

УДК 621:542.3

СТАЦЕНКО В. В., БУРМІСТЕНКОВ О. П., БІЛА Т. Я.

Київський національний університет технологій та дизайну

## ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЙ ВІДЦЕНТРОВИХ ЗМІШУВАЧІВ НА ЇХ ЗГЛАДЖУВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ

**Мета.** Дослідження залежності згладжувальної здатності відцентрових змішувачів безперервної дії від їх конструктивних особливостей.

**Методика.** У роботі використані методи дискретних елементів, математичного моделювання та регресійного аналізу.

**Результати.** У роботі розглянуто п'ять конструкцій відцентрових змішувачів безперервної дії із роторами конічної та параболічної форми. Визначено конструктивні особливості змішувачів, що дозволяють змінювати їх згладжувальну здатність. На основі методу дискретних елементів розроблено математичні моделі руху частинок сипких матеріалів всередині кожного змішувача. Досліджено реакцію змішувачів, що розглядаються, на стрибкоподібну зміну кількості ключового компоненту. Розраховано параметри перехідних процесів та визначено середній час перебування частинок у змішувачі. Встановлено, що введення турбулізаторів у конструкцію змішувачів підвищує кінетичну енергію частинок, що призводить до зменшення часу їх перебування у змішувачі. При цьому відсутність турбулізатора призводить до зниження інтенсивності перемішування. Також встановлено, що найбільш ефективним способом підвищення згладжувальної здатності змішувача є введення додаткових роторів. За сукупністю технологічних та конструктивних параметрів використання змішувачів з конічним ротором та турбулізатором є найбільш ефективним з точки зору підвищення згладжувальної здатності.

**Наукова новизна.** На основі методу дискретних елементів розроблені моделі руху частинок сипких матеріалів у відцентрових змішувачах безперервної дії п'яти конструкцій. Визначено вплив конструктивних особливостей змішувачів на їх згладжувальну здатність та середній час змішування.

**Практична значимість.** Отримані результати дозволяють за заданими вимогами до згладжувальної здатності обрати конструкцію змішувача, що їм відповідає.

**Ключові слова:** змішувач, сипкий матеріал, метод дискретних елементів, ротор, турбулізатор.

**Вступ.** Змішувальні комплекси безперервної дії використовуються для виготовлення композицій сипких матеріалів у легкій, хімічній, харчовій та будівельній галузях промисловості [1, 2]. Безпосередньо змішування компонентів суміші відбувається у змішувачах, які розрізняються за принципом дії та конструкцією [3]. З точки зору енерговитрат, масогабаритних показників та інтенсивності впливу робочих органів на матеріал, відцентрові змішувачі безперервної дії є одними з найбільш перспективних. Водночас, завданням будь-якого змішувача є забезпечення заданих значень відсоткового складу та однорідності готової суміші. Принцип роботи обладнання безперервної дії передбачає надходження вхідних компонентів суцільними потоками, що мають задані об'ємні або масові продуктивності. Відхилення параметрів потоків від заданих значень призводить до виникнення у готовій суміші зон із некоректним відсотковим складом, тобто до зниження її однорідності [4]. Змінити кількість матеріалу, що надійшла у змішувач, неможливо. Водночас, значна кількість відхилень продуктивності потоків вхідних компонентів пов'язана із дискретною природою їх руху, наприклад, із схильністю до грудкоутворення. В таких випадках відхилення носять короткочасний характер та частково можуть бути компенсовані за рахунок згладжувальної здатності змішувача. З фізичної точки зору ефект згладжування досягається розділенням у змішувачі вхідних потоків сипких матеріалів та формуванням

складних траєкторій руху частинок, що взаємно перетинаються. Характер руху окремих частинок визначається їх взаємодією із робочими органами та корпусом змішувача, тобто його конструкцією. Це зумовлює актуальність дослідження впливу конструктивних особливостей змішувачів на їх згладжувальну здатність.

**Постановка завдання.** Завданням дослідження є визначення згладжувальної здатності відцентрових змішувачів безперервної дії різних конструкцій. З цією метою необхідно дослідити можливість змішувача компенсувати пульсації у потоках вхідних компонентів суміші.

