

Jerzy RACZEK, Patrycja ZIELEŹNIK, Wojciech GUZIK

e-mail: jerzy.raczek@polsl.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

Badanie aerodynamiki poziomego transportu pneumatycznego wybranych materiałów siewnych

Wstęp

Właściwy dobór prędkości gazu transportującego w transporcie pneumatycznym materiałów sypkich jest warunkiem koniecznym prowadzenia procesów realizowanych w transporcie, szczególnie jeśli transport dotyczy materiałów siewnych. Zbyt wysoka prędkość gazu transportującego to zbędna strata energii i wzrost erozji zarówno materiału jak i przewodu transportowanego, natomiast zbyt niska jest przyczyną osiadania cząstek, co w konsekwencji prowadzi do zatrzymania transportu. Zatem znajomość roboczej prędkości gazu transportującego jest szczególnie ważna w przypadku projektowania linii transportu materiałów siewnych. W pracy podjęto próbę oszacowania przydatności dostępnych w literaturze korelacji na prędkość saltacji do wyznaczania roboczej prędkości gazu transportującego. Przez prędkość saltacji należy rozumieć taką prędkość gazu transportującego, dla której cząstki znajdujące się na dnie przewodu zaczynają się przemieszczać wykonując salta. Przyjmuje się, że prędkość saltacji jest równa prędkości osiadania cząstek (w praktyce, bardzo do niej zbliżona). Prędkość osiadania definiowana jest jako prędkość gazu odpowiadająca początkowi zjawiska osiadania cząstek stałych na dnie rury transportowej (na podstawie obserwacji wzrokowej) lub częściej jako prędkość gazu transportującego odpowiadająca minimum spadku ciśnienia na charakterystyce transportu.

Badania przeprowadzono dla wybranych materiałów siewnych, takich jak: owies, jęczmień, pszenżyto, sorgo, proso, pszenica, rzepak i żyto.

W tabeli 1 zestawiono korelacje na obliczanie prędkości saltacji, które wykorzystano w obliczeniach.

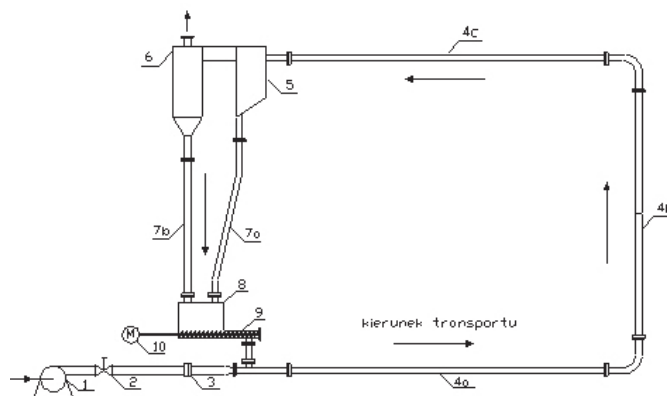
Tab. 1. Zestawienie korelacji na obliczanie prędkości saltacji

Autor	Postać korelacji na prędkość saltacji U_s
Duckworth [1]	$U_s = 10 \left(\frac{d_p}{D} \right) U_T \mu^{0,3}$
Matsumoto [3]	$Fr_s = 13,1 \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{-0,17} \left(\frac{Fr_p}{10} \right)^{0,58} \mu^{0,33}$
Muschelknautz [4]	$U_s = 1,3 U_T \mu^{0,25}$
Ochi [5]	$Fr_s = 0,87 J_s^{0,47} Fr_p^{0,82} \mu^{0,25}$
Rizk [2]	$\mu = \left(\frac{1}{10^a} \right) Fr_s^b$
Shade [1]	$U = 2,8 \left(\frac{G_s}{A} \right)^{0,1} D^{0,428} d_p^{-0,023} \rho_p^{0,306} \rho_g^{-0,405}$

Część doświadczalna

Badania doświadczalne przeprowadzono w skali laboratoryjnej w aparaturze badawczej, której schemat przedstawiono na rys. 1.

