

LABORATORY AND SIMULATION TESTS OF THE IMPACT OF THE TUBE CORRUGATIONS AND THE COEFFICIENT OF FRICTION ON PNEUMATIC TRANSPORT TIME

Summary

The paper presents the results of laboratory and simulation tests aimed at clarifying the impact of factors such as the amplitude and wavelength of tube corrugation line, velocity of conveying air, and friction coefficient, on the scattering of transportation times and the average speed of grain movement. The simulative studies concerned idealized granular material, whereas the laboratory tests were conducted on the rape seed. The hypothesis that greater roughness of the inner surface of the pneumatic tube reduces the average speed of the transported grains and increases transit time dispersion was confirmed. This, in most cases, may result in reducing the sowing regularity.

Key words: *pneumatic seed tube, amplitude and wavelength corrugation line tube, friction coefficient, transportation scattering time, computer simulation*

BADANIA LABORATORYJNE I SYMULACYJNE WPŁYWU POFAŁDOWANIA PRZEWODU I WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA NA CZAS TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO

Streszczenie

Prezentowane wyniki badań laboratoryjnych i symulacyjnych, zmierzających do wyjaśnienia wpływu amplitudy i długości fali pofałdowania przewodu, prędkości przepływu powietrza transportującego, współczynnika tarcia na rozrzut czasu transportu i średnią prędkość ruchu ziarna. Badania symulacyjne dotyczyły wyidealizowanego materiału ziarnistego, natomiast badania laboratoryjne przeprowadzono na ziarnie rzepaku. Potwierdzono tezę, że pofałdowanie powierzchni wewnętrznej przewodu pneumatycznego wpływa na zmniejszenie średniej prędkości transportowanego ziarna oraz wzrost rozrzutu czasu transportu, co może mieć niekorzystny wpływ na równomierność wysiewu

Słowa kluczowe: *przewód nasienny, amplituda i długość pofałdowania przewodu, współczynnik tarcia, rozrzut czasu transportu, symulacja komputerowa*

1. Wprowadzenie

Coraz częściej w nowoczesnym rolnictwie europejskim, w tym polskim, stosowane są siewniki z pneumatycznym transportem nasion w przewodach nasiennych. Siewniki takie mogą być produkowane jako maszyny monofunkcyjne, lub wchodzić w skład agregatów uprawowo-siewnych, które ostatnio cieszą się coraz większą popularnością. W siewnikach takich stosuje się różnego rodzaju przewody nasienne, a w szczególności przewody ze spiralnym wzmocnieniem, które nie załamują się na łukach. Niestety, w przewodach tych występują charakterystyczne pofałdowania wewnętrznej powierzchni. Może to wpływać na prędkość i opory transportu ziarna, a przez to na równomierność podłużną wysiewu oraz straty ciśnienia medium transportującego. Problem strat jest szczególnie istotny w siewnikach z inżektorem, ponieważ utrudniony transport materiału ziarnistego może powodować zapychanie się przewodów. Zjawiskami, które także mogą utrudniać transport, są zjawiska tribo-elektryczne. Powodują one elektryzowanie przewodów, często nawet wyładowania iskrowe, oraz elektryzowanie materiału ziarnistego, co też może utrudniać transport. Stąd zachodzi potrzeba stosowania specjalnych przewodów antystatycznych, usztywnionych metalowym drutem. Przewody te charakteryzują się również większym pofałdowaniem powierzchni wewnętrznej.

Istnieje zatem problem badawczy: W jaki sposób materiał oraz pofałdowanie powierzchni wewnętrznej przewodu

nasiennego może wpływać na prędkość transportowanego ziarna, straty ciśnienia związane z tym zjawiskiem a także na równomierność wysiewu?

