

АНОТАЦІЯ

Шепеленко М.І. Вдосконалення технічної системи «змішувач-конвеєр» в питаннях оптимізації кінцевої обробки шихтових матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» - Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2021.

Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням в якому вирішена актуальна наукова задача, що має важливе практичне значення з удосконалення технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної горизонтально-направленої дії для підготовки шихтових матеріалів до спікання на основі встановлення закономірностей, які описують вплив її конструктивних і режимних параметрів на якість суміші.

Так на основі проведеного аналізу розповсюджених технологічних схем підготовки шихтових матеріалів до спікання та випалу, характеристик конструкцій змішувачів безперервної дії, що застосовують для підготовки сумішей в гірничо-металургійному комплексі, виконаних науково-дослідних робіт, спрямованих на вивчення та моделювання процесів змішування матеріалів, встановлено, що використовуваний на даний час спосіб підготовки шихтових матеріалів не забезпечує технологічним вимогам щодо якості суміші й одним з можливих способів поліпшення якості змішування матеріалів може бути застосована технічна система «змішувач-конвеєр» з наданням вібраційного впливу на конвеєрну стрічку, де прототипом може служити технічне рішення, засноване на принципі роботи роторного змішувача безперервної дії з гнучким тросовим ротором. Таке технічне рішення було запатентовано й отримано патент України на корисну модель 145404. Україна: МПК В01F 11/00, В01F 13/00. № u202003861; заяв. 26.06.2020; надрук. 10.12.2020, Бюл.№23. Однак на сьогодні недостатньо вивчено як впливають конструктивні, режимні параметри запропонованої технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» на підвищення якості

суміші перед процесами випалу та агломерації. Окрім цього відсутні дослідження та методики розрахунку енергосилових, конструктивних параметрів, що описують рухи частинок матеріалу по лопатках ротора, які обертаються у шарі сипкого середовища назустріч одне одному, з урахуванням додаткового вібраційного імпульсу.

Таким чином в ході виконаних аналітичних досліджень була розроблена методика розрахунку з визначення енергосилових параметрів технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної дії з тросовими елементами ротора, що приводять шар матеріалу в суспендований стан; одержано математичну модель, яка описує вплив конструктивних і режимних параметрів на характер руху частинок матеріалу в псевдов'язкому середовищі. Встановлено, що характер руху частинок, які рухається разом з конвеєрною стрічкою, можна вважати умовним; побудовано профіль лопатки ротору роторного змішувача, що здійснює впровадження в масив матеріалу з найменшими втратами і при найменшому зносі лопатей; одержано аналітичну залежність, яка описує вплив конструктивних, режимних параметрів на характер руху частинок матеріалу після сходу з лопаток ротора, що рівномірно обертається, у горизонтальній площині псевдов'язкого середовища.

Для проведення лабораторних експериментальних досліджень, які були спрямовані на моделювання процесу змішування, було виготовлено фізичну модель технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної горизонтально-направленої дії; розроблено методику проведення досліджень. В результаті проведення повного факторного експерименту одержані математичні моделі, що описують процес змішування матеріалу в технічній системі «роторний змішувач-конвеєр»; проаналізовано отримані результати й встановлено вплив конструктивних і кінематичних параметрів технічної системи на основні технологічні показники змішування матеріалу. На підставі одержаних математичних моделей встановлено, що найбільший вплив на якість змішування матеріалу має поєднання тросового

та лопатного роторів, а також, що для дослідної системи «роторний змішувач-конвеєр», при постійних конструктивних та кінематичних параметрах стрічки конвеєра, якість змішування прямо пропорційно залежить від висоти шару матеріалу. Раціональний режим роботи технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» забезпечується при висоті шару матеріалу на конвеєрній стрічці моделі $H = 0,002$ м та частоті обертання валів ротора змішувача $\omega = 15 \text{ с}^{-1}$. Відповідно до геометричної подоби моделі оптимальна висота шару матеріалу в реальних умовах повинна становити $H = 0,2$ м.