**Результати та їх обговорення.** Для аналізу у роботі обрано п'ять конструкцій відцентрових змішувачів безперервної дії, які відрізняються формою ротора, наявністю турбулізатора та кількістю роторів (рис. 1-5).

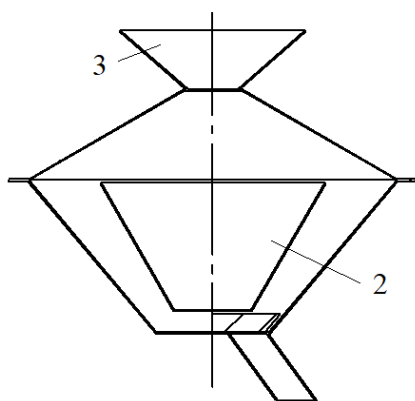


Рис.1. Схема змішувача з конічним ротором

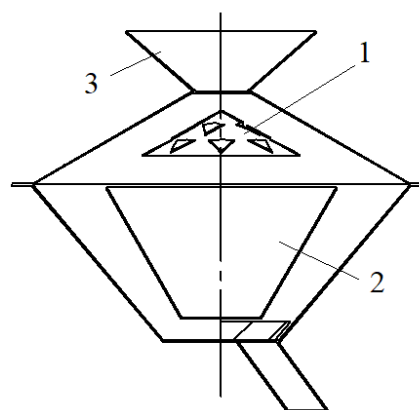


Рис. 2. Схема змішувача з конічним ротором та турбулізатором

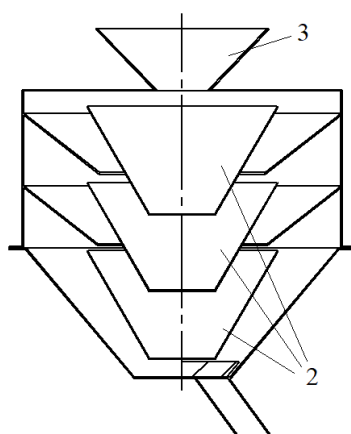


Рис. 3. Схема змішувача конструкції Ластовцева

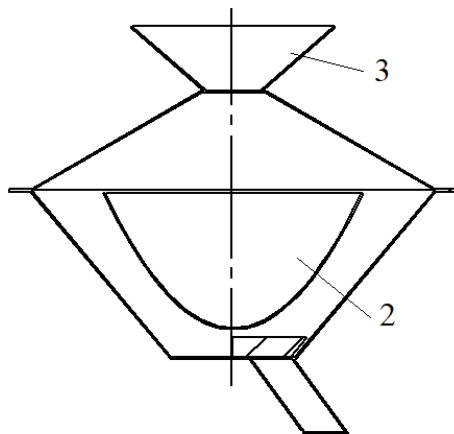


Рис. 4. Схема змішувача з параболічним ротором

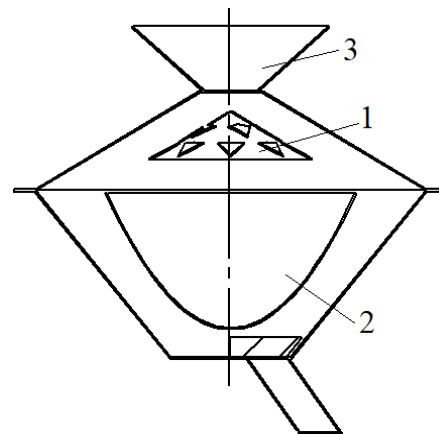


Рис. 5. Схема змішувача з параболічним ротором та турбулізатором

Вибір саме цих конструкцій зумовлено тим, що вони відображають основні підходи, які використовуються при проектуванні відцентрових змішувачів безперервної дії [5, 6]. Забезпечення якісного змішування передбачає створення умов, за яких частинки всіх компонентів будуть розподілені рівномірно по всьому об'єму змішувача. Це досягається розділенням вхідних потоків на частини, формуванням складних траєкторій руху частинок та збільшенням часу змішування. Конструкції змішувачів, що розглядаються у роботі, містять конструктивні елементи, які забезпечують використання всіх перелічених підходів. Турбулізатор 1 розділює вхідні потоки компонентів, ротор 2 – змінює прямолінійну траєкторію руху частинок на спіральну, послідовно розташовані ротори збільшують час змішування.

