

<https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2019.4.4>

УДК 621.3-5:  
678.7.05

БУРМІСТЕНКОВ О. П., БІЛА Т. Я., СТАЦЕНКО В. В.  
Київський національний університет технологій та дизайну

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета.** Визначення енергетичних параметрів обладнання для змішування сипких матеріалів.

**Методика.** У роботі використані методи математичного моделювання, порівняльного аналізу та дослідження електроприводу. Дослідження руху частинок всередині змішувача здійснено на основі законів теоретичної механіки.

**Результати.** Розглянуто особливості конструкції змішувачів сипких матеріалів безперервної та періодичної дії. Показано принцип дії та енергоспоживання стрічкового змішувача періодичної дії із продуктивністю 4000 кг/год. Представлено конструкцію та принцип роботи відцентрового змішувача безперервної дії. Наведено математичну модель руху частинок всередині відцентрового змішувача безперервної дії. Проведено аналіз взаємного розташування частинок сипкого матеріалу у роторі та визначено умови за яких забезпечується якісний процес змішування. Запропоновано математичні моделі, що дозволяють визначити конструктивні та технологічні параметри змішувача виходячи із заданої продуктивності. Визначено режими роботи за яких обладнання споживає максимальну кількість енергії. Запропоновано алгоритм визначення потужності електроприводу відцентрового змішувача безперервної дії. Представлено результати порівняльного аналізу енергоспоживання змішувачів безперервної та періодичної дії, що мають однакову продуктивність. Проведено дослідження режимів роботи та чинників, що впливають на енергоспоживання.

**Наукова новизна.** Отримані математичні моделі, що дозволяють визначити взаємозв'язок між продуктивністю відцентрового змішувача безперервної дії, його режимами роботи та енергоспоживанням.

**Практична значимість.** Отримані результати дозволяють здійснювати обґрунтований вибір обладнання для змішування сипких матеріалів.

**Ключові слова:** змішувач, сипкий матеріал, стрічковий змішувач, відцентровий змішувач, енергоспоживання, моделювання.

**Вступ.** Процеси змішування сипких матеріалів застосовуються у легкій, хімічній, харчовій, будівельній та інших галузях промисловості [2]. Метою змішування є виготовлення однорідної композиції вхідних компонентів із відсотковим складом, що відповідає заданій рецептурі. В ідеальному випадку такі процеси мають відбуватись швидко із мінімальними механічним впливом на матеріал та енерговикористанням. На практиці уникнути витрат енергії складно, оскільки змішування за своєю природою передбачає створення примусового взаємного руху частинок сипких матеріалів.

У промислових змішувачах переміщення частинок забезпечується за рахунок механічного впливу на них робочих органів. Цей процес потребує витрат енергії, кількість якої залежить як від продуктивності змішувача, так і від його конструкції. За принципом дії змішувачі поділяють на обладнання періодичної та безперервної дії [4].

Процес змішування у обладнанні періодичної дії складається з трьох основних етапів:

- завантаження компонентів суміші у робочу ємність змішувача;
- механічне перемішування;
- вивантаження готової суміші.

З точки зору використання енергії найбільш витратним є етап механічного змішування.

**Постановка завдання.** Основним завданням дослідження є аналіз витрат енергії у змішувачах періодичної та безперервної дії. Для визначення кількісного значення енерговитрат необхідно проаналізувати характер взаємодії робочих органів обладнання із сипким матеріалом та розрахувати механічні навантаження на електропривод.

**Результати та їх обговорення.** Розглянемо принцип дії змішувачів періодичної дії на прикладі стрічкового змішувача, який на теперішній час є одним з найбільш розповсюджених [2]. Схема змішувача показана на рис.1.

Вихідні компоненти суміші завантажуються у робочу ємність 1 через патрубки 2. Всередині робочої ємності знаходиться вал 3 із внутрішньою 4 та зовнішньою спіральними стрічками, які закріплені на ньому. Під час процесу змішування вал обертається із постійною швидкістю. Спіральні стрічки захоплюють матеріал та переміщують його. При цьому зовнішня стрічка переміщує матеріал в центральну частину робочої ємності, а внутрішня – у бік торців. В результаті всередині змішувача утворюються різноспрямовані потоки матеріалу, що забезпечують перемішування компонентів. Після завершення процесу змішування, готова суміш вивантажується через вихідний патрубок 6.

