

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШЕПЕЛЕНКО МАРІЯ ІВАНІВНА

УДК 621.929.6:622.781

ДИСЕРТАЦІЯ

Вдосконалення технічної системи «змішувач-конвеєр» в питаннях оптимізації кінцевої обробки шихтових матеріалів

133 – Галузеве машинобудування

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ М.І. Шепеленко

Науковий керівник – **Засельський Володимир Йосипович**, доктор технічних наук, професор

Кривий Ріг -2021

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 псевдо-в'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 змішу-

вання 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 обертальному 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 якості, 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 порталного багатороторного віброзмішувача-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 «роторний 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 «роторний 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 конфере-*

нції 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 В01F 11/00, В01F 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 $\omega = 15 \text{ s}^{-1}$. 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. *Scien-*

tific 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 ed-*

ucation. *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.

З М І С Т

ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕТИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
1.1 Деякі тенденції використання змішувачів для підготовки шихти	22
1.2 Динаміка інтересу до змішувачів безперервної дії як до технічного об'єкту.....	26
1.3 Аналіз розповсюджених конструкцій змішувачів безперервної дії.....	29
1.3.1 Барабанні змішувачі	29
1.3.2 Гвинтові змішувачі	32
1.3.3 Роторні змішувачі	34
1.3.4 Узагальнення результатів аналізу конструкцій змішувачів безперервної дії.....	41
1.4 Аналіз теоретичних досліджень, спрямованих на розрахунок основних параметрів та процесу підготовки суміші в змішувачах безперервної дії ..	44
1.5 Висновки та задачі дослідження	48
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ «РОТОРНИЙ ЗМІШУВАЧ-КОНВЕЄР»	51
2.1 Опис конструктиву секції змішувача та її вплив на енергоспоживання	51
2.2 Розрахунок енергетичних потреб, затрачених на роботу змішування матеріалу	54
2.3 Розрахунок ексцентричної опори стрічкового конвеєру	61
2.3.1 Гранична статична обертальна рівновага валка.....	61
2.3.2 Умови зчеплення при рівномірному русі стрічки з валком.....	65

2.3.3 Аналіз отриманих результатів з розрахунку ексцентричної опори стрічкового конвеєра.....	71
2.4 Розрахунок профілю лопаток роторного змішувача.....	72
2.4.1 Визначення мінімальної кількості лопаток на роторі	75
2.4.2 Графічна побудова профілю лопатки ротора	76
2.4.3 Аналітична побудова профілю лопатки ротора	79
2.5 Взаємодія частки сипкого матеріалу з поверхнею профільної лопатки при її обертальному виведенні з загального масиву.....	81
2.5.1 Рух матеріальної частинки по шорсткій поверхні обертової лопатки	82
2.5.2. Допустимий сектор процесу ковзання частинок	85
2.5.3 Аналіз результату розрахунків процесу ковзання частинок	87
2.6 Визначення зони розсівання частинок	89
2.7 Висновки.....	91
РОЗДІЛ 3 ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ «РОТОРНИЙ ЗМІШУВАЧ-КОНВЕЄР».....	93
3.1 Мета і задачі дослідження. Опис лабораторної моделі	93
3.2 Методика проведення дослідження.....	95
3.2.1 Методика проведення попереднього експерименту та одержані результати досліджень.....	98
3.2.2 Методика проведення повного факторного експерименту та одержані результати досліджень.....	101
3.3 Висновки.....	107
РОЗДІЛ 4 ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ «РОТОРНИЙ ЗМІШУВАЧ-КОНВЕЄР».....	108

4.1 Мета і задачі промислових випробувань. Опис удосконаленої технологічної схеми виробництва окатишів.....	108
4.2 Методика проведення промислових випробувань та отримані результати досліджень	110
4.3 Шляхи удосконалення роторного змішувача	114
4.4 Висновки.....	118
ВИСНОВКИ.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	123
ДОДАТКИ.....	135
Додаток А. Розрахунок програмою «Дифур Скольжение»	136
Додаток Б. Значення коефіцієнту варіації при різних частотах обертів із використанням лопастного ротору.....	140
Додаток В. Значення коефіцієнту варіації при різних частотах обертів із використанням тросового ротору	140
Додаток Г. Значення коефіцієнту варіації при різних частотах обертів із використанням тросового і лопастного роторів	141
Додаток Е. Значення коефіцієнту варіації при різних частотах обертів із використанням двох тросових і двох лопастних роторів	141
Додаток Є. АКТ про використання дисертаційної роботи ТОВ «КВМШ-плюс» (м. Кривий Ріг).....	142
Додаток Ж. Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи на ДП КВМШ (м. Кривий Ріг)	143
Додаток З. Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес Криворізького національного університету (м. Кривий Ріг).....	144

ВСТУП

Актуальність роботи. На сьогоднішній період часу в діючих технологічних схемах підготовки металургійної шихти до агломерації й випалу застосовується велика кількість різних типів змішувачів безперервної дії, головною відмінністю яких є спосіб дії на шихтовий матеріал. Шихта в цих змішувачах, зазвичай, є сипкою гетерогенною масою, яка більшою мірою набуває пластичних властивостей з великими неоднорідними грудками, що потребують достатньої гомогенізації суміші. Однак змішувачі, які використовують для металургійних шихтових матеріалів не дозволяють забезпечити якісну однорідну суміш. Для підвищення якості суміші в технологічних лініях випалу й агломерації на ряді виробництв встановлюють до змішувачів, які експлуатуються, додаткові горизонтальні роторні змішувачі безпосередньо над транспортуючими конвеєрами металургійної шихти. Внаслідок чого утворюється технічна система «роторний змішувач-конвеєр». Однак до теперішнього часу недостатньо вивчено як впливають конструктивні, режимні параметри запропонованої технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» на підвищення якості підготовки суміші перед процесами випалу та агломерації, а також не запропоновані шляхи його удосконалення.

Таким чином, встановлення закономірностей, що описують вплив конструктивних та режимних параметрів технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» на якість суміші з урахування фізико-механічних властивостей матеріалу перед процесами випалу та агломерації є актуальною **науковою задачею**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота М. І. Шепеленко є завершеною науково-дослідною роботою, яка виконана в період з 2017 р. по 2021р. на кафедрі гірничих машин та обладнання Криворізького національного університету. Вона є одним з наукових напрямів науково-дослідних робіт «Дослідження існуючих конструкцій та те-

хнології виготовлення роликів роlikоопор стрічкових конвеєрів» № 0118U000656і й «Підвищення якості процесів проектування, виготовлення та експлуатації машин» № 0118U0006690 та спрямована на удосконалення, впровадження ефективних машин для підготовки металургійної шихти і енергозбереження.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в вдосконаленні технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» на основі встановлення закономірностей, які розкривають вплив конструктивних та режимних її параметрів на підвищення якості підготовки суміші перед процесами випалу та агломерації.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- провести аналіз сучасного стану питання;
- аналітично та експериментально визначити енергосилові параметри технічної системи;
- теоретично визначити умови роботи ексцентричної опори стрічкового конвеєра;
- визначити необхідний профіль лопаток роторного змішувача для отримання якісної суміші;
- визначити траєкторію руху частинки матеріалу при її сході з профілю лопатки роторного змішувача;
- розробити лабораторну модель технічної системи «роторний змішувач - конвеєр» та провести на ній експериментальні дослідження для отримання функціональних залежностей між її технологічними показниками та конструкційними й кінематичними параметрами;
- провести промислові дослідження системи «роторний змішувач-конвеєр» в умовах ПАТ «ЦГЗК» та дослідити і визначити основні показники її роботи.

Об'єкт дослідження – процес вдосконалення технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної, горизонтально-направленої дії.

Предмет дослідження – конструктивні і режимні параметри технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної, горизонтально-направленої дії та їх вплив на якість змішування матеріалу.

Методи дослідження. При рішенні даних задач використовувалися комплексні методи досліджень. Аналітичні дослідження виконувалися на основі фундаментальних представлень динаміки матеріальної точки та тіла з криволінійною поверхнею, що обертається довкола нерухомої осі з застосуванням прикладних комп'ютерних програм Excel, Mathcad, Vizio. Експериментальні дослідження проводилися на спеціально розробленій моделі технічної системи, а промислові – на обладнанні, що безпосередньо перебувало в експлуатації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Встановлено, що для дослідної технічної системи «роторний змішувач-конвеєр», при постійних конструктивних та кінематичних параметрах стрічки конвеєра якість змішування прямопропорційно залежить від висоти шару матеріалу;
2. Вперше одержана аналітична залежність енерговитрат технічної системи «роторний змішувач-конвеєр», які дозволяють обґрунтувати його конструктивні та режимні параметри;
3. Вперше для технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної, горизонтально-направленої дії з безпосереднім вібраційним впливом на конвеєрну стрічку, одержана математична модель, яка характеризує рух частинок матеріалу в псевдов'язкому середовищі та їх розсіювання в момент сходу з лопатки, на підставі чого встановлено режимні та конструктивні параметри, що впливають на якість одержуваного продукту;
4. Вперше одержано залежності технологічних показників технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної, горизонтально-направленої дії у вигляді лінійного полінома з урахуванням взаємного впливу

його конструктивних та кінематичних параметрів, що дозволило визначити ступінь впливу кожного з них на якість суміші і продуктивність змішувача.

Практичне значення отриманих результатів.

В результаті проведеного дослідження:

- надані рекомендації, щодо вдосконалення технологічної схеми підготовки шихтової суміші для процесів випалу та агломерації для умов ПАТ «ЦГЗК»;

- розроблено інженерну методику розрахунку і вибору основних технічних параметрів системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної, горизонтально-направленої дії, яка використана підприємствами ТОВ «КВМШ плюс», м. Кривий Ріг, а також ДП «Криворізька вища металургійна школа» при проектуванні та виготовленні його для умов ПАТ «ЦГЗК».

Обґрунтованість та достовірність, висновків і рекомендацій забезпечувалася проведенням необхідної кількості експериментів в лабораторних і промислових умовах з використанням методів математичної статистики. В якості порівнюваних параметрів, використовуваних для підтвердження достовірності отриманих результатів і висновків, були прийняті енергосилові показники роторного змішувача. Розбіжність між величинами вказаних параметрів, одержаних шляхом розрахунку і в промислових умовах, для енергоспоживання при роботі змішувача в холостому ході відрізняється не більше чим на 3%, а під навантаженням не більш ніж 10 %.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та задач досліджень виконано спільно з науковим керівником. У роботах, опублікованих в співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в проведенні та обробці експериментальних досліджень та досліджень спрямованих на практичну реалізацію отриманих результатів; алгоритмі рішення по роботі лопатевого ротору змішувача; розробці методики розрахунку і виборі його основних конструктивних і режимних параметрів. Автор брав безпосередню участь у лабораторних та промислових випробуваннях за сприянням співробітників

ТОВ «КВМШ-плюс» та Криворізького металургійного інституту Національної металургійної академії України і технічного персоналу ПАТ «ЦГЗК». Текст дисертації автором написано особисто.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи і її основні наукові положення доповідалися на III Міжнародній конференції "Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід" (Дніпро-Амстердам, 2019 р.); на Всеукраїнській конференції молодих вчених "Молодь і наука. Практика інноваційного пошуку" (Дніпро, 2019 р.); на Congress proceedings – III International Scientific Congress Society Of Ambient Intelligence 2020 (student section) (Прага, 2020 р.); на The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020), яка індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus (Кривий Ріг, 2020 р.).

Публікації. Основні результати представленої роботи до захисту опубліковані в 15 друкованих виданнях: 1 стаття в фаховому науковому виданні категорії А; 2 статті в фахових наукових виданнях, які індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus; 5 статей в фахових наукових виданнях категорії Б; 6 тез доповідей на конференціях, одна з яких індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus та 1 патент України на корисну модель.

Об'єм і структура роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 111 найменувань. Загальний об'єм роботи складає 144 сторінки, зокрема 123 сторінки основного тексту, 48 рисунків, 14 таблиць, 8 сторінок додатків.

Робота виконана на кафедрі гірничі машини та обладнання Криворізького національного університету.

Р О З Д І Л 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ.

ВИЗНАЧЕННЯ МЕТИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Деякі тенденції використання змішувачів для підготовки шихти

Для отримання металів та сплавів необхідного хімічного складу застосовують шихтові матеріали, які потребують додаткової підготовки перед спіканням та плавкою. До основних технологічних схем, для яких необхідна переробка таких матеріалів, можна віднести підприємства гірничо-металургійної галузі, а саме, фабрики огрудкування, коксове та агломераційне виробництво. Такі виробництва не обходяться без процесів змішування на етапах кінцевої обробки шихтових матеріалів.

Традиційні технологічні схеми підготовки металургійної шихти для процесів випалу та спікання базуються на основних операціях: дозування, змішування, транспортування, дроблення, огрудкування, сортування та відповідно спікання.

Проаналізуємо діючу технологічну схему ГД (групового дроблення підготовки вугільної шихти) в системі вуглепідготовки коксохімічного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (рис. 1.1). Принцип дії даної схеми характеризують наступні етапи: з початку шихтові матеріали з бункерів 1 дозуються живильниками 2 на стрічковий конвеєр 3, звідки транспортуються у течку, в якій розмішений шибєр 4, що ділить потік матеріалу за необхідністю. Далі матеріал по жолобу 5 надходить в молоткову дробарку 6 або 7, де піддається механічному впливу її робочих елементів, що виконують дроблення, окрім цього, в робочій камері дробарки частково здійснюється змішування вугільної шихти. Готовий продукт потрапляє на конвеєр збору 8 та перевантажується на конвеєр 9, який подає готову суміш на завантаження камери коксової батареї.

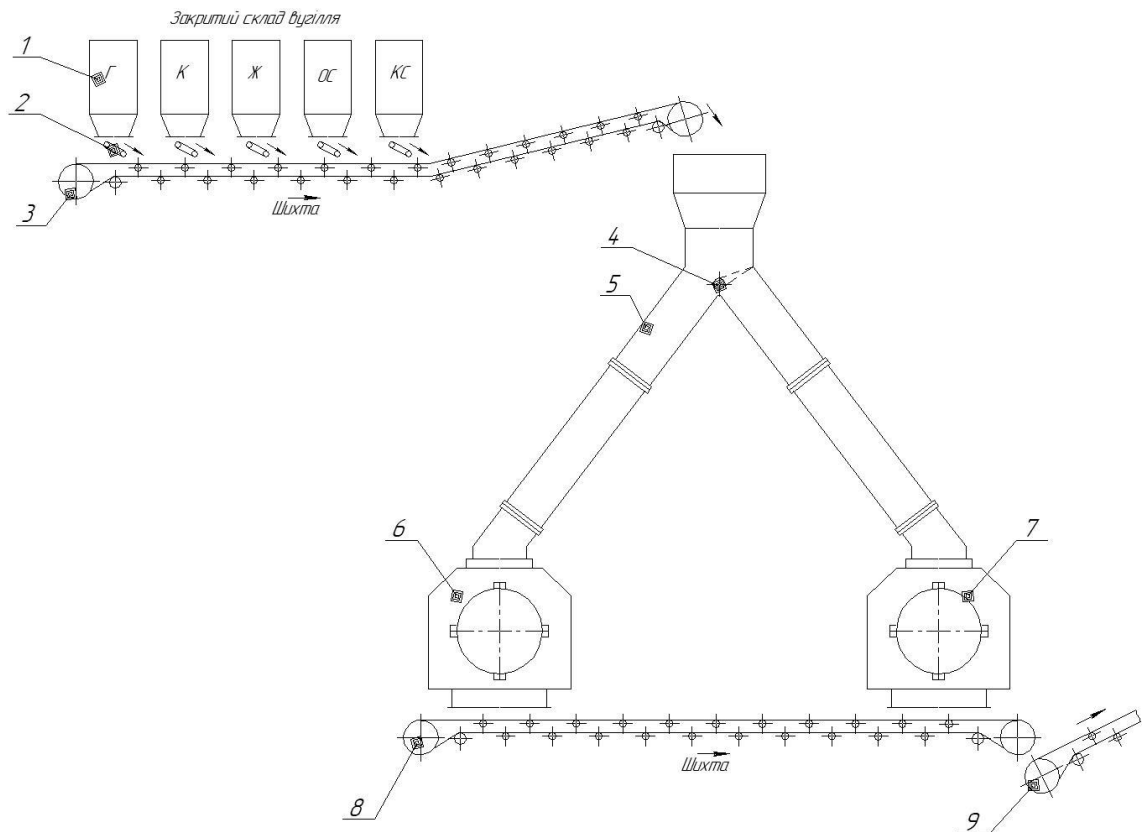


Рис. 1.1 – Технологічна схема підготовки вугільної шихти в системі вуглепідготовки коксохімічного виробництва

1 – бункери; 2 – живильники; 3 – конвеєр; 4 – шибер; 5 – жолоб;
6, 7 – молоткова дробарка; 8 – конвеєр збору; 9 – конвеєр завантаження

Одна із діючих технологічних схем виробництва агломерату ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» представлена на рис. 1.2. В наведеній схемі (рис. 1.2) можна виділити наступні етапи: дозування, змішування, зволоження та огрудування, спікання, обробка гарячого спікання (дроблення, розсівання з видаленням шматків до 5-10 мм), охолодження до 100°C та сортування. Принцип дії полягає в наступному: з початку шихтові матеріали дозуються 1 в бункери шихтового відділення 2. З бункерів шихтового відділення 2 шихта транспортується конвеєрною стрічкою 3 на ваги 4. Після зважування та дозування шихтові матеріали завантажуються у барабанний змішувач 5. Вже змішана шихта транспортується в відділення агломерації та стрічковими ре-

версними конвеєрами завантажується в проміжні бункери 6, звідки надходить на змішування та огрудкування 8. Шихта з огрудкування завантажується у розподільник 10, який рівним шаром розподіляє суміш на колосники рухомих спікальних візків агломераційної машини 11. Далі проходить спікання шихти. Після спікання готовий агломерат в хвостовій частині агломераційної машини 11 сходе з візків та поступає на дроблення 15, тут має місце виділення гарячого повернення, яке розсіюється грохотом 16 на конвеєр та використовується для підігріву інших компонентів шихти або охолоджується водою з охолоджувачів 17.

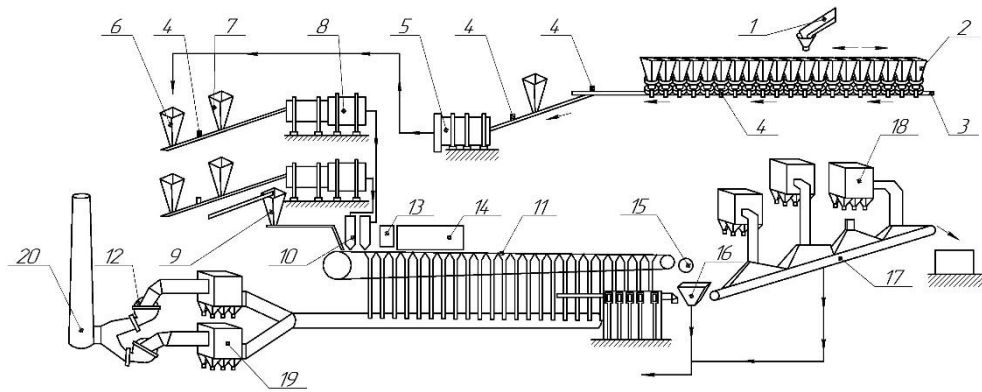


Рис. 1.2 – Технологічна схема виробництва агломерату

- 1 – дозування; 2 – бункери шихтового відділення; 3 – конвеєр;
 4 – ваги; 5 – барабанний змішувач; 6 – шихтові бункери; 7 – паливні бункери;
 8 – змішувач для огрудкування; 9 – бункер прошарків;
 10 – розподільник-укладач шихти; 11 – агломераційна машина;
 12 – ексгаустер; 13 – горн; 14 – камера гарячого повітря; 15 – дробарка;
 16 – грохот; 17 – охолоджувач; 18, 19 – мультициклони; 20 – димова труба.

З аналізу діючих технологічних схем виробництва окатишів можна зробити висновок, що основною задачею є отримання сирих куль діаметром 10 мм та подальшого їх зміцнюючого випалу при температурі 1200-1350°C [47]. Типова технологічна схема виробництва окатишів показана на рис. 1.3 та має

наступний принцип дії: матеріал з бункерів 1 через шихтовий конвеєр та змішувач 2 потрапляє на огрудкування 3. З огрудкування сирі грудки укладачем 4 рівномірним шаром розподіляються на рухому колосникову стрічку конвеєрної машини з подальшим спіканням матеріалу 5. Готові окатиші транспортуються з печі, охолоджуються продувкою та надходять на ділянку сортування 6, де відсівається некондиційний клас 0 – 5 мм.

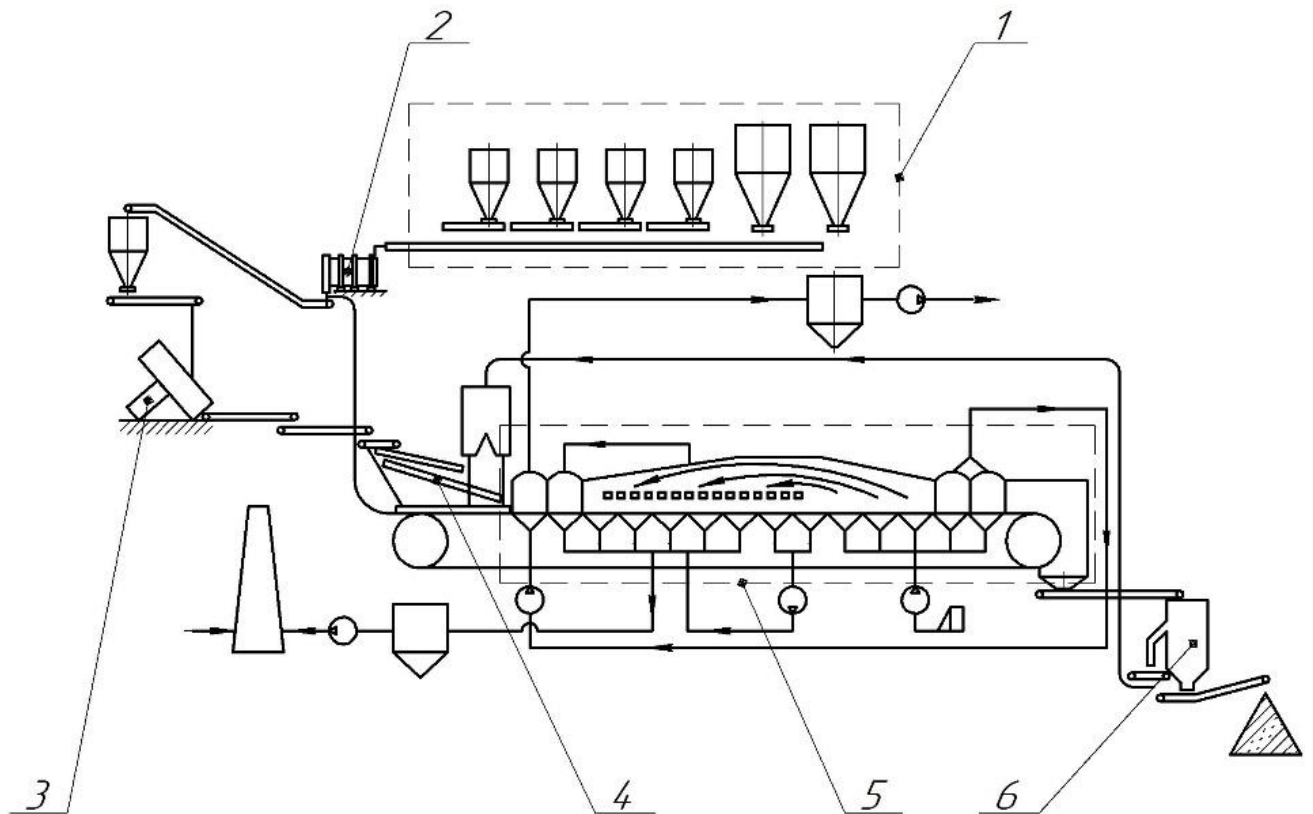


Рис. 1.3 – Технологічна схема виробництва окатишів

1 – складання шихти; 2 – змішування; 3 – огрудкування; 4 – розсів та укладка; 5 – спікання; 6 – сортування.

