

УДК 634

*Аліція Коляса, канд. техн. наук – Політехніка Опольська,
Інститут інженерного виробництва*

ВПЛИВ ЩІЛЬНОСТІ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЯКІСТЬ СУМІШІ ПРОТЯГОМ ЗМІШУВАННЯ В БАРАБАННОМУ ЗМІШУВАЧІ

Розглядаються питання процесу змішування сипких матеріалів з різною щільністю. Дослідження були виконані в довгому барабанному змішувачі. Представлені результати дослідження включають теоретичні узагальнення, що базуються на Марківському ланцюзі. Експериментальні результати нагромаджувались впродовж тривалого часу перемішування і порівнювались із теоретичними. Встановлено, що результати базуються на стохастичній моделі, яка може використовуватися для опису сумішей з різною щільністю різномірних гранульованих матеріалів.

Ключові слова: сипкі матеріали, різномірні матеріали, ступінь змішування, суміш у барабанній мішалці, стохастична модель

Dr eng. Alicja Kolasa – Opole University of Technology

Influence of grain materials density on mixture quality during blending in drum mixer

In this work the mixing process of the particulate materials with the different density has been investigated. The investigation have been performed in a long drum mixer. The results of investigation vs. theoretical considerations based on the Markov chain have been presented. Experimental results have been obtained with long time mixing and compared with theoretical. It was shown that results based on the stochastic model can be used to describe mixture with different density of heterogeneous granular materials.

Keywords: particulate materials, heterogeneous materials, degree of mixing, mixing in drum mixer, stochastic model.

Dr inż. Alicja Kolasa – Politechnika Opolska, Instytut Inżynierii Produkcji

Wpływ gęstości materiałów sypkich na jakość mieszaniny podczas procesu mieszania w mieszalniku bębnowym

Wprowadzenie

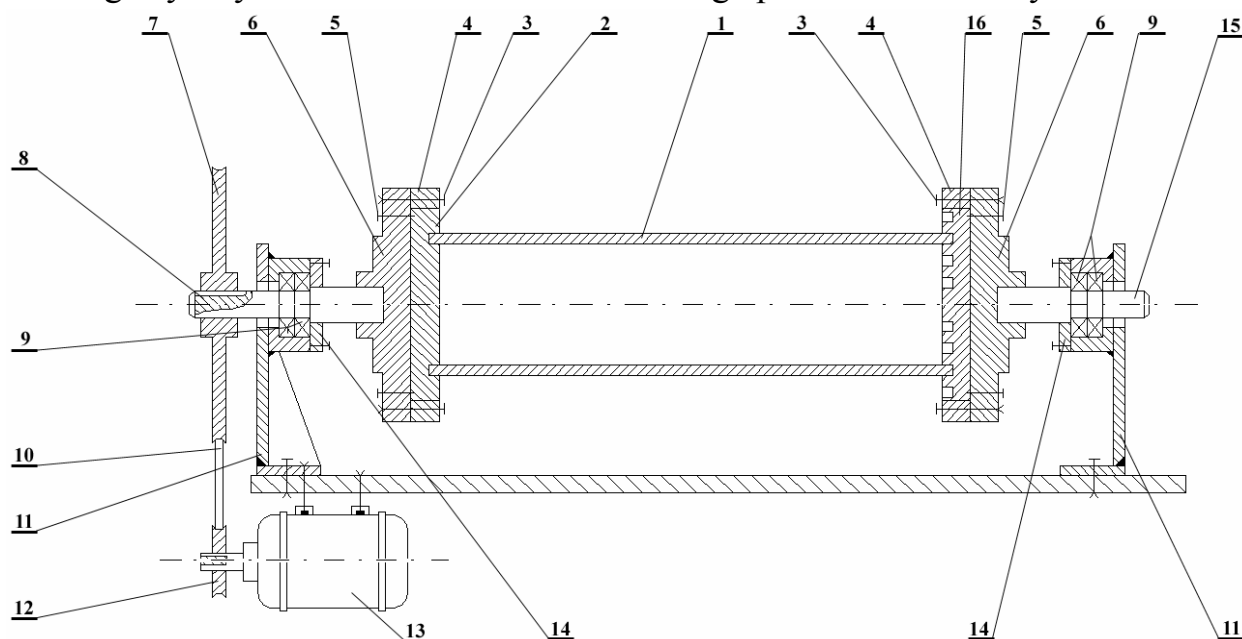
Proces mieszania jest powszechnie spotykanym w licznych dziedzinach przemysłowych, szczególnie zaś często stosowany jest w przemyśle spożywczym, chemicznym czy farmaceutycznym oraz innych pokrewnych branżach. Sposób prowadzenia procesu, parametry mieszanych komponentów, rodzaj urządzenia mieszającego i wiele jeszcze innych czynników odgrywają znaczącą rolę na stan wymieszania składników. Stąd nadal poszukiwane są metody taniego, szybkiego i efektywnego wymieszania materiałów.