Дослідження та розрахунок енергетичних параметрів змішувача стрічкового типу представлені у роботі [1]. Під час процесу змішування енергія витрачається на подолання сил тертя матеріалу о внутрішню поверхню змішувача, о гвинтову поверхню стрічки та на переміщення матеріалу вздовж вісі гвинта. У дослідженні [1] показано, що при продуктивності стрічкового змішувача, що дорівнює  $Q_C = 4000$  кг/год. потужність приводу має бути не менше  $P_C = 9,7$ кВт.

У змішувачах безперервної дії вихідні компоненти подаються всередину змішувача безперервним потоком, тобто одночасно змішується порівняно невеликий об'єм матеріалу [4, 5]. Конструкція відцентрового змішувача безперервної дії [6, 9] показана на рис.2.

Змішування компонентів відбувається за рахунок взаємного перетинання розріджених потоків частинок [7]. Частинки сипких матеріалів подаються за допомогою живильників у вхідний патрубок 1 змішувача та під дією сили тяжіння падають на дно ротора 2, який обертається із постійною кутовою швидкістю  $\omega$ .

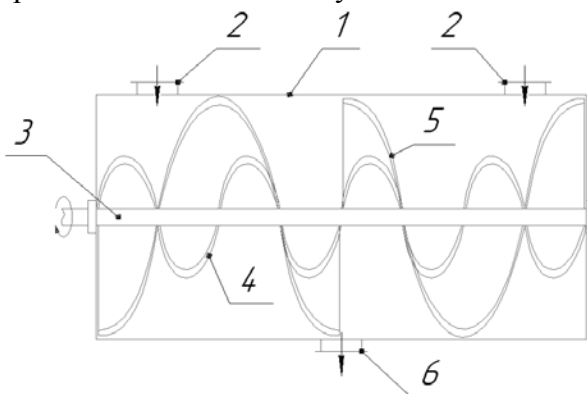


Рис.1. Схема стрічкового змішувача періодичної дії

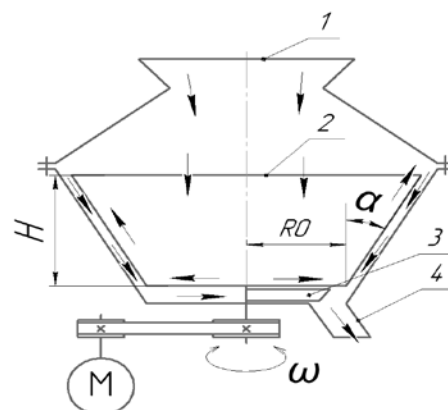


Рис.2. Схема відцентрового змішувача безперервної дії

Під дією відцентрової сили частинки починають рухатися вздовж бічної стінки ротора (напрямок руху показано стрілками). Після виходу із ротора сипкий матеріал за допомогою ножа 3 подається до вихідного патрубку 4. Траєкторії руху частинок є спіральними лініями [2], форма яких залежить від початкової швидкості частинок, їх початкового положення та параметрів матеріалу (коефіцієнту тертя між ротором та частинкою). В результаті траєкторії частинок різних компонентів перетинаються, що забезпечує ефект змішування.

Продуктивність відцентрового змішувача безперервної дії визначається об'ємом ротора та тривалістю перебування частинок в ньому. Для утворення розріджених потоків суміші необхідно уникати розташування частинок в декілька шарів. Враховуючи, що на початку процесу змішування всі частинки потрапляють на дно ротора, визначимо максимально можливу кількість частинок, що може бути розташована на дні ротора в один шар. Приймемо, що всі частинки є ідеальними сферами однакового розміру із радіусом  $r$ . Максимальна кількість кіл, яке можна розташувати всередині більшого кола  $R_0$ , залежить від їх пакування. Відомо [3], що максимально можливе співвідношення сумарної площини маленьких кіл до площини кола, всередині якого вони знаходяться, не перевищує

$$\frac{S_{\Sigma}}{S_0} \leq \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0,74048. \text{ Це співвідношення дозволяє визначити максимальну кількість}$$

частинок, яку можна розташувати на дні ротора в один шар.