Аналіз діючих технологічних схем дозволив виділити наступні недоліки:

- для діючої схеми (рис. 1.1) є характерним отримання шихтової суміші низької якості, що обумовлено використанням молоткової дробарки, конструкція якої не може забезпечити високоякісне

змішування перероблюваного матеріалу. Також в даній схемі присутня значна витрата енергії з одночасним обмеженням в можливості підвищення однорідності вугільної шихти, необхідної для коксування, що в свою чергу, впливає і на отримання металургійного коксу належної якості;

- в існуючих схемах (рис. 1.2 – 1.3) загалом використовують барабанні змішувачі, які не забезпечують з огляду на технологічні вимоги однорідність суміші на рівні 95% [32].

З вище описаного можна підсумувати, що вдосконалення змішувачів, як базисного устаткування для підготовки компонентів металургійної шихти, є дуже важливим, з точки зору підвищення ефективності процесів підготовки шихти перед спіканням та випалом.

Також слід наголосити на тому, що представлені вище технологічні схеми повинні забезпечити продуктивність процесу змішування не нижче 500 т/год, при однорідності суміші на рівні 95%. Тому питання удосконалення процесів та обладнання призначених для якісної підготовки шихтової металургійної суміші перед спіканням та випалом є актуальною сучасною задачею.

1.2 Динаміка інтересу до змішувачів безперервної дії як до технічного об'єкту

Аналіз динаміки інтересу до технічного об'єкта дозволяє на основі вивчення потоку інформації за попередні до аналізу (мінімум двадцять років) встановити наявність нових технічних рішень, які в свою чергу забезпечать подальше удосконалення об'єкта дослідження та як наслідок, дозволять встановити доцільність інвестування в цей проект. Даний аналіз являється елементом короткострокових та середньострокових прогнозів розвитку устаткування змішуючого типу. Частковими задачами аналізу є визначення періодич-

ності до об'єкта (період та амплітуда інтересу). Ґрунтуючись на основі цих часткових задач, з'являється необхідність в додаткових дослідженнях об'єкту та їх напрямків.

Додаткові дослідження доцільні та вчасні, якщо виконуються наступні умови:

- початок досліджень співпадає з передбачуваним інтересом використання змішувача в різноманітних ланках промислового виробництва;
- отримана інформація дозволяє знайти нові технічні рішення, що можуть лягти в основу удосконалення змішувача, або технічної системи де вони використовуються, що дає можливість отримати якісний продукт.

На рис. 1.4 наведена інформація інтересу, щодо основних типів змішувачів за останні двадцять років.

Для гравітаційних змішувачів основних видів, інформація по ним є 6–8 років, і найбільший прояв зацікавленості в них з'явився в 2001–2009 роках [3–5, 7] але на теперішній час інтерес до такого роду змішувачів спадає.

Зацікавленість до барабанних змішувачів складає від 5–10 років, пік інтересу до них спостерігається в 2009–2019 роках. Більш ніж 54% інформації за цей час присвячено новим технічним рішенням даної конструкції [8–10].

До переваг можна віднести, що запропоновані рішення дозволяють підвищити якість змішування за рахунок об'єднання та розділення потоків матеріалу, що перероблюється з використанням металевих кульок. Але їх використання в процесі змішування веде до підвищення металоємності та енергоємності барабанних змішувачів.

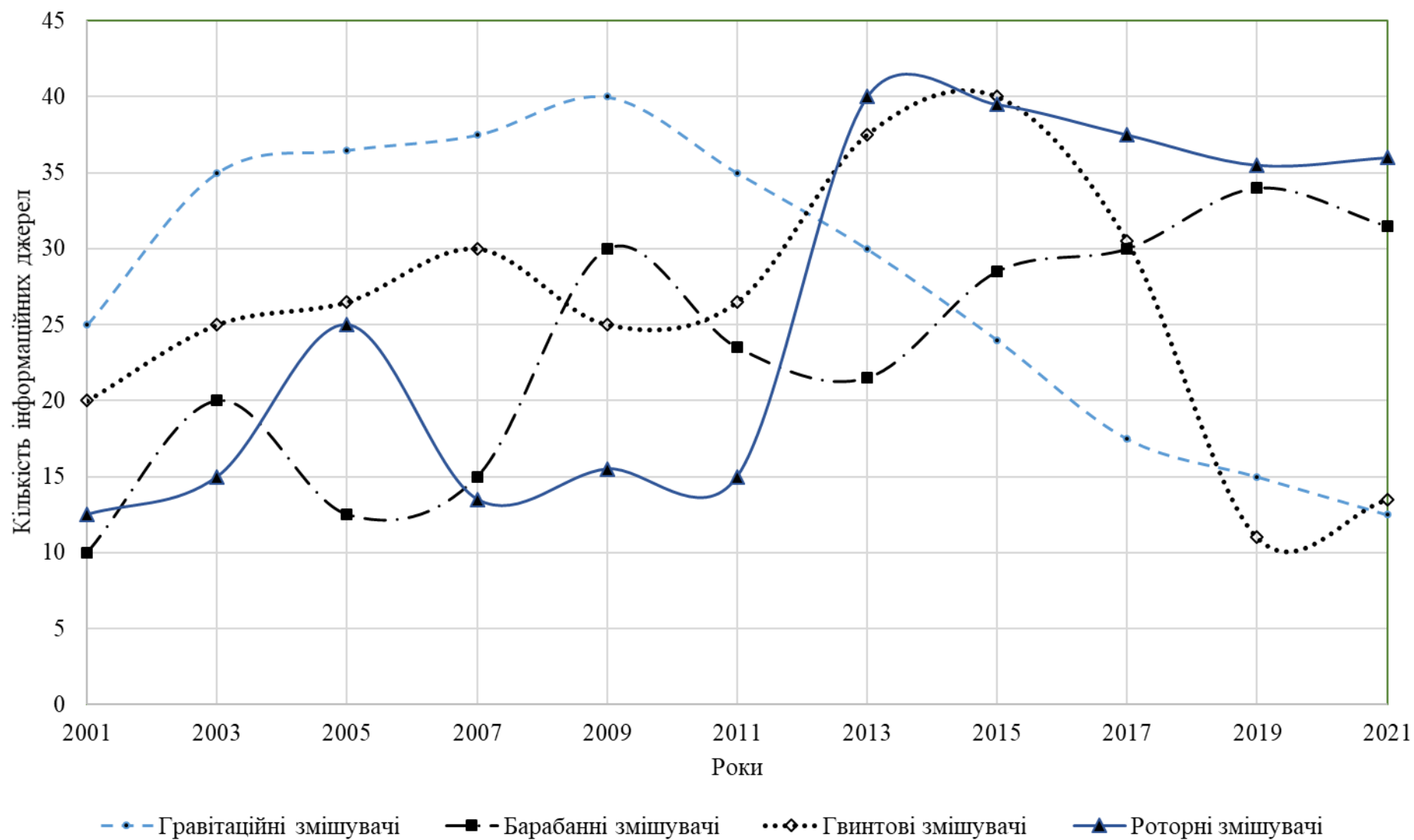


Рис. 1.4 – Динаміка інтересу до змішувачів як до технічного об'єкту

На теперішній час зростання інтересу до роторних змішувачів пов'язано з появою технічних рішень, які враховують жолобну форму стрічки.

З приведеного вище аналізу виявлено безперечних лідерів та аутсайдерів статистики серед розповсюджених конструкцій для змішування сипких матеріалів.

Таким чином встановлена динаміка інтересу до змішувачів дозволяє виявити нові тенденції, які можуть стати суттєвою складовою для модернізації існуючих технологій та технічних схем, що дозволяють підвищити ефективність підготовки шихтових матеріалів до процесів спікання та випалу. Проаналізуємо згідно з наведеною динамікою (рис.1.4) конструкції змішувачів безперервної дії, які здобули найбільшого розповсюдження при підготовці металургійної шихтової суміші до агломерації та випалу.

1.3 Аналіз розповсюджених конструкцій змішувачів безперервної дії

Для підвищення ефективності існуючих технологій, розглянутих в підрозділі 1.1 (див. рис. 1.1-1.3) та з урахуванням результатів аналізу, розглянутих в підрозділі 1.2 даної роботи (див. рис. 1.4), Розглянемо основні конструктивні особливості змішувачів безперервної дії, які використовуються в різноманітних технологічних процесах.

1.3.1 Барабанні змішувачі. Барабанні змішувачі безперервної дії (рис. 1.5) зазвичай виготовляють з циліндричним корпусом, який розташовують горизонтально або з невеликим кутом нахилу до горизонту (до 4°) [1, 23, 24]. До зовнішньої поверхні трубчастого корпусу (барабана) 1 жорстко прикріплюють два або більш бандажі 2 та 4, які спираються на опорні ролики 6 та 10.

Барабан приводиться в обертання від електродвигуна 7 через редуктор 8 та зубчасту пару 9 та 3.

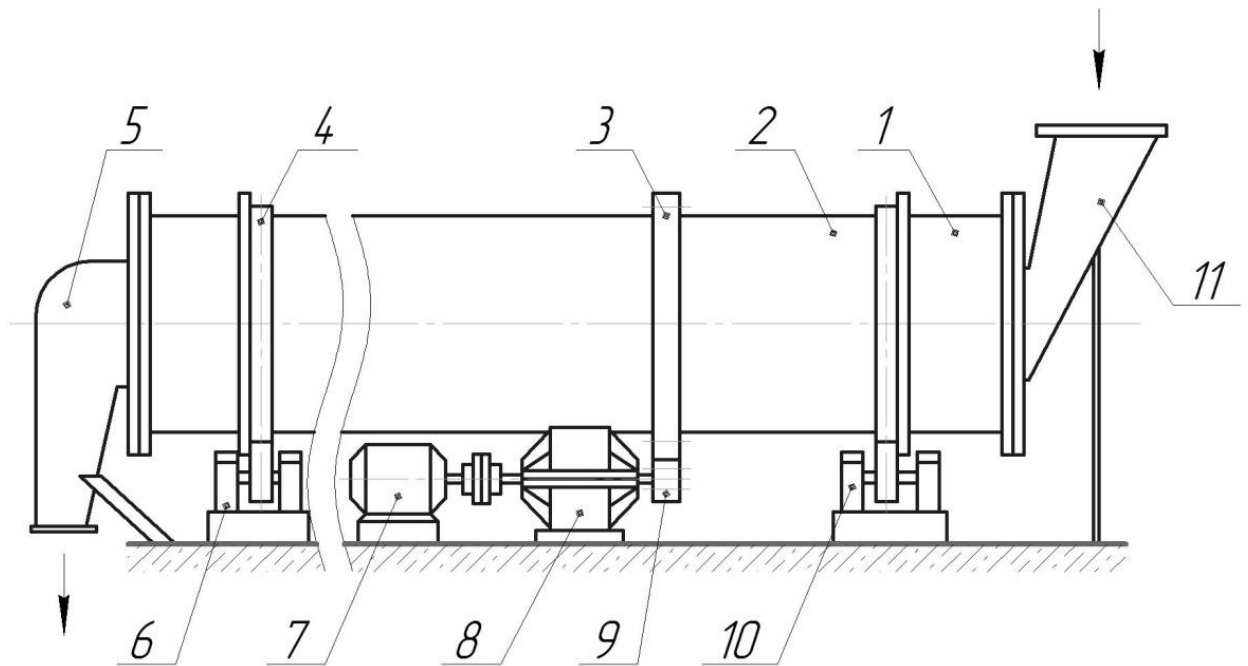


Рис. 1.5 – Принципова схема барабанного змішувача безперервної дії [1]

Матеріал, що дозується живильниками, поступає в барабан по похилому патрубку 11. Готова суміш з барабана виходить з протилежного розвантажувального патрубка торця. Для підтримки необхідного рівня матеріалу в барабані в його розвантажувальному торці розміщено підпірне кільце. Матеріал, що просипається, через кільце потрапляє в розвантажувальну камеру 5. Для збільшення подовжнього змішування матеріалу в барабан іноді вмонтовують гвинтову насадку, що складається із спіральних стрічок, прикріплених до внутрішньої стінки барабана. У деяких конструкціях барабанних змішувачів у середині корпусу, в його нижній частині, встановлюють лопатний вал або шнек, що обертається від самостійного приводу. Загалом безперервно діючі барабанні змішувачі знайшли широке розповсюдження в будівельній промисловості, в основному, для змішування різного роду розчинів та сумішей, хоча вони можуть бути використані для змішування сухих порошкоподібних матеріалів.

Технічна характеристика барабанних змішувачів Уральського заводу важкого машинобудування наведена в табл. 1.1. Саме цей тип барабанних змішувач став основоположним, конструкція якого взята за основу сучасних прототипів.

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика барабанних змішувачів Уральського заводу важкого машинобудування [1]

Показник	Тип барабанного змішувача	
	СБ1 2,5×5	СБ2 2,8×6
Внутрішній діаметр барабану, м	2,5	2,8
Довжина барабану, м	5,0	6,0
Швидкість обертання барабану, об/хв	8	6
Продуктивність, т/год:		
– при 10% заповнення барабану	150–200	–
– при 15% заповнення барабану та куті нахилу 4°	–	450
Встановлена потужність електродвигуна, кВт	40	55
Маса змішувача, т	14,43	16
Габаритні розміри, $l \times b \times h$, м	8,095×3,96×4,15	9,483×4,492×4,15

До переваг використання барабанних змішувачів можна віднести:

- можливість застосування в одній технологічній лінії з агломераційними машинами;

- даний тип устаткування є досить простим в експлуатації;

- не потребує значних капітальних вкладень на обслуговування.

Але не зважаючи на ряд переваг, існує низка суттєвих недоліків даного типу устаткування:

- для підвищення плавності обертання барабан потрібно виконувати з оптимальною кількістю секцій з бандажами, обробленими спільно з посадочними розмірами фланців;

- існує проблема утворення просипів шихти між стаціонарною тічкою завантажувального пристрою та обертовим барабаном;

- постійне налипання шихти на внутрішні стінки тічки;

- неідеальність системи змащення підшипникових вузлів, приводної системи устаткування;
- при роботі даного типу устаткування для змішування сипких матеріалів не забезпечується плавний запуск;
- неможливість амортизувати при запуску та при розгойдуванні корпусу барабана в процесі роботи, в наслідок чого збільшуються вібраційне навантаження на несучі перекриття.

До недоліків можна віднести значні капітальні вкладення на обслуговування та планові ремонти.

1.3.2 Гвинтові змішувачі. В гвинтових або шнекових змішувачах для змішування та осьового переміщення сипких матеріалів служать лопатки, спіралі, переривисті гвинти або гвинтові стрічки, які кріпляться на одному або двох паралельних валах, пропущених через корпус змішувача. Поперечний переріз корпусу даного типу устаткування може бути циліндричним, прямокутним або коритоподібним.

Американською компанією Eirich Machines Inc розроблено гвинтовий (плуговий) змішувач для виробництва високоякісної суміші завдяки ефективній багаторазовій дії лопатних гвинтів. Гомогенність суміші швидко досягається, а зменшений робочий потенціал означає низьку витрату енергетичних потреб. Подача матеріалу відбувається одночасно з процесом змішування, тому проблеми сегрегації та якості, пов'язані з проміжним зберіганням та окремими послідовними операціями, можна уникнути. Просте очищення внутрішніх поверхонь устаткування можливе завдяки наявності великих монтажних люків [28].

Гвинтовий змішувач безперервної дії (рис. 1.6) складається з циліндричного корпусу 1, в якому співвісно встановлено вал 2. Матеріал поступає з вхідного патрубку 3. На валу 2 розміщено ряд пластинчатих плугів 4, профіль плугів виконано з дугоподібною верхньою основою, таким чином відсутній зазор між плугом та стінкою корпусу, та виконується умова їх вільного ковзання по внутрішній циліндричній поверхні корпусу. Змішана суміш вивантажується

через вихідний патрубок 5. Для приводу вала 2 передбачений електричний двигун 6.

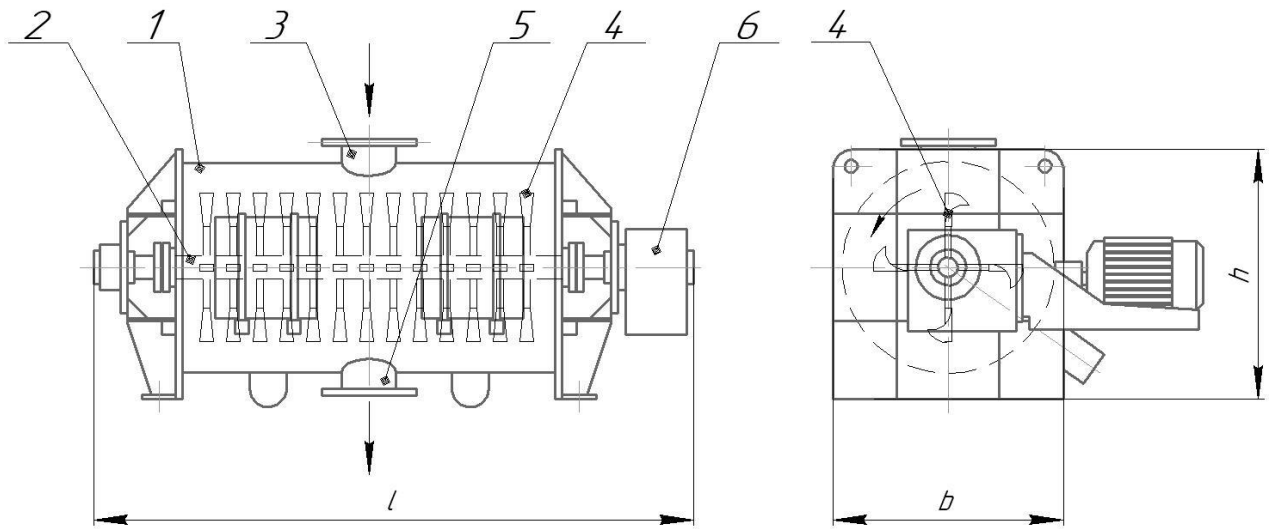


Рис. 1.6 – Принципова схема гвинтового змішувача безперервної дії [28]

Пристрій для змішування призначений для створення гомогенної суміші, змішуючи інгредієнти з незначними добавками. Гвинтовий змішувач Plow Blend високої інтенсивності перемішування компанії Eirich Machines Inc (рис. 1.6) працює наступним чином. Компоненти суміші поступають в горизонтальний циліндричний корпус 1 через вхідний патрубок 3, де піддаються дії високошвидкісного твердого вала ротора 2 з рядом пластинчастих плугів 4. Пластинчасті плуги інтенсивно та безперервно підмітають матеріал в замкнутому циліндричному просторі для досягнення гомогенності суміші за короткий цикл. Вивантаження готової суміші відбувається через вихідний патрубок 5. Привід вала 2 забезпечується електродвигуном 6.

Технічні характеристики гвинтових змішувачів Plow Blend компанії Eirich Machines Inc представлені в табл. 1.2.

До основних переваг такого типу устаткування можна віднести: на практиці плуги, використання яких продовжують боковий рух, загалом ефективніші для агломерації, на відміну від плоских лопаток; також виконується функція подрібнення збільшуючи дисперсність суміші; додаткової міцності комплекту додає суцільний вал змішувача; широкий модельний ряд дає змогу

обрати потрібне устаткування як від лабораторних зразків, так і до виробничих агрегатів.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики змішувачів компанії Eirich Machines Inc [28]

Модель	Діаметр корпусу, см	Робочий об'єм, м ³	Встановлена потужність ел.двигуна, кВт	Габаритні розміри, $l \times b \times h$, см
CPB-6	64	170	6-11	191×74×114
CPB-12	76	340	11-19	213×86×132
CPB-18	86	500	15-22	246×97×142
CPB-30	102	850	22-50	287×112×163
CPB-45	112	1275	50-38	307×122×178
CPB-60	112	1700	45-75	414×122×178
CPB-90	127	2550	56-93	452×137×201
CPB-135	142	3850	93-200	475×155×107
CPB-175	157	5000	112-187	505×170×185
CPB-350	213	10000	187-260	536×226×241

До недоліків можна віднести значні капітальні вкладення на обслуговування та заміну плугів внаслідок постійної абразивної дії матеріалу на них.

1.3.3 Роторні змішувачі. Це устаткування має схожі риси з попереднім, а саме те, що робочим органом і роторних, і гвинтових змішувачів є вал з розмішеними на ньому лопатками. Відмінність полягає в розміщенні вала та русі потоку матеріалу відносно осі вала.

В гвинтових (шнекових) змішувачах матеріал транспортується паралельно осі вала, що обумовлено геометрією лопатки. В роторному змішувачі матеріал транспортується розмішеним під змішувачем стрічковим конвеєром перпендикулярно до осей роторів або вільно падає з живильників на ротори змішувача.

Конструкція порталного багатороторного змішувача безперервної дії, представлена на рис. 1.7 [34]. Змішувач складається з бункера 1, зверху якого змонтована решітка 2. У бункері міститься робочий орган змішувача, який

представляє собою горизонтально розташовані штирьові ворушувачі 3 (царги), що складаються з двох і більш пар валів 4, які обертаються назустріч одне одному, повернених один відносно одного на 90° . Бункер разом з робочим органом змішувача закріплений на несучій рамі 5.

