

УДК 664.022.54:621.6.04

**Доломакін Ю. Ю.**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри машини і апарати харчових та фармацевтичних виробництв,  
Національний університет харчових технологій  
Київ, Україна  
**E-mail:** [dyu76@ukr.net](mailto:dyu76@ukr.net)  
**ORCID:** 0000-0001-5279-9916

**Беседа С. Д.**

старший викладач кафедри машини і апарати харчових та фармацевтичних виробництв,  
Національний університет харчових технологій  
Київ, Україна  
**E-mail:** [beseda@nuft.edu.ua](mailto:beseda@nuft.edu.ua)  
**ORCID:** 0009-0005-6926-2740

**Бабанова О. І.**

старший викладач кафедри машини і апарати харчових та фармацевтичних виробництв,  
Національний університет харчових технологій  
Київ, Україна  
**E-mail:** [petrikeyl@ukr.net](mailto:petrikeyl@ukr.net)  
**ORCID:** 0000-0001-6906-158X

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В ОБЕРТОВИХ БАРАБАННИХ АПАРАТАХ

### Анотація

Метод дискретних елементів (DEM), який був розроблений на початку 70-х років минулого сторіччя для одночасного відстеження всіх окремих взаємодіючих частинок, широко застосовується для оцінки та покращення продуктивності обладнання у віртуальному середовищі з метою уникнення дорогого прототипування.

Для моделювання низки процесів переробних виробництв важливим є дослідження поведінки сипкого матеріалу в обертовому барабані. Кількість досліджень, присвячених цій тематиці, значно збільшилась за останній час. Потрібно відмітити роботи, які пов'язані із параметричним аналізом поведінки частинок під час обертання барабана. Серед них є роботи, присвячені розрахункам товщини спадаючого шару, розрахункам середнього часу перебування гранул, а також дослідженням верхніх і нижніх кутів укусу.

Робота присвячена пошуку шляхів підвищення ефективності барабанного змішувача. Змішування сипких компонентів є важливим і невід'ємним етапом практично в кожному промисловому виробництві і пріоритетним напрямком технічного прогресу у промисловості, зокрема для вдосконалення технологічних процесів, заміни морально і фізично застарілого обладнання. Для аналізу ефективності наявних конструкцій барабанного змішувача представлені результати дослідження потоків часток матеріалу в робочій зоні апарата, які досліджувалися шляхом моделювання процесу в CAE-комплексі. У роботі застосовано алгоритм розрахунку потоку часток у програмному комплексі EDEM, розроблено розрахунковий та аналітичний аналіз ефективності змішування сипких компонентів. Для підвищення ефективності барабанного змішувача важливо дослідити поведінку сипкого продукту у камері для подальшого його конструювання з метою збільшення такої ефективності принаймні до 90%.

Розроблений підхід може слугувати прикладом для майбутніх імітаційних досліджень дрібнодисперсних частинок у різних процесах, що мають відношення до харчової, хімічної та фармацевтичної промисловості.

**Ключові слова:** барабанний змішувач, конструкція, ефективність, частинка, DEM-моделювання.

**Вступ.** Задача дослідження руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах становить великий інтерес. Особливе значення надається дослідженню траєкторії руху сипкого матеріалу за низьких та високих швидкостей обертання барабана. На основі аналізу робочих процесів цих систем усі види руху оброблюваного матеріалу можуть бути зведені до двох найбільш характерних рухів в'язкої ньютонівської рідини та сипкого тіла [1; 3].

Рух сипкого матеріалу в обертовому барабані можна умовно розділити на два граничних режими – інерційний та квазістатичний. Квазістатичний режим руху сипкого матеріалу характеризується малою швидкістю зсуву та описується теорією граничної рівноваги. Інерційний режим характеризується порівняно великими швидкостями зсуву та описується «теорією швидких рухів гранульованого середовища» [9].

**Мета роботи** – імітаційне визначення режимів роботи сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах. Підвищення ефективності та працездатності змішувача є актуальною темою у зв'язку зі значними витратами на процес змішування, ремонт обладнання та витратами часу на проведення процесу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для дослідження характеристик середньої швидкості руху тіл, що змішуються, і їх числа зіткнень вважаємо за доцільне використання різного розрахункового програмного забезпечення, зокрема DEM-системи, в якій можна реалізувати процес руху тіл, що змішуються, і побудувати електронно-цифрову модель САЕ-системи та провести низку чисельних експериментів. *EDEM* є провідним на ринку програмним забезпеченням для дискретних елементів (DEM) для моделювання сипучих матеріалів і їх взаємодії один з одним та обладнанням [2].