Można przypuszczać, że spowolnienie ruchu ziarna w przewodzie pneumatycznym może powodować zwiększenie nierównomierności podłużnej, a także opóźnienie transportowe dające się zauważyć na początku i na końcu obsiewanego arealu, gdzie siew jest nierównomierny. W wyniku opóźnienia transportowego ziarna, siewnik rozpoczyna prawidłowy wysiew dopiero po przejechaniu kilku metrów i wysiewa nasiona jeszcze po zatrzymaniu. Zjawiska te można badać metodami symulacji komputerowej, gdyż jest to metoda szybsza i znacznie tańsza od metody eksperymentalnej, jednak wymaga to utworzenia adekwatnych modeli matematycznych. Celem badań było rozwinięcie takich modeli oraz ich empiryczna walidacja. Modele powinny uwzględniać współczynnik tarcia o ścianki przewodu oraz kształt pofałdowania jego wewnętrznej powierzchni. W przypadku uzyskania poprawnych wyników metod symulacyjnych, można będzie uzyskać odpowiedzi na pytania o charakterze utylitarnym.

2. Prace dotychczasowe

W literaturze przedmiotu nie znaleziono prac ściśle dotyczących tak postawionego problemu. Zbliżone tematyczne badania prowadzili Sommerfeld i Kussin [1, 3]. Ich eksperymentalne prace dotyczyły wpływu szorstkości ścianek

przewodu pneumatycznego na ruch ziaren w wąskim kanale poziomym. Modelem ziarna były szklane kulki. Wykazali oni, że zwiększenie szorstkości ścianki powoduje wyhamowanie transportowanych kulek, a co za tym idzie spadek ciśnienia w przewodzie oraz zwiększenie częstotliwości kolizji kulek ze ścianką [1]. Udowodnili także, że zwiększenie średnicy kanału przyczynia się do zmniejszenia liczby odbić szklanych kulek wewnątrz przewodu, oraz że na straty ciśnienia ma nie tylko wpływ szorstkość ścianki, ale również zagęszczenie cząstek transportowanych w przewodzie, czyli ładunek masowy [1, 3]. Komputerowej symulacji wpływu szorstkości wewnętrznej ścianki przewodu pneumatycznego na proces transport podjęli się najpierw Sommerfeld metodą Lagrange [2], a następnie wspólnie z Lain metodą Eulera i Lagrange [4]. Wszystkie eksperymenty numeryczne przeprowadzili przy stałym natężeniu przepływu i doszli do podobnych konkluzji jak we wcześniejszych badaniach eksperymentalnych, a mianowicie, że większa szorstkość przyczynia się do większego spadku ciśnienia [4], natomiast im większe cząstki przy zadanej szorstkości kanału tym częstotliwość odbić jest mniejsza [3].

Ma i in. [5] prowadzili badania eksperymentalne i numeryczne wpływu promienia zakrzywienia przewodu pneumatycznego na spadek ciśnienia statycznego. Do badań eksperymentalnych użyli oni popiołu lotnego, transportowanego w prostym, a następnie zakrzywionym kanale pneumatycznym, natomiast do badań symulacyjnych zastosowali komercyjny program Fluent 6.3, który wykorzystuje metodę CFD (numeryczna mechanika płynów *Computational Fluid Dynamics*). Po przeprowadzonych doświadczeniach wynioskowali, jak można było się spodziewać, że wraz ze wzrostem zakrzywienia przewodu pneumatycznego spadek ciśnienia zwiększa się oraz, że można zastosować w obliczeniach, zamiast długich i skomplikowanych przewodów, krótkie przewody reprezentatywne [5]. Natrafiono także na prace związane z badaniami właściwości triboelektrycznych podczas transportu pneumatycznego, pomierzono jednak tylko ilość ładunków, a nie dociekano, jak elektryczność statyczna wpływa na prędkość transportowanych cząstek oraz rozrzut czasu transportu. Jak zaobserwowali autorzy, powtarzalne wyniki ładowania triboelektrycznego można uzyskać pod warunkiem stałej kontroli wilgotności względnej powietrza oraz rozcieńczonego przepływu cząstek, gdzie dominują zderzenia cząstek ze ściankami przewodu [6, 7].