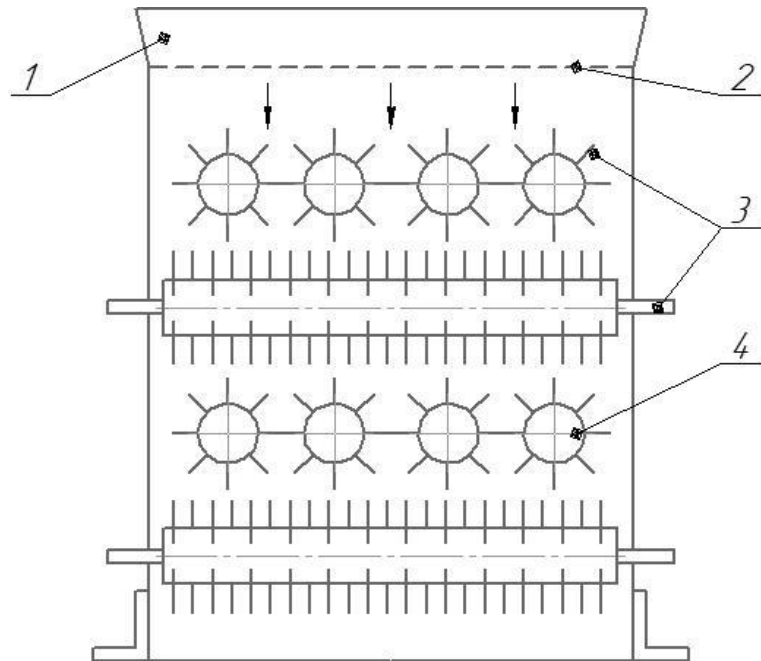


Рис. 1.7 – Конструктивна схема портального багатороторного змішувача безперервної дії

Змішувач працює таким чином. Змішувані матеріали, наприклад, обмалену прокатну окалину і торф активований, за допомогою грейферного крана можна подавати із заздалегідь заготовлених штабелів через захисну решітку 2 в бункер 1, закріплений на несучій рамі 5. При обертанні кожної пари валів 4 в протилежних напрямках штирьовими ворушувачами 3 здійснюється дезинтеграція і змішування компонентів. Розпушений і заздалегідь змішаний на першому штирьовому ворушувачі (1–а царга) матеріал під дією власної ваги і при примусовій дії зусиль від обертання ворушувачів, встановлених на роторі царги, потрапляє на другий (нижній) штирьовий, де процес змішування і гомогенізації компонентів продовжується, але вже при взаємно перпендикулярному напрямі обертання пар валів штирьового ворушувача. Для поліпшення якості

змішування і гомогенізації матеріалу описаний процес на перших двох царгах, який повторюється і на нижче розташованих штиркових ворущувачах (всього показано на рис. 1.7 чотири царги).

Для завантаження змішаного матеріалу у вагон змішувач може бути встановлений на відповідній порталній рамі.

Технічні характеристики порталного багатороторного змішувача безперервної дії представлені в табл. 1.3 [34].

Серед закордонних конструкцій змішувачів значного розповсюдження здобули роторні змішувачі безперервної інтенсивної дії компанії Айріх. Змішувач Айріх типу DW 29/4 conti представлений на рис. 1.8.

Роторний змішувач безперервної дії DW 29/4 (рис.1.7) [49] складається з корпусу 1, в якому встановлено під кутом 22° чашу для змішування 2. Матеріал поступає з вхідного патрубку 3. В чашу 2 встановлено два ротори 4 з розміщеними на кожному по ряду пластинчатих лопаток 5. Привід ротору здійснюється за допомогою електродвигуна 6. Змішана суміш вивантажується через вихідний патрубок 7.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики багатороторного змішувача безперервної дії

Найменування параметра, одиниці виміру	Значення
Продуктивність, т/год	100 ÷ 150
Крупність матеріалу, не більше, мм:	
– початкова	600
– кінцева	50
Кількість встановлених царг, шт.	4
Робоча довжина і ширина поверхні змішування, м	1,6×1,6
Тип встановленого приводу: мотор-редуктор	ЗМП-80-71-1434-110
Встановлена потужність, кВт	11
Швидкість руху робочого органу, об/хв	21,52
Маса, кг	7620

Змішувач типу DW 29/4, призначений для приготування концентрату залізної руди та працює наступним чином. Компоненти суміші поступають у встановлену під кутом циліндричну чашу 2 через вхідний патрубок 3. Ротори 4 з лопатками 5 безперервно обертаються, завдяки чому матеріали змішуються. Вивантаження готової суміші відбувається через вихідний патрубок 7. Привід валу 4 забезпечується електродвигуном 6.

Технічна характеристика роторного змішувача DW 29/4 компанії Айріх представлені в табл. 1.4.

З переваг вище описаної конструкції можна виділити такі, як: повна автоматизація процесу змішування; знижений рівень звуку завдяки унікальному корпусу.

До недоліків можна віднести: значні капітальні вкладення на ремонт та обслуговування устаткування.

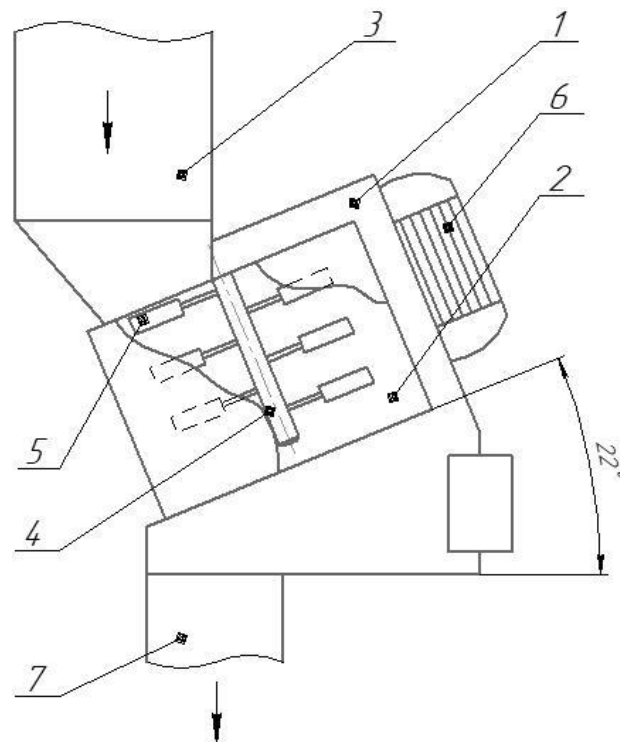


Рис. 1.8 – Конструктивна схема роторного змішувача безперервної дії DW 29/4

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики роторного змішувача безперервної дії
DW 29/4

Найменування параметра, одиниці виміру	Значення
Продуктивність, т/год	100 ÷ 150
Кількість встановлених роторів, шт.	2
Встановлена потужність, кВт	2×18,5
Швидкість руху робочого органу, об/хв	145
Маса, кг	13000

Наступна конструкція роторного змішувача була запропонована та впроваджена в промисловість Уральським заводом важкого машинобудування та удосконалена підприємством ТОВ «КВМШ плюс» шляхом розробки роторного змішувача з гнучким тросовим та лопатевим роторами [14, 25, 26]. Конструкція змішувача наведена на рис. 1.9.

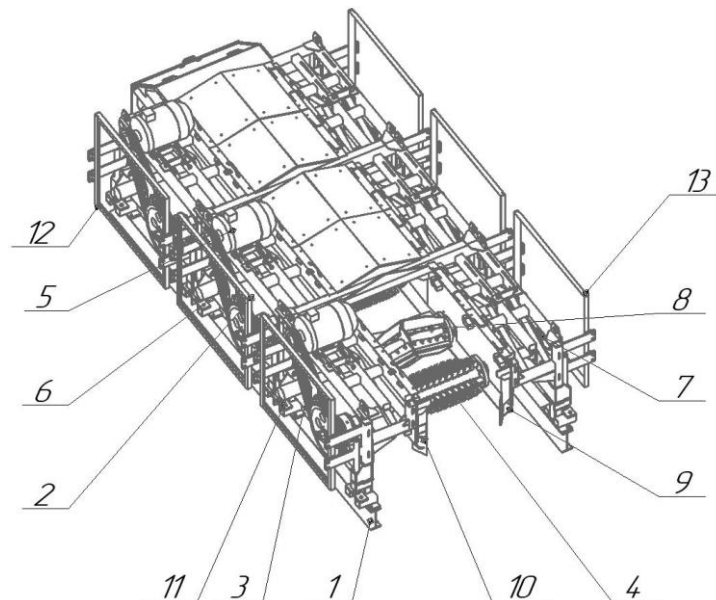


Рис. 1.9 – Роторний змішувач з гнучким тросовим ротором
(виконаний з розрізом першої секції) [14]

Змішувач (див. рис. 1.9) розміщується безпосередньо над конвеєрною стрічкою і складається із рами 1 та послідовно розташованих секцій 2. В кож-

ній секції встановлюється по два ротори, один з яких (з гнучкими тросовими елементами 4) отримує обертовий момент від двигунів 5 за допомогою пасової передачі 6. Рух лопатевого ротору 8 також здійснюють за допомогою пасової передачі 7 тільки на протилежній стороні. Зазор між ротором та стрічкою конвеєра здійснюється регулюванням гвинтів 11. Секції роторів виконуються закритого типу (див. позиції 12, 13). В залежності від переробляемого матеріалу встановлюються необхідна кількість секцій [14].

Робота змішувача виглядає наступним чином: матеріал рухаючись по конвеєрній стрічці поступає в робочу зону змішувача, де потрапляє на перший ротор з гнучким тросовим елементом, а після нього на лопатевий.

Технічні характеристики роторних змішувачів типу СР підприємства ТОВ «КВМШ плюс» представлені в табл. 1.5.

Використання даного типу змішувача обумовлено рядом переваг, таких як відсутність значних динамічних навантажень, а також використання його на діючих технологічних ланках підготовки металургійної шихти до агломерації та випалу без суттєвих капітальних витрат.

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики роторних змішувачів з гнучким тросовим та лопатевим роторами

Тип (варіанти виконання)	СР– 520×0,8– (2,3,4)	СР– 520×1,0– (2,3,4)	СР– 520×1,2– (2,3,4)	СР– 620×1,4– (2,3,4)
Ширина стрічки конвеєра, м	0,8	1	1,2	1,4
Продуктивність змішувача, т/г	250	500	800	1200
Кількість секцій, шт	2, 3, 4	2, 3, 4	2, 3, 4	2, 3, 4
Кількість роторів, шт	4, 6, 8	4, 6, 8	4, 6, 8	4, 6, 8
Діаметр ротора, мм	520	520	520	520
Потужність привода, кВт	15–22,5–30	22–33–44	30–45–60	37–55,5–74
Маса змішувача, т	3,8–5,3–6,8	4–5,5–7	4,2–5,8–7,3	4,4–6–7,5

Недоліками такого устаткування є низька ефективність процесу змішування в силу короткого часу перебування матеріалу в робочій зоні змішувача.

Закордонним аналогом роторного змішувача є установка американської компанії PEKAY Machine & Engineering Co., Inc (рис. 1.10) [58].

PEKAY Machine & Engineering Co., Inc виробляє індивідуальне змішувальне обладнання для ливарного виробництва, переробки руди і багатьох інших галузей, які транспортують різні матеріали на конвеєрних стрічках.

Компанія пропонує стрічкове конвеєрне обладнання, яке може змішувати, аерувати і видаляти грудки багатьох стандартних формувальних пісків і рудних матеріалів. Ці нестандартні системи змішування і аерації включають ходову частину, раму, корпус, колеса, вали і елементи захисту приводу, виготовлені з вуглецевої або нержавіючої сталі, а також гумові системи для утримання і відведення матеріалу, що транспортується. Таке обладнання може обробляти матеріал глибиною до 10 дюймів і витримує допуски $\pm 1/8$ дюйма.

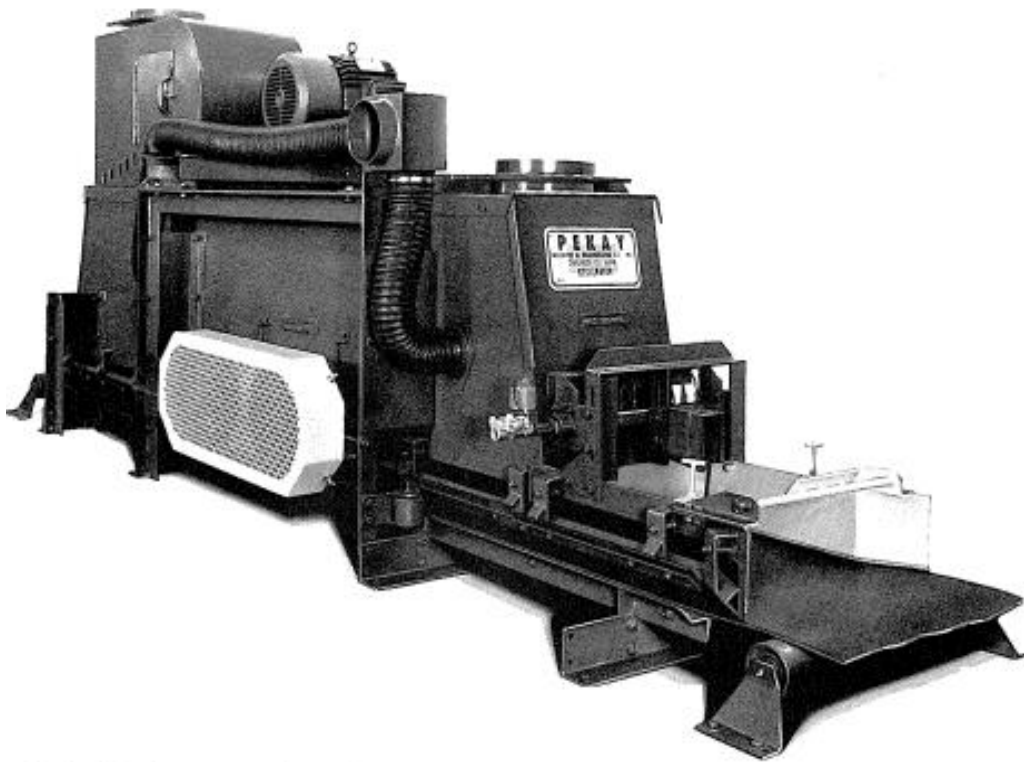


Рис. 1.10 – Загальний вигляд роторного змішувача PEKAY Machine & Engineering Co., Inc

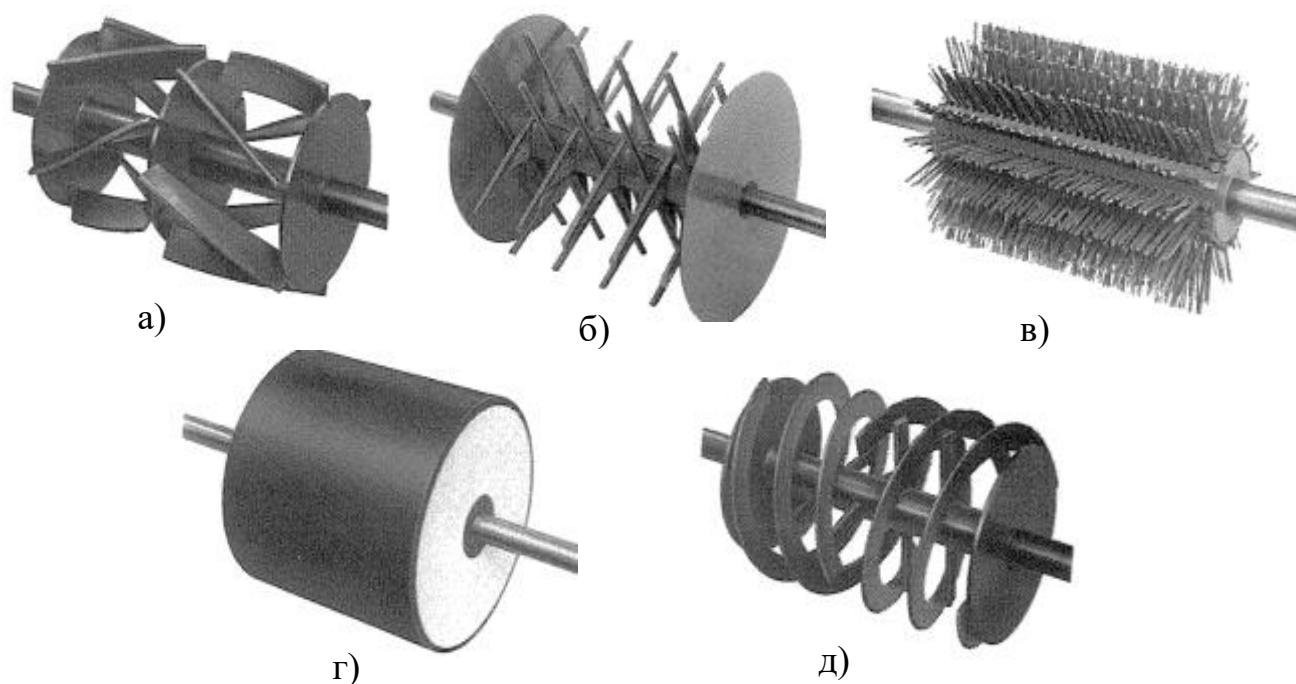


Рис. 1.11 – Типи роторів змішувача PEKAY Machine & Engineering Co., Inc [58]: а) лопатевий; б) голчастий; в) щітковий; г) суцільний; д) спіральний.

Також цікавим є можливість використання обладнання з модифікаціями типів роторів (рис. 1.11), для роботи змішувача з різними видами матеріалів.

1.3.4 Узагальнення результатів аналізу конструкцій змішувачів безперервної дії. З приведенного аналізу конструкцій змішувачів, що використовуються (див. підр.1.3.1 - 1.3.3) можна зробити висновок, що є такі, які використовують високі показники продуктивності при одночасних низьких показниках енергоспоживання, це все стосується закордонних апаратів, але питання їх надійності, в умовах нашого регіону, залишається не визначеним. Окрім цього є питання і до капітальних витрат, в придбанні та обслуговуванні іноземних аналогів.

– удосконалення високопродуктивних, ефективних змішувачів безперервної дії з низькою питомою металоємністю і енергоємністю процесу змішування;

– об'єднання змішування та розпушування в одному типі устаткування;

– розробка апаратів, що не потребують великих капітальних витрат при їх впровадженні в існуючі технологічні процеси.

З приведених вище конструкцій змішувачів (див. підрозділ 1.3) є досить цікаві та перспективні апарати, які загалом використовуються на закордонних виробництвах (США, Німеччина, Китай, Канада) та демонструють високі показники продуктивності використовуючи при цьому мінімальне електроспоживання. При цьому якість до початкового матеріалу європейських виробництв незрівнянна в порівнянні з вітчизняною, тому питання надійності закордонних типів змішувачів в умовах нашого регіону залишається не визначеним.

Основними характеристиками матеріалу, зумовленими якістю змішування, є фізичні властивості матеріалу (розмір, форма частин, вологість); наявність різниці між компонентами (різниця розмірів, густини та ін.); схильність до сегрегації та адгезії [32].

Для вибору оптимального типу устаткування для змішування компонентів металургійної шихти в важких умовах діючих технологічних схем гірничо-металургійної промисловості необхідно провести аналіз технічних характеристик (див. підрозділ 1.3) вітчизняних конструкцій змішувачів та їх закордонних аналогів, які найбільш придатні для підвищення якості отриманої суміші.

Порівняльна характеристика основних техніко–економічних показників устаткування для змішування шихтових матеріалів приведено у зведеній таблиці 1.6 [1, 33].

З даних, представлених в табл. 1.6, випливає наступне. Для визначення оптимального типу устаткування, модернізація якого доцільна та актуальна, з можливістю впровадження в існуючі технологічні схеми (рис. 1.1–1.3) виробництва без значних капітальних вкладень, визначено наступні питомі показники: електрична енергія, яка була витрачена для механізації змішувача за одну годину експлуатації K_1 (відношення потужності до продуктивності); масовий показник, який характеризує металоємність відповідного типу устаткування K_2 (відношення потужності до маси агрегату з електричним обладнанням); по-

казник який характеризує відношення продуктивності до габаритних розмірів та відповідно площі агрегату K_3 .

Таблиця 1.6 – Зведена таблиця технічних характеристик устаткування для змішування шихтових матеріалів

Тип змішувача	Потужність, N , кВт	Продуктивність, Q , т/год	Маса, M , т	Площа (враховуючі електродвигун), $L \times B = A$, m^2	Питомі показники		
					$K_1 = N/Q$, кВт·т/год	$K_2 = Q/M$, т/год·т	$K_3 = Q/A$, т/год· m^2
Барабанний змішувач типу СБ1–2,8×6	55	450	16	$9,5 \times 4,45 =$ $= 42,27$	0,12	28,1	10,64
Шнековий змі- шувач типу СШ–50	37	50	1,5	$3,6 \times 1,2 =$ $= 4,32$	1,1	33,3	11,57
Роторний змі- шувач типу Ай- ріх DW 29/4	40	650	13	$3,5 \times 4,7 =$ $= 16,45$	0,061	50	39,51
Роторний змі- шувач типу СР– 3–520	45	600	5,6 5	$5,87 \times 2,92 =$ $= 17,14$	0,075	106,2	35,0

З аналізу таблиці 1.6 і наведених питомих показників, видно що шнековий змішувач не забезпечує необхідну продуктивність для технологічних схем, які були розглянуті в розділі 1.1 даної роботи. Практично за всіма питомими показниками найбільш перспективним є роторний змішувач СР–3–520 виробництва «КВМШ плюс», його технічні характеристики свідчать про забезпечення максимальної продуктивності при відносно невеликій займаній площі (показник K_3). Також показник K_2 питомої ваги перевищує більш ніж в два рази, чим роторний змішувач типу Айріх DW 29/4 і в три з половиною рази більше в порівнянні з таким же показником барабанного змішувача. По показнику K_1 СР–3–520 не значно поступається (на 23%) показникам роторного змішувача типу Айріх, але суттєво відрізняється від аналогічного показника барабанного змішувача, який зменшується в 1,6 рази. Таким чином, з наведе-

них та проаналізованих показників можна зробити висновок, що найбільш придатними з точки зору удосконалення технологічних схем підготовки металургійної суміші (шихти) до спікання та випалу є роторний змішувач Айріх DW 29/4, однак такий тип устаткування потребує значних капітальних вкладень при його впровадженні для реконструкції діючих технологічних схем. Водночас роторні змішувачі СР–3–520 потребують мінімальних вкладень при впровадженні, та добре поєднуються з кожною з розглянутих раніше технологічних схем (рис. 1.1-1.3).

Для удосконалення роторного змішувача типу СР–3–520 та підвищення якості суміші при підготовці металургійних шихтових матеріалів. Для підвищення якості суміші може бути запропонована технічна система «змішувач-конвеєр», яка включає в себе раму, на нижньому ярусі якої між роторами встановлені ексцентрикові ролики, котрі мають безпосередній контакт з поверхнею стрічки конвеєра підтримуючі її, здатні генерувати постійні гармонійні коливання, що передаються транспортуючому матеріалу [48]. Але така конструкція маловивчена та потребує додаткових теоретичних досліджень в області розрахунків впливу конструктивних параметрів на ефективність змішування, енерговитрат та математичного опису процесу змішування сипких матеріалів у псевдов'язкому середовищі.