У даній праці проводилося 3 розрахунки: 1) 3 лопаті під кутом  $45^\circ$ ; 2) 3 лопаті під кутом  $90^\circ$ ; 3) 2 лопаті під кутом  $45^\circ$ . На рисунках представлено рух часток матеріалу у змішувачі з 2 лопатями під кутом  $45^\circ$  як найбільш показовий.

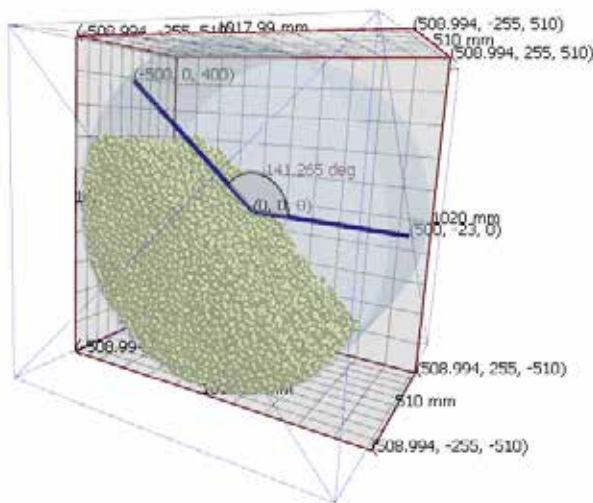
За допомогою САД-системи *Inventor* розроблено 3D-модель барабанного змішувача. В САЕ-комплексі *EDEM* проведено розрахунок потоків суміші та моделювання процесу змішування, що відбувається в машині [7].

Протягом 6 с було проведено симуляцію. Цього вистачило, аби побачити місця, які потребують у подальшому вдосконалення конструкції.

Спочатку був визначений важливий параметр – кут підйому (обвалення) шару часток при обертанні у циліндричному барабані (рис. 1). Згідно з розрахунками програмного комплексу граничний кут обвалення шару часток у барабані буде дорівнювати [10]:

$$\alpha = 180 - 141,265^\circ = 38^\circ 44' 10''.$$

Серед безлічі характеристик, що розглядаються серед вихідних даних у модулі *EDEM* для оцінювання ефективності процесу змішування в барабані, були визначені такі, як середня швидкість переміщення частинок і кількість зіткнень між ними.



**Рис. 1.** До визначення кута підйому шару сировини

Джерело: розроблено авторами

Наступна частина результатів розкриває розподілення швидкості часток у середині барабана у вигляді проєкцій на осях  $x$ ,  $y$  та  $z$  та у вигляді результуючої абсолютної швидкості (рис. 2).

Максимальну зміну швидкості протягом першої секунди ми не приймаємо до уваги, тому що це швидкість завантаження часток у барабан.

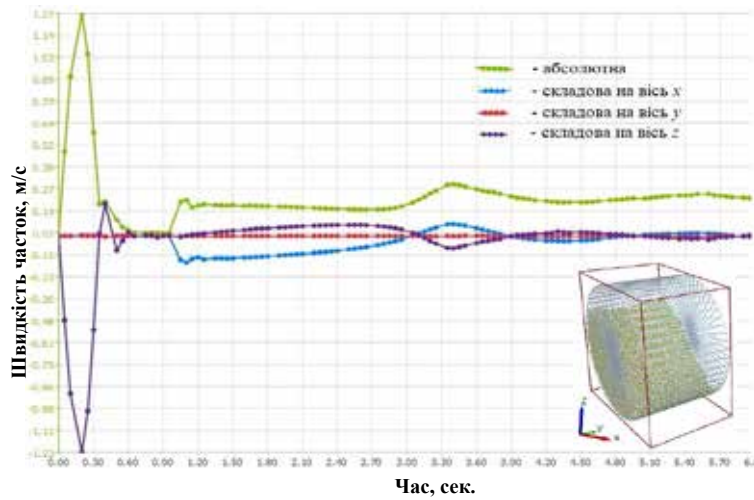
І далі наводимо абсолютну швидкість часток як суму складників на осі координат без урахування першої секунди завантаження.

