuwana jest wzdłuż dolnej części rurociągu poziomego, co jest istotnym odstępstwem od modelu przepływu.

Rzeczywisty transport porcjowy znacznie odbiega od modelu transportu przyjmowanego w rozważaniach teoretycznych. Poszczególne porcje wprowadzane z podajnika do rurociągu ulegają w czasie transportu deformacji i rozwarstwieniu, a drobne frakcje mogą się poruszać w sposób unoszony. Poszczególne porcje mają również skłonność do łączenia się ze sobą, głównie w dolnej strefie rurociągu.

Zjawisko to jest w przypadku wykonywania natrysku korzystne, gdyż na końcu rurociągu uzyskuje się ciągły wypływ mieszanki o małej pulsacji. Stopień deformacji i rozwarstwienia mieszanek betonowych wraz z zawartością wody ujęto w pracach [5], [12].

Ze względu na potrzeby budownictwa podziemnego objęto badaniami pneumatyczny transport porcjowy mokrych mieszanek betonowych o konsystencjach wilgotnych i gęstoplastycznych.

Na przebieg i dobór odpowiednich parametrów pneumatycznego transportu mieszanek ziarnowych istotny wpływ mają takie właściwości, jak: gęstość i rozmiary ziarn, kształt, właściwości sprężyste i gładkość ziarn oraz skład granulacyjny. W przypadku transportu mokrych mieszanek betonowych na przebieg transportu zasadniczy wpływ ma również wilgotność mieszaniny związana z występowaniem wody jako składnika chemicznie aktywnego przy hydratacji cementu. Ilość wody w mieszance betonowej nie jest obojętna zarówno z punktu widzenia transportu pneumatycznego, jak i jakości betonu. Ilość ta powinna być tak dobierana, aby zapewnić prawidłowe uwodnienie cementu, transport bez zatykań oraz umożliwić dobre formowanie betonu [12].

Woda w mieszance betonowej jest również aktywna fizycznie, gdyż odgrywa w zależności od jej ilości rolę lepszycza względnie smaru. Przy małych nawilgoceniach mieszanki tarcie wewnętrzne jest znaczne, w związku z tym przemieszczanie ziarn względem siebie jest silnie hamowane. W ten sposób eliminowane jest zjawisko rozwarstwienia powodujące utratę jednorodności mieszanki betonowej w rurociągu, a tym samym obniżenie jakości betonu.

Wilgotność mieszanki betonowej (zależna od ilości wody) stanowi obok składu ziarnowego podstawowy czynnik wpływający na jakość betonu.

Ze znanych wzorów Abramsa [14]:

$$R_w = \frac{K_1}{K_2^{w/c}} \quad (1)$$

oraz Bolomeya (6)

$$R_w = A \left(\frac{1}{w/c} - 0,5 \right) \quad (2)$$

(gdzie: K_1 , K_2 są współczynnikami zależnymi od rodzaju kruszywa), wynika, że wytrzymałość betonu spada wraz ze wzrostem współczynnika wodno-cementowego w/c , którego wartość (przy stałej masie cementu) jest proporcjonalna do ilości wody. Wzrost ilości wody w mieszance betonowej wpływa

również na utratę jednorodności mieszanki betonowej wskutek jej rozwarstwienia (odmieszania) w rurociągu.

Zawartość wody w mieszance betonowej, ustalająca jej konsystencję, rzuca tuje w zasadniczy sposób na przebieg jej pneumatycznego transportu w rurociągu (konsystencja mieszanki betonowej rozumiana jako stopień jej plastyczności decydujący o zdolnościach do rozplływania się względnie deformacji przez działanie sił zewnętrznych [12]).

Biorąc pod uwagę wymogi stawiane w budownictwie podziemnym oraz możliwości wykonywania pneumatycznego natrysku, w kręgu zainteresowania znalazł się w OBR-BG pneumatyczny transport mieszanek betonowych o konsystencjach wilgotnych i gęstoplastycznych [17]. Takie mieszanki betonowe charakteryzują się bowiem znikomą podatnością do rozwarstwienia, dobrą przytrzymałością do natryskiwanego podłoża oraz gwarantują wysoką jakość betonu.