1.4 Аналіз теоретичних досліджень, спрямованих на розрахунок основних параметрів та процесу підготовки суміші в змішувачах безперервної дії

Дослідженням в області розрахунків конструктивних та технологічних параметрів змішувачів безперервної дії присвячено безліч робіт вітчизняних та закордонних авторів. Найбільш близькими до пропонованої конструкції роторного змішувача безперервної дії є роботи В.І. Большакова, А.Д. Учителя, В.В. Коноваленко, Д.В. Пополова, В.Й. Засельського, Ю.І. Вітітньова та інших [26, 43, 44, 50, 53]. В роботі [43] розглянута конструкція, що наведена на рис. 1.7, для якої визначались продуктивність, енергосилові параметри та траєкто-

рія руху частинки матеріалу. Дослідження змішувача проводилось відповідно для його конструктивних особливостей, які складались з паралельно розташованих роторних елементів (модульних царг), де продуктивність була визначена відповідно до [44]

$$\Pi = \Pi' + \Pi'', \quad (1.1)$$

де Π' – продуктивність визначена, як при розрахунку продуктивності барабанного дозуючого пристрою, м³/с; Π'' – продуктивність визначена, як при розрахунку продуктивності шлюзовим дозуючим пристроєм, м³/с.

Необхідна потужність приводу вказаного апарату, згідно з [43, 53, 55] була визначена за формулою

$$N_{\text{дв}}^{\text{I-I}} = \frac{[K'_\Pi \cdot (M_\text{м} + M_\text{ц}) \cdot \omega_\text{в}]}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3^{n_{\text{ст}}}}, \quad (1.2)$$

де K'_Π – коефіцієнт запасу настановної потужності, виходячи з [44] приймається $K'_\Pi = 1,2$; $M_\text{м}$ – сумарний момент від діючого навантаження матеріалу на вал і лопатки, Н·м; $M_\text{ц}$ – момент сил тертя в цапфах вала, Н·м; η_1 – ККД редуктора; η_2 – ККД ланцюгової передачі; $\eta_3^{n_{\text{ст}}}$ – зубчастої передачі в одному ступені з урахуванням втрат в підшипниках; $n_{\text{ст}}$ – кількість ступенів у зубчастих передачах (для даного випадку $n_{\text{ст}} = 3$).

Відповідно для другої царги, встановленої під першою, як і для подальших, спожита потужність витрачалась на змішування матеріалу, а також на тертя в опорах валу, визначалася як

$$N^{\text{II-II}} = \frac{(A_\text{тр} + M_\text{тр}) \cdot \omega_\text{в}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3^{n_{\text{ст}}}}, \quad (1.3)$$

де $A_{\text{тр}}$ – робота, необхідна на змішування (транспортування) матеріалу, Дж; $M_{\text{тр}}$ – момент сил тертя в підшипниках вала, Н·м.

Також автором була одержана функція траєкторії частинки за заданих умов

$$y = \frac{V_{Ay} + mg}{V_{Ax}} \cdot (x - x_A) + \frac{m^2 g}{\mu^2} \ln \left[1 - \frac{\mu}{m \cdot V_{Ax}} \cdot (x - x_A) \right] + y_A, \quad (1.4)$$

де m – маса частинки, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Встановлені залежності дають можливість визначити продуктивність та енергосилові параметри, а також траєкторію руху частинки матеріалу для змішувача вертикально-направленої безперервної дії. Але вони не дають можливості визначити такі параметри для технічної системи «змішувач-конвеєр», яка є горизонтально-направленої безперервної дії, що до теперішнього часу не були розглянуті.

Крім визначення перерахованих параметрів є потреба в математичному описанні процесу змішування сипких матеріалів, необхідних для запропонованої системи [48].

Теоретичним дослідженням у області математичного опису процесу змішування сипких матеріалів, необхідних для розробки змішувальної техніки, присвячено багато робіт вітчизняних та закордонних вчених, таких як Ю. І. Гусев, В. В. Кафаров, Л. А. Сивеченко, С.О. Учитель, Л. В. Корольов, О. Д. Учитель, В. І. Большаков, В. Й. Засельський, Д. В. Пополов, С. В. Швед, І. В. Засельський, С. Ким, В. Ф. Першин, Ф. Стренк, А. І. Мошинській, М. Ю. Таршис, Б. Ю. Ланге, Ю. І. Бабенко, А. А. Александровський, М. Сато, К. Яматуті, М. Аун, В. Мюллер, Н. Румпф, К. Зоммер, Ю. І. Макаров та ін.

Як правило, метою учених, що займаються описом процесу змішування сипких матеріалів, є встановлення функціонального зв'язку між прийнятою

оцінкою якості суміші та факторами, які на неї впливають. Математичний опис цього функціонального зв'язку зводиться до розробки або використання тієї або іншої математичної моделі системи змішувача, яка визначає характер переміщення частинок змішуваних матеріалів. На рис. 1.12 наведено основні математичні моделі, які використовуються для опису процесу змішування [56].

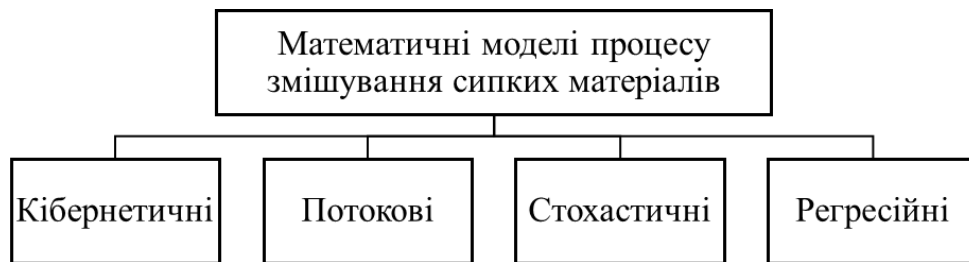


Рис. 1.12 – Структурна схема основних математичних моделей змішування сипких матеріалів

У роботі [51] автор досліджував агрегат змішувача, до складу якого, окрім дозаторів, входять такі змішувачі: відцентровий, шнековий та спеціальний вібраційний апарат із зовнішнім регулятором при змінних параметрах вібрації. При цьому виведена передаточна функція, що моделює інерційну складову із запізненням

$$W(p) = \exp(-\tau_p p) / (\tau_p p + 1), \quad (1.5)$$

де τ_p – характерний час взаємодії частини змішуючого та транспортуючого компонентів у області активного змішування.

Автор праці [40] проводить дослідження змішувача з коливальними властивостями і передавальною функцією типу

$$W(p) = k / (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1), \quad (1.6)$$

де T_1, T_2 – постійні часу; p – символ диференціювання за часом.

У роботі [52] автором було проведено математичне моделювання безперервно діючого агрегату змішувача. Передаточні функції відцентрових змішувачів двох ступенів агрегату представлялися відповідно інерційними ланками 1-го і 2-го порядків

$$W_1(p) = k_1 / (T_1^2 p^2 + T_1 p + 1), \quad W_2(p) = k_2 / (T_2 p + 1), \quad (1.7)$$

де T_1 – постійна часу; $k_{1,2}$ – коефіцієнти передачі.

Дані методи є характерними для змішувачів безперервної дії, проте при певних обмеженнях (лінійність, постійність коефіцієнтів дифузійного та конвективного переносу і інше) його практична реалізація має обмеження в випадках, коли відомі пряме та зворотне перетворення Лапласа. Окрім цього, слід зазначити, що в роботах [40, 51, 52] автори для перевірки адекватності моделі застосовують емпіричні моделі (рівняння регресії).

Використання описаних вище математичних моделей процесу змішування матеріалу для розробки змішувального пристрою є важливим елементом досліджень. Це обумовлено також тим, що в роботі [43] отримано рівняння регресії, які пов'язують технологічні показники з кінематичними та конструктивними параметрами, натомість для запропонованої конструкції [48] такі дослідження не проводились. Таким чином, при удосконаленні технічної системи «змішувач-конвеєр» необхідні дослідження, які б дозволили встановити взаємозв'язок між прийнятою оцінкою якості суміші та впливаючими на неї факторами.

1.5 Висновки та задачі дослідження

Автором були проаналізовані технологічні схеми діючих промислових виробництв, на яких застосовується операція змішування. Встановлена дина-

міка інтересу до змішувачів, здатна виявити нові тенденції, які можуть стати суттєвою складовою для модернізації існуючих технологій та технічних схем, що дозволяють підвищити ефективність підготовки шихтових матеріалів до процесів спікання та випалу. Також розглянута порівняльна характеристика основних техніко-економічних показників устаткування для змішування шихтових матеріалів. Проаналізовано теоретичні дослідження, які спрямовані на розрахунок основних параметрів та процесу підготовки суміші в змішувачах безперервної дії

На основі проведеного аналізу розповсюджених технологічних схем підготовки шихтових матеріалів до спікання та випалу; характеристик конструкцій змішувачів безперервної дії, що застосовані на цих виробництвах; виконаних науково-дослідних робіт, спрямованих на вивчення та моделювання процесів змішування матеріалів, встановлено, що:

- існуючі закордонні аналоги змішувачів безперервної дії відповідають вимогам вітчизняної технології з виробництва високоякісної суміші вугільної шихти, але потребують значних капітальних вкладень;

- використовуваний на даний час спосіб підготовки шихтових матеріалів не задовольняє технологічним вимогам щодо якості суміші;

- одним з можливих способів поліпшення якості змішування металургійної шихти може бути застосована технічна система «роторний змішувач-конвеєр» з наданням вібраційного впливу на конвеєрну стрічку;

- для удосконалення технічної системи «роторний змішувач-конвеєр», яка відповідає вимогам гірничо-металургійного комплексу, щодо підготовки металургійної шихти до агломерації і випалу за аналог може бути прийняте технічне рішення, яке відповідає конструкції роторного змішувача встановленого над конвеєрною стрічкою;

- на сьогодні відсутні роботи з 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;

– відсутні дослідження які б описували функціональну залежність між технологічними показниками та конструктивними й кінематичними параметрами технічної системи «роторний змішувач-конвеєр».

Мета роботи полягає в вдосконаленні технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» на основі встановлення закономірностей, які розкривають вплив конструктивних та режимних її параметрів на підвищення якості підготовки суміші перед процесами випалу та агломерації.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз сучасного стану питання;
- аналітично та експериментально визначити енергосилові параметри технічної системи;
- теоретично визначити умови роботи ексцентричної опори стрічкового конвеєра;
- визначити необхідний профіль лопаток роторного змішувача для отримання якісної суміші;
- визначити траєкторію руху частинки матеріалу при її сході з профілю лопатки роторного змішувача;
- розробити лабораторну модель технічної системи «роторний змішувач - конвеєр» та провести на ній експериментальні дослідження для отримання функціональних залежностей між її технологічними показниками та конструкційними й кінематичними параметрами;
- провести промислові дослідження системи «роторний змішувач-конвеєр» в умовах ПАТ «ЦГЗК» та дослідити і визначити основні показники її роботи.

Р О З Д І Л 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ «РОТОРНИЙ ЗМІШУВАЧ-КОНВЕЄР»

2.1 Опис конструктиву секції змішувача та її вплив на енергоспоживання

В даному розділі приведено методику розрахунку визначення енергосилових параметрів технічної системи «роторний змішувач-конвеєр», конструктивна схема якої запропонована за патентом [48].

В загальному випадку потужність окреслюється такими параметрами як швидкість переміщення матеріалу; фізико-механічні властивості матеріалу та конструктивні параметри устаткування.

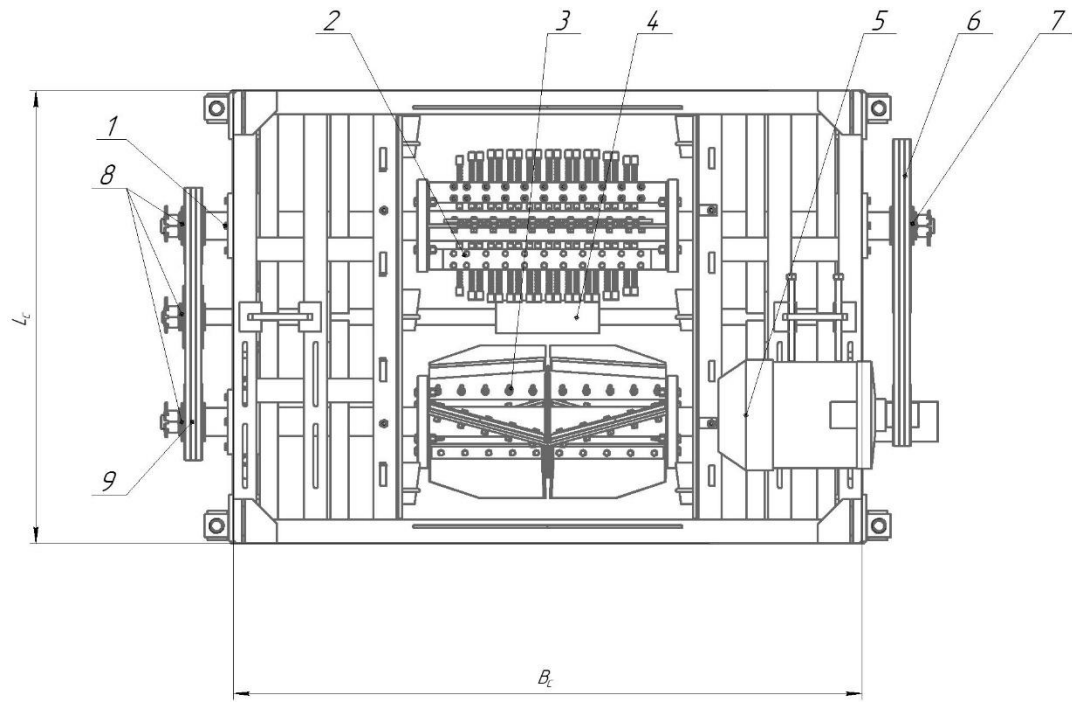
Розглянемо детальніше конструкцію секції роторного змішувача, яка є першою по ходу постачання матеріалу по конвеєрній стрічці та наведена на рис. 2.1.

Наведена конструкція відрізняється від конструкції на рис. 1.9 тим що вона має додатковий вібруючий ролик 4. Тим самим забезпечує вібраційні коливання стрічки конвеєра в робочій зоні змішування матеріалу.

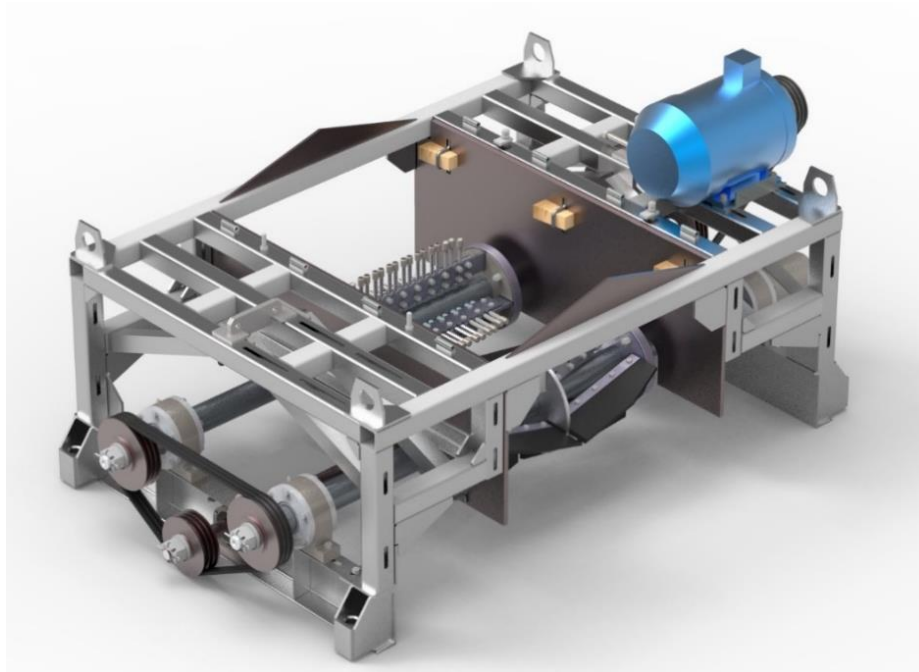
На роторах 2 та 3 перпендикулярно валам розміщені троти та лопаті відповідно. Конструктивна схема робочих елементів змішувач (наприклад поз.2,3 рис. 2.1) показана на рис. 2.2.

З технічних особливостей змішувача, приведених на рис. 2.2, очевидно, що перший ротор з гнучкими елементами виконує розпушуючу дію шару приводячи металургійну шихту у суспендований стан.

Технологічною задачею роторного змішувача з гнучким тросовим елементом є отримання якісної, гомогенної шихтової суміші з меншими затратами енергетичних потреб.



а)



б)

Рис. 2.1 – Секція роторного змішувача:

а) конструктивна схема; б) 3D-модель

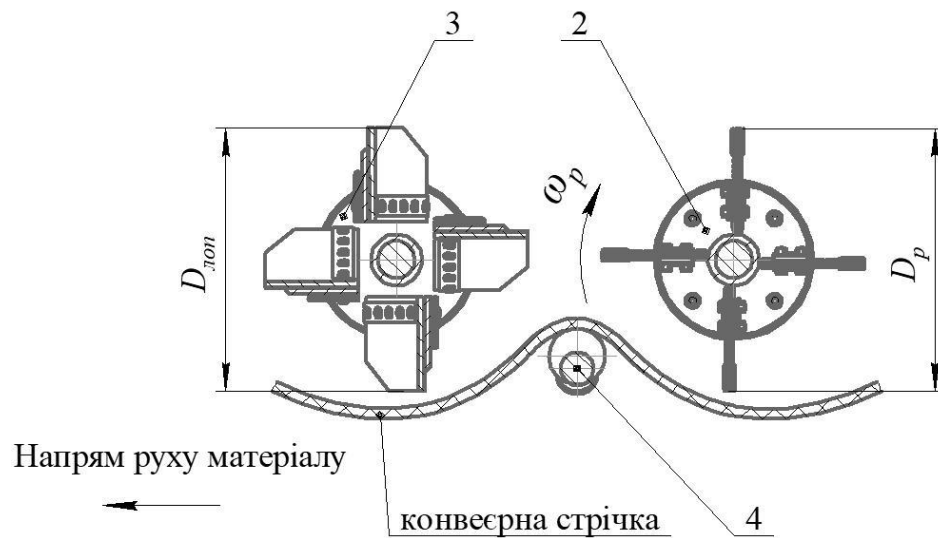


Рис. 2.2 – Принципова схема основних працюючих елементів змішувача

Для вирішення поставленої задачі та отримання необхідних залежностей слід провести дослідження енергетичних потреб (затраченої потужності N) робочих елементів змішувача, для цього розіб'ємо процес на чотири функціональні технологічні етапи:

- 1) розпушення шару матеріалу внаслідок його ударної взаємодії з тросовим елементом (пальцем) ротора 2;
- 2) створення коливань стрічки конвеєра за рахунок обертання вібруючого валка;
- 3) рух прискорених частин матеріалу;
- 4) взаємодія лопатей другого ротора 3 з частинами матеріалу, що переміщуються на конвеєрній стрічці.

На підставі математичного моделювання визначених етапів технологічного процесу змішування в робочому просторі роторного змішувача стає можливим визначити загальну потужність устаткування. Для цього розглянемо окремо кожен етап процесу.

2.2 Розрахунок енергетичних потреб, затрачених на роботу змішування матеріалу

Сумарна потужність приводу одної секції змішувача (рис. 2.1, а), виконаного за конструктивною схемою представленою на рис. 1.8 (див. п. 1.3.3), може бути розрахована за наступною формулою:

$$N_{\text{дв}} = N^I + N^{II}, \quad (2.1)$$

де N^I – сумарна потужність витрачена від роботи однієї секції роторів змішувача забезпечена двома типами роторів: одного розпушуючого, другого переміщуючого матеріал, котра може бути визначена як

$$N^I = \frac{k_n \cdot \sum M \cdot \omega_p}{9,55 \cdot \eta_{\text{заг}}}, \text{ кВт} \quad (2.2)$$

де k_n – коефіцієнт по запасу потужності привода, ($k_n = 1,2 \dots 1,5$); $\eta_{\text{заг}}$ – загальний ККД привода; ω_p – кутова швидкість обертання ротора, с^{-1} ; $\sum M$ – сумарний момент від роботи роторів секції, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Сумарний момент $\sum M$ від роботи секції складається з крутного моменту I-го (тросового, розпушуючого) ротора – M_I та II-го (переміщуючого матеріал) ротора – M_{II} .

Крутний момент M_I на валу I-го ротора наступним чином

$$M_I = i \cdot G_{\text{роз}} \cdot V_p^{\text{мат}} \cdot f_{\text{зс}} + m_{\text{рот}}^I \cdot g \cdot \frac{D_p}{2} \cdot \mu, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.3)$$

де i – кількість встановлених розпушувачів, шт; $G_{\text{роз}}$ – розподілене навантаження на один тросовий елемент, Н/м²; $V_{\text{р}}^{\text{мат}}$ – об'єм переробляемого матеріалу, м³; $f_{\text{зс}}$ – коефіцієнт внутрішнього зсуву матеріалу, для сипких матеріалів дорівнює коефіцієнту внутрішнього тертя матеріалу $f_{\text{вн}}$; $m_{\text{рот}}^I$ – маса I-го ротору, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; $D_{\text{р}}$ – діаметр ротора, мм; μ – коефіцієнт тертя в підшипникових опорах ротора.

Епюра та розрахункова схема навантаження $G_{\text{роз}}(x)$, що діє на один розпушувач, представлена на рис. 2.3, з якого видно, що навантаження $G_{\text{роз}}(x)$ розподіляться за законом трапеції від точки B до точки C й дорівнює

$$G_{\text{роз}}(x) = G_B + K(x - a), \quad (2.4)$$

де K – тангенс кута нахилу кута β дотичної до епюри навантаження

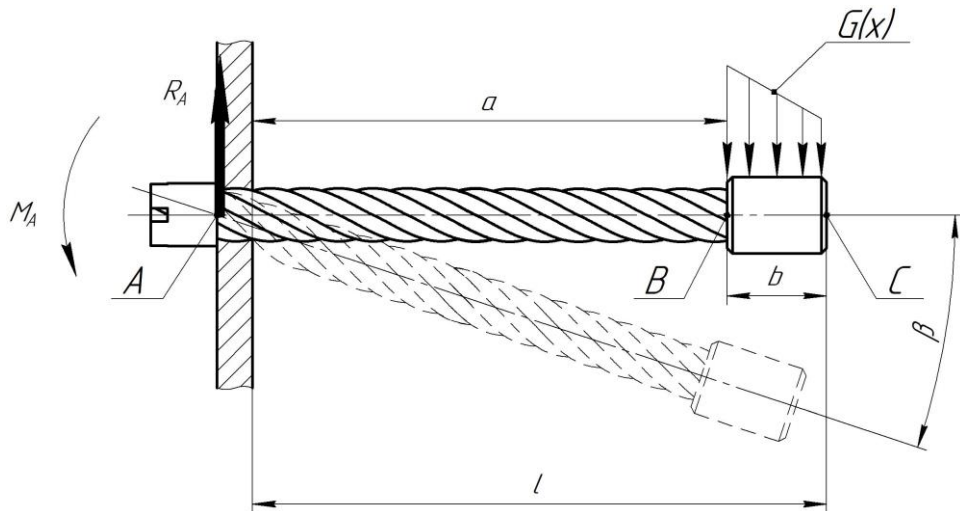


Рис. 2.3 – Розрахункова схема та епюра навантаження, яке діє на один тросовий елемент (розпушувач)

$$K = \operatorname{tg} \beta = \frac{G_B - G_C}{l - a} = \frac{G_B - G_C}{b}. \quad (2.5)$$

Максимальне навантаження буде в точці B й характеризується найбільшою висотою прошарку матеріалу H на конвеєрі. Для більшості металургійних шихтових матеріалів $\beta = 30-35^\circ$, а висота шару матеріалу на конвеєрі дорівнює $H = 0,2$ м, при цьому величина K складе від $0,09 \div 0,18$, тому нею можна знехтувати.