Procesowi mieszania komponentów niejednorodnych towarzyszy często zjawisko segregacji. Jest ono skomplikowane i ciągle niewystarczająco opisane [3, 6]. Kluczowym zagadnieniem przy badaniu procesu mieszania układów niejednorodnych, tj. o zróżnicowanej gęstości lub o zróżnicowanych wymiarach ziaren jest więc określenie optymalnych warunków prowadzenia procesu.

Aparatura i metodyka badań

Badania miały na celu analizę koncentracji składnika rozpraszanego w poszczególnych partiach mieszalnika dla dwóch przypadków. Porównano dane empiryczne uzyskane w oparciu o macierz prawdopodobieństw przejścia z danymi doświadczalnymi.

Badania prowadzono w poziomym mieszalniku bębnowym o pracy okresowej – o stosunku długości do średnicy równej $L/D = 10,6$. Cylindryczny bęben zamocowano w dwóch ułożyskowanych uchwytach, z których jeden poprzez przekładnię pasową napędzany był silnikiem prądu stałego o mocy 0,5 kW. W obwód zasilania silnika włączono autotransformator umożliwiającą regulację obrotów silnika. Mieszalnik pracował ze stałą prędkością równą $n = 1,315$ obr/s, co równało się połowie obrotów krytycznych bębna. Stopień wypełnienia przyjęto 35 % całkowitej objętości bębna. Do pomiaru prędkości obrotowej bębna użyto prędkościomierza, wyposażonego w czujnik magnetyczny. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – bęben, 2 – dno przytwierdzone do bębna, 3 – śruby dociskające pierścień, 4 – pierścień centrujący dno, 5 – śruba zabezpieczająca przed przekręceniem się dna, 6 – piasta, 7 – duże koło pasowe, 8 – wałek napędowy, 9 – łożyska, 10 – pasek klinowy, 11 – podpora mechanizmu napędowego z oprawą, 12 – małe koło pasowe, 13 – silnik, 14 – zabezpieczenie łożyska, 15 – wałek podtrzymujący, 16 – wymienne dno bębna

Procesowi mieszania poddano 5 par materiałów ziarnistych. Jako fazę rozpraszającą zastosowano materiały o gęstościach:

- śrut ołowiany – ($\rho_{sk} = 11700 \text{ kg/m}^3$)
- kulki stalowe – ($\rho_{sk} = 7800 \text{ kg/m}^3$)
- kulki szklane – ($\rho_{sk} = 2400 \text{ kg/m}^3$)
- tlenek glinu – ($\rho_{sk} = 1680 \text{ kg/m}^3$)
- gorczyca – ($\rho_{sk} = 970 \text{ kg/m}^3$)

Fazę rozpraszającą dla wszystkich układów stanowiły ziarna agalitu ($\rho_r = 2400 \text{ kg/m}^3$).

Materiały wykorzystane do badań charakteryzowały pewne własności: duża trwałość i odporność na ścieranie. Zastosowanie materiałów miękkich, np. niektórych nasion roślin uprawnych, spowodowałoby powstanie dodatkowego błędu pomiarów wskutek ich nietrwałości np. rozbijania w trakcie operacji długotrwałego mieszania.

Obserwowano rozprzestrzenianie się składnika kluczowego podczas długotrwałego czasu prowadzenia procesu mieszania. W praktyce przemysłowej dąży się oczywiście do minimalnie krótkiego okresu mieszania przy zachowaniu jak najwyższej jakości mieszaniny.