Для порівняння енергетичних характеристик стрічкового змішувача періодичної дії та відцентрового змішувача безперервної дії визначимо геометричні розміри та швидкість обертання ротора. Для ротора із кутом нахилу бічної стінки  $\alpha$  та при коефіцієнті тертя  $f$  час перебування частинок всередині ротора становить  $t_3$  с. Відповідно, кількість частинок, що мають одночасно знаходитись всередині змішувача для забезпечення заданої продуктивності становить:

$$n = \frac{Q_c}{m_{\text{ч}}} t_3, \quad (1)$$

де  $m_{\text{ч}}$  – маса однієї частинки.

Траєкторія руху частинок всередині ротору визначається наступною системою рівнянь [3, 10]:

$$\begin{aligned} z_r'' - z_r \omega^2 \sin \alpha \cdot (\sin \alpha - f \cos \alpha) = \\ = g \sin \alpha (\sin \alpha - f \cos \alpha) + R_0 \omega^2 \cos \alpha \cdot (\sin \alpha - f \cos \alpha) - g \end{aligned} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= f(x, y, z) \cdot \cos \omega t \\ y &= f(x, y, z) \cdot \sin \omega t \\ z &= z_r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $x, y, z$  – координати частинки у нерухомій системі координат (вісь  $z$  співпадає із віссю обертання ротора);  $z_r$  – координати частинки відносно рухомої системи координат, що обертається із кутовою швидкістю  $\omega$ ;  $f(x, y, z)$  – рівняння бічної поверхні ротора.

Розв'язок рівнянь (2) та (3) відносно  $t$  дозволяє визначити час, протягом якого частинка рухається від дна ротора вздовж бічної стінки до його верхньої кромки вздовж бічної стінки.

Мінімальна площа основи ротора, яка дозволяє розташувати  $n$  сферичних частинок радіусом  $r$ , визначається за формулою:

$$S_p \geq \frac{n \cdot \pi \cdot r^2}{0,74048}. \quad (5)$$

В результаті проведених розрахунків за співвідношеннями (1)-(5) визначено параметри ротора відцентрового змішувача безперервної дії, що забезпечує продуктивність  $P_B = 4000$  кг/год. Значення цих параметрів становлять: висота ротора  $H = 0,18$  м, радіус основи  $R_0 = 0,137$  м, кут нахилу бічної стінки  $\alpha = 35^\circ$ ; швидкість обертання  $\omega = 52,36$  рад/с<sup>-1</sup>. Прийmemo, що ротор виготовлений з товщиною стінок  $h = 0,002$  м зі сталі густиною  $\rho = 7820$  кг/м<sup>3</sup>. Тоді момент інерції відносно вісі обертання  $z$  дорівнюватиме  $J_z = 0,151$  кг·м<sup>2</sup>.

Найбільш енерговитратним режимом роботи ротора відцентрового змішувача безперервної дії є розганяння із нерухомого положення до заданої швидкості обертання  $\omega$  [8]. Динамічний момент, що має розвивати електропривод, в такому режимі визначається за рівнянням:

$$M_\delta = J_z \frac{d\omega}{dt}. \quad (6)$$

Відповідно, максимальна потужність, що споживається приводом, становитиме:

$$P_{\max} = \frac{M_\delta \omega}{\eta_{pn} \eta_\delta}, \quad (7)$$

де  $\eta_{pn}$  – ККД пасової передачі,  $\eta_\delta$  – ККД двигуна.

За результатами розрахунків визначено, що максимальна потужність запропонованої конструкції змішувача безперервної дії становить  $P_B = 989$  Вт, що у 9,8 рази менше потужності змішувача періодичної дії  $P_C$ .

#### Висновки:

- 1) Запропоновані у роботі математичні моделі дозволяють визначити енергоспоживання відцентрового змішувача безперервної дії за певною продуктивністю.
- 2) Відцентровий змішувач безперервної дії споживає у 9,8 разів менше електричної енергії ніж стрічковий змішувач за умов рівної продуктивності.
- 3) Більш висока енергоефективність змішувачів безперервної дії зумовлена тим, що робочі органи взаємодіють із значно меншим об'ємом матеріалу.

#### Література

1 Савиных П. А. Обоснование конструкционно-технологических параметров ленточного смесителя. / П. А. Савиных, Н. В. Турубанов, Д. А. Зырянов // Вестник ВНИИМЖ. – №3(19). – 2015. – С.76-80.