В ході промислових досліджень було розроблено методику проведення промислових досліджень для визначення енергосилових параметрів роторного змішувача та конвеєра, методику оцінки ефективності роботи системи «роторний змішувач-конвеєр». Як показали промислові іспити в умовах фабрики огрудкування ПАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг енергосилові витрати роботи роторного змішувача в холостому ході становлять 3,9 кВт та під навантаженням 15,4 кВт. Порівнюючи отримані результати промислових випробувань потужності з результатами розрахунків, встановлено, що різниця між ними при роботі змішувача в холостому ході відрізняється не більше чим на 3%, а під навантаженням не більш ніж 10 %. Також була визначена потужність привода конвеєра при його роботі без змішувача та з ним, під вібраційним впливом та без нього. Встановлено, що потужність привода конвеєра при роботі зі змішувачем та з застосуванням ексцентричних роликів опор збільшується на 8%. Але таке підвищення допустиме, так як привод не завантажено на 20%. Промисловими дослідженнями визначено, що застосування роторного змішувача в удосконаленій технологічній схемі підготовки окатишів до спікання дозволяє не менш як на 2,5% знизити вміст некондиційного класу по сирим окатишам без вібраційного впливу на матеріал та на 3,8% з ним. Окрім цього, встановлені недоліки в роботі технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» змішувача та запропоновано шляхи щодо її удосконалення.

На підставі результатів досліджень й для їх практичного використання розроблено «Методику визначення енергетичних потреб, затрачених на роботу змішування матеріалу», «Методику розрахунку ексцентричної опори стрічкового конвеєру», «Методику визначення профілю лопаток роторного змішувача», «Методику визначення взаємодії частки сипкого матеріалу з поверхнею профільної лопатки при її обертовому виведенні з загального масиву» та «Методику визначення зони розсівання частинок», які впроваджено в практику наукових досліджень, проектно-конструкторських робіт ТОВ «КВМШ-плюс», а також в навчальний процес Криворізького національного університету.

Таким чином поставлена в роботі мета була досягнута за рахунок вдосконалення технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» та на основі встановлення закономірностей, які розкривають вплив конструктивних та режимних її параметрів на підвищення якості підготовки суміші перед процесами випалу та агломерації.

Ключові слова: технологічні системи, агломераційна фабрика, машинобудування, визначення технічного стану, система керування якістю, амплітуда коливань, технічне обслуговування, ризик, контроль, оптимізація, дрібна фракція, склад.

Список публікацій здобувача: Основні положення та результати дисертації опубліковані в таких роботах:

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав або України, які включені в міжнародні наукометричні бази

1. Zaselskiy V., Popolov D., Ivanov I., Shepelenko M., Sagalay D. Experimental studies of preparation of coal charge for cooking using vibrating impact equipment. *Coke and Chemistry*. 2021. Vol.17 (62). P. 67-77. *(Входить до переліку міжнародної наукометричної бази Scopus)*.

2. Zaselskiy, V., Popolov, D., Zaytsev, H., and Shepelenko, M. Upgrade of Conveyor Line for Coal Charge Preparation with the Use of Modern Grading-and-Mixing Equipment. *Sci. innov.*2021. V.17,no. 3. P. 67—77.

<https://doi.org/10.15407/scine17.03.067> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази Scopus).

Статті в наукових фахових виданнях

3. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Засельський І.В., Шепеленко М.І. Експериментальні дослідження роботи портального багатороторного віброзміувача-гомогенізатора безперервної вертикально направленої дії. *Загальнодержавний науково-технічний журнал "Теорія і практика металургії"*. Дніпро, 2019. Випуск 1 (118). С. 41-48.

4. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Швед С.В., Шепеленко М.І. Аналіз роботи ексцентричної опори стрічкового конвеєру. *Науково-технічний журнал "Проблеми тертя та зношування"*. Київ. НАУ, 2020, №2 (87). С.59-67.

5. Засельський В.Й., Швед С.В., Засельський І.В., Шепеленко М.І. Функціонування робочого органу змішувача при горизонтальному русі шару матеріалу на конвеєрі. *Вісник КНУ. Кривий Ріг*, 2020. Випуск 50. С.45-50.

6. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Засельський І.В., Шепеленко М.І. Алгоритм розрахунку енергосилових витрат технічної системи «роторийний змішувач-конвеєр». *Вісник КНУ. Кривий Ріг*, 2020. Випуск 51. С. 24-29.

7. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Засельський І.В., Шепеленко М.І. Лабораторні дослідження технічної системи «роторийний змішувач-конвеєр» горизонтально-направленої дії. *Вісник КНУ. Кривий Ріг*, 2021. Випуск 52. С. 29-35.

8. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Зайцев Г.Л., Шепеленко М.І. Удосконалення трактів підготовки вугільної шихти до коксування шляхом використання сучасного сортувально-змішувального обладнання. *Науково-практичний журнал «Наука та інновації» Національна академія наук України*. Київ, 2021. Випуск 17, №3. С. 67-77.

Статті та тези в виданнях конференцій

9. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Засельський І.В., Шепеленко М.І. Обґрунтування вибору оптимальних параметрів портального багатороторного

віброзмішувача-гомогенізатора безперервної вертикально направленої дії. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід: матеріали III Міжнародної конференції*, (м. Дніпро-Амстердам, 12-14 листопада 2019 р.). Дніпро: НМетАУ. С.216-220.

10. Засельський В.Й., Шепеленко М.І., Тодінг А.Р. Класифікація змішувачів безперервної дії для створення гомогенної суміші шихти. *Молодь і наука. Практика інноваційного пошуку: збірник матеріалів Всеукраїнської конференції молодих вчених*. (м. Дніпро, 18 грудня 2019 р.). Дніпро: НМетАУ. С. 53-56.

11. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Шепеленко М.І. Аналіз змішувачів безперервної дії роторного типу *Молодь і наука. Практика інноваційного пошуку: збірник матеріалів Всеукраїнської конференції молодих вчених*. (м. Дніпро, 18 грудня 2019 р.). Дніпро: НМетАУ. С. 56-59.

12. Zaselskiy, V., Shved, S., Shepelenko, M., Suslo, N. Modeling the horizontal movement of bulk material in the system "conveyor - Rotary mixer". *E3S Web of Conferences*. (Kryvyi Rih, 20-22 May 2020). Kryvyi Rih: Kryvyi Rih National University. (*Входить до переліку міжнародної наукометричної бази Scopus*).

13. Shepelenko, M., Zaselskiy, V. The analysis of the dynamics of interest in continuous mixers both to the technical object *Congress Proceedings - Iii International Scientific Congress Society Of Ambient Intelligence 2020 (Student Section)*. Praha: OKTAN PRINT (Praha, 12-19 May 2020). P. 356-359.

14. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Шепеленко М.І. Алгоритм визначення енергосилових параметрів роторного змішувача. *Молодь і наука. Практика інноваційного пошуку: збірник матеріалів Всеукраїнської конференції молодих вчених*. (м. Дніпро, 17 грудня 2020 р.). Дніпро: НМетАУ. С. 67-71.

Патенти України

15. Роторний змішувач з вібруючими роликами.: пат. 145404. Україна: МПК B01F 11/00, B01F 13/00. № u202003861; заявл. 26.06.2020; надрук. 10.12.2020, Бюл.№23.

A N N O T A T I O N

Shepelenko M.I. Improving the technical system "mixer-conveyor" in terms of optimizing the final processing of charge materials. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 133 "Mechanical engineering" - the Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2021.

In the dissertation work the scientific bases of process of mixing of charge materials with application of the improved technical system "the rotary mixer-conveyor" are considered. It is established that for the experimental technical system "rotary mixer-conveyor", with constant design and kinematic parameters of the conveyor belt, the quality of mixing is directly proportional to the height of the material layer.

Based on the analysis of common technological schemes of preparation of charge materials for sintering and firing; characteristics of designs of continuous mixers used for preparation of coal charge; performed research work aimed at studying and modeling the mixing of materials, it is established that the existing foreign analogues of continuous mixers meet the requirements of domestic technology for the production of high-quality mixture of coal charge, but require significant capital investment; the currently used method of preparation of charge materials does not meet the technological requirements for the quality of the mixture; one of the possible ways to improve the quality of mixing of the metallurgical charge can be used technical system "mixer-conveyor" with a vibrating effect on the conveyor belt; to create an efficient mixing device that meets the technological requirements for the production of coal charge, the

prototype can be a technical solution based on the principle of operation of a rotary mixer of continuous action with a flexible cable rotor; to date, there are no works on the calculation of power, design parameters that describe the movements of material particles on the rotor blades, which rotate in a layer of bulk medium towards each other, taking into account the additional vibration pulse.