В цьому випадку доцільно є розглянути розрахункову схему з рівномірно розподіленим навантаженням, представлену на рис. 2.4.

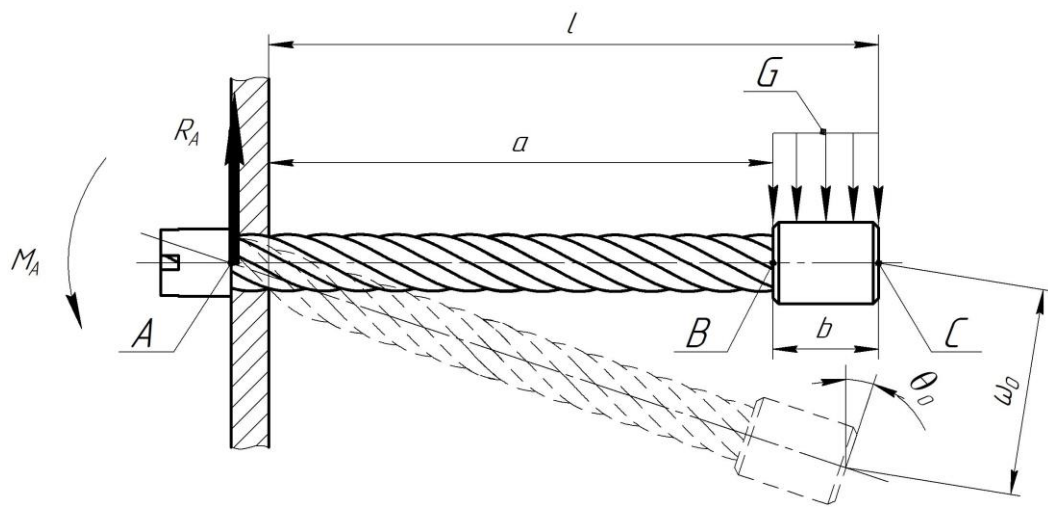


Рис. 2.4 – Розрахункова схема від навантаження, яке діє на один тросовий елемент

Тоді згідно рис. 2.4 рівняння пружної лінії набуде вигляду

$$\omega(x) = \omega_0 + \theta_0 \cdot x + \frac{1}{EJ} \cdot \left[M_0 \frac{x^2}{2!} + R_A \frac{x^3}{3!} - \frac{g(x-a)^4}{4!} \right]. \quad (2.6)$$

З умови рівноваги балки статичні початкові параметри становлять

$$M_0 = M_A = -G_{\text{роз}} \cdot (l-a) \cdot \left(\frac{l-a}{2} \right) = -G_{\text{роз}} \cdot \frac{(l-a)^2}{2}, \quad (2.7)$$

$$R_A = G_{\text{роз}} \cdot (l - a). \quad (2.8)$$

Так як початок координат співпадає з точкою A (закладанням), то прогин та кут буде дорівнювати 0.

$$\omega_0 = 0; \theta = 0.$$

Підставивши в рівняння (2.6) початкові параметри, рівняння пружної лінії стане

$$\omega(x) = \frac{1}{EJ} \cdot \left[\frac{G_{\text{роз}} \cdot (l - a)^2 \cdot x^2}{2!} + \frac{G_{\text{роз}} \cdot (l - a)^3 \cdot x^3}{3!} - \frac{G_{\text{роз}} (x - a)^4}{4!} \right], \quad (2.9)$$

при $x = l$, прогин в точці

$$\omega(l) = \frac{1}{EJ} \cdot \frac{G_{\text{роз}} \cdot (l - a)^4}{24} = \frac{G_{\text{роз}} H^4}{EJ \cdot 24}. \quad (2.10)$$

Обмежимо прогин балки в точці C $\omega(l) = 2\text{мм}$, тоді

$$G_{\text{роз}} H^4 = 48EJ, \quad (2.11)$$

звідки

$$G_{\text{роз}} = \frac{48 \cdot EJ}{H^4}. \quad (2.12)$$

Об'єм переробляемого матеріалу $V_p^{\text{мат}}$, можна визначити виходячи з розрахункової схеми, представленій на рис. 2.5.

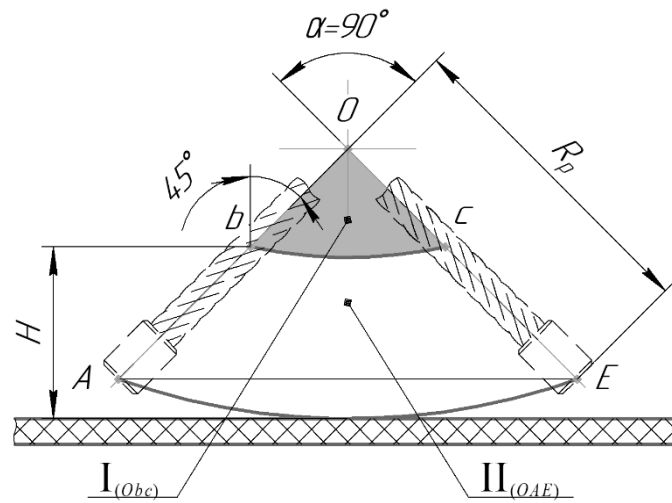


Рис. 2.5 – Схема для визначення об'єму розпушеного матеріалу

Площа фігури Obc буде

$$S_1 = \frac{\pi \cdot Oc^2 \cdot \alpha}{360} = 0,785 \cdot \left(R_p - \frac{H}{0,7} \right)^2, \quad (2.13)$$

де $\frac{H}{Ab} = \cos 45^\circ$, або $Ab = \frac{H}{0,7}$.

Площа другої фігури OAE визначиться як

$$S_2 = \frac{\pi \cdot R_p^2 \cdot \alpha}{360} = 0,785 \cdot R_p^2, \quad (2.14)$$

тоді

$$V_p^{\text{мат}} = (S_2 - S_1) \cdot B_k = 0,785 \cdot \left[R_p^2 - \left(R_p - \frac{H}{0,7} \right)^2 \right] \cdot B_k, \quad (2.15)$$

де B_k – ширина конвеєрної стрічки, м; R_p – радіус ротора з тросовими елементами, мм.

Тоді крутний момент M_I

$$M_I = 0,785 \cdot i \cdot \frac{(l-a)}{R_A} \cdot \left[R_p^2 - \left(R_p - \frac{H}{0,7} \right)^2 \right] \cdot B_k \cdot f_{cd} + m_{\text{рот}}^I \cdot g \cdot \frac{D_p}{2} \cdot \mu. \quad (2.16)$$

Крутний момент M_{II} вала на якому знаходиться лопатевий ротор (поз.3 рис. 2.2) можна визначається

$$M_{II} = m_M V \cdot \omega_p \cdot L + m_{\text{рот}}^{II} g \cdot \frac{D_{\text{лоп}}}{2} \cdot \mu, \quad (2.17)$$

де $m_M V$ – імпульс сили від руху матеріалу по конвеєру; V – швидкість конвеєрної стрічки, м/с; ω_p – кутова швидкість обертання лопатевого ротора; L_M – шлях транспортування матеріалу, який дорівнює довжині дуги ротора

$$L_M = \frac{\pi r_{\text{л}} \cdot \alpha}{180}. \quad (2.18)$$

при $\alpha = 90^\circ$:

$$L = \frac{\pi r_{\text{л}}}{2}, \quad (2.19)$$

де α – кут між встановленими роторами; $r_{\text{л}}$ – радіус лопатевого ротора, мм; $m_{\text{рот}}^{II}$ – маса лопатевого ротора, кг; $D_{\text{лоп}}$ – діаметр лопатевого ротора, (поз.3, рис. 2.2), мм.

Припустимо, що кожна лопатка ротора 3 (рис. 2.2) продовж одного обертуту вала змішує деяку середню кількість матеріалу, тоді маса кускової частини, яка підлягає змішуванню, може бути визначена як

$$m_{\text{м}} = \frac{Q \cdot \gamma}{3600 \cdot \omega_{\text{р}} \cdot n_{\text{л}}}. \quad (2.20)$$

Зіставивши (2.20) та (2.17), отримуємо

$$M_{\text{II}} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot V \cdot \omega_{\text{р}} \cdot \pi \cdot r_{\text{л}}}{3600 \cdot \omega_{\text{р}} \cdot n_{\text{л}} \cdot 2} + m_{\text{рот}}^{\text{II}} \cdot g \cdot \frac{D_{\text{лоп}}}{2} \cdot \mu, \quad (2.21)$$

де γ – питома вага матеріалу, Н/м³; $n_{\text{л}}$ – кількість лопаток на роторі, шт; Q – продуктивність конвеєра, м³/год

$$Q = 3600 \cdot B_{\text{к}} \cdot H \cdot V. \quad (2.22)$$

Визначимо потужність N^{II} , яка витрачається на подолання сил тертя в опорах вала $N_{\text{тр}}$ та підкидання матеріалу $N_{\text{м}}$

$$N^{\text{II}} = \frac{N_{\text{тр}} + N_{\text{м}}}{2}. \quad (2.23)$$

де $N_{\text{тр}}$ – потужність, витрачена на подолання сил тертя в підшипникових опорах

$$N_{\text{тр}} = m \cdot g \cdot l \cdot \omega_{\text{вор}}^3 \cdot \mu \cdot \frac{D_{\text{р}}'''}{2}, \quad (2.24)$$

а потужність $N_{\text{м}}$, витрачена на підкидання матеріалу

$$N_M = E_K \cdot \omega_B, \quad (2.25)$$

де E_K – кінетична енергія зворотно-поступальних рухомих мас матеріалу за один оборот вала

$$E_K = m_M \cdot A^2 \cdot \omega_B^2, \quad (2.26)$$

тоді
$$N_M = m_M \cdot A^2 \cdot \omega_B^3, \quad (2.27)$$

де m_M – маса матеріалу, кг; A – амплітуда коливань; ω_B – частота вимушених коливань.

2.3 Розрахунок ексцентричної опори стрічкового конвеєру

Проаналізуємо роботу вібраційного ролика встановленого під конвеєрною стрічкою. На рис. 2.6 показані послідовні отримані положення ексцентричного валка через кожні 45° його повороту, звідки видно яким чином зміщується конвеєрна стрічка по вертикалі.

Так виникають гармонійні коливання стрічки конвеєра. Чим більшим буде r валка, тим з більшою амплітудою відбувається вібрація стрічки з матеріалом, а чим скоріше рухається стрічка конвеєру $\bar{V}$, тим з більшою частотою буде відбуватися вібрація. При цьому постає задача: чи можна величину ексцентриситету r , а значить і амплітуду коливань збільшувати безмежно. Для вирішення даної задачі потрібно вирахувати динаміку обертального руху ексцентричного валка.

2.3.1 Гранична статична обертальна рівновага валка. Конвеєр завжди може бути зупинений. Тоді якщо в ньому мають ексцентричні опорні валки, то вони не повинні мимовільно прокручуватись під діючими на них навантаженнями, тобто їх рівновага повинна бути

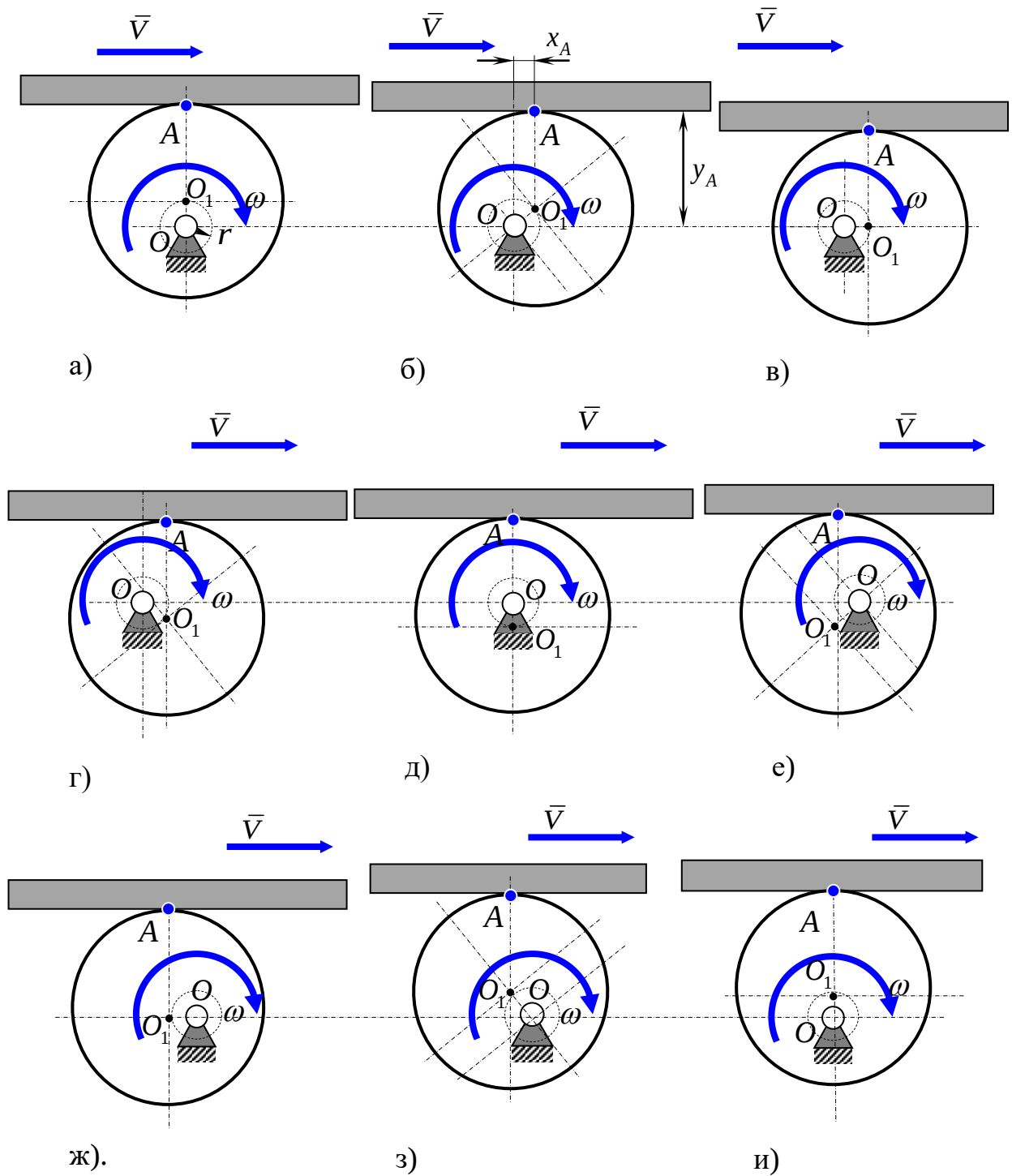


Рис. 2.6 – Послідовність обертання ексцентричного опорного валка стрічкового конвеєра

сталою. У іншому випадку сили тертя зі сторони конвеєру не зможуть заставити валки обертатися навколо своєї осі без ковзання. Для визначення особливостей статичної рівноваги валка розглянемо силові фактори, на рис. 2.7, які на нього діють при досягненні статичної рівноваги. Причому, обираємо положення з найбільшим обертальним моментом від зовнішніх сил.

Тому застосуємо нерухомі координатні вісі O_x та O_y .

Також, якщо конвеєр має розрахункову продуктивність по вазі насипного продукту Q при розрахунковій швидкості стрічки V і довжині робочої гілки L , то при кількості n опорних валків під вантажною гілкою стрічки завантаженість валка складає собою

$$N = \frac{Q \cdot L}{n \cdot V} \quad (2.28)$$

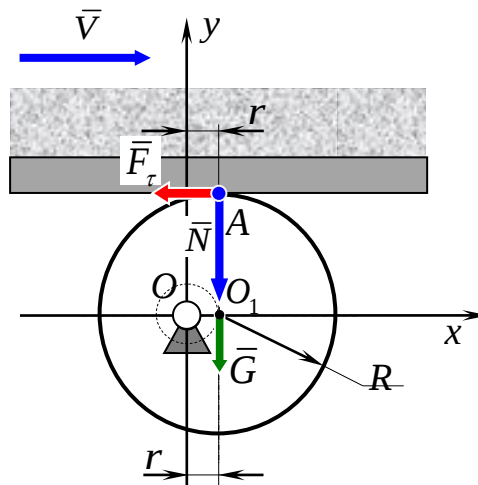


Рис. 2.7 – Розрахункова схема силових факторів, що діють на валок при статичній рівновазі

Відповідно до закону тертя Кулона маємо

$$|F_{\tau \max}| = k \cdot N = k \frac{Q \cdot L}{n \cdot V} \quad (2.29)$$

Алгебраїчна величина сили тертя вираховується з рівняння рівноваги моментів відносно осі O обертання валка

$$\sum M_o = 0, \quad (2.30)$$

звідки послідовно одержуємо

$$F_r \cdot R - (G + N) \cdot r = 0, \quad (2.31)$$

$$F_r = (G + N) \cdot \frac{r}{R}. \quad (2.32)$$

Умова, при якій ковзання відсутнє, в парі тертя стрічка-валок формується на основі співставлення (2.29) та (2.32)

$$k \frac{Q \cdot L}{n \cdot V} > (G + N) \cdot \frac{r}{R}, \quad (2.33)$$

звідки послідовно одержуємо конструктивне співвідношення

$$\frac{r}{R} < k \frac{Q \cdot L}{n \cdot V (G + N)}, \quad (2.34)$$

$$\frac{r}{R} < k \frac{1}{\frac{n \cdot Vmg}{Q \cdot L} + 1}, \quad (2.35)$$

$$\frac{R}{r} > \frac{n \cdot Vmg}{k \cdot Q \cdot L} + \frac{1}{k}, \quad (2.36)$$

Дуже зручно знаходити не абсолютну величину ексцентриситету r , а його відносну, безрозмірну величину, приймаючи значення

$$\varepsilon = \frac{R}{r} > 1, \quad (2.37)$$

тоді (2.36) перепишеться у вигляді

$$\varepsilon > \frac{n \cdot Vmg}{k \cdot Q \cdot L} + \frac{1}{k}. \quad (2.38)$$

Таким чином, одержано співвідношення граничних конструктивних розмірів ексцентричного валка при його статичній рівновазі.

2.3.2 Умови зчеплення при рівномірному русі стрічки з валком. Розглянемо силові фактори (рис. 2.8), що діють на валок при його повороті при рівномірному обертанні на довільний кут φ . І в цьому разі введемо нерухомі координатні вісі O_x та O_y , пов'язані з поздовжнім та поперечним напрямками відносно стрічки з початком на осі O обертання валка. Якщо ексцентриситет валка має величину r , а радіус циліндричної поверхні валка R , то точка контакту A його циліндричної поверхні з навантаженою стрічкою у введеній системі осей буде мати координати

$$\begin{cases} x_A = r \cdot \cos \varphi \\ y_A = R + r \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad (2.39)$$

За урахуванням $\varphi = \varphi t$, маємо закон зміни координат точки A контакту

$$\begin{cases} x_A = r \cdot \cos(\varphi \cdot t) \\ y_A = R + r \cdot \sin(\varphi \cdot t), \end{cases} \quad (2.40)$$

Причому, координата y_A відповідальна за нормальне переміщення навантаженої стрічки, тобто, за її вібрацію.

З рис. 2.8 видно, що має місце рівність, яка стосується координати вздовж осі O_x для точок A (точки контакту) і O_1 (центра мас валка)

$$x_A = x_{O_1}. \quad (2.41)$$

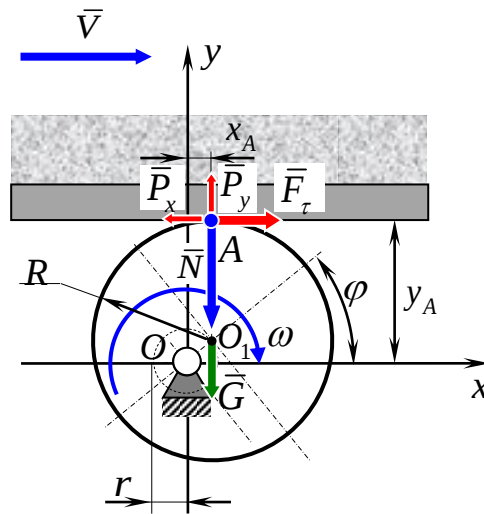


Рис. 2.8 – Розрахункова схема силових факторів, що діють на валок

З курсу теоретичної механіки [80] на основі (2.40) та (2.41) можна визначити швидкість та прискорення точки A вздовж осі O_x наступним чином:

$$|V_{O_1x}| = r \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (2.42)$$

$$|a_{O_1x}| = r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (2.43)$$

Модуль прискорення точки A вздовж осі O_y впливає з (2.40) наступним чином:

$$|a_{O_1y}| = r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (2.44)$$

Визначимо взаємозв'язок між шляхами рухомих поверхонь в їх контакті A , при відсутності ковзання

$$s = -\varphi R, \quad (2.45)$$

де S – шлях, що проходить стрічка за деякий довільний період часу Δt , м;
 φ – кут, що утворює вісь валка за такий же термін Δt , рад.

Залежність (2.45) також означає наявність зв'язку між лінійною швидкістю стрічки V та кутовою швидкістю валку ω в їх алгебраїчному значенні

$$\frac{s}{\Delta t} = -\frac{\varphi}{\Delta t} R, \quad (2.46)$$

$$V = -\omega R. \quad (2.47)$$

При рівномірному русі стрічки на валок діють наступні сили: $\bar{G}$ - сила тяжіння, валка; $\bar{N}$ - сила ваги, що діє на одиничний валок зі сторони навантаженої стрічки; $\bar{F}_\tau$ - сила тертя, що діє зі сторони навантаженої стрічки на валок; $\bar{P}_x$ - сила інерції, що діє на валок внаслідок прискорення його центру мас при русі вздовж осі O_x (стрічка з вантажем у цьому напрямку рухається рівномірно); $\bar{P}_y$ - сила інерції, що діє на стрічку і її вантаж внаслідок прискорення разом з валком при русі вздовж осі O_y (саме в цьому напрямі стрічка з вантажем то збільшує, то зменшує своє притискання до валка внаслідок своєї інертності).