#### References

1 Savynykh P. A., Turubanov N. V., Zyrianov D. A. (2015). Obosnovanye konstruktzyonno-tekhnolohycheskykh parametrov lentochnoho smesytelia [Justification of the tape mixer design and technological parameters] – Vestnyk VNYIMZh, №3(19), 76-80 [in Russian].

- 2 Стаценко В. В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія / В. В. Стаценко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла. — Київ : КНУТД, 2017. — 220 с.
- 3 Слоэн Н. Дж. А. Упаковка шаров / Н. Дж. А. Слоэн // В мире науки. — 1984. — №3. — С. 72-82.
- 4 Бурмістенков О. П. Основні напрямки автоматизації змішувальних комплексів безперервної дії для сипких матеріалів / О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла, В. В. Стаценко. // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2017. — № 6. — С.28-31.
- 5 Бакин И. А. Комплексное моделирование процессов непрерывного смешивания / И. А. Бакин, А. И. Саблинский, Г. Н. Белоусов // Технология и техника пищевых производств. Сборник научных работ. — Кемерово: КемТИПП, 2003. — С. 137-141.
- 6 Біла, Т. Я. Визначення оптимальних параметрів відцентрового змішувача безперервної дії / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2016. — № 4 (239). — С. 25-27.
- 7 Зайцев А. И. Современные конструкции и основы расчета 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.
- 8 Біла Т. Я. Моделювання динамічних навантажень в змішувальних комплексах безперервної дії / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник КНУТД. — 2015. — №4, С.24-29.
- 9 Бурмістенков А. П., Белая Т. Я., Корзун В. В., Слижевский В. А., винахідники. Смеситель непрерывного
- 2 Statsenko V. V., Burmistenkov O. P., Bila T. Ya. (2017). Avtomatyzovani kompleksi bezperervnoho pryhotuvannia kompozytsii sypkykh materialiv: monohrafiia [Automated complexes for bulk material compositions continuous preparation]. Kyiv : KNUTD [in Ukrainian].
- 3 Sloen N. Dzh. A. (1984). Upakovka sharov [Ball Packing] V myre nauky, 3, 72-82 [in Russian].
- 4 Burmistenkov O. P., Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2017). Osnovni napriamky avtomatyzatsii zmishuvalnykh kompleksiv bezperervnoi dii dlia sypkykh materialiv [The main automation directions of continuous action mixing complexes for bulk materials] Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Tekhnichni nauky, 6, 28-31 [in Ukrainian].
- 5 Bakyn Y. A., Sablynskyi A. Y., Belousov H. N. (2003). Kompleksnoe modelyrovanye protsessov nepreryvnoho smesepryhotovleniya [Comprehensive continuous mixing processes simulation] — Tekhnolohyia y tekhnika pyshevykh proyzvodstv. Sbornyk nauchnykh rabot, Kemerovo: KemTYPP, 137-141 [in Russian].
- 6 Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2016). Vyznachennia optymalnykh parametriv vidtsentrovoho zmishuvacha bezperervnoi dii [Optimum parameters determination in centrifugal mixers of continuous action] — Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Tekhnichni nauky, № 4 (239), 25-27 [in Ukrainian].
- 7 Zaitsev A. Y., Bytev D. O., Severtsev V. A. i dr. (1984) Sovremennye konstruktsyy y osnovy rascheta smesytelnykh apparatov s tonkosloinym dvyzhenyem sypchuykh materyalov [Modern designs and calculation fundamentals of mixing apparatus with a thin-layer bulk materials movement] — Obzornaia ynformatsyia. Seryia: Khym-farm. prom. — M : Yzd-vo. TsBNTY Med. prom., 23p. [in Russian].
- 8 Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2015). Modeliuvannia dynamichnykh navantazhen v zmishuvalnykh kompleksakh bezperervnoi dii [Dynamic loads simulation in mixing complexes of continuous action] — Visnyk KNUTD, №4, 24-29 [in Ukrainian].
- 9 Burmystenkov A. P., Belaia T. Ya., Korzun V. V., Slyzhevskiy V. A. (1985). Smesytel nepreryvnoho deistvyia [Continuous mixer]: A. s. USSR no.1165446.
- 10 Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2012).