3. Cel badań i problem badawczy

Zasadniczym celem badań było udowodnienie tezy, że pofałdowanie powierzchni wewnętrznej przewodu pneumatycznego wpływa na zmniejszenie średniej prędkości transportowanego ziarna oraz wzrost rozrzutu czasu transportu. Dodatkowo, sprawdzono też wpływ kilku innych czynników, takich jak prędkość powietrza transportującego oraz współczynnika tarcia. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych. Zasadniczym celem badań empirycznych była weryfikacja modelu matematycznego, który pozwala na obliczenie czasu i prędkości transportu ziarna w dowolnie ukształtowanym przewodzie pneumatycznym.

4. Materiał i metody

4.1. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne przeprowadzono na zbudowanym do tego celu stanowisku, którego schemat oraz zasadę działania opisano we wcześniejszych opracowaniach [10, 11].

Założona w programie badań prędkość powietrza transportującego na poziomie 10, 15, 20, 25 m/s, ustalona na podstawie danych zaczerpniętych od producentów siewników, kontrolowana była przy pomocy wyskalowanego anemometru turbinowego Voltcraft BL-30 AN, ustawionego na wylocie przewodu nasiennego. Założona prędkość po skalowaniu kształtuje się na poziomie 8,43; 12,23; 15,99; 19,87 m/s.

Badania, ze względu na kształt ziarna zbliżony do kulistego, przeprowadzono na ziarnach rzepaku zakupionych w poznańskiej Centrali Nasiennej. Przed rozpoczęciem badań wykonano pomiary ważniejszych parametrów tego materiału, w szczególności masy, rozmiarów i wilgotności nasion, które mogły mieć wpływ na przebieg wykonywanych pomiarów.

Pomiar masy każdej próbki 100 ziaren wykonano na wadze elektronicznej firmy RADWAG PS 1000/Y. W tym celu odliczono 5 próbek po 100 nasion pobranych losowo i zważono je. Pomiar wilgotności ziarna został przeprowadzony na wago-suszarce RADWAG WPE/WS 30. W tym celu wykonano bezpośrednio przed pomiarem po 3 próbki rozdrobionych w moździerzu nasion, o masie ok. 30 g. Cały cykl pomiaru wilgotności tym urządzeniem przebiegał automatycznie. Suszenie odbywało się w temperaturze 130°C. Wymiary gabarytowe ziaren zmierzono metodą fotogrametryczną za pomocą programu o nazwie *gabar*, napisanego w środowisku Delhi. Fotografie ziarna wykonano za pomocą kamery cyfrowej, o rozdzielczości 5 megapikseli, w oświetleniu tylnym. Jako wzorzec długości użyto metalowy krążek o średnicy 16 mm, umieszczony na fotografo- wanych płytkach z nasionami, który mierzony jako pierwszy pozwala na automatyczne wyskalowanie obrazów nasion według znanego wymiaru tego wzorca. Wyniki obliczeń zostały zapisane w pliku dyskowym i podane obróbce statystycznej, polegającej na obliczeniu wartości średniej i średniego odchylenia kwadratowego wymiarów nasion. W wyniku przeprowadzonych pomiarów ustalono następującą charakterystykę ziaren rzepaku:

- średnia masa 100 ziaren – 0,76±0,02 g,
- wilgotność – 5,7%,
- długość ziaren – 2,55±0,3 mm,
- szerokość ziaren – 2,14±0,3 mm.