Робимо висновок про те, що максимальна швидкість, якої досягають частки усередині барабана, становить близько 0,3 м/с, мінімальне значення – 0,15 м/с. Середнє значення буде коливатись на рівні 0,21 м/с.

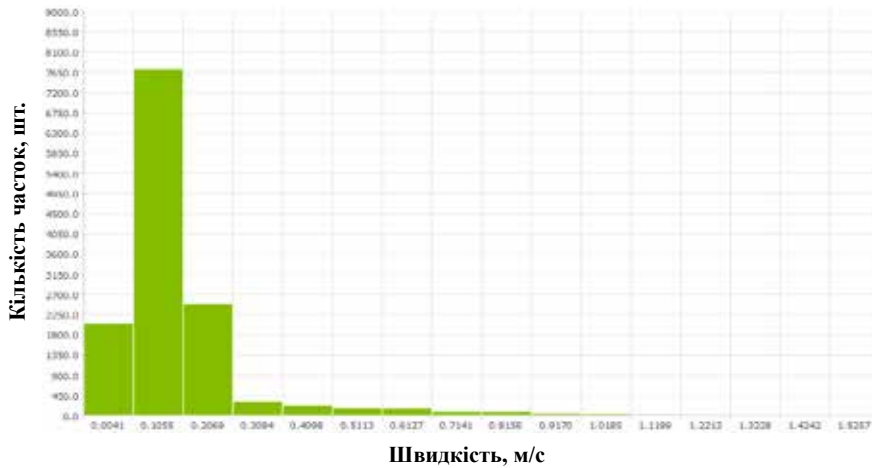
На графіку (рис. 3) показано, що найбільша кількість часток має швидкість у діапазоні 0,0041...0,4098 м/с.

Гістограма, зображена на рис. 4, вказує на дистанцію, яку у середньому проходить певна кількість часток [5; 7].

Відповідно на наступній гістограмі (рис. 5) зображена кількість контактів між частками на певному часовому проміжку обертання барабана [6].



**Рис. 2.** Розподілення швидкості часток у середині барабана у вигляді проєкцій на осях *x*, *y* та *z*  
Джерело: розроблено авторами



**Рис. 3.** Гістограма розподілу кількості часточок за швидкістю  
Джерело: розроблено авторами



**Рис. 4.** Гістограма розподілу дистанції, пройденої частками  
Джерело: розроблено авторами

Далі наведені результати динамічних характеристик системи «барабан – частки», необхідні для розрахунків проєктованої конструкції.

Першими наведемо данні, що описують вплив на частку динамічних характеристик, а саме силовий вплив (рис. 6) та зміну потенційної енергії частки (рис. 7).

Для визначення потужності приводу, що буде приводити в рух барабанний змішувач, було визначено зміну крутного моменту у часі (рис. 8).