W instalacji tej powietrze tłoczone jest wentylatorem – 1, następnie przepływa przewodem przez zawór regulacyjny – 2 i zwiększając prędkość – 3 do komory mieszania. Tam materiał zostaje porwany przez strumień powietrza i transportowany jest do układu separującego. Transport odbywa się dwoma odcinkami poziomymi – 4a, 4c i jednym odcinkiem pionowym – 4b. Układ separujący składa się z komory opadowej – 5 oraz cyklonu – 6, gdzie materiał zostaje oddzielony od powietrza i zwracany przewodami zsympowymi – 7a, 7b do komory zasympowej – zbiornika przelotowego zasilającego dozownik ślimakowy

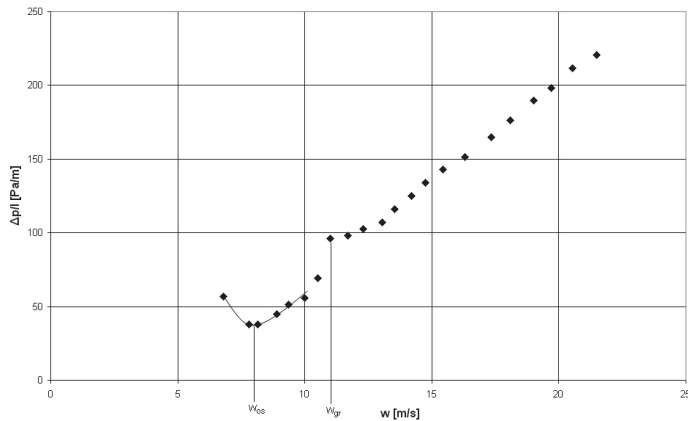


Rys. 1. Schemat instalacji do badań transportu pneumatycznego

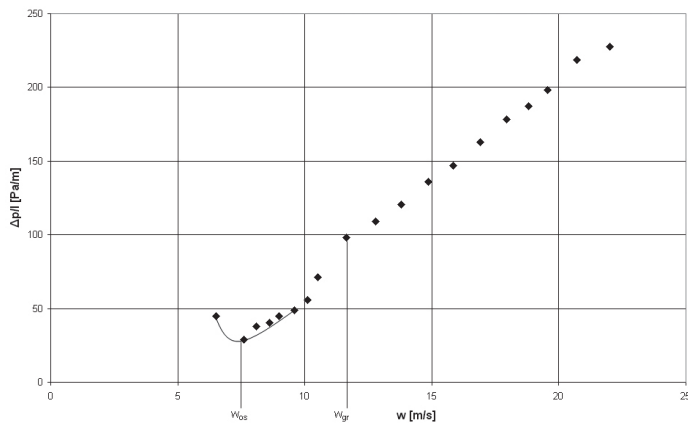
– 8. Dozowanie materiału sypkiego do rury transportowej odbywa się za pośrednictwem podajnika ślimakowego – 9 zasilanego materiałem ze zbiornika przelotowego – 8. Wydajność materiału regulowana jest poprzez zmianę liczby obrotów ślimaka napędzanego silnikiem prądu stałego – 10. Zawór – 2 przeznaczony jest do regulacji prędkości gazu transportującego. Zasadniczym elementem instalacji jest pozioma rura transportowa – 4a o średnicy wewnętrznej 0,0535 m i długości odcinka pomiarowego 4,44 m. Aby umożliwić obserwację wzrokową transportowanego materiału w części poziomej rurociągu – 4a został on wykonany z przezroczystego materiału (polimetakrylan metylu).

Dla każdego materiału sporządzano charakterystykę podajnika ślimakowego jako zależność wydajności materiału od liczby obrotów ślimaka. Przy różnych wartościach liczby obrotów ślimaka (1/min) gromadzono w specjalnym pojemniku (mierząc równocześnie czas) ziarno dozowane przez ślimak a zgromadzone ziarno ważono. W ten sposób wyznaczono wydajność transportu w zależności od liczby obrotów ślimaka dla wszystkich użytych w badaniach materiałów. We wszystkich przypadkach była to zależność liniowa choć dla każdego materiału inne było pochylenie prostej.