Визначимо величину кожної з вказаних сил.

Якщо m – це маса валка, то маємо

$$G = m \cdot g. \quad (2.48)$$

Якщо Q при розрахунковій швидкості стрічки V і довжині робочої гілки L , то при кількості n опорних валків під вантажною гілкою стрічки завантаженість валка складає собою

$$N = \frac{Q \cdot L}{n \cdot V}. \quad (2.49)$$

Сила тертя спокою (при умові, якщо ковзання відсутнє) між стрічкою та валком по модулю не може бути більше, ніж значення, що відповідає закону тертя Кулона. Тобто при коефіцієнті тертя спокою k , маємо

$$|F_{\tau \max}| = k \cdot N = k \frac{Q \cdot L}{n \cdot V}. \quad (2.50)$$

Сила інерції валка вздовж осі O_x відповідає другому закону Ньютона. Та за урахуванням (2.43), маємо її абсолютну величину за видом

$$|P_x| = m \cdot |a_{O_1x}| = m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (2.51)$$

Напрямок сили інерції протилежний напрямку прискорення центра мас валку. Цю обставину відзеркалено на розрахунковій схемі (рис. 2.8).

Сила інерції $\bar{P}_y$ по модулю може бути вирахована за (2.51) для прискорення в відповідному напрямі стрічки з вантажем

$$|P_y| = \frac{N}{g} \cdot |a_{O_1y}| = \frac{Q \cdot L}{gn \cdot V} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (2.52)$$

Алгебраїчна величина сили тертя вираховується з рівняння рівноваги моментів відносно осі O обертання валка

$$\sum M_o = 0, \quad (2.53)$$

звідки послідовно одержуємо:

$$(P_x - F_\tau) \cdot y_A - (G + N - P_y) \cdot x_A = 0. \quad (2.54)$$

та

$$F_\tau = P_x - (G + N - P_y) \cdot \frac{x_A}{y_A}. \quad (2.55)$$

Як видно з (2.51), знак сили тертя залежить від знаку координати x_A (координата y_A завжди позитивна). При $|\varphi| > \frac{\pi}{2}$ направленість сили тертя позитивна, а при $|\varphi| < \frac{\pi}{2}$ негативна.

Умова не ковзання пари тертя стрічка-валок формулюється на основі зіставлення (2.50) та (2.55) при тому, що $r \cdot \omega^2 < g$, чи $V < R\sqrt{\frac{g}{r}}$ (для безвідривного руху стрічки)

$$\begin{cases} k \frac{Q \cdot L}{n \cdot V} > P_x - (G + N - P_y) \cdot \frac{x_A}{y_A} \\ V < R\sqrt{\frac{g}{r}} \end{cases}. \quad (2.56)$$

Після підстановки величин, що входять до (2.56), знаходимо

$$\begin{cases} k \frac{QL}{nV} > mr \left(\frac{V}{R} \right)^2 \cdot \cos \left(\frac{V}{R} t \right) - \left\{ mg + \frac{QL}{nV} \left[1 - \frac{r}{g} \left(\frac{V}{R} \right)^2 \cdot \sin \left(\frac{V}{R} t \right) \right] \right\} \cdot \frac{r \cdot \cos \left(\frac{V}{R} t \right)}{R - r \cdot \sin \left(\frac{V}{R} t \right)} \\ V < R \sqrt{\frac{g}{r}} \end{cases} \quad (2.57)$$

Зручно знаходити не абсолютну величину ексцентриситету, а його відносну, безрозмірну величину, приймаючи позначення

$$\varepsilon = \frac{R}{r} > 1, \quad (2.58)$$

Тоді (2.57) набуде вигляду

$$\begin{cases} k \frac{QL}{nV} > m \frac{V^2}{\varepsilon \cdot R} \cdot \cos \left(\frac{V}{R} t \right) - \left\{ mg + \frac{QL}{nV} \left[1 - \frac{V^2}{g \varepsilon R} \cdot \sin \left(\frac{V}{R} t \right) \right] \right\} \cdot \frac{\cos \left(\frac{V}{R} t \right)}{\varepsilon - \sin \left(\frac{V}{R} t \right)} \\ V < R \sqrt{\frac{g}{r}} \end{cases} \quad (2.59)$$

З нерівності, що утворилася, визначаємо відносну величину ексцентриситету при наданих інших параметрах. Визначення проводимо у символічному виді за допомогою математичного пакету *MathCAD*.

Отримані значення можемо використати, щоб визначити максимально допустиму амплітуду та частоту вібрації при використанні ексцентрикового валка заданого розміру. Так, амплітуда коливань A буде дорівнювати абсолютній величині r ексцентриситету, тобто з (2.58) маємо

$$A = \frac{R}{\varepsilon}, \quad (2.60)$$

А за урахуванням (2.47) отримаємо частоту коливань

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{V}{2\pi R}, \text{ Гц} \quad (2.61)$$

Таким чином, коливання з параметрами по (2.60) і (2.61) при відсутності ковзання в контакті валок-стрічка, виникають з подвійною умовою. Одна з цих умов стосується відсутності ковзання, а друга – безвідривності взаємодіючих тіл - опорного валка і стрічки конвеєра. Остання умова гарантує, що між взаємодіючими тілами не виникатиме ударів, які неодмінно негативно впливатимуть як на сипкий вантаж конвеєру, так і на ексцентричний валок зі стрічкою.

2.3.3 Аналіз отриманих результатів з розрахунку ексцентричної опори стрічкового конвеєра. Побудована математична модель ексцентрикового збудника для стрічкового конвеєру дозволяє проводити аналіз вібрації, яка передається його вантажу. Вона також дозволяє вибирати конструктивні розміри валка для заданих параметрів вібрації. Виявлена в роботі аналітична функція, яка відповідає вібраційному процесу, може бути представлена тільки на робочому столі математичної програми, з-за своїх великих розмірів.

Скористуємося можливостями пакету математичних програм MathCAD, та проведемо графічний аналіз отриманих результатів.

Для проведення аналізу вибрано наступні значення конструктивних параметрів: $k = 0,8$; $Q = 83 \div 133 \text{ Н/с}$; $L = 10 \text{ м}$; $n = 10$; $m = 25 \text{ кг}$; $R = 0,1 \text{ м}$.

За використанням отриманих залежностей для статичної рівноваги (2.38) і динамічного стану (2.57) та (2.58), побудовано графіки граничних функцій, які представлено на рис. 2.9 при різних швидкостях стрічки конвеєру з різною його продуктивністю в діапазоні від 83 Н/с (29,88 Т/годину) до 133 Н/с

(47,88 Т/годину). З умов нерівностей випливає, що із всіх кривих кожного графіка потрібно вибрати найменшу граничну криву. Саме така крива відповідає умовам нековзання і безвідривності для пари тертя в контакті.

З рисунків видно, що при найменших швидкостях стрічки (рис. 2.9, а) допустимий ексцентриситет валка визначається його статичною рівновагою, тобто співвідношенням (2.38). При збільшенні швидкості стрічки до такої, при якій допустимий ексцентриситет, можна вибирати як по статичному, так і по динамічному стану (рис. 2.9, б). При цьому вібраційне пришвидшення стрічки збільшується до максимуму $0,35g$. При ще більшому збільшенні швидкості допустимий ексцентриситет визначається вже динамічним станом. Але при цьому вібраційне пришвидшення стрічки досягає найменшої величини $0,19g$.

Таким чином, можна зробити висновок, що раціональним буде вибір такої швидкості стрічки, при якій граничні криві при найменшому її навантаженні при динамічному і статичному стані співпадають. Саме в цьому випадку вібраційне пришвидшення буде найбільшим, хоч і не дуже великим порівняно з пришвидшенням вільного падіння. Амплітуда вібрації визначається найбільшим допустимим ексцентриситетом, який у цьому випадку значущий ($0,014\text{ м}$).

2.4 Розрахунок профілю лопаток роторного змішувача

В даному пристрої стрічка конвеєра з шаром сипкого матеріалу кінематично пов'язана з ротором. Ротор має занурені в продукт лопатки. Рух стрічки конвеєра збігається з діаметральної площиною ротора, а між його лопатками та стрічкою встановлений мінімально можливий зазор. Будемо вважати, що при виході лопатки з масиву сипкого матеріалу, котрий рухається по конвеєрній стрічці, вона в результаті його екскавації захоплює за собою деяку його порцію. Розглянемо можливість процесу звільнення лопатки від матеріалу, що знаходиться на ній, в процесі обертання ротора. Приймемо допущення, що

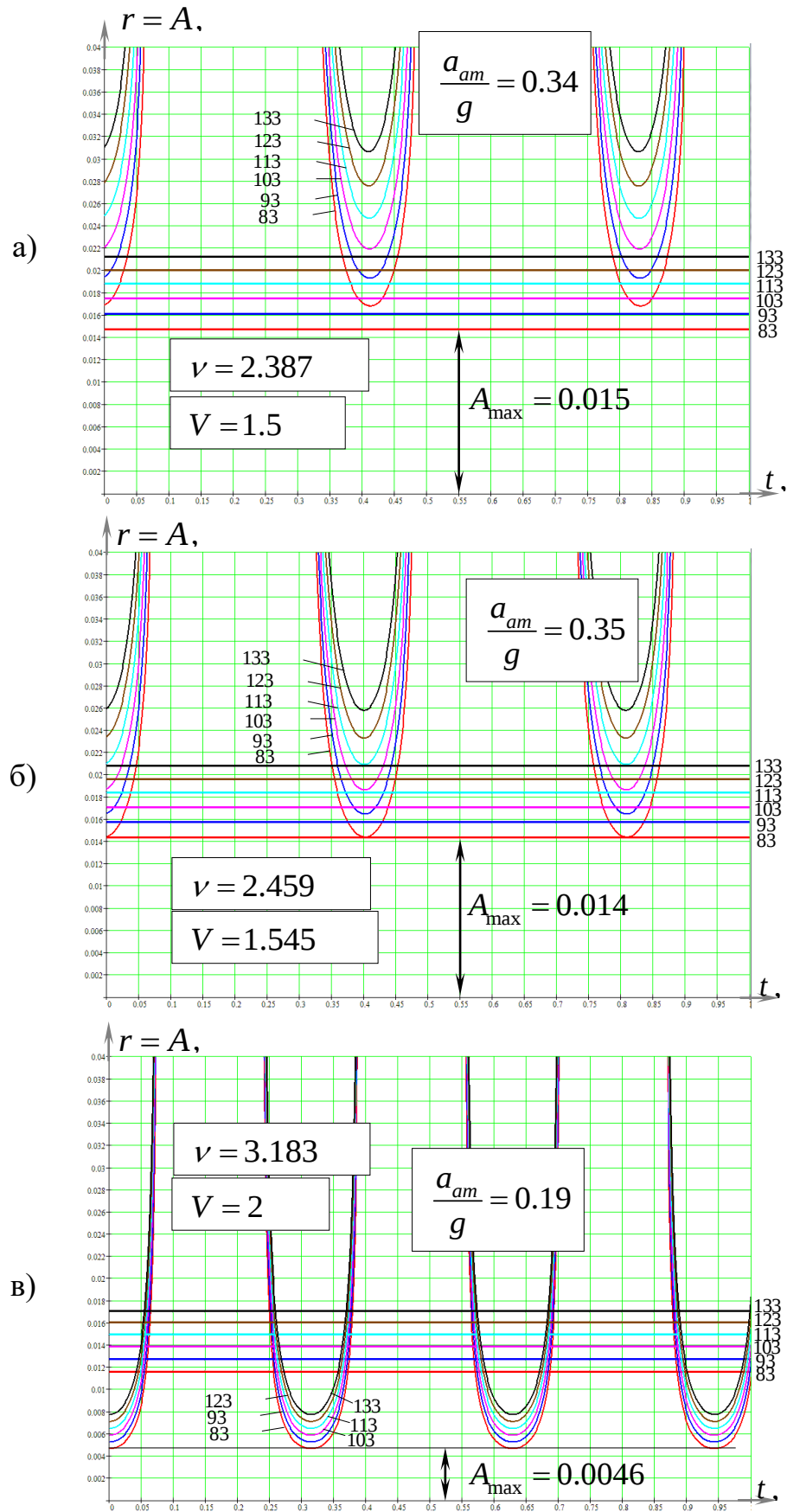


Рис. 2.9 – Графіки залежності статичного і динамічного граничного ексцентриситету при зміні продуктивності конвеєра

прослизання між стрічкою конвеєра і лопатки ротора відсутнє. Тоді умовна кутова швидкість обертання ω з лопатками буде перебувати в кінематичній відповідності до лінійної швидкості стрічки конвеєра $\bar{V}$, а обертання ротора з лопатками ставиться в суворий кінематичний взаємозв'язок з рухом стрічки конвеєра по співвідношенню

$$\bar{V} = \omega \cdot R, \quad (2.62)$$

де ω – кутова швидкість абсолютного обертання ротора, рад/с; $\bar{V}$ – лінійна абсолютна швидкість руху конвеєрної стрічки, м/с; R – максимальний радіус лопатки ротора, м.

Рухомий разом зі стрічкою матеріал змушує оснащений лопатками ротор здійснювати обертання, а, отже, кожна лопатка ротора проходить кілька стадій взаємодії з матеріалом: впровадження лопатки в шар матеріалу; досягнення максимального її заглиблення в шар; захоплення і вертикальний винос (екскавації) порції сипучого продукту з його масиву назовні; викид захопленого сипучого продукту з поверхні лопаті в напрямку руху стрічки конвеєра.

Весь процес впровадження лопаток в шар насипного продукту повинен бути налаштований на мінімізацію втрат енергії. У зв'язку з цим висуваємо робочу гіпотезу для визначення профілю лопатей за умови голономного зв'язку ротора зі стрічкою конвеєра (рис. 2.10).

Профіль лопаток в діаметральній площині пристрою виконується так, що при доторку поверхні шару висотою h насипного продукту процес вдавлення лопаток в масив відбувається в напрямку лінійної відносної швидкості точки A перетину лопатки з вільною поверхнею насипного матеріалу.

Для відповідності умови гіпотези профіль лопатки в діаметральній площині ротора повинен бути криволінійним, а дотична до профілю лопатки в діаметральній площині ротора повинна мати певний кут β по відношенню до радіуса OA положення точки контакту A . При цьому профіль лопатки буде відповідати траєкторії відносного руху точки A по поверхні діаметральної

площині ротора, а впровадження лопатки відбуватиметься строго по вектору відносної швидкості точки A .

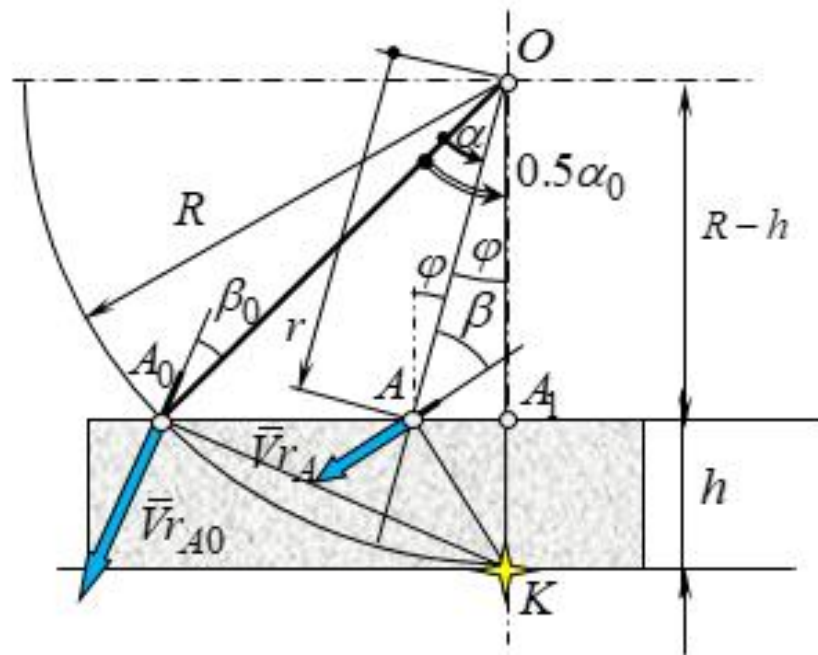


Рис. 2.10 – До пояснення гіпотези формоутворення лопаток

2.4.1 Визначення мінімальної кількості лопаток на роторі. В даному пристрої ротор має занурені в сипучий продукт лопатки. При цьому обертання ротора забезпечується напором матеріалу на занурені лопатки, а, отже, кількість одночасно завантажених лопаток для забезпечення надійності та плавності обертання ротора в секторі опорного кута α_0 має бути не менше трьох (при двох лопатках в опорному секторі буде можливий випадок, коли обидві лопатки лише доторкнуться до поверхні насипного продукту).

З $\triangle A_0A_1O$ (рис. 2.10) визначимо кут α_0

$$\alpha_0 = 2 \cdot \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right), \quad (2.63)$$

де R – максимальний радіус ротора, або відстань між віссю ротора та поверхнею стрічки конвеєра, м; h – висота шару сипкого матеріалу на стрічці конвеєру, м.

У поперечному перерізі ротора вміщається $(2\pi/\alpha_0)$ таких кутів. В такому випадку з урахуванням (2.62) та уточненням до найближчої більшості, ціла мінімальна кількість лопаток визначиться зі співвідношення

$$n_{\min} = \frac{2\pi}{\alpha_0} + 1 = \frac{\pi}{\arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right)} + 1. \quad (2.64)$$

Залежність мінімальної кількості лопаток від відношення радіуса ротора до висоти шару матеріалу на стрічці конвеєра представлена на рис. 2.11.

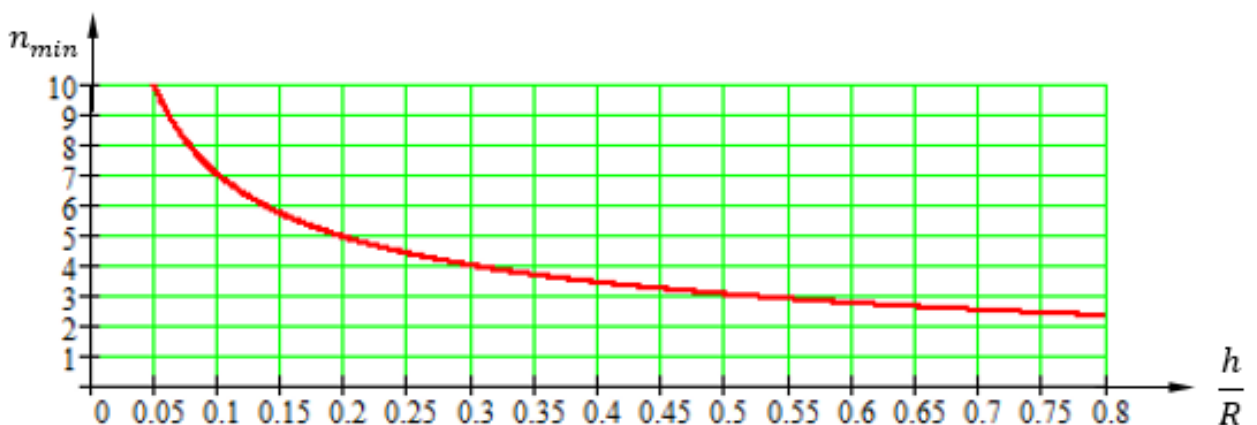


Рис. 2.11 – Залежність мінімального числа лопаток від відношення радіусу ротора до висоти шару матеріалу

З графіка (рис. 2.11) видно, що для безперервного охоплення всього масиву сипучого масиву досить 4-5 лопаті на роторі (в діапазоні $0,3 < h/R < 0,5$).

2.4.2 Графічна побудова профілю лопатки ротора. Геометрія контактуючих тіл (ротора з лопатками та конвеєрної стрічки з навантаженим на неї сипучим матеріалом) формує зону взаємного проникнення, обмеженою сектором з опорним кутом α_0 , який визначається з (2.63).

Побудуємо графічно профіль лопатки, використовуючи гіпотезу входження лопатки у напрямку векторів відносних швидкостей її точок.

Побудову починаємо з визначення половини опорної хорди лопаток (лінія 1-A) і поділу її на частини - бажано рівні - точками 1-7* (рис. 2.12).

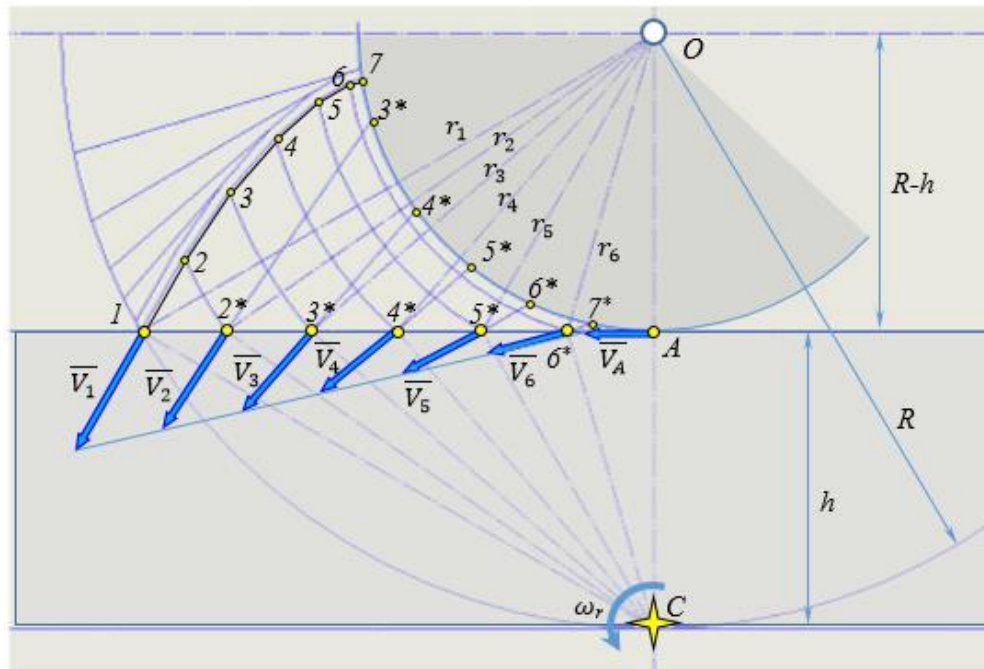


Рис. 2.12 – Графічна побудова профілю лопатки в діаметральній площині ротора

Далі робимо допоміжні побудови. Для цього починаємо з того, що з'єднуємо ці точки радіальними лініями (1-C; 2*-C; ...; 6*-C) з миттєвим центром відносного повороту C. Уздовж перпендикуляра до кожної з цих ліній в відповідну сторону будуюмо вектори миттєвих відносних швидкостей точок. І нарешті, будуюмо допоміжні кола з радіусом положення r_i для кожної з усіх виділених точок щодо центру обертання O ротора.