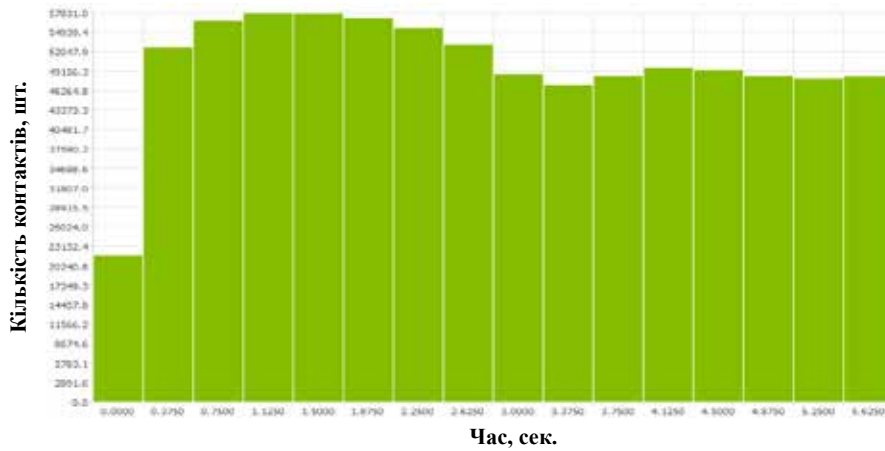


Рис. 5. Гістограма кількості контактів між частками

Джерело: розроблено авторами

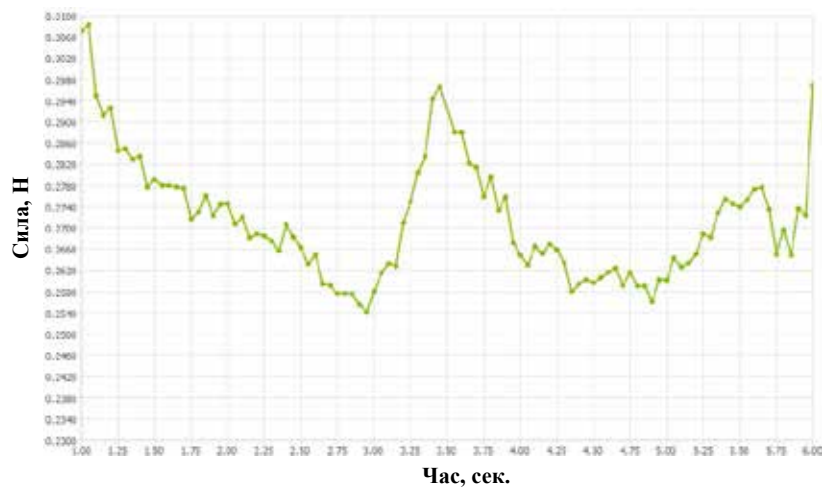


Рис. 6. Сила, що діє на частки усередині барабана, що обертається

Джерело: розроблено авторами

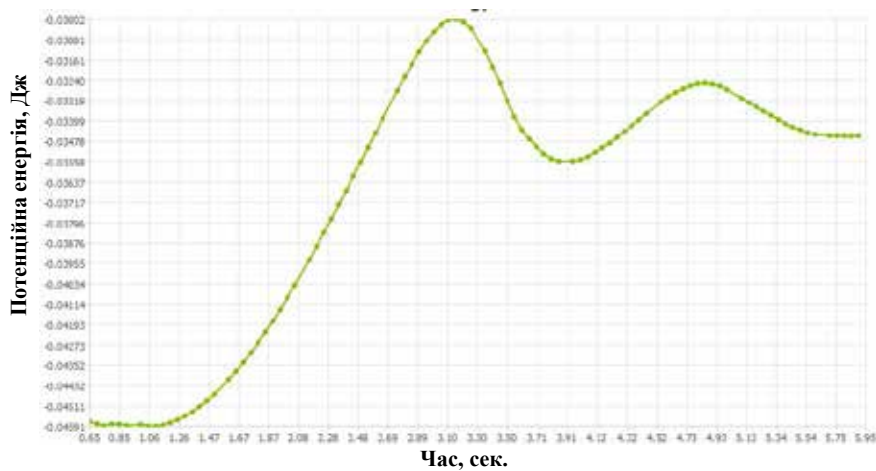
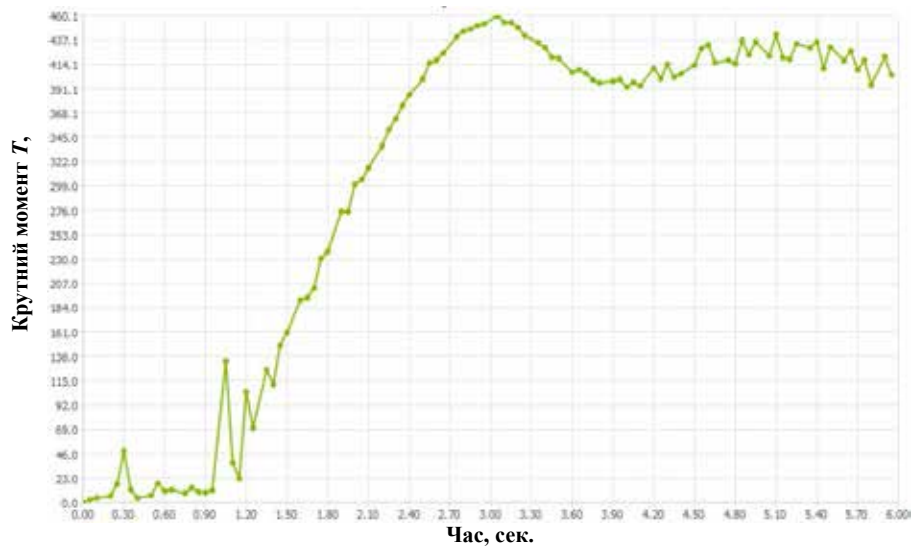