Do opisu kinematyki procesu wykorzystano model stochastyczny. Podstawowe założenie tego modelu głosi, że prawdopodobieństwo znalezienia się ziarna trasera po $N+1$ krokach zależy wyłącznie od stanu położenia tego ziarna w N -tym kroku poprzednim i nie zależy od stanów obserwowanych w przeszłości. Proces ten nazwany został procesem odznaczającym się brakiem pamięci lub procesem Markowa [1, 4]. Prawdopodobieństwo $p_j(N)$ znalezienia się dowolnego ziarna trasera w j -tym segmencie i po N krokach mieszania jest funkcją prawdopodobieństwa zdarzenia $p_i(0)$ oznaczającego, że ziarno przed rozpoczęciem mieszania znajdowało się w i -tym stanie oraz prawdopodobieństwa p_{ij}^N określającego przejście ze stanu i do j po N krokach mieszania:

$$p_j(N) = \sum_{i=1}^r p_i(0) p_{ij}^N, \quad i, j = \overline{1, r} \quad (1)$$

gdzie: N – liczba wszystkich ziaren w próbie; p – prawdopodobieństwo znalezienia trasera w dowolnym segmencie; s – odchylenie standardowe składu mieszaniny w w próbach; σ_0 – odchylenie standardowe na początku procesu mieszania; σ_r^2 – wariancja stanu randomowego; r – jest liczbą możliwych stanów ziaren fazy rozpraszanej.

Dla całego układu ziarnistego ostatnią zależność można przedstawić w postaci wzoru mnożenia macierzy:

$$\vec{p}(N) = \vec{p}(0) P^N, \quad (2)$$

gdzie: $\vec{p}(N)$ – oznacza wektor prawdopodobieństwa rozkładu trasera po N krokach mieszania; $\vec{p}(0)$ – wektor prawdopodobieństwa rozkładu trasera przed zmieszaniem; P – macierz prawdopodobieństw przejścia ziaren trasera ze stanu i -tego do j -tego w jednym kroku.

W praktyce poszczególne wartości prawdopodobieństwa p_{ij} są utożsamiane z udziałem trasera x_i w odpowiednich segmentach mieszalnika po pierwszym kroku mieszania, co można zapisać jako

$$x_i = \frac{n_i}{N_i} = p_{ij}, \quad i, j = \overline{1, r}, \quad (3)$$

gdzie: n_i – oznacza liczbę ziaren trasera; N_i – liczba wszystkich ziaren w i -tym segmencie mieszalnika.

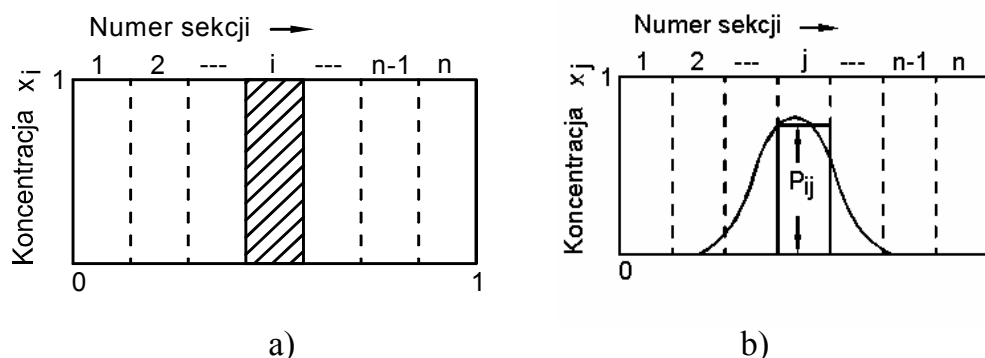
Dla macierzy prawdopodobieństw przejścia P buduje się kolejne wiersze, dla których indeks i jest utożsamiany z numerem sekcji składnika kluczowego przed zmieszaniem, zaś j oznacza numer sekcji po zmieszaniu. Bliższe informacje na temat budowy macierzy zawarte są w rozdziale poświęconym metodyce badań. Ogólnie macierz tę można przedstawić w postaci:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1j} & \cdots & p_{1r} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2j} & \cdots & p_{2r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \cdots & p_{ij} & \cdots & p_{ir} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{r1} & p_{r2} & \cdots & p_{rj} & \cdots & p_{rr} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Macierz wyznacza się eksperymentalnie. Przed przystąpieniem do jej wyznaczenia, należy wykonać niezbędne czynności:

- podzielić mieszalnik na odpowiednią liczbę segmentów,
- ustalić krok mieszania,
- założyć, iż koncentracje składnika kluczowego w badanych sekcjach mieszalnika odpowiadają liczbowo prawdopodobieństwom.