Безпосередня побудова лінії профілю лопатки виробляємо наступним набором послідовних дій:

– лінію дії вектору відносної швидкості периферійної точки 1 продовжуємо до перерізу з допоміжною окружністю, проведеної для точки 2 (радіуса

r_2). В результаті отримуємо другу точку 2 тіла лопатки, рахуючи від її першої точки 1;

– з отриманої точки 2 проводимо лінію, паралельну лінії дії вектору відносної швидкості для точки 2*. Ця лінія перетинає допоміжне коло радіуса r_3 для третьої точки 3*. В результаті цього перерізу утворюється третя точка 3 профілю лопаті;

– далі всі аналогічні операції послідовно повторюються для всіх наступних допоміжних кіл і ліній дії векторів відносних швидкостей точок, аж до отримання кінцевої в даному випадку точки 7 контуру, що лежить на дотичній кола радіуса $R-h$.

Для отримання контуру лопаті в діаметральній площині ротора залишається послідовно з'єднати отримані точки відрізками прямих, як показано на рис. 2.12, або плавною апроксимуючою кривою.

Таким чином проводиться геометрична побудова профілю лопаті, що здійснює впровадження в масив матеріалу з найменшими втратами і при найменшому зношенні лопатей. Проектування ротора з лопатками слід проводити з урахуванням вимог до мінімальної кількості лопаток (рис. 2.13), тобто з урахуванням формули (2.64). Як видно з рис. 2.13, мінімальної кількості лопатей може не вистачити для повноцінного об'ємного охоплення матеріалу.

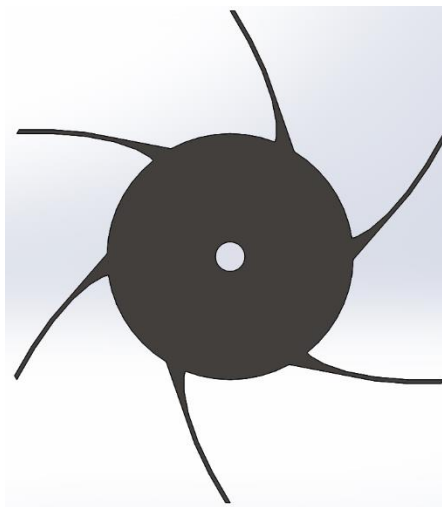


Рис. 2.13 – Приклад профілю ротора з лопатками, отриманого графічною побудовою

$$\cos \varphi = \frac{R-h}{r} = \frac{R-h}{x}, \quad (2.67)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{x \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}}{R-h} = \frac{x \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{R-h}{x}\right)^2}}{R-h}. \quad (2.68)$$

Після спрощення отриманого виразу отримаємо

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\left(\frac{x}{R-h}\right)^2 - 1}. \quad (2.69)$$

З урахуванням (2.65), (2.66) та (2.69) отримаємо

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{\left(\frac{x}{R-h}\right)^2 - 1}. \quad (2.70)$$

Вираз (2.70) являє собою диференціальне рівняння, яке відповідає прийнятій умові формування профілю лопатки в діаметральній площині ротора. Вирішимо це диференціальне рівняння, щодо введених відносних координат

$$y = \int \left(\sqrt{\left(\frac{x}{R-h}\right)^2 - 1} \right) dx. \quad (2.71)$$

При обчисленні інтеграла (2.71) визначаємо постійну інтегрування з умови, що при $x=R-h$, $y=0$.

В результаті отримуємо функцію профілю лопаті в діаметральній площині ротора

$$y(x) = x \cdot \frac{\sqrt{x^2 - (R-h)^2}}{2(R-h)} - \frac{R-h}{2} \cdot \ln \left[\frac{x + \sqrt{x^2 - (R-h)^2}}{R-h} \right]. \quad (2.72)$$

Для наочності проілюструємо криву, отриману в функції (2.72), за допомогою її накладення на лопатку, отриману графічним способом (рис. 2.15). Розміри ротора для обох способів обрані однаковими.

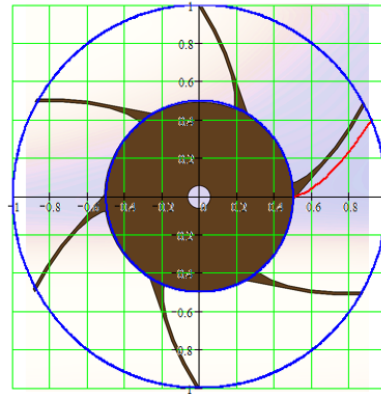


Рис. 2.15 – Результати графічного та аналітичного способів отримання профілю лопатки

Таким чином, отримано два способи побудови профілю лопатки ротора для ефективного його розкручування при впровадженні лопатей в масив поступально рухомого сипучого продукту.

2.5 Взаємодія частки сипкого матеріалу з поверхнею профільної лопатки при її обертовому виведенні з загального масиву

У процесі виходу лопатки з масиву сипкого матеріалу вона виробляє його екскавацію - винос захопленої порції на поверхню масиву. Швидкість матеріалу, що рухається на стрічці конвеєра кінематично пов'язана залежністю (2.62) з обертанням ротора, забезпеченого шорсткими профільними лопатками. Таким чином, очевидно, що від швидкості матеріалу, що рухається разом зі стрічкою конвеєра, залежить подальша поведінка захопленої порції сипучого матеріалу з масиву. Розглянемо цю залежність.

2.5.1 Рух матеріальної частинки по шорсткій поверхні обертової лопатки. Будемо вважати, що при виході лопатки з масиву сипкого матеріалу вона в результаті його екскавації захоплює за собою деяку його порцію. Розглянемо можливість процесу звільнення лопатки від матеріалу, що знаходиться на ній, в процесі обертального руху ротора.

Нехай матеріальна частинка знаходиться на поверхні обертової шорсткої лопатки (рис. 2.16).

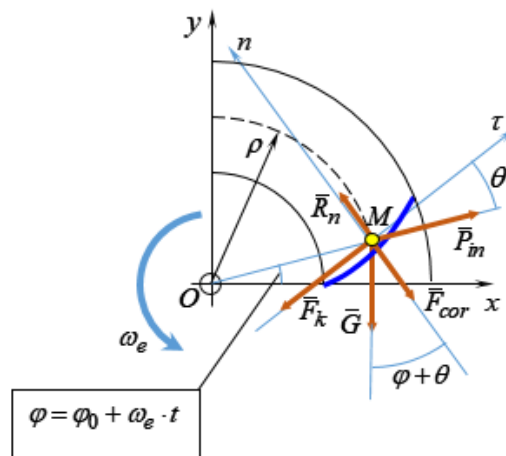


Рис. 2.16 – Система сил, прикладених до матеріальної точки на лопатці ротора, що здійснює рівномірне обертання у вертикальній площині

Для дослідження руху матеріальної точки введемо дві системи координат. Одну абсолютно нерухому xOy , пов'язану з горизонтом, а другу рухому (відносну), пов'язану з дотичною до профілю лопатки. Дотична вісь нахилена під кутом θ до радіусу-вектору положення точки.

Площина обертання лопатки розташована вертикально а, отже, дія сили ваги на частку у відносній системі відліку буде лінійно залежати від кута її повороту φ , від кута нахилу θ дотичної до її профілю, а також від часу з урахуванням спрямованості. Ця залежність може бути представлена наступним чином:

$$\begin{cases} G_n = -mg \cdot \cos(\varphi + \theta) \\ G_\tau = -mg \cdot \sin(\varphi + \theta) \end{cases}. \quad (2.73)$$

Зауважимо, що при рівномірному обертанні ротора його поточний кут повороту легко виразити, як функцію часу

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_e \cdot t. \quad (2.74)$$

А кут нахилу дотичної є функція положення точки

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{dy_L}{dx_L}\right), \quad (2.75)$$

де $\frac{dy_L}{dx_L}$ - похідна від функції (2.72) профілю лопатки.

З (2.72) маємо

$$\frac{dy_L}{dx_L} = \frac{\sqrt{x^2 - (R - h)^2}}{R - h}. \quad (2.76)$$

І з урахуванням того, що при даному виборі система відліку $x = \rho$, отримаємо

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{\rho^2 - (R - h)^2}}{R - h}\right). \quad (2.77)$$

Крім сили ваги у відносній системі відліку на частку діють: сила інерції в переносному її русі $\bar{P}_{in}$; сила інерції від прискорення Коріоліса $\bar{F}_{cor}$ (вектор прискорення Коріоліса спрямований відповідно до правила Жуковського); дві

сили від накладених зв'язків - $\bar{R}_n$ (реакція по безумовній односторонньої кінематичного зв'язку) і $\bar{F}_k$ (реакція за допомогою кулонівського тертя).

Сила інерції в переносному русі є функцією відносного положення частинки

$$|P_{in}| = m \cdot |a_{en}| = m\omega_e^2 \cdot \rho. \quad (2.78)$$

Сила інерції від дії прискорення Кориоліса є функцією її відносної швидкості, і по модулю приймає значення

$$|F_{cor}| = 2m\omega_e \cdot \dot{\rho}. \quad (2.79)$$

Силою опору руху частки в повітрі нехтуємо.

Сила кулонівського тертя частинки з коефіцієнтом тертя ковзання k об поверхню лопатки залежить від притиснутої сили, величина якої в точності відповідає реакції опори $\bar{R}_n$ по безумовному кінематичному зв'язку. Баланс сил при відносній рівновазі частки відповідно до схеми дії сил в нормальному до поверхні лопатки напрямку набуде вигляду

$$R_n - F_{cor} - G \cdot \cos(\varphi + \theta) = 0. \quad (2.80)$$

Звідки обчислюємо модуль сили тертя

$$\begin{aligned} |F_k| &= k \cdot F_{cor} + k \cdot G_n = \\ &= k \cdot m \cdot 2\omega_e \cdot \dot{\rho} + k \cdot mg \cdot \cos \left[\omega_e t + \varphi_0 + \arctg \left(\frac{\sqrt{\rho^2 - (R-h)^2}}{R-h} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.81)$$

На підставі основного рівняння динаміки для відносного руху матеріальної точки відповідно до спрямованості дії сил, приведеної на схемі (рис. 2.16), маємо

$$m \cdot \ddot{\rho} = P_{in} - F_k - mg \sin \left[\omega_e t + \varphi_0 + \arctg \left(\frac{\sqrt{\rho^2 - (R-h)^2}}{R-h} \right) \right], \quad (2.82)$$

або після підстановки входять величин

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{\rho} = m \omega_e^2 \cdot \rho - k \cdot m \cdot 2 \omega_e \cdot \dot{\rho} - k \cdot mg \cdot \cos \left[\omega_e t + \varphi_0 + \arctg \left(\frac{\sqrt{\rho^2 - (R-h)^2}}{R-h} \right) \right] - \\ - mg \sin \left[\omega_e t + \varphi_0 + \arctg \left(\frac{\sqrt{\rho^2 - (R-h)^2}}{R-h} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.83)$$

де ρ - координата відносного положення частинки (її поточний радіус положення), кг/м³; R - максимальний радіус ротора, або відстань між віссю ротора і поверхнею стрічки конвеєра, м; h - висота шару сипучого продукту на стрічці конвеєра, м; $\omega = V / R$ - кутова швидкість обертання ротора з лопатками, рад/с; V - швидкість руху конвеєра з матеріалом на ньому, м/с; k - коефіцієнт тертя ковзання частинки об поверхню лопатки; m - маса частинки, кг; g - прискорення вільного падіння, м/с².

Таким чином, диференціальне рівняння процесу ковзання частинки по криволінійній поверхні лопатки в деякому секторі кутів повороту лопатки сформульовано. Залишається з'ясувати, в якому саме секторі положення лопатки цей процес відбувається.

2.5.2. Допустимий сектор процесу ковзання частинки. Вираз (2.83) містить початковий кут φ_0 установки лопаті, по

поверхні якої починається ковзання частинок матеріалу. Очевидно, що таким початковим кутом доцільно призначити кутове положення лопаті в момент виходу її кінцевої точки з масиву матеріалу (рис. 2.17).

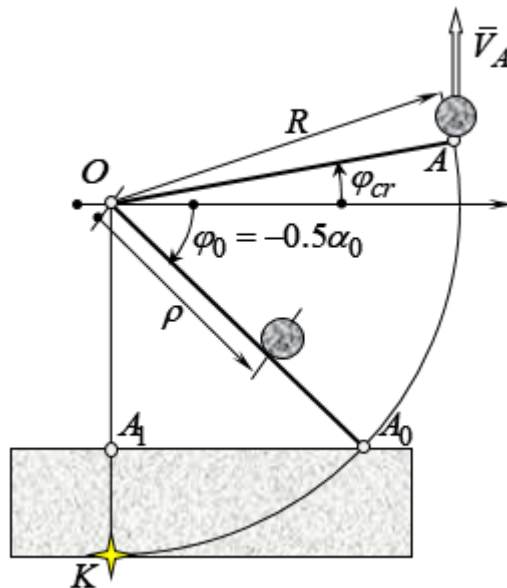


Рис. 2.17 – До визначення сектора процесу ковзання частинок по поверхні лопатки

Але в такому випадку значення початкового кута, в якому починається процес ковзання частинок по поверхні лопаті при прийнятому початку кутового положення, складе половину опорного кута, взятого з негативним знаком

$$\varphi_0 = -0,5\alpha_0. \quad (2.84)$$

У процесі ковзання частинок по поверхні лопатки при її повороті навколо осі ротора доводиться визначати гранично допустиме значення кута повороту φ_{cr} . Цей критеріальний кут визначається умовою безпечного викиду останньої частинки з поверхні лопатки. А саме: напрямок абсолютної швидкості частинки після її скидання з лопатки не повинен сприяти падінню частки на поверхню наступних лопаток ротора. Виходячи з цієї умови приймаємо значення критеріального кута рівним нулю

$$\varphi_{cr} = 0. \quad (2.85)$$

З використанням крайових обмежень (2.84) і (2.85), з'являється можливість проведення аналізу по результату рішення диференціального рівняння (2.83) з метою підбору геометрії змішувача і режимів його руху. Дослідження ковзання частинок по поверхні лопатки проводиться для сектора положення лопатки, що визначається нерівністю

$$\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_{cr}. \quad (2.86)$$

Поза діапазону (2.86) процес ковзання найповільнішої останньої частки по поверхні лопаті будемо вважати неприпустимим.

2.5.3 Аналіз результату розрахунків процесу ковзання частинок. Розташуємо на робочій поверхні лопатки кілька частинок на рівних радіальних відстанях один від одної і проаналізуємо процес їх ковзання при проходженні по поверхні лопатки в діапазоні (2.86).

Рішення диференціального рівняння (2.83) будемо проводити для кожної з обраних частинок числовими методами.

При ілюстрації результатів будемо брати до уваги рівномірність обертання ротора з лопатками по закону

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega_e \cdot t = \varphi_0 + \frac{V}{R} \cdot t, \text{ в допустимих межах } -0,5\alpha_0 \leq \varphi \leq 0. \quad (2.87)$$

Для розрахунків скористаємося програмою «Дифур Скольжение» (додаток А), написаної відповідно до (2.83) і з урахуванням (2.87).

Приймаємо вихідні базові параметри для розрахунку:

- кількість частинок на лопатці в рівномірному радіальному розподілі - 5;
- зовнішній радіус ротора з лопатками - 1 м;
- коефіцієнт тертя ковзання частинки об поверхню лопатки - 0,4.

Приймаємо величину незалежних змінних параметрів:

- швидкість руху стрічки конвеєра з масивом матеріалу - 10 м/с;

– коефіцієнт крупності ротора з лопатками (відношення висоти шару матеріалу до зовнішнього радіусу ротора з лопатками) – 0,2 (таким чином, в даному випадку висота шару матеріалу 200 мм).

Результати розрахунку наведені на рис. 2.18. Радіус початкового положення точки збільшується зі збільшенням її індексу. Точка з нульовим індексом в початковому положенні знаходиться в зоні маточини ротора з лопатками.

Зона кутів повороту лопаті, що відповідає умові (2.86) виглядає як прямокутник, обмежений справа кутом φ_{cr} і зверху радіусом R . Якщо при досягненні лопатою критеріального кута φ_{cr} найповільніша з частинок на лопаті (з нульовим індексом) її не покинула, тобто не досягнула радіуса R , то це означає, що деякі повільні частки в процесі обертання ротора з лопатками не підкидаються в сторону руху конвеєра. Ці частки вилітають таким чином, що знову захоплюються ротором і потрапляють в зону входу лопатей в масив матеріалу.

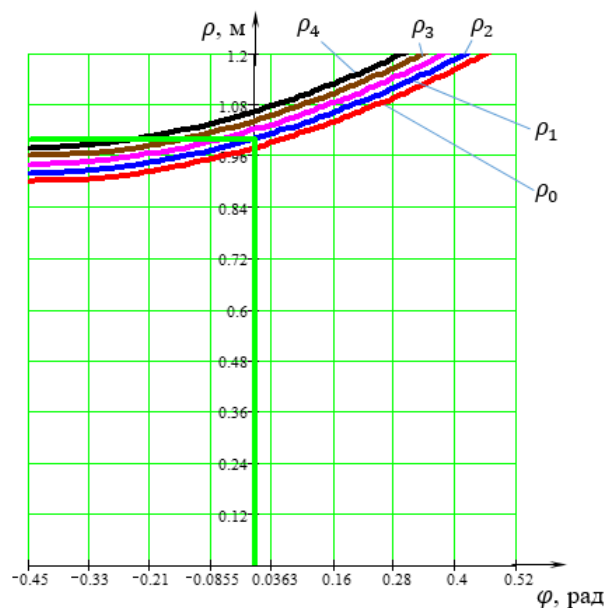


Рис. 2.18 – Обрані параметри змінних повністю підтримують розвантаження лопатей від матеріалу в ньому

Таким чином, критерію доцільності та ефективності пристрою відповідає той випадок, коли всі криві залишають прямокутну область, що не перетинають правий її кордон.

2.6 Визначення зони розсівання частинок

Після відриву частинки сипкого матеріалу від поверхні лопатки, вона починає вільний політ в повітрі під дією придбаної кінетичної енергії. Відрив кожної частинки відбувається в строгий певний момент часу при досягненні певного поточного кута положення лопаті (рис. 2.19).

Відповідно до закону складання швидкостей маємо векторну рівність

$$\bar{V}_A = \bar{V}_\tau + \bar{V}_\rho, \quad (2.88)$$

де $\bar{V}_A$ - вектор абсолютної швидкості частинки в момент її вильоту з поверхні лопатки; $\bar{V}_\rho$ - вектор радіальної швидкості руху частинки; $\bar{V}_\tau$ - вектор дотичної швидкості руху частинки.

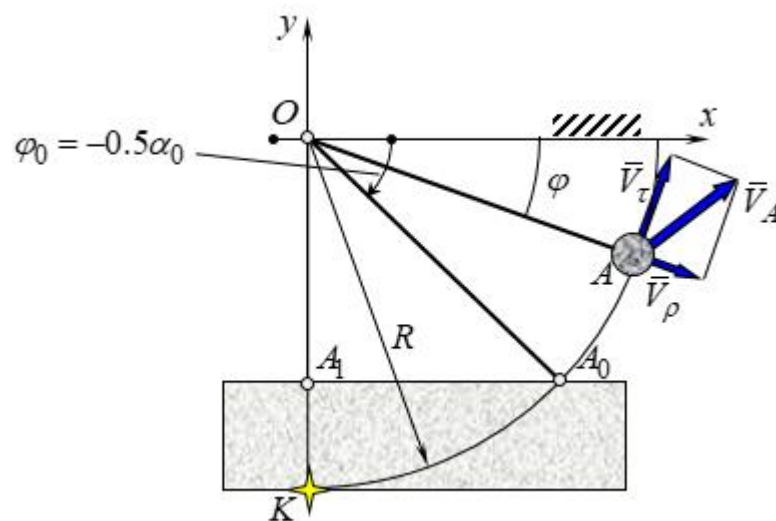


Рис. 2.19 – До визначення вектору швидкості частинки при її відриві від лопатки

Обидва векторні доданки можуть бути обчислені за своєю абсолютною величиною з наступних співвідношень

$$|\bar{V}_\tau| = V, \quad (2.89)$$

$$|\bar{V}_\rho| = \frac{d\rho}{dt}. \quad (2.90)$$

Вираз (2.90) визначається на підставі знайденого рішення диференціального рівняння (2.83).

У проекції на осі абсолютних координат xOy з урахуванням негативності кута φ рівність (2.88) набуде вигляду

$$\begin{cases} V_{Ax} = -V \sin \varphi + V_\rho \cos \varphi \\ V_{Ay} = V \cos \varphi + V_\rho \sin \varphi \end{cases}. \quad (2.91)$$

Після визначення проекцій абсолютних швидкостей частинок і з урахуванням кутового положення лопаті вирішуємо диференціальне рівняння руху кожної частинки і знаходимо для кожної з них закон руху до їх потрапляння на поверхню матеріалу

$$\begin{cases} x = \int V_{Ax} dt + C_x \\ y = \int V_{Ay} dt + C_y \end{cases}. \quad (2.92)$$

Постійні інтегрування визначаємо за початковими умовами в початковий момент часу

$$\begin{cases} x(0) = R \cdot \cos \varphi \\ y(0) = R \cdot \sin \varphi \end{cases}. \quad (2.93)$$

Відстань від осі ротора до місця падіння кожної частки в момент T уздовж поверхні матеріалу на конвеєрі визначиться з (2.92)

$$L = x(T), \quad (2.94)$$

При цьому вертикальна координата всіх частинок, які впали буде одна і та ж, та дорівнює

$$y(T) = h - R. \quad (2.95)$$

Таким чином, визначення поздовжніх розмірів зони розсіювання на поверхні матеріалу, що рухається разом з конвеєрною стрічкою, можна вважати певними.

Приклад обчислення зони розсіювання при теперішніх початкових умовах руху ротора та стрічки конвеєра наведено на рис. 2.20.