Рис. 7. Зміна потенційної енергії частки усередині барабана, що обертається

Джерело: розроблено авторами



**Рис. 8.** Крутий момент, що виникає на корпусі барабана, що обертається

Джерело: розроблено авторами

Знаючи крутий момент, можемо визначити потужність приводу змішувача за формулою [8]:

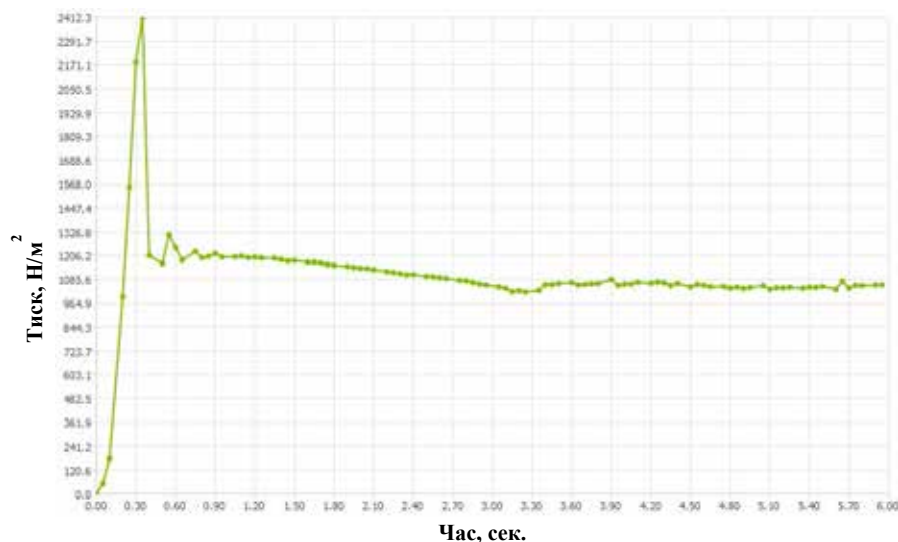
$$N = T \times \omega,$$

де  $T$  – крутий момент на осі барабана, Н×м;  $\omega$  – кутова швидкість обертання барабана, рад/с.

Отримавши максимальне значення крутного моменту на осі барабана (460 Н×м) та задавши межі його кутової швидкості обертання (2,1...5,2 рад/с), матимемо приблизні значення потужності приводу барабанного змішувача:

$$N = T \times \omega = 460 \times (2,1 \dots 5,2) = 966 \dots 2392 \text{ Вт.}$$

Наступна динамічна характеристика, що необхідна для розрахунку конструкції барабана, а саме товщини його стінки, представлена на графіку зміни величини тиску (рис. 9), що діє на його внутрішню поверхню.



**Рис. 9.** Тиск на внутрішній поверхні барабана від часток під час його обертання

Джерело: розроблено авторами

Отже, раціональним є використання змішувача з 2 лопатями, встановленими під кутом  $45^\circ$ , тому що змішування матеріалу відбувається швидко та якісно, але існує застійна зона, її можливо позбутися, змінивши конструкцію корпуса змішувача. Вона присутня через те, що лопаті не дістають до корпуса і через це майже немає контакту з матеріалом.

**Висновки.** Проведене імітаційне моделювання засобами програми *EDEM* дає можливість визначити траєкторію руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах.

За результатами моделювання отримано: кут обвалення матеріалу; розподіл дистанції, пройденої частками; кількість контактів між частками; розподіл кількості часточок за швидкістю; проєкції швидкості часток на осях  $x$ ,  $y$  та  $z$  у часі; абсолютну швидкість часток усередині барабана; кутову швидкість часток; силу, що діє на частки. Серед механічних параметрів барабанного змішувача також визначено крутний момент, що виникає на його корпусі, та тиск на його внутрішній поверхні.