In the course of theoretical studies of power and design parameters in the technological processes of the rotary mixer the following results were obtained: developed a method of calculation to determine the power parameters of the technical system "rotary mixer-conveyor" of continuous action with cable elements of the rotor. for a horizontally directed mixer with cable elements of the rotor, which bring the material layer into a suspended state, a mathematical model is obtained, which describes the influence of design and mode parameters on the nature of the motion of material particles in a fluidized medium. It is established that the nature of the motion of particles moving together with the conveyor belt can be considered certain; the profile of the rotor blade of the rotor mixer is constructed, which carries out the introduction into the array of material with the least losses and with the least wear of the blades; an analytical dependence is obtained, which describes the influence of constructive, regime parameters on the nature of the motion of material particles after rising from the blades of the rotor, which rotates uniformly, in the horizontal plane of the pseudo-viscous medium.

An improved technical system "rotary mixer-conveyor" has been developed and patented.

As a result of laboratory experimental researches the following results were received: the laboratory model of technical system "rotary mixer-conveyor" of continuous horizontal-directed action is developed; developed research methods; mathematical models describing the process of mixing material in the technical system "rotary mixer-conveyor" are obtained; the obtained results are analyzed and the influence of constructive and kinematic parameters of the technical system on the main technological indicators of material mixing is established; on the basis of the received mathematical models it is established that the greatest influence on

quality of mixing of material has a combination of cable and blade rotors; it is established that for the experimental system "rotary mixer-conveyor", at constant design and kinematic parameters of the conveyor belt, the quality of mixing is directly proportional to the height of the material layer; it is established that the rational mode of operation of the technical system "rotary mixer-conveyor" is provided at the height of the material layer on the conveyor belt $H = 0.002$ m and the rotational speed of the rotor shafts of the mixer $\omega = 15$ s⁻¹. According to the geometric similarity of the model, the optimal height of the material layer in real conditions should be $H = 0.2$ m.

In the course of industrial researches the following results are received: the technique of carrying out industrial researches on definition of power parameters of the rotary mixer and the conveyor is developed; the technique of an estimation of efficiency of work of system "the rotary mixer-conveyor" is developed; the power consumption of the rotary mixer at idle, which is 3.9 kW and under a load of 15.4 kW. Comparing the obtained results of industrial power tests with the results of calculations, it is established that the difference between them when the mixer is idling differs by no more than 3%, and under load by no more than 10%; determined the power of the conveyor drive during its operation without the mixer and with it, under vibration and without it. It is established that the power of the conveyor drive when working with the mixer and with the use of eccentric roller supports increases by 8%. But such an increase is permissible because the drive is not loaded by 20%; determined that the use of a rotary mixer in the advanced technological scheme of preparation of pellets for sintering allows to reduce by at least 2.5% the content of substandard class for raw pellets without vibration impact on the material and by 3.8% with it; identified shortcomings in the operation of the rotary mixer and suggested ways to improve it.

Based on the results of research and for their practical use developed: "Methodology for determining the energy needs spent on mixing material", "Methodology for calculating the eccentric support of the belt conveyor", "Methodology for determining the profile of rotary mixer blades", "Methodology

for determining the interaction of bulk material with the surface of the profile blade during its rotational removal from the general array" and "Methods for determining the scattering zone of particles", which are implemented in the practice of research, design and engineering work "KVMSH-Plus", as well as in the educational process of the State University economics and technology.

The goal is achieved by improving the technical system "rotary mixer-conveyor" and established patterns that reveal the influence of its design and mode parameters on improving the quality of mixture preparation before firing and sintering.

Keywords: technological systems, agglomeration factory, mechanical engineering, determination of technical condition, quality management system, amplitude of oscillations, maintenance, risk, control, optimization, small fraction, composition.

List of publications of the applicant: The main provisions and results of the dissertation are published in the following works:

Articles in scientific periodicals of other states or Ukraine, which are included in international scientometric databases

1. Zaselskiy V., Popolov D., Ivanov I., Shepelenko M., Sagalay D. Experimental studies of preparation of coal charge for cooking using vibrating impact equipment. *Coke and Chemistry*. 2021. Vol.17 (62). P. 67-77. (*Included in the list of the international scientometric database Scopus*).