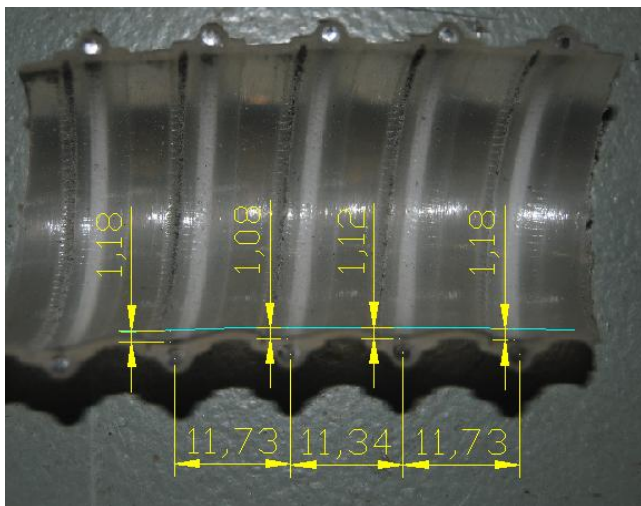
Każdą próbę, zarówno w badaniach laboratoryjnych, jak i symulacyjnych powtarzano 100-krotnie w celu ograniczenia wpływu błędów pomiarowych. Jako zmienne niezależne w eksperymentach przyjęto:

- prędkość przepływu powietrza,
- długość i konfigurację przewodu nasiennego,
- skok i amplitudę fałd,
- współczynnik tarcia ziarna o ścianki przewodu.

Prędkość powietrza oraz długość i konfigurację przewodu nasiennego wybrano na podstawie wcześniejszych doświadczeń [11], natomiast skok i amplitudę fałd przyjęto na podstawie pomiaru falistości w przewodzie antystatycznym P 3 PU (zakupionym na potrzeby badań), widocznym na rys. 1. Aby odnieść i wyskalować pomiary falistości na fotografii przeciętego w połowie przewodu, najpierw dokonano pomiaru skoku wzmacniającego drutu, którego rzeczywisty skok wynosił 11,0 mm, po czym dokonano przeskalowania wymiarów amplitudy falistości. Po obróbce statystycznej i zaokrągleniu średnia amplituda falistości wynosiła 1,0 mm.

Do analizy danych uzyskanych w badaniach laboratoryjnych i symulacyjnych, które zostały zapisane w plikach

tekstowych użyto programu *ANALIZATOR*, którego zasadę działania omówiono w [10, 11, 12].



Rys. 1. Wymiary falistości przewodu antystatycznego P 3 PU
Fig. 1. Dimensions of the wave of P 3 PU tube (ESD)

Pomiaru współczynnika tarcia ziarna o ścianki przewodu dokonano na przyrządzie zaprojektowanym i zbudowanym w Zakładzie Maszyn Roboczych PP (rys. 2).



Rys. 2. Stanowisko do pomiaru współczynnika tarcia ziarna o ścianki przewodu
Fig. 2. Research stand for measurements of friction coefficient of the grain on the side of a tube

Na przedstawionym stanowisku badawczym można pomierzyć kąt zsuwania materiału ziarnistego w przewodzie. Współczynnik tarcia jest tangensem tego kąta. Po wykonanych 100 pomiarach kąta tarcia dla przewodu najczęściej stosowanego wykonanego z PVC i przewodu antystatycznego P 3 PU, wykonanego z mieszanki poliestru i poliuretanu, średni współczynnik tarcia statycznego ziarna rzepaku o ścianki przewodu wykonanego z PVC wynosi 0,61, natomiast przewodu P 3 PU – 0,54. Podczas badań symulacyjnych przedstawiono wpływ współczynnika tarcia na czas i rozrzut czasu transportu, w celu zweryfikowania wpływu współczynnika tarcia tocznego.

4.2. Eksperymenty numeryczne

Pierwsze symulacje matematyczne poszczególnych procesów opierały się zwykle na metodzie *Computation Fluid Dynamic* (CFD). Mieszaninę ziaren i powietrza traktowano jako jednorodne kontinuum o uśrednionych parametrach.

Gdy rozmiary ziaren są duże, lub gdy przepływ zostaje zagęszczony, model ten nie jest adekwatny do rzeczywistości. Obecnie wielu naukowców pracuje nad rozwojem modeli przepływów wielofazowych, które używane są w metodzie Lagrange'a oraz w metodzie elementów dyskretnych DEM, w których ruch każdej indywidualnej cząstki jest wyznaczany jako konsekwencja wszystkich działających na nią sił.