Отримані результати дають можливість аналізувати режими руху сипкої сировини та встановлювати залежність між параметрами установки та матеріалом. Ця інформація буде корисною для проєктування змішувачів для приготування сипких напівфабрикатів.

#### Список використаних джерел

1. Assessment of bi-disperse solid particles mixing in a horizontal paddle mixer through experiments and DEM / M. Ebrahimi, A. Yaraghi, B. Jadidi, F. Ein-Mozaffari, A. Lohi. *Powder Technology*. 2021. Vol. 381. P. 129–140.
2. Effects of ball-to-powder diameter ratio and powder particle shape on EDEM simulation in a planetary ball mill / K.-C. Kim, T. Jiang, N.-L. Kim, C. Kwon. *Journal of the Indian Chemical Society*. 2022. Vol. 99, Issue 1, Article ID: 100300.
3. Effect of aspect ratio of ellipsoidal particles on segregation of a binary mixture in a rotating drum / S. Kumar, S. Khatoon, S. Parashar, P. Dubey, J. Yogi A. Anand. *Powder Technology*. 2023. Vol. 427. Article ID: 118682.
4. Li M. DEM Simulation on Mixing Characteristics and Macroscopic/Microscopic Flow Behaviors of Different-Shaped Sphero-Cylinders in a Rotating Drum, *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60. P. 8874–8887.
5. Mhadhbi M. Calibration of DEM Parameters to Simulate a Planetary Ball Mill. *Advances in Materials Physics and Chemistry*. 2022. Vol. 12. P. 155–162.
6. Sensitivity analysis of particle contact parameters for DEM simulation in a rotating drum using response surface methodology / W. Rong, Y. Feng, P. Schwarz, T. Yurata, P. Witt, B. Li, T. Song, J. Zhou. *Powder Technology*. 2020. Vol. 362. P. 604–614.
7. A study of the design and arrangement of flights in a rotary drum / J.C. Silveira, R.M. Lima, R.J. Brandao, C.R. Duarte, M.A. Barrozo. *Powder Technology*. 2022. Vol. 395. P. 195–206.
8. Efficient DEM modeling of solid flavor particle mixing in a rotary drum / R. Sleuwen, S. Pantaleev, M. Ebrahimi, L. Feng. *Powder Technology*. 2024. Vol. 437. Article ID: 119559.
9. Influence of particle size and blender size on blending performance of bi-component granular mixing: a DEM and experimental study / S. Tanabe, S.R. Gopireddy, H. Minami, S. Ando, N.A. Urbanetz, R. Scherließ. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2019. Vol. 134. P. 205–218.
10. Parametric optimization and experimental verification of multi-fertilizer mixing by air blowing and blade stirring based on discrete element simulations / X. Xi, R. Wang, X. Wang, Y. Shi. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 210. Article ID: 107895.
11. Modelling of Grain Breakage of in a Vertical Rice Mill Based on DEM Simulation Combining Particle Replacement Model / Y. Zeng, B. Mao, F. Jia, Y. Han, G. Li. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 215. P. 32–48.

#### **Dolomakin Yu. Yu.**

*Candidate of Technical Sciences,*

*Senior Lecturer at the Department of Machines and Apparatuses for Food and Pharmaceutical Productions,  
National University of Food Technology  
Kyiv, Ukraine*

**E-mail:** *dyy76@ukr.net*

**ORCID:** *0000-0001-5279-9916*

#### **Beseda S. D.**

*Assistant Professor at the Department of Machines and Apparatuses for Food and Pharmaceutical Productions,  
National University of Food Technology  
Kyiv, Ukraine*

**E-mail:** *beseda@nuft.edu.ua*

**ORCID:** *0009-0005-6926-2740*

#### **Babanova O. I.**

*Assistant Professor at the Department of Machines and Apparatuses for Food and Pharmaceutical Productions,  
National University of Food Technology  
Kyiv, Ukraine*

**E-mail:** *petrikeyl@ukr.net*

**ORCID:** *0000-0001-6906-158X*

## SIMULATION MODELLING OF B-ULK MATERIAL MOVEMENT IN ROTATING DRUM MACHINES

### Abstract

The discrete element method (DEM), which was developed in the early 70s to simultaneously track all individual interacting particles, is widely used to evaluate and improve equipment performance in a virtual environment to avoid costly prototyping.