Kolejnym etapem badań było sporządzenie charakterystyk transportu pneumatycznego dla różnych wydajności transportu badanych materiałów. W tym celu po uruchomieniu wentylatora (przy pełnym otwarciu zaworu regulacyjnego) ustalano liczbę obrotów podajnika ślimakowego, czyli wydajność transportu. Następnie odczytano przy użyciu manometru różnicowego spadek ciśnienia w badanym odcinku transportu – 4a. Po każdym takim pomiarze stopniowo zmniejszano prędkość przepływającego powietrza za pomocą zaworu regulacyjnego – 2. Rejestrowano prędkość gazu, która mierzona była cyfrowym mikromanometrem różnicowym CMR-10A oraz temperaturę gazu. Gdy materiał zaczął opadać i zalegać na dnie rury, kończono obserwacje, zamykano dozowanie materiału i odkręcano zawór regulacyjny, aby uniknąć zablokowania instalacji poprzez nagromadzenie materiału. Dziękując spadkiem ciśnienia na odcinku transportu – 4a przez długość odcinka poziomego transportu, uzyskano jednostkowe spadki ciśnienia w transporcie. Następnie sporządzono wykresy zależności jednostkowego spadku ciśnienia dla odcinka – 4a w funkcji prędkości gazu transportującego dla ustalonej wydajności transportu. Przykładowe charakterystyki zamieszczono na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Charakterystyka transportu pneumatycznego dla pszenżyta przy wydajności transportu $G_s = 0,067$ [kg/s]



Rys. 3. Charakterystyka transportu pneumatycznego dla sorgo przy wydajności transportu $G_s = 0,067$ [kg/s]

Na wykresach naniesiono również wartości granicznych prędkości gazu, dla których obserwowano zmianę przepływu z przepływem pełnym przekrojem na przepływ, w którym koncentracja materiału wzrastała przy dnie rurociągu.

Omówienie wyników badań

Dla wszystkich badanych materiałów prędkości osiadania ziaren zbóż wyznaczone na podstawie charakterystyki transportu są nieznacznie wyższe od zmierzonych na podstawie obserwacji wzrokowych. Porównanie tych wartości zamieszczono w tabeli 2. W każdym przypadku transportu ziaren zjawisko osiadania cząstek zachodziło stosunkowo wolno i łagodnie. Na każdej charakterystyce transportu można było zauważyć wyraźnie zaznaczony minimalny spadek ciśnienia.

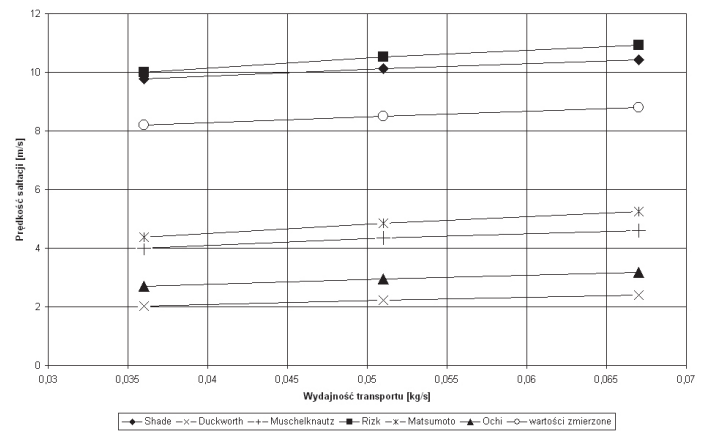
Tab. 2. Zestawienie wartości prędkości osiadania określonych na podstawie obserwacji wzrokowych, wyznaczonych z charakterystyk transportu oraz wg korelacji Shade'a i Rizka

Material	Wydajność transportu G_s [kg/s]	Prędkość osiadania wg obserwacji wzrokowych w_{os} [m/s]	Prędkość osiadania wg charakterystyki transportu w_{os} [m/s]	Prędkość saltacji wg Shade U_s [m/s]	Prędkość saltacji wg Rizka U_s [m/s]
Owies	0,031	7,40	7,8	8,5	9,5
	0,040	7,60	7,8	8,7	9,9
	0,049	7,80	7,9	8,9	10,2
	0,058	8,10	8,0	9,0	10,5
Jęczmień	0,038	9,00	9,0	9,7	10,0
	0,055	9,10	9,4	10,1	10,5
	0,071	9,30	9,6	10,4	10,9
	0,088	9,60	9,7	10,6	11,2