действия: А. с. СССР № 1165446, 1985.  
10 Біла Т. Я. Дослідження руху  
частинок суміші у ступінчастому роторі  
відцентрового змішувача безперервної  
дії / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник  
КНУТД. – 2012. – №6, С.17-21.

Doslidzhennia rukhu chastynok sumishi u  
stupinchastomu rotorі vidtsentrovoho zmishuvacha  
bezperervnoi dii [The investigation of loose materials  
particles movements in continuous action centrifugal  
mixers stepped rotor] – Visnyk KNUTD, №6, 17-21  
[in Ukrainian].

**BURMISTENKOV OLEKSANDR**

ResearcherID: T-5180-2018

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

Kyiv National University of Technologies & Design

**BILA TETYANA**

ResearcherID: T-5276-2018

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

Kyiv National University of Technologies & Design

**STATSENKO VOLODYMYR**

ResearcherID: C-3646-2017

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

Kyiv National University of Technologies & Design

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ БУРМИСТЕНКОВ А. П., БЕЛАЯ Т. Я., СТАЦЕНКО В. В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

**Цель.** Определение энергетических параметров оборудования для смешивания сыпучих материалов.

**Методика.** В работе использованы методы математического моделирования, сравнительного анализа и исследования электропривода. Исследование движения частиц внутри смесителя проведено на основе законов теоретической механики.

**Результаты.** Рассмотрены особенности конструкции смесителей сыпучих материалов непрерывного и периодического действия. Показаны принцип действия и энергопотребление ленточного смесителя периодического действия с производительностью 4000 кг/час. Представлены конструкция и принцип работы центробежного смесителя непрерывного действия. Приведена математическая модель движения частиц внутри центробежного смесителя непрерывного действия. Выполнен анализ взаимного расположения частиц сыпучего материала внутри ротора и определены условия, при которых обеспечивается качественный процесс смешивания. Предложены математические модели, позволяющие определить конструктивные и технологические параметры оборудования исходя из заданной производительности. Определены режимы работы, при которых центробежный смеситель потребляет максимальное количество энергии. Предложен алгоритм определения мощности электропривода центробежного смесителя непрерывного действия. Представлены результаты сравнительного анализа энергопотребления смесителей непрерывного и периодического действия, имеющих одинаковую производительность. Проведено исследование режимов работы и факторов, влияющих на энергопотребление.

**Научная новизна.** Получены математические модели, позволяющие определить взаимосвязь между производительностью центробежного смесителя непрерывного действия, его режимами работы и энергопотреблением.

**Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют осуществлять обоснованный выбор оборудования для смешивания сыпучих материалов.

**Ключевые слова:** смеситель, сыпучий материал, ленточный смеситель, центробежный смеситель, энергопотребление, моделирование.

## THE RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY FOR MIXING BULK MATERIALS EQUIPMENT

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

*Kyiv National University of Technologies and Design*

**Purpose.** *The energy parameters determination of bulk materials mixing equipment.*

**Methodology.** *The paper used methods of mathematical modeling, comparative analysis and research of electric drive. The particles motion study inside the mixer was performed on the theoretical mechanics laws basis.*

**Findings.** *Design features of continuous and batch bulk materials mixers are considered. The operation principle and energy consumption are shown for a periodic action tape mixer with a productivity of 4000 kg / h. The continuous centrifugal mixer design and operation principle are presented. A particle motion mathematical model inside a continuous centrifugal mixer is presented. The mutual arrangement analysis of the bulk material particles inside the rotor was carried out and the conditions are determined under which a high-quality mixing process is ensured. Mathematical models are proposed to determine equipment design and technological parameters based on a given performance. Operation modes are determined in which the centrifugal mixer consumes the maximum energy amount. An algorithm for determining the continuous electric centrifugal mixer power is proposed. The comparative analysis results of the continuous and batch mixers energy consumption with the same performance are presented. A study of operating modes and factors affecting energy consumption was carried out.*

**Originality.** *Mathematical models are obtained that allows determining the relationship between a continuous centrifugal mixer performance, its operating modes, and power consumption.*

**Practical value.** *The obtained results permits to make an informed choice of equipment for mixing bulk materials.*

**Keywords:** *mixer, bulk material, belt mixer, centrifugal mixer, power consumption, modeling.*