В усіх конструкціях сипкі компоненти, що змішуються, подаються через вхідний патрубок 3, розташований у верхній частині змішувача. Далі частинки під дією сили тяжіння потрапляють всередину змішувача. У конструкціях без турбулізатора (рис. 1 та 4) частинки падають у ротор, що обертається із постійною кутовою швидкістю. За рахунок дії відцентрових сил, компоненти суміші рухаються вгору вздовж бічної стінки ротора за спіральними траєкторіями. Після виходу з ротора вони відбиваються від верхньої частини корпусу змішувача та потрапляють у його нижню частину, де за допомогою ножа подаються до вихідного патрубку. Процес змішування відбувається переважно за рахунок взаємного перетинання траєкторій частинок різних компонентів суміші.

У конструкціях із турбулізаторами, що обертаються із заданими кутовими швидкостями та містять наскрізні отвори (рис. 2 та 5), вхідні потоки розділюються на декілька складових [5]. Одна частина вхідного потоку проходить крізь ці отвори та потрапляє у ротор, інша – відбивається від поверхні турбулізатора та верхньої частини корпусу ротора і лише після цього потрапляє всередину ротора. Таким чином, вхідний потік розділюється на складові, що мають різні початкові швидкості та положення всередині ротора. Це призводить до зміни форми спіральної траєкторії частинок та, відповідно, до додаткового їх перемішування.

Змішувач конструкції Ластовцева (рис. 3) містить три розташованих послідовно конічних ротори [6]. Після виходу із першого ротора частинки потрапляють у другий і далі у

третьої ротор. Це призводить до збільшення часу змішування та довжини спіральних траєкторій частинок, що у свою чергу, підвищує рівномірність їх розподілення.

Моделювання роботи змішувачів здійснювалось за методом дискретних елементів (МДЕ) [7-10]. Тривимірні моделі змішувачів створено у програмному середовищі Solidworks, а рух частинок моделювався за допомогою системи EDEM 2017.

Швидкість обертання роторів та турбулізаторів всіх змішувачів становила 126 рад/с.

Для всіх конструкцій змішувачів моделювання надходження частинок двох компонентів (основного та ключового) у зону вхідного патрубку здійснювалось протягом двох секунд. Інтенсивність надходження основного компоненту була задана постійною та становила 2000 частинок у секунду. Інтенсивність руху ключового компонента змінювалась стрибкоподібно: на інтервалі часу від 0 до 0,5 с становила 500 частинок у секунду, а у момент часу 0,5 с збільшувалась до 1000 частинок за секунду. Графік зміни кількості частинок ключового (КК) та основного (ОК) компонентів суміші на вході змішувача показано на рис.6. Тривалість надходження частинок у змішувач для всіх конструкції становила 2 секунди.

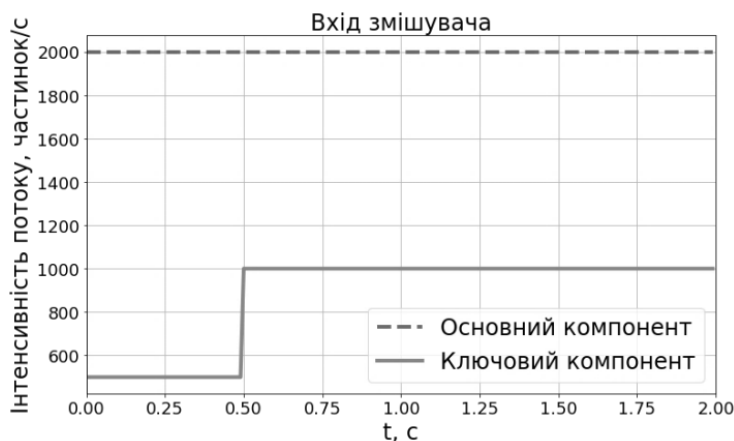


Рис. 6. Залежність кількості частинок на вході змішувача від часу

З метою оцінки відсоткового складу суміші для всіх змішувачів розраховано залежності зміни концентрації ключового компонента від часу:

$$C_{KK} = \frac{N_{KK}}{N_{KK} + N_{OK}} 100\%, \quad (1)$$

де  $N_{KK}$ ,  $N_{OK}$  – кількість частинок ключового та основного компонентів, відповідно.