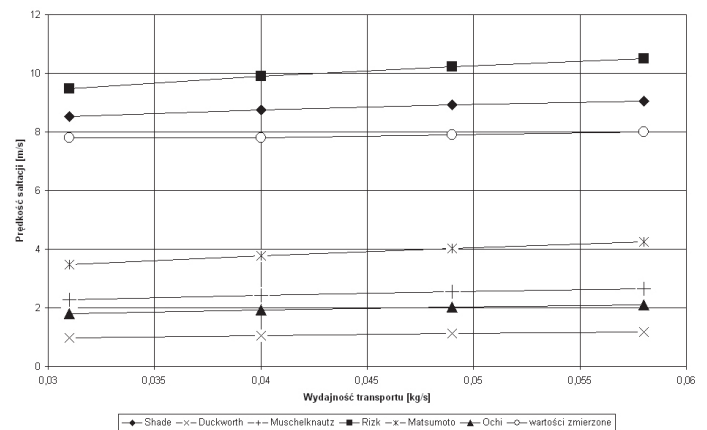
Pszenżyto	0,036	7,80	8,2	9,8	10,0
	0,051	7,90	8,5	10,1	10,5
	0,067	8,20	8,8	10,4	10,9
Sorgo	0,047	6,90	7,2	10,4	11,0
	0,067	7,00	7,4	10,8	11,5
	0,087	7,30	7,7	11,0	11,9
Proso	0,048	7,30	7,4	10,3	9,5
	0,068	7,40	7,8	10,6	10,2
	0,088	7,70	8,1	10,9	10,7
Pszenica	0,041	7,10	7,6	9,9	10,7
	0,058	7,40	8,2	10,2	11,2
	0,075	7,50	8,4	10,5	11,6
Rzepak	0,037	6,30	7,0	9,8	9,2
	0,052	6,70	7,5	10,1	9,8
	0,069	7,30	7,9	10,4	10,2
Żyto	0,034	8,00	8,7	9,5	10,2
	0,044	8,40	9,0	9,7	10,5
	0,054	8,40	9,2	9,9	10,8
	0,063	8,70	9,3	10,0	11,0

Do dalszych porównań z wartościami obliczonymi jako prędkości osiadania przyjęto prędkości odpowiadające minimalnemu spadkowi ciśnienia na charakterystyce transportu.

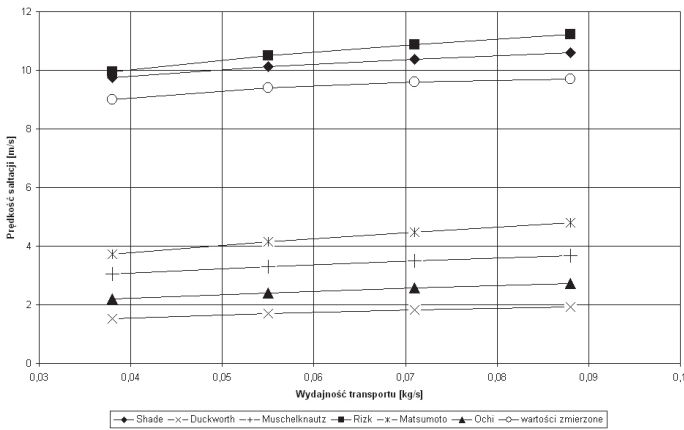
Na rysunkach 4÷11 przedstawiono graficzne porównanie wartości prędkości saltacji obliczonych na podstawie wybranych korelacji doświadczalnych i wartości prędkości osiadania wyznaczonych na podstawie charakterystyki transportu.



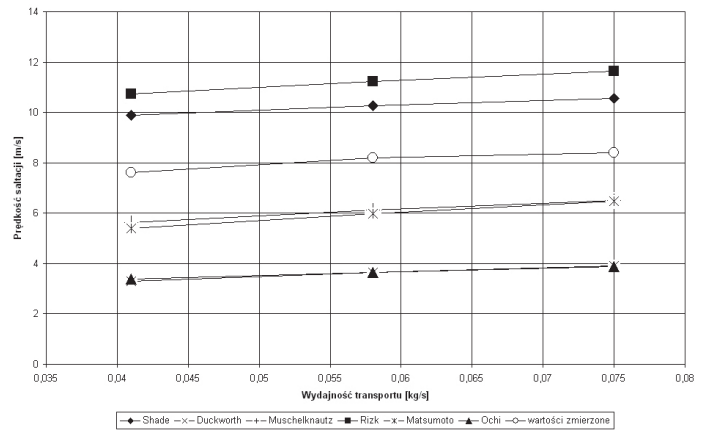
Rys. 4. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości prędkości saltacji dla pszenżyta