Metoda elementów dyskretnych (DEM) wzoruje się na mechanice molekularnej, bazującej na chaotycznym ruchu atomów, który można utożsamić ze zjawiskami zachodzącymi w strumieniu materiałów granularnych [8]. Zbudowany w ramach badań model procesu wysiewu oparty jest właśnie o tzw. metodę elementów dyskretnych (DEM). Model ten jest częścią programu o nazwie *Rzwp* napisanego przez autorów w środowisku Rad Delphi Embarcadero2010 i w dalszym ciągu doskonalonego. Gruntowny opis tej metody DEM można znaleźć w pracach A. Munjiza [9], natomiast szczegółowy opis modelu znajduje się we wcześniejszych pracach [10, 11].

Zmodyfikowany program symulacyjny *Rzwp*, zawiera procedurę generacji siatki dowolnie ukształtowanego, krzywoliniowego i pofałdowanego przewodu nasiennego. Istnieje możliwość generowania fałd o dowolnym zarysie, skoku i amplitudzie. Program ten jest w dalszym ciągu doskonalony w celu uzyskania lepszej zbieżności wyników badań symulacyjnych i laboratoryjnych. Na początku badań symulacyjnych, wprowadza się dane dotyczące parametrów przewodu nasiennego w formie krzywej Beziera za pośrednictwem czterech punktów kluczowych oraz skok i amplitudę fałd, następnie prędkość powietrza oraz parametry ziarna, tj. średnicę, gęstość właściwą i współczynnik tarcia ziarna o przewód. Widok Interface-u programu z przewodem wygenerowanym za pomocą krzywej Beziera o długości 1,0 m wraz z uwydatnionymi fałdami o skoku 8 mm i amplitudzie 3,5 m pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Wygenerowany w programie *Rzwp* model przewodu z fałdami o długości fali 0,008 m i amplitudzie 0,0035 m
Fig. 3. The tube model with corrugations of wavelength 0,008 m and amplitude 0,0035 m generated in program *Rzwp*

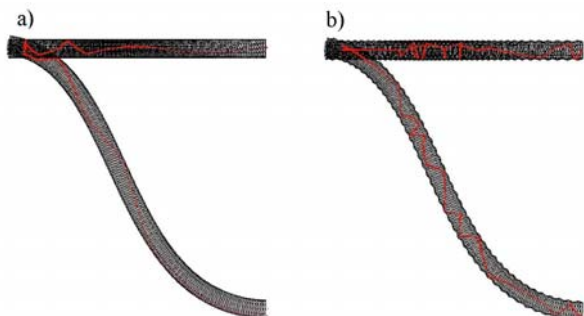
Ruch ziarna w tym przewodzie jest opisany równaniem różniczkowym drugiego rzędu. Jest on wymuszany siłami kolizji ze ściankami przewodu, siłami grawitacji oraz siłami aerodynamicznymi. Równanie ruchu wynika z warunku równowagi sił. Najistotniejszą częścią programu symulacyjnego jest procedura detekcji kolizji i procedura obliczania reakcji ścianek przewodu w trakcie kolizji. Program nie ma ograniczeń co do liczby branych jednocześnie pod uwagę ziaren, jednak w przypadku siewu precyzyjnego ziarna po-

ruszają się w przewodach pojedynczo, stąd nie ma potrzeby brania pod uwagę ich wzajemnego oddziaływania. Obliczenia symulacyjne pozwalają na dokładne wyznaczenie trajektorii ziarna oraz przebiegu sił na nie działających, a z tego – czasu przelotu ziarna przez przewód nasienny, liczby kolizji ze ściankami oraz średniej prędkości transportu.

5. Wyniki badań symulacyjnych

W efekcie realizacji programu badań, zarówno eksperymentów laboratoryjnych, jak i numerycznych pozyskano znaczny zbiór danych, na podstawie których możliwe było wyznaczenie zależności prędkości ziarna oraz rozrzutu czasu transportu ziarna od prędkości powietrza transportującego ze szczególnym zwróceniem uwagi na wpływ pofałdowania powierzchni wewnętrznej przewodu oraz współczynnika tarcia materiału ziarnistego o ścianki przewodu. Uzyskane wyniki pomiarów z każdej serii badań laboratoryjnych i symulacyjnych, najpierw zapisane w plikach tekstowych, poddawane były obróbce statystycznej przy użyciu programu *ANALIZATOR*.