Результати розрахунків показані на рис. 7-12. Момент часу  $t = 0$  відповідає моменту стрибкоподібної зміни інтенсивності надходження ключового компоненту. Реакцію системи на зміну вхідного сигналу можна наближено описати за допомогою експоненціальної функції вигляду:

$$C_{KK} = C_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2)$$

де  $C_0$  – концентрація КК в усталеному режимі роботи;  $\tau$  – постійна часу певного типу змішувача.

Для кожного перехідного процесу змінювання  $C_{KK}$ , що представлені на рис. 7-12, методом найменших квадратів розраховані коефіцієнти експоненціальної залежності (2) та побудовані графіки цих залежностей (показані суцільними лініями).

На рис.12 наведено всі графіки експоненціальних залежностей, що дозволяє візуально оцінити вплив конструкції змішувача на тривалість перехідного процесу. Чисельні значення коефіцієнтів наведені у табл.1.

Також для всіх конструкцій змішувачів за допомогою МДЕ визначено середній час перебування частинок всередині змішувача (табл.1).

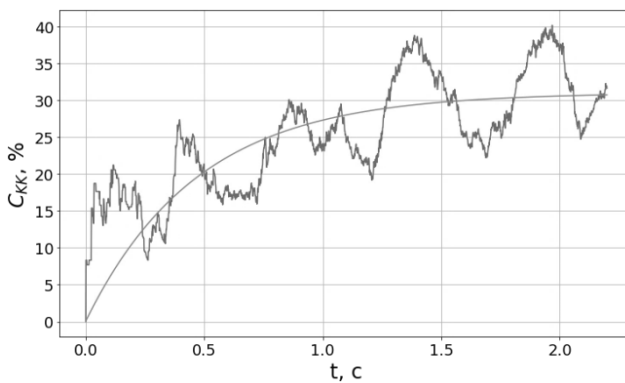


Рис. 7. Зміна концентрації КК на виході змішувача з кінчним ротором

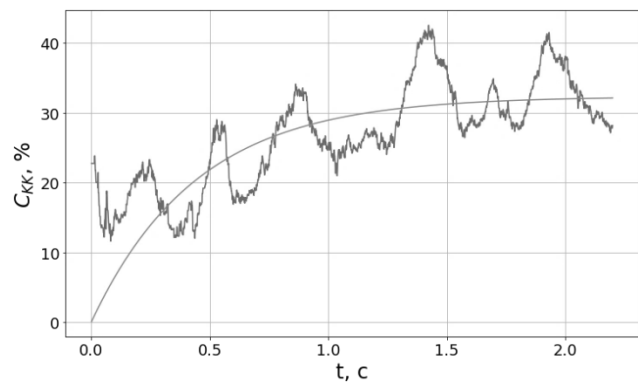


Рис. 8. Зміна концентрації КК на виході змішувача з кінчним ротором та турбулізатором