Ustalenie kroku mieszania również odbywa się na drodze doświadczalnej i polega na znalezieniu optymalnego czasu trwania tego kroku [2]. Składnik kluczowy umieszczamy w i -tym segmencie kasetki (rys. 2).



Rys. 2. Rozkład koncentracji traseru w bębnie: a) przed rozpoczęciem procesu mieszania; b) po czasie Δt – odpowiadającemu jednemu krokowi mieszania

W ten sposób przystępowano do wyznaczenia poszczególnych wierszy macierzy prawdopodobieństw przejścia. W tym celu korzystając z kasety załadowniczo – wyładowniczej, zasypano traserem pierwszą sekcję, kasety umieszczano w bębnie mieszarki i wysypywano doń materiał. Dokonywano operacji mieszania dla zadanych kroków. Materiał w bębnie ulegał częściowemu rozproszeniu. Po jego zatrzymaniu dokonywano analizy składu ziarnowego w poszczególnych segmentach kasety. Tę czynność powtarzano kilkakrotnie dla wszystkich 30-tu segmentów, po czym wartość koncentracji traseru uśredniano. Tak powstała macierz stanowiła bazę do obliczania teoretycznych stopni zmieszania. Dla badanego przypadku jeden krok mieszania równy jest pięciu obrotom bębna. Każdorazowo składnik kluczowy zasypywano w pierwszej sekcji.

Obliczeń teoretycznych dokonano w oparciu o napisany w tym celu program mnożenia macierzy (przy 40 tys. krokach mieszania, macierz należało pomnożyć przez siebie tyle właśnie razy). Rachunek macierzowy pozwolił na wyznaczenie teoretycznych wartości stopnia zmieszania, które następnie porównano z wartościami empirycznymi otrzymanymi na drodze doświadczalnej. Dla wszystkich materiałów zbudowano macierz prawdopodobieństw przejść w jednym kroku. Poniżej zamieszczono jedną z pięciu opracowanych macierzy (tabela 1).

Dane rzeczywiste uzyskiwano podczas operacji mieszania dla wyznaczonej liczby kroków procesu. Aparat zatrzymywano i badano stopnie zmieszania dla następujących czasów: 1, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 480, 640 oraz 800 minut.

Po każdym kroku mieszania obliczano stopień zmieszania. Stopień zmieszania dla całego układu jest wyznaczany na podstawie analizy koncentracji fazy rozpraszanej w poszczególnych próbkach.

Udział składnika kluczowego wyznaczano korzystając ze wzoru:

$$x_i = \frac{v_{Bi}}{v_{Ai} + v_{Bi}}, i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

gdzie: v_{Ai} – objętość składnika kluczowego w i -tym segmencie; v_{Bi} – objętość fazy rozpraszającej w i -tym segmencie,

Średni udział uzyskiwano na podstawie równania:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (6)$$