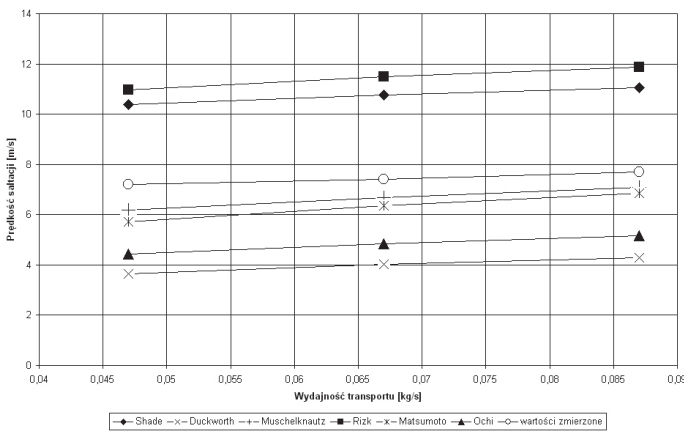
Rys. 5. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości prędkości saltacji dla owies



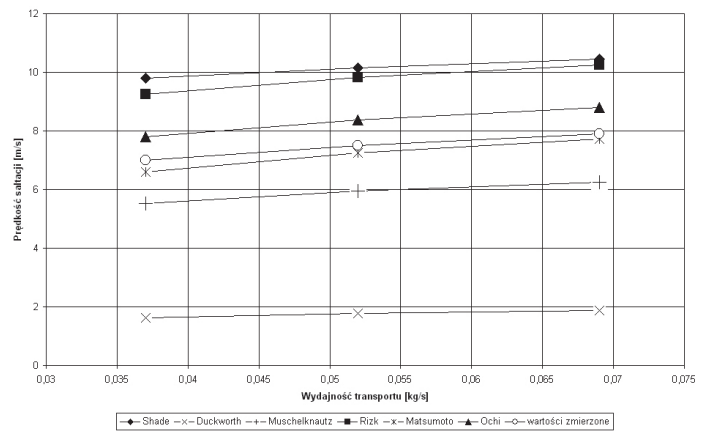
Rys. 6. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości prędkości saltacji dla jęczmienia



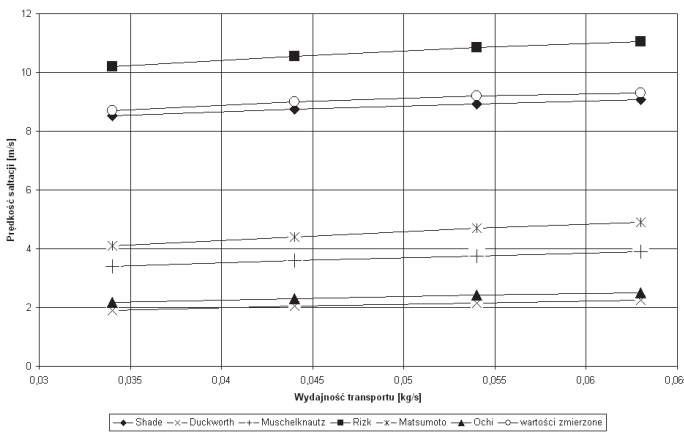
Rys. 9. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości prędkości saltacji dla pszenicy



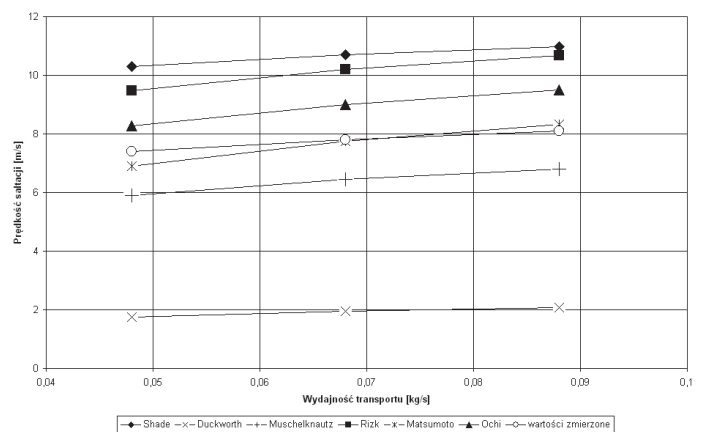
Rys. 7. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości prędkości saltacji dla sorga



Rys. 10. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości prędkości saltacji dla rzepaku



Rys. 8. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości prędkości saltacji dla żyta



Rys. 11. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości prędkości saltacji dla prosa

Na podstawie analizy tych rysunków można zauważyć, że większość obliczonych wartości prędkości saltacji uzyskanych z korelacji różni się znacznie od wartości zmierzonych.