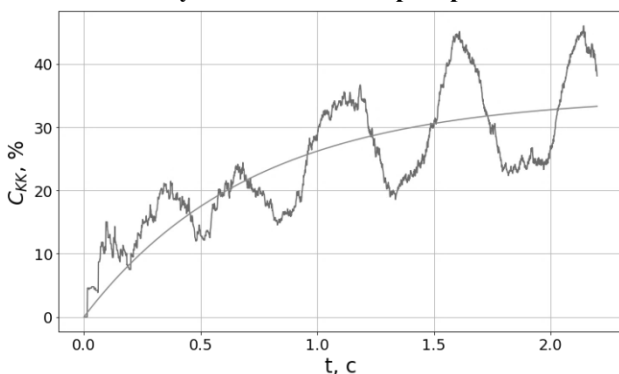


Рис. 9. Зміна концентрації КК на виході змішувача конструкції Ластовцева

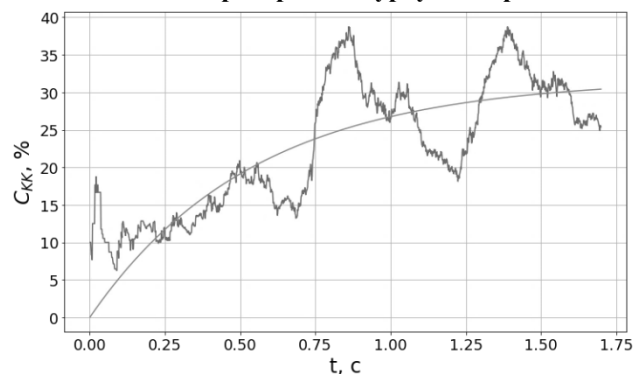


Рис. 10. Зміна концентрації КК на виході змішувача з параболічним ротором

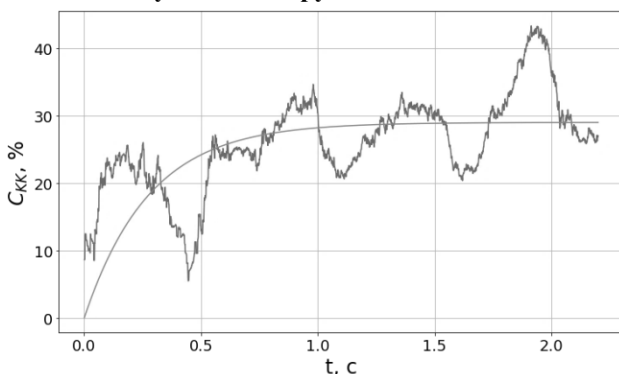


Рис. 11. Зміна концентрації КК на виході змішувача з параболічним ротором та турбулізатором

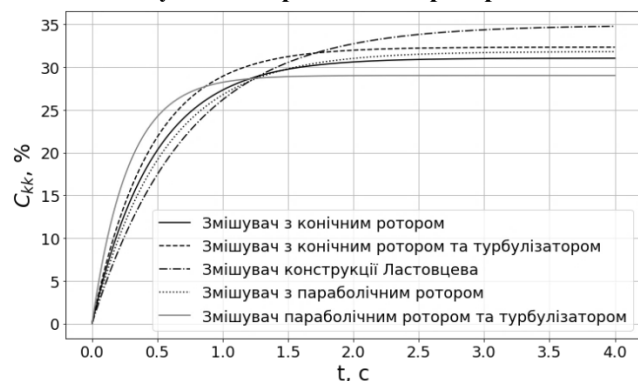


Рис. 12. Перехідні процеси зміни концентрації КК для різних конструкцій змішувачів

Таблиця 1

Параметри перехідних процесів у змішувачах різних типів

№ п/п	Тип змішувача	Параметри перехідного процесу	Середній час перебування частинок у змішувачі, с
1	Змішувач з конічним ротором	$C_{KK} = 31,037 \left( 1 - e^{-\frac{1}{0,472}t} \right)$	0,9
2	Змішувач з конічним ротором та турбулізатором	$C_{KK} = 32,326 \left( 1 - e^{-\frac{1}{0,444}t} \right)$	0,85
3	Змішувач конструкції Ластовцева	$C_{KK} = 34,906 \left( 1 - e^{-\frac{1}{0,721}t} \right)$	2,7
4	Змішувач з параболічним ротором	$C_{KK} = 31,811 \left( 1 - e^{-\frac{1}{0,543}t} \right)$	1,4
5	Змішувач з параболічним ротором та турбулізатором	$C_{KK} = 29,013 \left( 1 - e^{-\frac{1}{0,278}t} \right)$	0,9

**Висновки:**

1) Запропоновані математичні моделі дозволяють оцінити згладжувальну здатність відцентрових змішувачів безперервної дії різних конструкцій.

2) Введення турбулізаторів у конструкцію змішувача підвищує кінетичну енергію частинок, що призводить до зменшення часу їх перебування у змішувачі та, відповідно, до зменшення постійної часу.

3) Введення додаткових роторів (змішувач конструкції Ластовцева) є найбільш ефективним способом підвищення згладжувальної здатності, але у цьому випадку в 1,31..2,56 рази збільшується час перебування частинок всередині змішувача.

4) Відсутність турбулізатора у конструкції змішувача призводить до зменшення кількості потоків матеріалу, що взаємно перетинаються, а отже до зменшення інтенсивності перемішування.

5) Враховуючи, що технологічно змішувачі з параболічними роторами та декількома роторами складніше виготовити ніж змішувач з одним конічним ротором, в більшості випадків доцільно застосовувати змішувач з конічним ротором та турбулізатором.