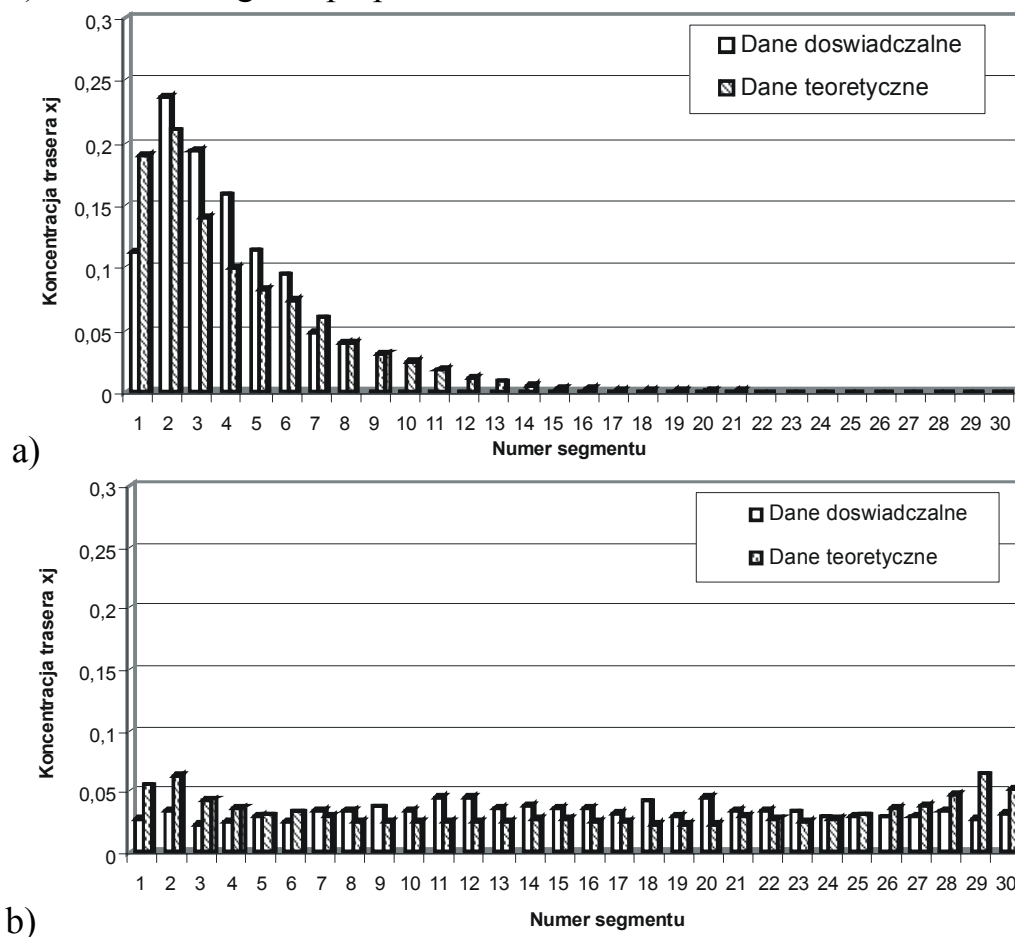
Stopień zmieszania materiałów obliczano, korzystając z definicji zaproponowanej przez Rose'a [7]:

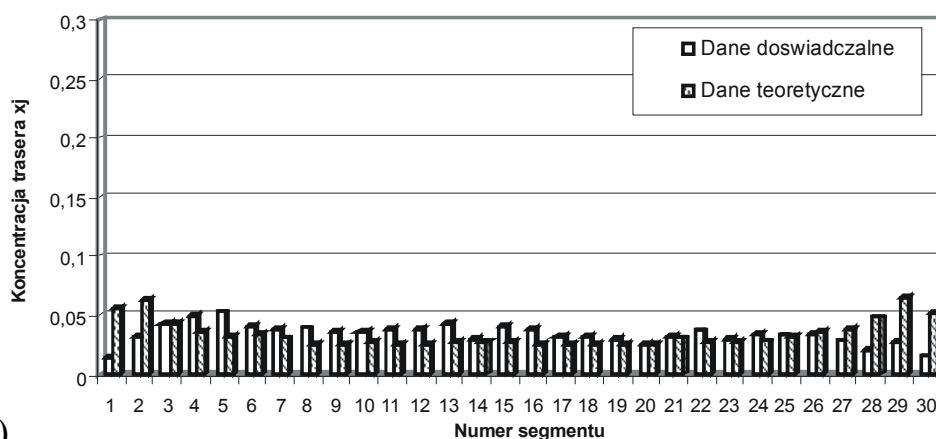
$$M = 1 - \frac{s}{\sigma_0}. \quad (7)$$

Wyniki badań

W celu ustalenia rozprzestrzeniania się składnika kluczowego w bębnie porównano zgodność rozkładu jego koncentracji na różnych etapach procesu mieszania dla wartości otrzymanych na drodze mieszania oraz wartości teoretycznych wyliczonych z macierzy przejścia. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci histogramów (rys. 3). Rozkłady te pokazano dla dwóch wybranych układów: agalit – gorczyca (zgodnie oddających rozkład koncentracji) oraz agalit – ołów (ukazujących pewne rozbieżności). Przykłady te odzwierciedlają rozkłady:

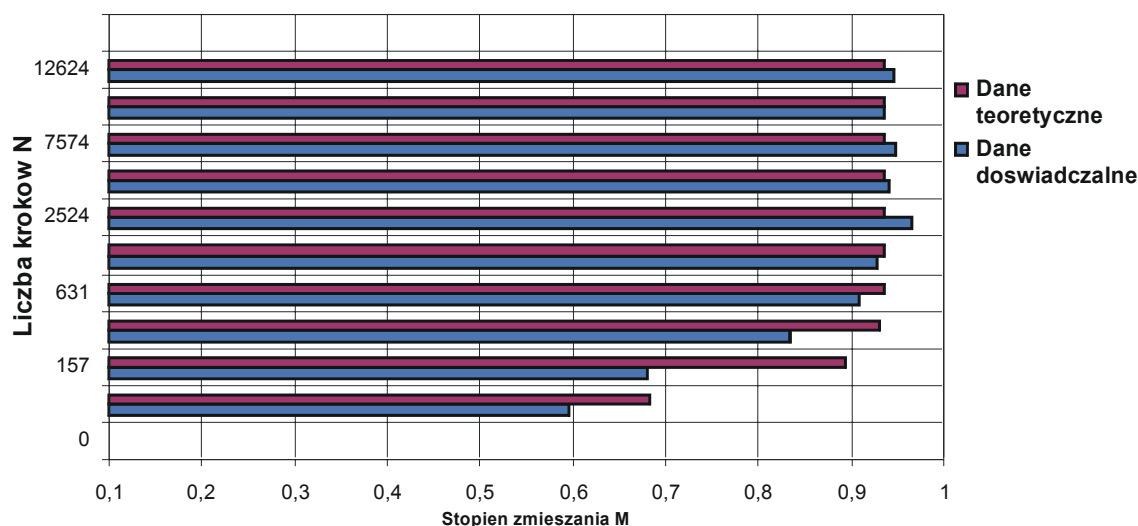
- a) na początku procesu mieszania,
- b) dla najwyższego uzyskanego stopnia zmieszania,
- c) dla końcowego etapu procesu.





c)

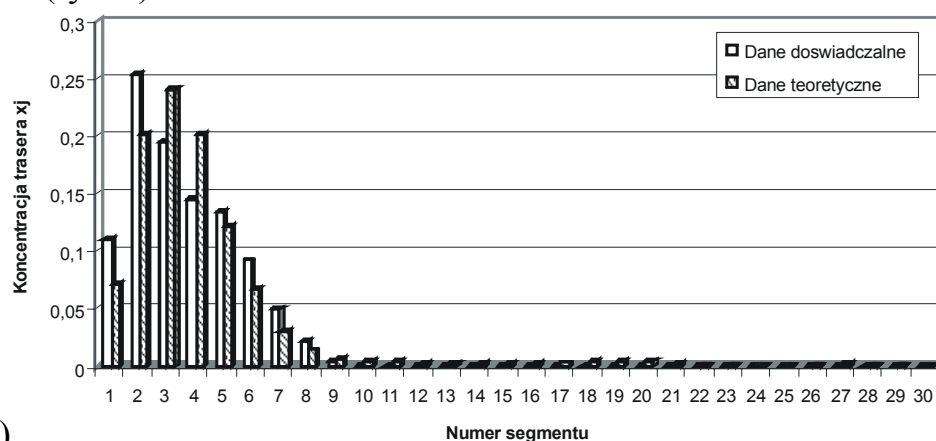
Rys. 3. Histogramy koncentracji traseru w różnych fazach procesu mieszania:
a) na początku procesu mieszania (po 1 min. = 5 kroków mieszania), b) dla najwyższego uzyskanego stopnia zmieszania (po 160 min.), c) dla końcowego etapu procesu (po 800 min.), dla układu: traser – gorczyca, faza rozpraszająca – agalit