To model a number of processes in processing industries, it is important to study the behaviour of bulk material in a rotating drum. The number of studies on this topic has increased significantly in recent years. It is worth noting the works related to the parametric analysis of the behaviour of particles during drum rotation. Among them are works on calculating the thickness of the falling layer, calculating the average residence time of the pellets, and studying the upper and lower slope angles.

The research is devoted to finding ways to improve the efficiency of a drum mixer. Mixing of bulk components is an important and integral stage in almost every industrial production and a priority area of technical progress in industry, improvement of technological processes, replacement of obsolete and physically outdated equipment. To analyse the effectiveness of existing designs of a drum mixer, the paper presents the results of studying the flows of material particles in the working area of the device, which were investigated by modelling the process in the CAE complex. The paper uses the algorithm for calculating the particle flow in the EDEM software package, and develops a computational and analytical analysis of the efficiency of mixing bulk components. To improve the efficiency of a drum mixer, it is important to study the behaviour of the bulk product in the chamber for its further design to increase it to at least 90%.

The developed approach can serve as an example for future simulation studies of fine particles in various processes related to the food, chemical and pharmaceutical industries.

**Key words:** drum mixer, design, efficiency, particle, DEM modelling.

### References

1. Ebrahimi, M., Yaraghi, A., Jadidi, B., Ein-Mozaffari, F., & Lohi, A. (2021). Assessment of bi-disperse solid particles mixing in a horizontal paddle mixer through experiments and DEM. *Powder Technology*, Vol. 381, pp. 129–140.
2. Kim, K.-C., Jiang, T., Kim, N.-L., & Kwon, C. (2022). Effects of ball-to-powder diameter ratio and powder particle shape on EDEM simulation in a planetary ball mill. *Journal of the Indian Chemical Society*, Vol. 99, Issue 1, Article ID: 100300.
3. Kumar, S., Khatoun, S., Parashar, S., Dubey, P., Yogi, J., & Anand, A. (2023). Effect of aspect ratio of ellipsoidal particles on segregation of a binary mixture in a rotating drum. *Powder Technology*, Vol. 427, Article ID: 118682.
4. Li, M., et al. (2021). DEM Simulation on Mixing Characteristics and Macroscopic/Microscopic Flow Behaviors of Different-Shaped Sphero-Cylinders in a Rotating Drum. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 60, pp. 8874–8887.
5. Mhadhbi, M. (2022). Calibration of DEM Parameters to Simulate a Planetary Ball Mill. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, Vol. 12, pp. 155–162.
6. Rong, W., Feng, Y., Schwarz, P., Yurata, T., Witt, P., Li B., Song, T., & Zhou, J. (2020). Sensitivity analysis of particle contact parameters for DEM simulation in a rotating drum using response surface methodology. *Powder Technology*, Vol. 362, pp. 604–614.
7. Silveira, J.C., Lima, R.M., Brandao, R.J., Duarte, C.R., & Barrozo, M.A. (2022). A study of the design and arrangement of flights in a rotary drum. *Powder Technology*, Vol. 395, pp. 195–206.
8. Sleuwwen, R., Pantaleev, S., Ebrahimi, M., & Feng, L. (2024). Efficient DEM modeling of solid flavor particle mixing in a rotary drum. *Powder Technology*, Vol. 437, Article ID: 119559.
9. Tanabe, S., Gopireddy, S.R., Minami, H., Ando, S., Urbanetz, N.A., & Scherließ, R. (2019). Influence of particle size and blender size on blending performance of bi-component granular mixing: a DEM and experimental study. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 134, pp. 205–218.
10. Xi, X., Wang, R., Wang, X., & Shi, Y. (2023). Parametric optimization and experimental verification of multi-fertilizer mixing by air blowing and blade stirring based on discrete element simulations. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 210, Article ID: 107895.
11. Zeng, Y., Mao, B., Jia, F., Han, Y., & Li, G. (2022) Modelling of Grain Breakage of in a Vertical Rice Mill Based on DEM Simulation Combining Particle Replacement Model. *Biosystems Engineering*, Vol. 215, pp. 32–48.