Przy ocenie zmierzonych i obliczonych wartości kierowano się zasadą, że wartości obliczone muszą być bezpieczne, tzn. muszą być wyższe od zmierzonych. Wartości prędkości obliczone z korelacji wg *Ochi-go*, *Duckwortha*, *Muschelknautz* i *Matsumoto* są znacznie niższe niż zmierzone. Jedynie wartości prędkości obliczone wg korelacji *Rizka* i *Shade'a* są wyższe. Pozwala to przyjąć, że korelacjami tymi można się posłużyć przy projektowaniu instalacji poziomego transportu pneumatycznego i potraktować je jako korelacje bazowe do obliczania roboczej prędkości gazu transportującego.

Inną sprawą jest przyjęcie wartości współczynnika zwiększającego tak obliczoną prędkość, czyli współczynnika bezpieczeństwa.

Wnioski

- Analizując wyniki badań i obliczeń można stwierdzić, że:
- minimalna robocza prędkość gazu transportującego powinna być wyższa od prędkości osiadania,
 - zbyt wysoka prędkość gazu transportującego (choć bezpieczna) jest nieekonomiczna i powoduje wysoką i zbędną stratę energii, degradację transportowanego materiału i erozję instalacji
 - zbyt niska prędkość gazu transportującego grozi niebezpieczeństwem wystąpienia zjawiska wypadania cząstek ze strumienia, blokady

- przewodu transportowego oraz nierównomiernego rozkładu cząstek stałych w przewodzie transportowym.
- najbardziej interesującym z punktu widzenia projektowego jest obszar prędkości gazu odpowiadający minimum spadku ciśnienia w transporcie,
 - jako prędkość osiadania ziarn przebadanych materiałów siewnych można przyjąć prędkość saltacji obliczoną na podstawie korelacji *Shade'a* [1] i *Rizka* [2], które niewiele się różnią.
 - jako prędkość roboczą gazu transportującego zaleca się stosować prędkość nieznacznie wyższą od prędkości wyznaczonych wg korelacji *Shade'a* i *Rizka*.
 - prędkość osiadania nieznacznie rośnie wraz ze wzrostem wydajności transportu.

Oznaczenia

- A – powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu transportowego, [m²]
 a, b – współczynniki w równaniu *Rizka*, [-]
 d_p – średnica zastępcza cząstki, [m]
 D – średnica rurociągu, [m]
 f_s – współczynnik tarcia cząsteczek o ścianę, [-]
 G_s – wydajność transportu, [kg/s]
 w_{gr} – prędkość graniczna, [m/s]
 w_{os} – prędkość osiadania, [m/s]

$$Fr_p - \text{liczba Froude'a cząstki } Fr_p = \frac{U_T}{\sqrt{gd_p}} [-], \text{ wg [3] i [5]}$$

$$Fr_s - \text{liczba Froude'a saltacji, } Fr_s = \frac{U_s}{\sqrt{gD}} [-], \text{ wg [2], [3] i [5]}$$

- g – przyspieszenie siły grawitacji, [m/s²]
 U_s – prędkość saltacji, [m/s]
 U_T – prędkość swobodnego opadania cząstki, [m/s]
 μ – stosunek masowego natężenia przepływu ciała stałego do masowego natężenia przepływu gazu, [-]
 ρ_p – gęstość cząstki, [kg/m³]
 ρ_g – gęstość gazu, [kg/m³]

LITERATURA

- [1] *M. Hubert, H. Kalman*: Powder Technology, 133, 156, 2003.
- [2] *R. D. Marcus, L. S. Leung, G. E. Klinzing, F. Rizk*: Pneumatic conveying of solids, Chapman and Hall, London, New York, Tokyo, Melbourne, Madras, 1990.
- [3] *S. Matsumoto, M. Kikuta, S. Maeda*: J. Chem Eng. Jpn. 10 (4), 273, 1977.
- [4] *E. Muschelknautz, H. Wojahn*: Chem. Eng. Technol. 46, 223, 1974.
- [5] *M. Ochi, M. Takei*: Proceedings of the Second International Particle Technology, San Diego, USA, 1996.
- [6] *W. Guzik*: Praca dyplomowa magisterska. Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Śląska, Gliwice 2010.
- [7] *P. Zieleźnik*: Praca dyplomowa magisterska. Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Śląska, Gliwice 2010.