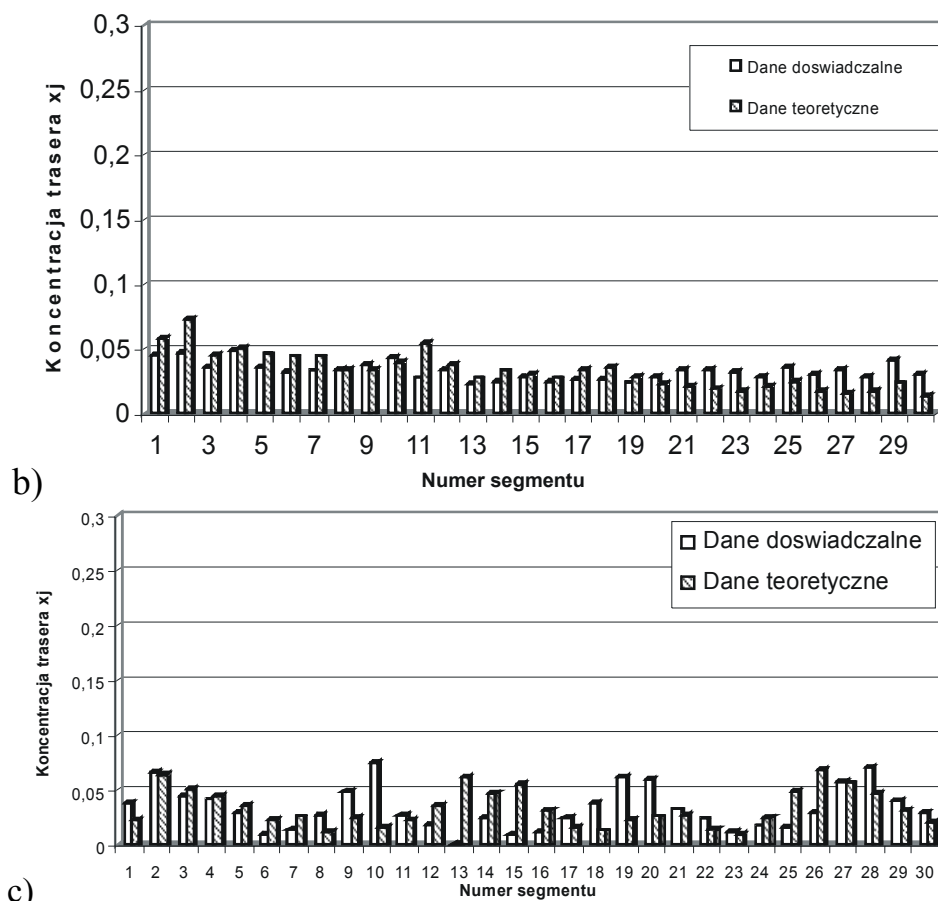
Rys. 4. Stopnie zmieszania teoretyczne i doświadczalne dla układu agalit- gorczyca dla poszczególnych punktów kontrolnych

Analiza powyższych histogramów koncentracji traseru dowodzi, że model stochastyczny dobrze opisuje proces. Widać na nich dobrą zgodność koncentracji traseru w poszczególnych sekcjach bębna z wartościami obliczonymi.

Dla par materiałów ołów – agalit oraz stal – agalit obserwuje się pewne rozbieżności pomiędzy rozkładem teoretycznym a empirycznym dla długiego czasu mieszania (rys. 5).



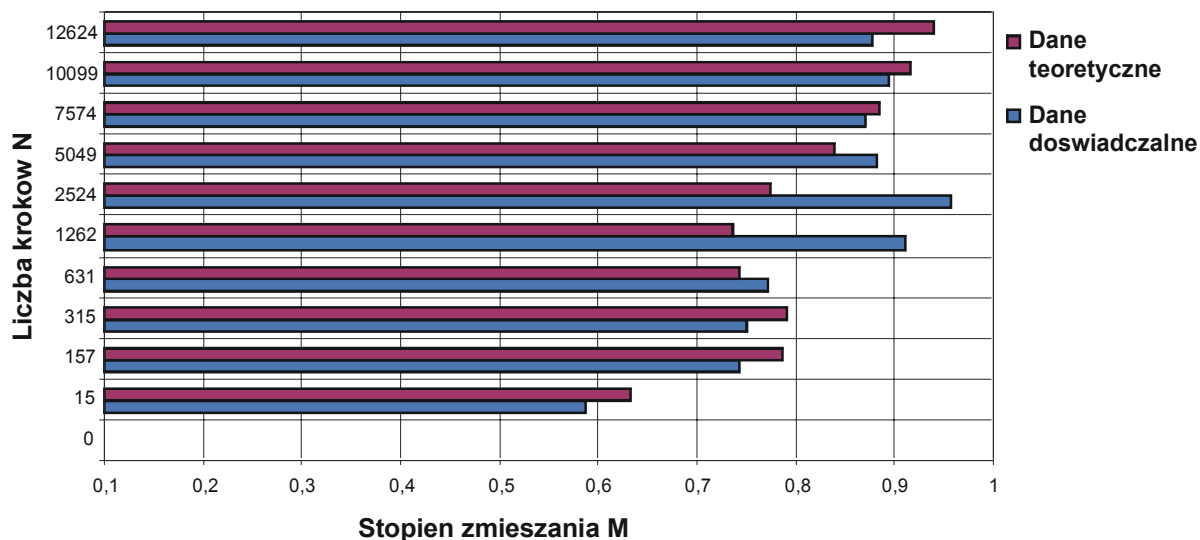
a)