W celu wizualnego ukazania wpływu pofałdowania powierzchni wewnętrznej przewodu pneumatycznego, przedstawiono losowo wybraną trajektorię ruchu symulacyjnego ziarna rzepaku, czyli kulki o średnicy zawierającej się w przedziale od 0,002 do 0,003 m dla przewodu gładkiego (rys. 4a) oraz przewodu pofałdowanego (rys. 4b) o długości fali 8 mm i wysokości 2,1 mm. Analizując wykresy 4a i 4b, można zauważyć, że częstotliwość kolizji cząstki ze ścianką przewodu, dla przewodu z wewnętrznymi pofałdowaniami, zwiększyła się przyczyniając się do znacznego wydłużenia czasu transportu.



Rys. 4. Wygenerowana trajektoria ruchu symulacyjnego ziarna w przewodzie o długości 1,0 m: a) gładkim, b) pofałdowanym

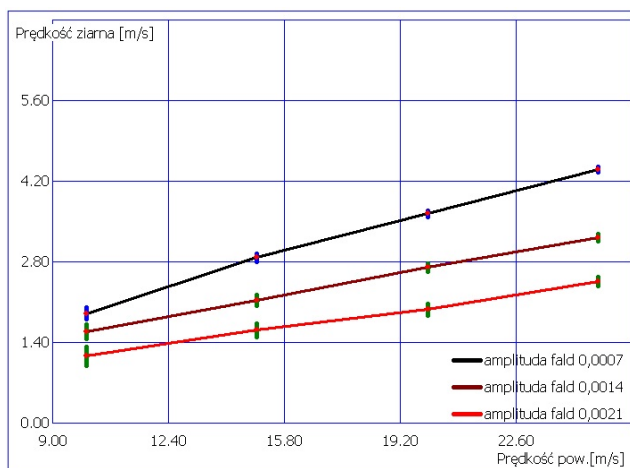
Fig. 4. The generated trajectory of simulation movement of grain in a seed tube of length 1.0 m: a) smooth, b) corrugated

Na rys. 5 przedstawiono wpływ amplitudy fałd na średnią prędkość transportowanego ziarna dla przewodu o długości 1,0 m, natomiast na rys. 6 wpływ amplitudy fałd na rozrzut czasu transportu także dla przewodu o długości 1,0 m. Analizując rys. 5 i 7 można stwierdzić, że wraz ze wzrostem amplitudy fałd średnia prędkość transportowanego ziarna maleje, natomiast rozrzut czasu transportu rośnie.

6. Porównanie wyników badań symulacyjnych i laboratoryjnych

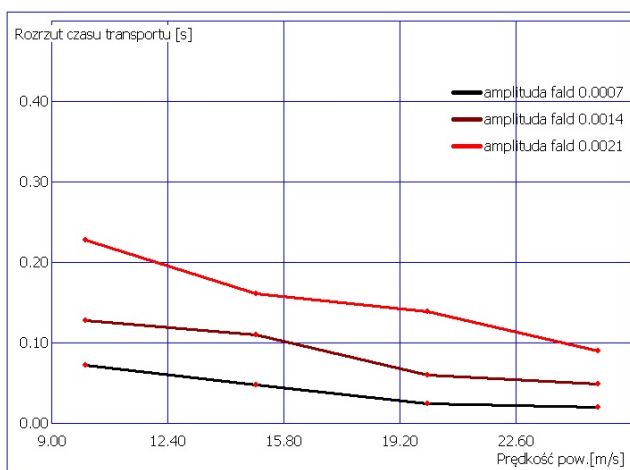
Na rys. 7 wykreślono, uzyskane z badań laboratoryjnych i symulacyjnych dla przewodu długości 1,0 m, zależności średniej prędkości transportowanego ziarna od prędkości

kości powietrza. Dla przewodu pofałdowanego długość fali pofałdowania wynosiła 11 mm, natomiast amplituda 1,0 mm.