2. Zaselskiy V., Popolov D., Zaytsev H., Shepelenko M. Improvement of coal preparation tract cocking by using modern sortingmixing equipment. *Scientific and practical journal "Science and Innovation" National Academy of Sciences of Ukraine*. Kyiv, 2021. Vol.3 (62). R. 30-35. (*Included in the list of the international scientometric database Scopus*).

Articles in scientific professional publications

3. Zaselsky V., Popolov D., Zaselsky I., Shepelenko M. Experimental studies of the portal multi-rotor vibrator-homogenizer of continuous vertical directional

action. *National scientific and technical journal "Theory and practice of metallurgy"*. Dnipro, 2019. Issue 1 (118). P. 41-48.

4. Zaselsky V., Popolov D., Shved S. Shepelenko M. Analysis of the eccentric support of the belt conveyor. *Scientific and technical journal "Problems of friction and wear"*. Kiev. NAU, 2020, №2 (87). P.59-67.

5. Zaselsky V., Shved S., Zaselsky I., Shepelenko M. Functioning of the working body of the mixer at horizontal movement of a layer of material on the conveyor. *Bulletin of the KNU*. Kryvyi Rih, 2020. Issue 50. P.45-50.

6. Zaselsky V., Popolov D., Zaselsky I., Shepelenko M. Algorithm for calculating energy costs of the technical system "rotary mixer-conveyor". *Bulletin of the KNU*. Kryvyi Rih, 2020. Issue 51. P. 24-29.

7. Zaselsky V., Popolov D., Zaselsky V, Shepelenko M/ Laboratory studies of the technical system "rotary mixer-conveyor" of horizontal directional action. *Bulletin of the KNU*. Kryvyi Rih, 2021. Issue 52. P. 29-35.

8. Zaselsky V., Popolov D., Zaitsev G., Shepelenko M. Improvement of coal charge preparation paths for coking through the use of modern sorting and mixing equipment. *Scientific and practical journal "Science and Innovation" National Academy of Sciences of Ukraine*. Kyiv, 2021. Issue 3 (17). P. 30-35.

Articles and abstracts in conference publications

9. Zaselsky V., Popolov D., Zaselsky I., Shepelenko M. Substantiation of the choice of optimal parameters of the portal multi-rotor vibrating mixer-homogenizer of continuous vertically directed action. *Innovative technologies in science and education. European experience: materials of the III International Conference* (Dnipro-Amsterdam, November 12-14, 2019). Dnipro: NMetAU. P.216-220.

10. Zaselsky V., Shepelenko M., Toding A. Classification of continuous mixers to create a homogeneous mixture of the charge. *Youth and science. The practice of innovative search: a collection of materials of the All-Ukrainian conference of young scientists*. (Dnipro, December 18, 2019). Dnipro: NMetAU. P. 53-56.

11. Zaselsky V., Popolov D., Shepelenko M. Analysis of rotary mixers of continuous type. *Youth and Science. The practice of innovative search: a collection of materials of the All-Ukrainian conference of young scientists.* (Dnipro, December 18, 2019). Dnipro: NMetAU. Pp. 56-59.

12. Zaselskiy, V., Shved, S., Shepelenko, M., Suslo, N. Modeling the horizontal movement of bulk material in the system "conveyor - Rotary mixer". *E3S Web of Conferences.* (Kryvyi Rih, 20-22 May 2020). Kryvyi Rih: Kryvyi Rih National University. *(Included in the list of the international scientometric database Scopus).*

13. Shepelenko, M., Zaselskiy, V. The analysis of the dynamics of interest in continuous mixers both to the technical object. *Congress Proceedings - III International Scientific Congress Society Of Ambient Intelligence 2020 (Student Section).* Prague: OKTAN PRINT (Prague, 12-19 May 2020). P. 356-359.

14. Zaselsky V., Popolov D., Shepelenko M. Algorithm for determining the power parameters of a rotary mixer. *Youth and science. The practice of innovative search: a collection of materials of the All-Ukrainian conference of young scientists.* (Dnipro, December 17, 2020). Dnipro: NMetAU. P. 67-71.

Patents of Ukraine

15. Rotary mixer with vibrating rollers .: US Pat. 145404. Ukraine: IPC B01F 11/00, B01F 13/00. № u202003861; declared 26.06.2020; print. 10.12.2020, Bull.№23.