Badania parametrów transportu

Aby zapewnić niezawodność pneumatycznego transportu mieszanek betonowych o małej zawartości wody, muszą być starannie dobrane parametry przepływu, a mianowicie: ciśnienie początkowe, masowe natężenie przepływu sprężonego powietrza oraz masowa koncentracja transportu. Dobieranie ww. parametrów w sposób przypadkowy jest przyczyną powstawania częstych zatykań rurociągu w czasie transportu. Jak już wspomniano, czynnikiem determinującym wykonanie transportu pneumatycznego z natryskiem mieszanki betonowej jest jej wilgotność. Występowanie w natryskiwanej mieszance znacznej części drobnych frakcji ($0 \leq 2$ mm) staje się w pewnym zakresie wilgotności bardzo niekorzystne dla realizacji transportu bez zatykań [16]. Jest pewna krytyczna wartość wilgotności mieszanki betonowej (zależnie od jej składu), przy której opory przepływu są największe [1], [8].

W związku z tym przed rozpoczęciem badań przepływowych należało określić optymalny zakres wilgotności mieszanek betonowych, zapewniający zarówno wysoką jakość betonu, jak i przepływu bez zatykań oraz dobrą przytrzymałość przy natrysku. W oparciu o przeprowadzone badania ustalono dla mieszanek betonowych zakres wilgotności od 5,9 do 7,5%, odpowiadający konsystencjom wilgotnym i gęstoplastycznym. Zakres ten pomija wilgotności krytyczne, przy których opory przepływu są największe, natomiast wzrost zawartości wody w tym zakresie powoduje obniżanie oporów.

Badania przepływowe mieszanek betonowych o wyżej wymienionym zakresie wilgotności przeprowadzono na stanowisku badawczym OBR-BG.

W skład stanowiska wchodziły:

- podajnik pneumatyczny (typ WUBET-400),
- poziome rurociągi tłoczne 100 i 50,
- dwie sprężarki (WEK-100 M) o wydajności $10 \text{ m}^3/\text{min}$ każda,

- zbiornik wyrównawczy (10 m^3),
- aparatura pomiarowa (kryza pomiarowa ilości sprężonego powietrza, manometry z przekaźnikami ciśnienia i rejestratorami, manometry zwykłe, aparat Ve-Be, waga, sekundomierze),
- urządzenie do pomiarów wytrzymałości próbek betonu.

Badania przeprowadzono dla rurociągów poziomych przy następujących założeniach:

- średnice rurociągu $\phi 100$ (rurociąg stalowy),
 $\phi 50$ (rurociąg gumowy),
- długości rurociągu - 100 m ($\phi 100$),
 80 m ($\phi 50$),
- średnica chropowatości wewnętrznej ścianki rurociągu $\xi = 0,004$,
- dysponowane nadciśnienie sprężonego powietrza - $7,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$,
- nadciśnienie na wylocie rurociągu - 0 Pa ,
- zakres masowych natężeń przepływu mieszanki betonowej 4 do 14 kg/s (rurociąg $\phi 100$), 2,7 do $6,5 \text{ kg/s}$ (rurociąg $\phi 50$),
- przepływ powietrza - izotermiczny,
- rodzaj transportu - porcjowy,
- konsystencje mieszanki - wilgotne i gęstoplastyczne,
- zakres wilgotności mieszanki - $5,9 \pm 7,5\%$
- receptura i skład ziarnowy wg BN-77/0434 -06 [2],
- wartości ciśnień początkowych - większe o 20% od ciśnienia, przy którym rozpoczyna się transport bez zatykań.

Badania przeprowadzono przy masowych natężeniach przepływu zmieniających się w zależności od długości rurociągu oraz przy stałych natężeniach przepływu mieszanki betonowej.

Wartości koncentracji masowych występujących w czasie badań przedstawiono w tablicach 1, 2 i 3.

W oparciu o wyniki badań ustalono empiryczną zależność ciśnienia początkowego od długości rurociągu, masowej koncentracji transportu oraz wilgotności mieszanki betonowej w postaci:

$$p_1 = 10^2 \left(AL + B \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_b} + C \frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_p} + D \frac{\dot{m}_b}{z} \right) (\text{kPa}) \quad (3)$$

gdzie:

- A, B, C, D - stałe współczynniki zależne od średnicy rurociągu [10],
- L - długość rurociągu, m,
- \dot{m}_p - masowe natężenie przepływu powietrza, kg/s,
- \dot{m}_b - masowe natężenie przepływu mieszanki, kg/s,
- z - wilgotność mieszanki, %.

Dla celów praktycznych wymagane parametry transportu można wyznaczać wg nomogramów siatkowych [10].