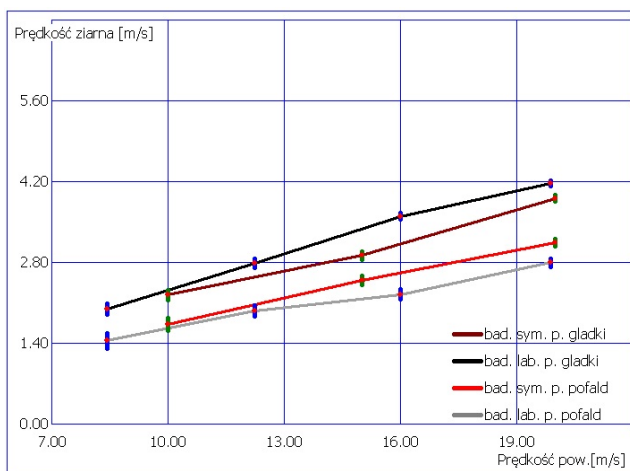
Rys. 5. Wpływ amplitudy fałd na średnią prędkość transportowanego ziarna

Fig. 5. Influence of amplitude folds on average speed of transported grains



Rys. 6. Wpływ amplitudy fałd na rozrzut czasu transportu ziarna

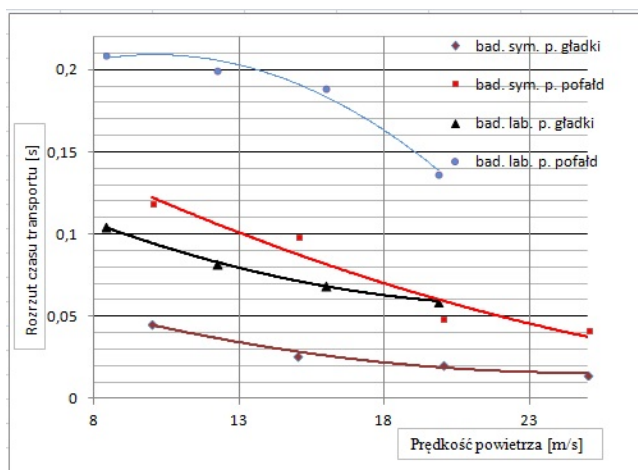
Fig. 6. Influence of amplitude folds on the scattering of grain transport time



Rys. 7. Zależność średniej prędkości ziarna rzepaku od prędkości powietrza w przewodzie nasiennym pofałdowanym o długości 1,0 m

Fig. 7. The dependence of the average speed of rape grain on air velocity in corrugated seed tube of length 1,0 m

Na rys. 8 przedstawiono zależność rozrzutu czasu transportu od prędkości powietrza stosując interpolację wielomianową drugiego stopnia. W badaniach symulacyjnych przyjęto efektywny współczynnik tarcia 0,2.



Rys. 8. Zależność rozrzutu czasu transportu ziarna rzepaku od prędkości powietrza w przewodzie nasiennym pofałdowanym o długości 1,0 m

Fig. 8. The dependence of the transport scattering time of rape grain on air velocity in a corrugated seed tube of length 1,0 m

Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że przebieg zależności uzyskiwanych z badań empirycznych jest podobny do uzyskanych z symulacji. Niższe wartości średniej prędkości transportu ziarna i wyższe wartości rozrzutu czasów transportu uzyskiwane z badań empirycznych wynikają m.in. z idealizacji kształtu ziarna i przyjęcia jednakowego współczynnika tarcia w obliczeniach symulacyjnych. Wprowadzenie zmiennego współczynnika tarcia i dodatkowych parametrów kształtu ziarna pozwoli w przyszłości na lepsze dostrojenie modelu.

7. Wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne i symulacyjne pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Potwierdzono empirycznie tezę, że pofałdowanie powierzchni wewnętrznej przewodu nasiennego wpływa na zmniejszenie średniej prędkości ziarna oraz zwiększenie rozrzutu czasu transportu ziaren.
2. Wraz ze zwiększeniem prędkości powietrza w przewodzie nasiennym rozrzut czasów transportu ziaren maleje.
3. Wydłużenie czasu transportu ziarna, spowodowane pofałdowaniem powierzchni wewnętrznej przewodu nasiennego, wynika głównie ze zwiększenia częstotliwości kolizji cząstki z ścianką przewodu.
4. Większy, w stosunku do obliczonego numerycznie, rozrzut czasu transportu ziarna zaobserwowany w badaniach laboratoryjnych może być spowodowany nie idealnie kuli-

stym kształtem ziaren rzepaku, nierównościami przewodu i większym wpływem różnych innych czynników losowych wpływających na prędkość ruchu ziarna.

5. W pneumatycznych siewnikach precyzyjnych, w których nasiona są transportowane do redlic przez przewody nasienne, należy stosować przewody o gładkich ściankach wewnętrznych w celu podwyższenia równomierności siewu.

6. Opracowany model matematyczny transportu materiału ziarnistego zapewnia stosunkowo dobrą zgodność wyników symulacji z danymi empirycznymi, jednak wymaga on jeszcze dostrajania i doskonalenia w celu podwyższenia tej zgodności oraz lepszej predykcji czasu transportu i jego rozrzutu, tj. czynników determinujących wpływ przewodu nasiennego na podłużną równomierność wysiewu.

8. Bibliografia

- [1] Sommerfeld M., Kussin J.: Wall roughness effects on pneumatic conveying of spherical particles in a narrow horizontal channel. *Powder Technology*, 142 (2004), 180–192.
- [2] Sommerfeld M.: Analysis of collision effects for turbulent gas-particle flow in a horizontal channel: Part I. Particle transport. *International Journal of Multiphase Flow*, 29 (2003), 675–699.
- [3] Sommerfeld M., Kussin J.: Analysis of collision effects for turbulent gas-particle flow in a horizontal channel. Part II. Integral properties and validation. *International Journal of Multiphase Flow*, 29 (2003), 701–718.
- [4] Lain S., Sommerfeld M.: Euler/Lagrange computations of pneumatic conveying in a horizontal channel with different wall roughness. *Powder Technology*, 184 (2008), 76–88.
- [5] Ma A.C., Williams K.C., Zhou J.M., Jones M.G.: Numerical study on pressure prediction and its main influence factors in pneumatic conveyors. *Chemical Engineering Science*, 65 (2010), 6247–6258.
- [6] Ndama A.T., Guigon P., Saleh K.: A reproducible test to characterise the triboelectric charging of powders during their pneumatic transport. *Journal of Electrostatics*, 69 (2011), 146–156.
- [7] Boschung P., Glor M.: Methods for investigating the electrostatic behaviour of powders. *Journal of Electrostatics*, 8 (1980), 146–156.
- [8] Tijssens E., Ramon H., De Baerdemaeker J.: Discrete element modeling for process simulation In agriculture. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266, s. 493–514.
- [9] Munjiza A.: *A combined discrete finite element method*. Wiley & Sons, 2004.
- [10] Gierz Ł., Kęska W., Gierz S.: Badania laboratoryjne czasu transportu ziarna pszenicy w przewodzie nasiennym siewnika. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2012, Vol. 57(1), s. 37–40.
- [11] Gierz Ł., Kęska W.: Badania symulacyjne i laboratoryjne czasu transportu ziarna rzepaku w przewodzie nasiennym siewnika. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2012, Vol. 57(2), s. 73–78.
- [12] Gierz Ł., Kęska W., Gierz S.: Metoda precyzyjnego pomiaru czasu transportu ziarna w przewodach pneumatycznych. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2012, Vol. 57(2), s. 79–82.