Rys. 5. Histogramy koncentracji traseru w różnych fazach procesu mieszania dla układu: traser – kulki ołowiane, faza rozpraszająca – agalit po:
a) 15 krokach mieszania; b) 2524 krokach mieszania; c) 12624 krokach mieszania

Podobne wykresy otrzymano dla pozostałych układów [5].

Wyniki badań procesu mieszania układów, w których występuje segregacja, pokazano na przykładowym wykresie (rys. 6).



Rys. 6. Stopnie zmieszania teoretyczne i doświadczalne dla układu agalit-gorczyca dla poszczególnych punktów kontrolnych.

Wnioski

Badania dowiodły, iż model stochastyczny dobrze opisuje proces mieszania materiałów ziarnistych w mieszalniku bębnowym dla układów o różnych gęstości-

ach. Stwierdzono bardzo dobrą lub dobrą zgodność danych teoretycznych uzyskanych na podstawie łańcucha Markowa z danymi rzeczywistymi.

Dla najwyższego uzyskanego stopnia zmieszania oraz dla końcowego etapu procesu w trzech z pięciu badanych przypadkach uzyskano bardzo zbieżne dane doświadczalne z prognozowanymi.

Po 10 minutach prowadzenia procesu uzyskano stopnie zmieszania o wartościach 0,9 i wyższych (dla par materiałów kulki szklane – agalit, gorczyca – agalit, tlenek glinu – agalit) oraz ok. 0,8 (dla układów: stal – agalit, ołów – agalit), co pozwoliło zakwalifikować mieszaninę wg skali zaproponowanej przez Rose'a i Robinsona [8] odpowiednio jako dobrą i dość dobrą.

Literatura

1. **Benjamin J.R., Cornell C.A.** Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów, WNT Warszawa, 1997.
2. **Boss J., Knapik A.** Modele stochastyczne procesu mieszania, Zesz. Nauk. WSI – Opole Studia i Monografie z. 78, 1995.
3. **Hill K.M., Kakalios J.** 1995. Reversible Axial Segregation of Rotating Granular Media, Phys. Rev., E 52, 4393.
4. **Fisz M.** Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna, PWN, Warszawa, 1969.
5. **Kolasa A.** 2002. Mieszanie materiałów ziarnistych niejednorodnych w mieszalniku bębnowym, Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska.
6. **Metcalf G., Shattuck M.** 1996. Pattern Formation during Mixing and Segregation of Flowing Granular Materials, Physica A, 233, 709.
7. **Rose H.E.** 1959. A Suggested Equation Relating to the Mixing of Powders and Its Application to the Study of the Performance of Certain Types of Machine, Trans. Instn Chem. Engr. – P. 37.
8. **Rose H.E., Robinson D.J.** 1965. The Application of the Digital Computer to the Study of Some Problems in the Mixing of Powders, Instn Chem. Engrs, Symp. Series No 10, 61-70.

УДК 674.047

Ст. викладач М.В. Дендюк – НЛТУ України, м. Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛОГІСНОГО І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНІВ ДЕРЕВИНИ У ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ЗАЛЕЖНО ВІД ЇЇ ПОРОДИ

Розглянуто динаміку вологісного і напружено-деформівного станів деревини у процесі сушіння залежно від породи.

Senior teacher M.V. Dendyuk – NUFWT of Ukraine, L'viv

Research of humidity and stressedly-deformed states of wood in the process of drying depending on a breed

The dynamics of the humidity and stressedly-deformed states of wood is considered in the process of drying depending on a breed.

Актуальність і аналіз відомих досліджень. Розвиток вологісного і напружено-деформівного станів у пиломатеріалах під час сушіння тісно пов'язаний зі структурою і густиною деревини [1, 2]. Властивості деревини дуже відрізняються в межах породи, а ще більше між породами. Відомі дослідження напружень з врахуванням реологічної поведінки деревини [3-4], проведені для хвойних порід в одновимірній постановці задачі, дають тільки