Tablica 1

Wartości koncentracji $M_{\phi 100}$ i $M_{\phi 50}$ przy zmiennych masowych natężeniach przepływu mieszanki betonowej

Średnica i długość rurociągu	$M_{\phi 100}$ i $M_{\phi 50}$		
	z = 5,9%	z = 6,5%	z = 7,5%
$\phi 100 L_c = 40$ m	104,0	121,5	145,0
$\phi 100 L_c = 60$ m	66,2	74,0	83,0
$\phi 100 L_c = 80$ m	42,5	46,5	50,0
$\phi 100 L_c = 100$ m	27,5	29,4	31,2
$\phi 100 L_c = 100$ m z kolankiem 90°	24,5	25,9	27,2
$\phi 50 L_c = 20$ m	67,0	72,2	78,3
$\phi 50 L_c = 40$ m	46,2	52,4	54,0
$\phi 50 L_c = 60$ m	30,7	32,7	35,1
$\phi 50 L_c = 80$ m	20,1	22,5	24,0

Tablica 2

Wartości koncentracji $M_{\phi 100}$ przy stałych masowych natężeniach przepływu mieszanki betonowej (rurociąg $\phi 100$)

\dot{m}_b kg/s	L_c m	$M_{\phi 100}$		
		z = 5,9%	z = 6,5%	z = 7,5%
4	40	38,8	41,7	45,4
	60	32,2	34,2	36,4
	80	26,0	27,4	28,8
	100	21,0	22,1	23,3
6	40	55,5	58,8	63,8
	60	45,4	48,4	52,2
	80	35,5	37,5	40,0
	100	27,8	29,0	30,8
8	40	68,9	74,0	80,0
	60	55,2	58,8	63,0
	80	41,45	44,0	46,5
	100	30,8	32,6	34,3

Tablica 3

Wartości koncentracji $M_{\phi 50}$ przy stałych masowych natężeniach przepływu mieszanki betonowej (rurociąg $\phi 50$)

\dot{m}_b kg/s	L_c m	$M_{\phi 50}$		
		$z = 5,9\%$	$z = 6,5\%$	$z = 7,5\%$
3	20	38,9	43,2	46,8
	40	36,0	37,5	40,5
	60	28,8	30,9	32,6
	80	22,4	24,3	26,1
4	20	47,0	52,2	56,3
	40	41,6	44,8	49,4
	60	34,1	36,0	39,6
	80	25,7	27,9	30,7
5	20	57,0	61,0	65,7
	40	49,2	52,3	56,6
	60	38,2	41,8	44,2
	80	29,8	32,2	34,0

Podsumowanie

Dobór parametrów pneumatycznego transportu rozpatrywanych mieszanek betonowych w oparciu o wzory empiryczne względnie według nomogramów zapewnia realizację tego transportu bez zatykań, przy zachowaniu jednorodności mieszanki oraz dobrej jej przyczepności natryskowej. Potwierdza to dotychczasowa praktyka stosowania tego rodzaju transportu zarówno w budownictwie podziemnym, jak i budownictwie ogólnym.

Wymagane dla wykonywania betonu natryskowego prędkości wypływu mieszanki betonowej z przewodu natryskowego $\phi 50$ 25-35 m/s [13] uzyskuje się przy długościach do 40 m. Wynika stąd wniosek, że przy wykonywaniu natrysku długość poziomego rurociągu $\phi 50$ nie powinna być (ze względu na zmniejszanie się prędkości wypływu mieszanki) większa od 40 m.

Analizując występujące w czasie badań prędkości wypływu mieszanki betonowej i prędkości powietrza, można stwierdzić, że stosunek tych prędkości $\frac{w_b}{w_p}$ maleje wraz ze wzrostem długości rurociągu. Wynika to z deformacji poszczególnych porcji mieszanki, które poruszają się w coraz większym stopniu wzdłuż dolnej ścianki rurociągu poziomego, równocześnie łącząc się ze sobą. Powietrze natomiast przepływa nad mieszankę nie powodując już dalszego jej przyspieszenia. W trakcie badań ustalono również ekwiwalentną długość poziomego kolanka 90° (promień zakrzywienia 0,7 m) przy prze-

pływie rozpatrywanych mieszanek betonowych. Jej wartość mieści się w zakresie 9,2 do 11,5 m [10].

Pobierając próbki mieszanki betonowej przed i po transporcie wykonano badania wytrzymałościowe betonu. Porównując wytrzymałości tych próbek, określono różnice wytrzymałości. Są one niewielkie, dlatego problemu rozwarstwienia (odmieszania) mieszanek betonowych o konsystencjach wilgotnych i gęstoplastycznych można praktycznie nie uwzględniać.

W Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Budownictwa Górniczego "Budokop" w dalszym ciągu kontynuuje się prace badawczo-doświadczalne, związane z problemami pneumatycznego transportu mieszanek betonowych o małych zawartościach wody. Prace te dotyczą zwiększenia odległości transportu poziomego, możliwości transportu pionowego z połączeniem z natryskiem, obniżenia zużycia energii na 1 m³ przetransportowanej mieszanki, zmniejszenia stopnia pulsacji wypływu oraz doskonalenia podajników pneumatycznych o konstrukcji zbiornikowej.

LITERATURA

- [1] Bajkonorow O.: Razrabotka poleznych iskopajemych z zakładkoj. Wyd. Nauka, Ażma Ata 1972.
- [2] BN-77/0434-06: Wyrobiska korytarzowe i komorowe. Obudowa z betonu natryskowego. Beton natryskowy. Wymagania i badania.
- [3] Bukowski B., Kuczyński W.: Technologia betonu. Cz. 2. Wyd. Arkady, Warszawa 1972.
- [4] Fiedorow S. i inni: Miechanizm rassłojeniija bieronnoj smiesi pri pniewmatischenkom truboprowodnom transportie. I VUZ, Gornyj Żurnal nr 8/69.
- [5] Gorbunow B. i inni: Wlijanije dliny bieronprowoda na procznost bieronna pri pniewmatischenkom transportirowanii bieronnoj smiesi. Szachtnoje Stroitelstwo nr 10/69.
- [6] Kuczyński W.: Betony konstrukcyjne. Wyd. Budownictwo i Architektura, Warszawa 1956.
- [7] Lubański S.: Badania prototypu urządzenia do wykonywania betonu WUBET-400. Praca OBR-BG temat nr 59/71, etap Xb. Mysłowice, czerwiec 1975.
- [8] Lubański S.: Badania parametrów poziomego transportu pneumatycznego mokrej masy betonowej dla budownictwa podziemnego. Praca doktorska. Biblioteka Pol. Śląskiej, Gliwice 1978.
- [9] Lubański S.: Sprawozdanie z badań nad natryskownicą betonu. Prace OBR-BG, temat nr 59/71, etap XI. Mysłowice, listopad 1975.
- [10] Lubański S.: Określenie parametrów poziomego transportu pneumatycznego mokrych mieszanek betonowych w budownictwie podziemnym. Prace naukowo-badawcze OBR-BG Budokop, Mysłowice 1980.
- [11] Lubański S., Mateja J.: Wyniki badań wdrożeniowych transportu mieszanki betonowej i wykonywanie betonu natryskowego przy użyciu urządzenia WUBET-400. Przegląd Budowlany nr 6/78.
- [12] Mateja J., Lubański S.: Transport masy betonowej w budownictwie podziemnym i jego wpływ na jakość betonu. Budownictwo Górnicze nr 4/74.
- [13] Mateja J.: Wpływ czynników mechanicznych związanych z przygotowaniem transportu i nanoszenia masy betonowej na parametry betonu natryskowego wykonywanego w warunkach kopalnianych. Praca doktorska, Biblioteka Pol. Śląskiej, Gliwice 1974.

- [14] Neville A.: Właściwości betonu. Wyd. Arkady, Warszawa 1977.
- [15] Pajer G., Kuhnt H., Kurth F.: Stetigförderer. VEB Verlag Technik Berlin 1974.
- [16] Palarski J.: Badania nad określeniem strat ciśnienia w pneumatycznym transporcie materiału podsadzkiowego poziomymi rurociągami. Przegląd Górniczy nr 1/75.
- [17] PN-75/B-06250: Beton zwykły.
- [18] Scukin A., Atmanskij S.: Metodyka rasczota pneumaticzeskogo transporta raboczich smieszaj nabryzg betona. IVUZ, Gornyj Żurnal nr 9/69.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПНЕВМОТРАНСПОРТУ МОКРЫХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Р е з ю м е

В работе представлены исследования, касающиеся пневматического горизонтального транспорта бетонных смесей с малым количеством воды. Дана характеристика условий, гарантирующих ведение транспорта без закупориваний при одновременном сохранении высокого качества укладываемого бетона. Представлены способы подбора оптимальных параметров транспорта бетонных смесей с влажной и пластически повышенной консистенцией при получении бетона путём распыления.

TESTS FOR PNEUMATIC CONVEYING OF WET CONCRETE MIXES

S u m m a r y

Horizontal pneumatic conveying of lightly hydrous concrete mixes has been tested. Conditions which guarantee the transport without stops with simultaneous high quality of the setting of concrete are given. Ways of optimal parameters choice have been proposed for conveying of concrete mixes with wet or thick consistency used for shotcrete production.