**Література**

1. Стаценко В. В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія / В.В. Стаценко, О.П. Бурмістенков, Т.Я. Біла. – Київ: КНУТД, 2017. – 220с.  
 2. Бурмістенков О. П. Процеси та обладнання підготовчих виробництв легкої промисловості / О. П. Бурмістенков, О. А. Стародуб, В. П. Місяць, Т. Я. Біла, В. В. Стаценко. - К. : КНУТД, 2011. – 137 с.  
 3. Зайцев А. И. Современные конструкции и основы расчета

**References**

1. Statsenko V. V., Burmistenkov O. P., Bila T. Y. (2017). Avtomatyzovani kompleksi bezperervnoho pryhotuvannya kompozycij sykkykh materialiv: monohrafiya [Automated complexes for bulk material compositions continuous preparation]. Kyiv: Kyiv National University of Technologies and Design [in Ukrainian].  
 2. Burmistenkov O. P., Starodub O. A., Misiats V. P., Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2011). Protsesty ta obladnannia pidhotovchykh vyrobnytstv lehkoj promyslovosti [Processes and equipment of light industry

смесительных аппаратов с тонкослойным движением сыпучих материалов / А. И. Зайцев, Д. О. Бытев, В. А. Северцев и др. // Обзорная информация. Серия: Хим-фарм. пром. – М : Изд-во. ЦБНТИ Мед. пром., 1984. – 23 с.

4. Біла Т. Я. Аналітичне дослідження руху часток суміші у двороторному змішувачі безперервної дії / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник КНУТД. 2006. – № 5. – С. 30–34.

5. Бурмистенков А. П., Белая Т. Я., Корзун В. В., Слижевский В. А., винахідники. Смеситель непрерывного действия: А. с. СССР № 1165446, 1985.

6. Ластовцев А. М. Устройство для непрерывного смешивания мелкодисперсных материалов: А.с. СССР №92181, 1950.

7. Ante Munjiza. The Combined Finite-Discrete Element Method. Wiley, 2004. – 333 p.

8. Mindlin R. D., Deresiewicz H. Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Force. Trans. ASME, J. Appl. Mech. 20. 1953. – P. 327–344.

9. Tsuji Y., Tanaka T., Ishida T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. Powder Technology. Volume 71, Issue 3. 1992. – P. 239–250.

10. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения, М: Физматлит, 2012. – 348с.

preparatory industries] – Kyiv: Kyiv National University of Technologies and Design, 137 p. [in Ukrainian]

3. Zaitsev A. Y., Bytev D. O., Severtsev V. A. i dr. (1984) Sovremennye konstruksyy u osnovy rascheta smesytelnykh apparatov s tonkosloinym dvyzhenyem syrpuchykh materyalov [Modern designs and calculation fundamentals of mixing apparatus with a thin-layer bulk materials movement] – Moscow: Izdatelstvo. Central'noe bjuro nauchno-tehnicheskoy informacii meditsynskoy promyshlennosti, 23p. [in Russian].

4. Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2006). Analitychne doslidzhennia rukhu chastok sumishi u dvorotornomu zmishuvachi bezperervnoi dii [The particles motion analytical study of a mixture in a two-rotor continuous mixer] – Visnyk Kyiv National University of Technologies and Design. – № 5. – P. 30–34. [in Ukrainian]

5. Burmystenkov A. P., Belaia T. Ya., Korzun V. V., Slyzhevskiy V. A. (1985). Smesytel nepreryvnogo deistviya [Continuous mixer]. USSR patent, no.1165446.

6. Lastovtsev A. M. (1950). Ustrojstvo dlya nepreryvnogo smeshivaniya melkodispersnykh materialov [Device for continuous mixing of finely divided materials]. USSR patent, no. 92181.

7. Ante Munjiza. (2004) The Combined Finite-Discrete Element Method. Wiley., 333 p. [in English].

8. Mindlin R. D., Deresiewicz H. (1953) Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Force. Trans. ASME, J. Appl. Mech. 20. P. 327–344. [in English]

9. Tsuji Y., Tanaka T., Ishida T. (1992) Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. Powder Technology. Volume 71, Issue 3. P. 239–250. [in English]

10. Popov V. L. (2012) Mekhanyka kontaktnoho vzaymodeistviya u fyzyka treniya [Contact mechanics interaction and physics of friction] – Moscow: Fyzmatlyt. 348p. [in Russian]

**STATSENKO V. V**

statsenko.v@knutd.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3932-792X>

Researcher ID: C-3646-2017

Kyiv National University of Technologies & Design

**BURMISTENKOV O. P**

burmistenkov.op@knutd.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0001-4229>

Researcher ID: T-5180-2018

Kyiv National University of Technologies & Design

**BILA T. Y.**

bila.ty@knutd.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8937-5244>

Researcher ID: T-5276-2018

Kyiv National University of Technologies & Design

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ НА ИХ СГЛАЖИВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

**СТАЦЕНКО В. В., БУРМИСТЕНКОВ А. П., БЕЛАЯ Т. Я.**

Киевский национальный университет технологий и дизайна

**Цель.** Исследование зависимости сглаживающей способности центробежных смесителей непрерывного действия от их конструктивных особенностей.

**Методика.** В роботі використані методи дискретних елементів, математического моделювання та регресійного аналізу.

**Результати.** В роботі розглянуті п'ять конструкцій центробіжних змішувачів неперервного дії з роторами конічної та параболическої форми. Визначені конструктивні особливості змішувачів, що дозволяють змінювати їх згладжуючу здатність. На основі методу дискретних елементів розроблені математическі моделі руху частинок сыпучих матеріалів всередині кожного змішувача. Досліджено реакцію розглянутих змішувачів на скачкообразне змінювання кількості ключового компонента. Розраховані параметри перехідних процесів та визначено середнє час перебування частинок в змішувачі. Встановлено, що введення турбулізаторів в конструкцію змішувачів збільшує кінетическу енергію частинок, що призводить до зменшення часу їх перебування в змішувачі. При цьому відсутність турбулізатора призводить до зниження інтенсивності перемішування. Також встановлено, що найбільш ефектйвним способом збільшення згладжуючої здатності змішувача є введення додаткових роторів. По сукупності технологіческіх та конструктйвних параметрів використання змішувачів з коніческім ротором та турбулізатором є найбільш ефектйвним з точки зору збільшення згладжуючої здатності.

**Научесна новизна.** На основі методу дискретних елементів розроблені моделі руху частинок сыпучих матеріалів в центробіжних змішувачах неперервного дії п'яти конструкцій. Визначено вплив конструктйвних особливостей змішувачів на їх згладжуючу здатність та середнє час змішування.

**Практическа значимість.** Отримані результати дозволяють за заданими вимогами до згладжуючої здатності вибрати підходящу конструкцію змішувача.

**Ключеві слова:** змішувач, сыпучий матеріал, метод дискретних елементів, ротор, турбулізатор.

## THE CENTRIFUGAL MIXERS DESIGNS INFLUENCE ON THEIR SMOOTHING ABILITY

STATSENKO V. V., BURMISTENKOV O. P., BILA T. Y.

Kyiv National University of Technologies and Design

**Purpose.** Studying the influence of continuous centrifugal mixers design features on their smoothing ability.

**Methodology.** The methods used are discrete elements, mathematical modeling and regression analysis.

**Findings.** The paper considers five continuous centrifugal mixers designs with conical and parabolic rotors. The mixers design features are determined, allowing to change their smoothing ability. Mathematical models of the bulk materials particles movement inside each mixer have been developed based on the discrete element method. The considered mixers reaction to a step change of the key component amount is investigated. The transients parameters are calculated and the particles average residence time in the mixer is determined. It is established that the introduction of turbulizers in the mixers design increases the particles kinetic energy, which leads to a decrease in their residence time in the mixer. Moreover, the absence of a turbulizer leads to a decrease in the mixing intensity. It was also found that the most effective way to increase the mixer smoothing ability is the introduction of additional rotors. In terms of the technological and design parameters combination, the use of mixers with a conical rotor and a turbulizer is the most effective from the point of view for increasing the smoothing ability.

**Originality.** On the discrete element method basis, the bulk materials particles movement models in continuous centrifugal mixers of five designs have been developed. The influence of the mixers design features on their smoothing ability and average mixing time is determined.

**Practical value.** The results obtained allow us to select the appropriate mixer design according to the specified requirements for smoothing ability.

**Keywords:** mixer, bulk material, discrete element method, rotor, turbulizer.