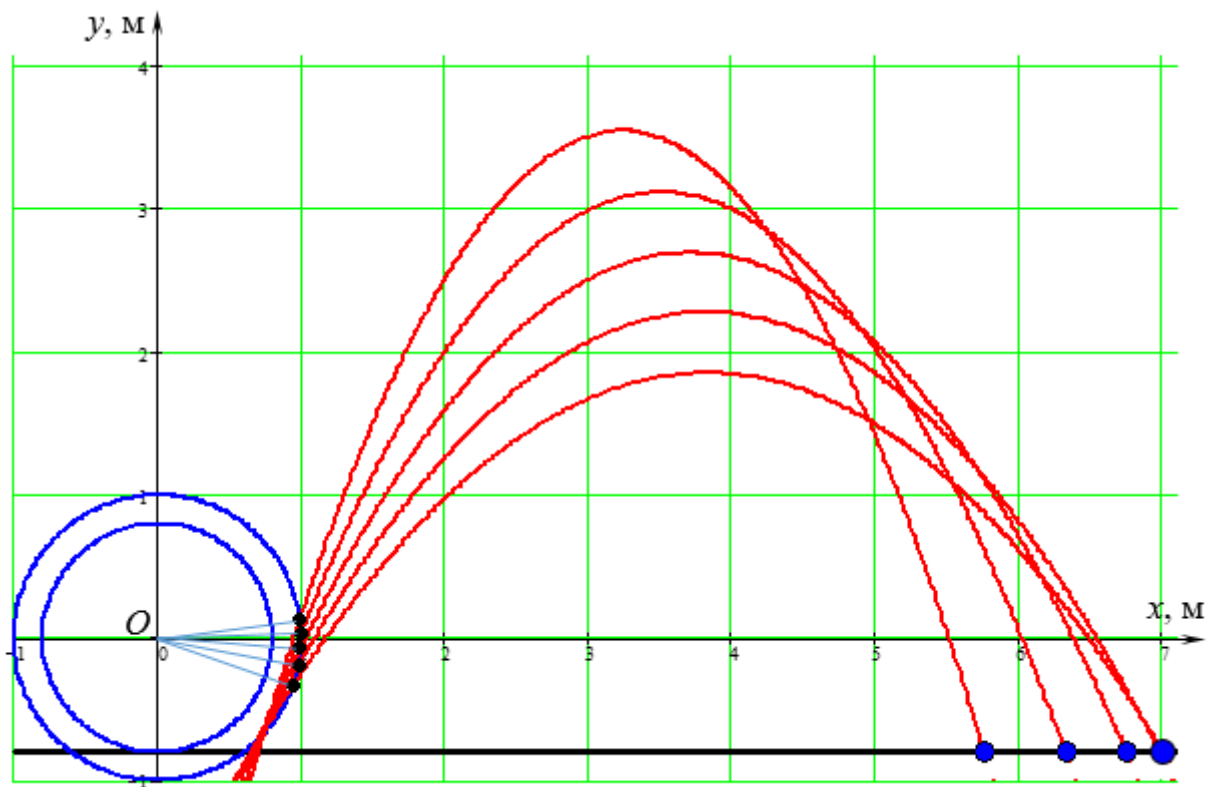


Рис. 2.20 – Розсіювання частинок однієї лопаткою

2.7 Висновки

В ході виконаних досліджень отримано наступні результати:

– розроблено методику розрахунку з визначення енергосилових параметрів технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної дії з тросовими елементами ротора, що приводять шар матеріалу в суспендований стан;

– для змішувача горизонтально-направленої 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 певним;

– 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.

Р О З Д І Л 3

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ «РОТОРНИЙ ЗМІШУВАЧ-КОНВЕЄР»

3.1 Мета і задачі дослідження. Опис лабораторної моделі

Метою лабораторних досліджень було отримання математичної моделі процесу змішування в технічній системі «роторний змішувач-конвеєр» а також визначення його раціональних конструктивних параметрів, що впливають на якість змішування матеріалу.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- розробити лабораторну модель системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної горизонтально-направленої дії;
- розробити методику проведення досліджень;
- отримати математичну модель, що описує процес змішування матеріалу в роторному змішувачі безперервної дії;
- проаналізувати отримані результати і встановити вплив конструктивних і кінематичних параметрів змішувача на його технологічні показники.

Для проведення лабораторних експериментальних досліджень була, виготовлена модель технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» схема якої наведена на рис. 3.1. Розміри моделі становлять одну десяту натуральної величини з дотриманням геометричної та динамічної подоби.

Модель передбачає можливість зміни наступних основних параметрів:

- а) частоту обертання валів ротора змішувача;
- б) тип роторів змішувача;
- в) висоту шару матеріалу на стрічці конвеєра;
- г) вібраційне прискорення стрічки конвеєра.

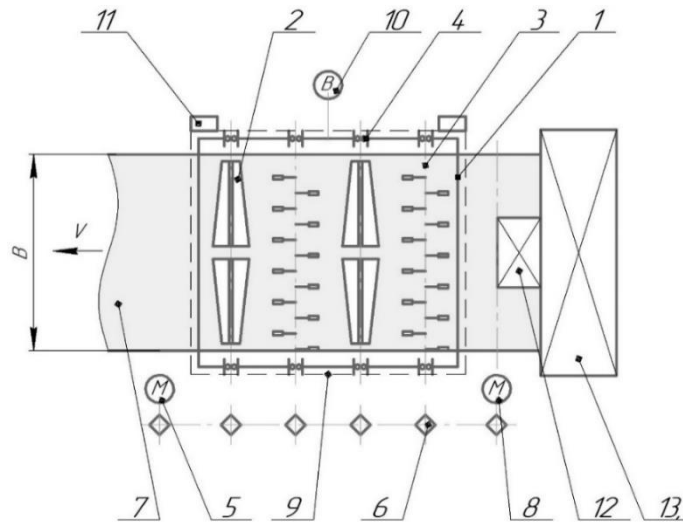


Рис 3.1 – Схема лабораторної моделі технічної системи «роторний змішувач-конвеєр»

Лабораторний стенд (рис. 3.1) представлений у вигляді системи «роторний змішувач-конвеєр» та складається з корпусу 1, в якому встановлені вали з двома типами насадок, лопатками 2 або з гнучкими тросовими елементами 3; вали опираються на шарикопідшипники 4; обертання валів здійснюється двома синхронізованими двигунами постійного струму 5, типу МВ-42, через ланцюгову передачу 6 з передаточним відношенням $i = 2$; конвеєрної стрічки 7, встановленої під змішувачем, з відповідним електродвигуном 8, типу МВ-42 (при цьому конвеєрна стрічка 7 має постійну ширину B та рухається з постійною швидкістю V); вібруючої поверхні 9 з віброзбудником 10, типу VV038/4 з робочою частотою 50 Гц, та датчиками фіксування вібраційного прискорення 11, типу Wintact WT63B з точністю вимірювання 0,001 Гц; двох бункерів 12 та 13 для звичайного та ключового компонентів. Для дослідів також використовувались ваги марки РН10Ц13У ГОСТ 13882-68; частотного перетворювача типу, SYSDRIVE 3G3HV INVERTER; амперметр 3365-1; стробоскоп СШ-2; ємність для змішаного матеріалу та електронний секундомір. Фото моделі технічної системи наведено на рис 3.2.



Рис 3.2 – Лабораторна модель технічної системи «роторний змішувач-конвеєр»

3.2 Методика проведення дослідження

Планування лабораторних досліджень було спрямовано на одержання максимальної інформації при мінімальних витратах на експериментування, що дозволяло визначити значимість факторів, описати процес змішування математичною моделлю та систематизувати отриманий матеріал [57].

Оскільки метою досліджень є математичний опис процесу змішування матеріалу та отримання висновків, які стосуються визначення раціональних конструктивних параметрів технічної системи «роторний змішувач-конвеєр», виконуємо планування й проведення експерименту за схемою, представленою на рис. 3.3.

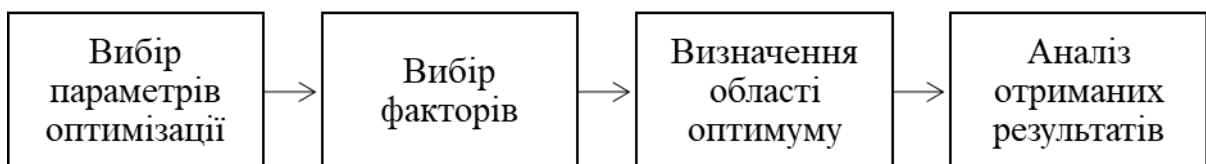


Рис. 3.3 – Схема планування й проведення експерименту

В якості параметра оптимізації приймаємо показники, які найбільш повно відображають якість отриманої суміші та ефективність процесу змішування матеріалу в проточному змішувачі - коефіцієнт варіації, якому відповідає продуктивність конвеєрної стрічки.

Коефіцієнт варіації визначаємо за формулою

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad (3.1)$$

де $\bar{c}$ – середнє арифметичне значення концентрації ключового компонента у всіх n пробах суміші, %; c_i – концентрація ключового компонента в i -й пробі суміші, %.

Продуктивність визначаємо за формулою

$$Q = 3600 \cdot B \cdot H \cdot V \cdot j, \quad (3.2)$$

де H – висота шару матеріалу; B – ширина конвеєрної стрічки; V – швидкість конвеєрної стрічки; j – питома вага матеріалу.

Так як величини B , V та j в дослідженнях були постійними, можна отождествити, що продуктивність безпосередньо залежить від висоти шару матеріалу.

Коефіцієнти варіації у статистичному змісті є ефективними, а це значить, що вони визначаються з достатньою точністю й мають ясний фізичний зміст, що скорочує можливість помилки при визначенні обраних параметрів оптимізації. Крім цього обрані параметри мають однозначність, що дозволяє визначити одне значення параметра оптимізації для загального процесу.

Прийняті фактори, згідно з [37], повинні відповідати наступним вимогам:

– між факторами не повинно бути зв'язку;

- фактори повинні мати сумісність;
- фактори повинні досить точно вимірятися й підтримуватися на певному рівні.

З огляду на перераховані вимоги, приймаємо наступні фактори:

- інтенсивність завантаження (висота шару) X_1 , мм;
- частота обертання валів моделі X_2 , с^{-1} ;
- вібраційне прискорення стрічки конвеєра X_3 , $\text{м}/\text{с}^2$.

Варіювання факторів здійснюється на двох рівнях, тому задається верхній і нижній рівні фактору, а також нульова відмітка. Інтервал між нульовим та верхнім, а також нульовим та нижнім рівнями (інтервал варіювання) обирається однаковий. При виборі інтервалу варіювання є певні труднощі: інтервал варіювання повинен бути досить малим, щоб одержати лінійне рівняння, але разом з тим і досить великим, щоб не дістати помилкового висновку про незначущий вплив того чи іншого фактору [38].

З огляду на вище сказане, приймаємо наступні рівні варіювання факторів, що зводяться до табл. 3.1.

У дослідженнях механізму перемішування матеріалу застосовувалась так звана ідеальна система, тобто система сферичних часток одного виду матеріалу однакових розмірів [39]. З огляду на вище перераховані вимоги, в якості матеріалу для дослідження застосовуємо пшоно. Щоб виділити в цій системі компоненти, частина пшоно забарвлюється в червоний колір та використовується як ключовий компонент (рис. 3.3).

Таблиця 3.1 – Рівні вимірювання факторів

Рівень	Висота шару, мм	Число обертів, об/хв	Прискорення, $\text{м}/\text{с}^2$
	X_1	X_2	X_3
Верхній (+1)	20	164	25
Нульовий (0)	15	148	15
Нижній (-1)	10	132	5
Інтервал варіації	5	16	15

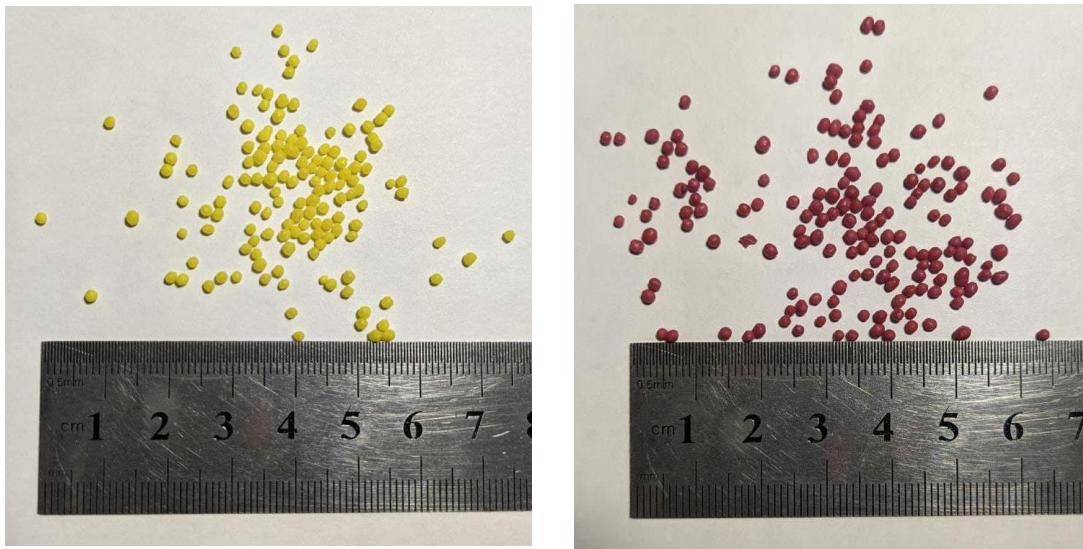


Рис. 3.3 – Матеріал для дослідження

3.2.1 Методика проведення попереднього експерименту та одержані результати досліджень. Експеримент проводили при варіаціях встановлення роторів різних типів (лопатного і тросового) та їх комбінацій над конвеєрною стрічкою при наступних режимах роботи технічної системи «роторний змішувач-конвеєр»:

- частота обертання валів ротора змішувача $\omega = 14 \div 17 \text{ с}^{-1}$;
- висота шару матеріалу на стрічці конвеєра $H = 0,005 \div 0,025 \text{ м}$;
- пропорція ключового компонента в суміші становила 10% загальної кількості матеріалу.

Перед проведенням дослідів перевірялася вага матеріалу. Потім матеріал викладався шарами на конвеєрну стрічку. Нижній шар формувався із нефарбованого пшона, тоді як верхній - із пофарбованого у червоний колір. Після завершення формування шарів вмикалося живлення електродвигуна та проводились вимірювання частоти обертів валів за допомогою стробоскопа і вимірювання вібраційного прискорення за допомогою датчика Wintact WT63B. Далі вмикався секундомір, який зупиняли при повному витoku матеріалу з конвеєрної стрічки в розміщену під нею ємність. З ємності (піддону) брались проби

суміші, з яких відокремлювали частки червоного та природнього кольорів, які далі зважували і одержували їх співвідношення. Одержані дані фіксувались в лабораторному журналі (додаток від Б до Д включно). Кожен дослід повторювався три рази.

Оцінку отриманих сумішей у результаті проведення дослідження на моделі ротору здійснювали з використанням формул (3.1) та (3.2).

В табл. 3.2 наведені дані, що відображають коефіцієнт варіації в залежності від варіантів розташування різних типів роторів. Умовні позначення в таблиці «Л» - лопатний ротор, «Т» - тросовий ротор.

Таблиця 3.2 – Залежність коефіцієнту варіації від комбінацій типів роторів

Варіант розташування та послідовності роторів	Коефіцієнт варіації, %				
	14 с ⁻¹	14,5 с ⁻¹	15 с ⁻¹	16 с ⁻¹	17 с ⁻¹
«Л»	8,46	6,50	6,66	6,14	3,49
«Т»	8,14	5,52	7,81	5,34	5,78
«Л»+«Т»	3,14	6,35	5,51	3,67	4,01
«Т»+«Л»	6,53	4,65	5,14	3,80	3,14

Результати проведених досліджень представлено в графіках, що відображають залежність коефіцієнта варіації від типу роторів та частоти обертання – на рис. 3.4; залежність коефіцієнта варіації від висоти шару матеріалу – на рис. 3.5.

З проілюстрованих графіків видно, що найбільший вплив на якість змішування матеріалу має поєднання тросового та лопатного роторів («Т+Л»). Неменше вагомим фактором є висота шару матеріалу, але варто відмітити, що зі збільшенням висоти шару матеріалу покращується якість змішування. Також встановлено, що для дослідної системи «роторний змішувач-конвеєр», при постійних конструктивних та кінематичних параметрах стрічки конвеєра якість змішування прямо пропорційно залежить від висоти шару матеріалу.

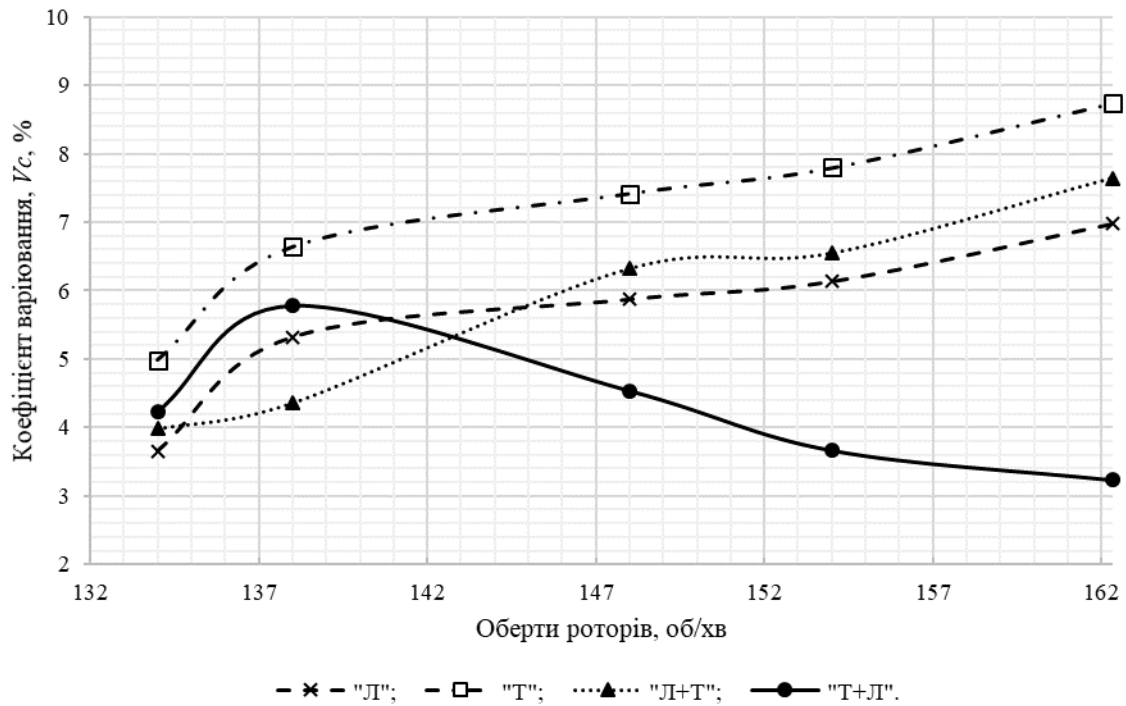


Рис. 3.4 – Залежність коефіцієнту варіації від типу ротору та частоти обертання

За результатами попереднього експерименту визначено, що якість суміші V_c підвищувалась при наступних параметрах: частота обертання валів роторів $\omega = 15 \text{ c}^{-1}$; висота шару матеріалу $H = 0,02 \text{ м}$, при більшому завантаженні ($H \leq 0,025 \text{ м}$) присутнє значне перекидання матеріалу за борти корпусу установки; застосування комбінації тросового та лопатного роторів.

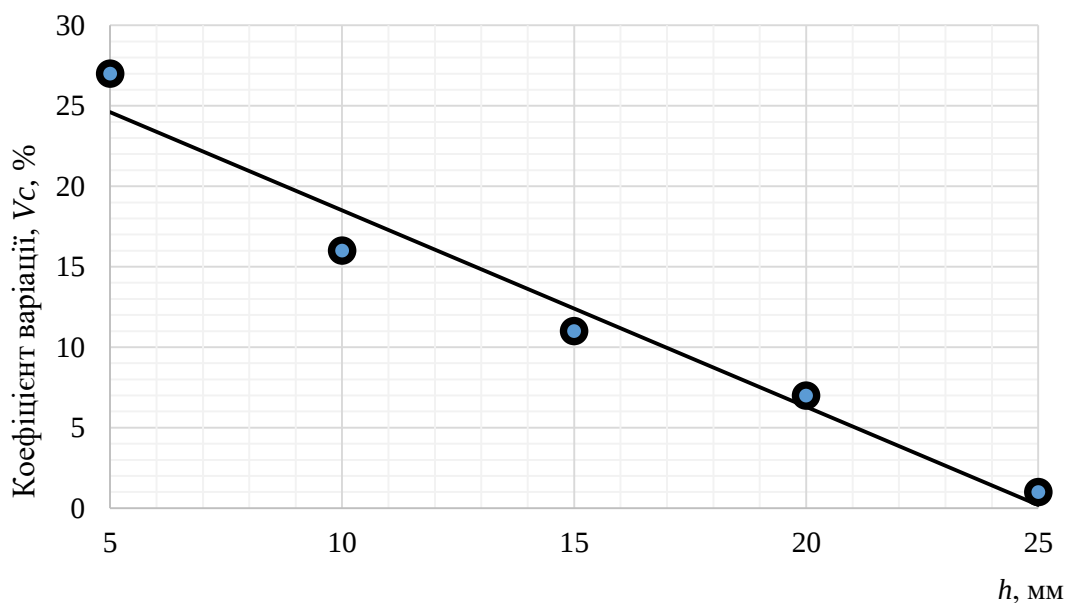


Рис. 3.5 – Залежність коефіцієнта варіації від висоти шару матеріалу

3.2.2 Методика проведення повного факторного експерименту та одержані результати досліджень. Для одержання математичної моделі процесу змішування матеріалу на роторному змішувачі застосовувався повний факторний експеримент типу 2^3 . Для застосування стандартної ортогональної план-матриці експерименту переводимо натуральні фактори в безрозмірні величини за формулою

$$x_i = \frac{x_i - x_i^0}{\Delta x_i}, \quad (3.3)$$

де x_i – натуральне значення i -го фактору на певному рівні (верхньому або нижньому); x_i^0 – натуральне значення i -го фактору на нульовому рівні; Δx_i^0 – інтервал варіювання i -го фактору.

Натуральні й кодовані значення факторів обираються з табл. 3.1.

Досліди проводимо при режимах роботи моделі, зазначених у плані-матриці (табл. 3.3). Для того щоб додати елемент випадковості впливу факторів на результати експерименту, а це необхідно для обґрунтування використання апарата математичної статистики, установлюється випадковий порядок постановки дослідів у часі (рандомизацією). Для її здійснення користуємося витягом написаних на папері номерів дослідів з урни, кожне сполучення рівнів (номера дослідів) повинне зустрічатися тричі.

Досліди проводимо відповідно методиці, описаної в пункті 3.2. Оцінку отриманих сумішей у результаті проведення дослідження на моделі змішувача здійснюємо по формулі (3.1). Також розраховувались за формулою (3.2) та фіксувались значення продуктивності при різних режимах роботи дослідної технічної системи «роторний змішувач-конвеєр». При цьому потужність електродвигунів контролювалась в кожній серії дослідів. Значення коефіцієнта варіації та потужності вносимо в таблицю 3.4.

Таблиця 3.3 – Ортогональна план-матриця першого порядку

№ дос- ліду	x_1	x_2	x_3
1	—	—	—
2	+	+	+
3	+	+	—
4	+	—	—
5	+	—	—
6	—	+	+
7	—	+	—
8	—	—	+

Таблиця 3.4 – Умови та результати дослідів

№ досліду	Потужність			Параметри оптимізації							
	N_1 , Вт	N_2 , Вт	N_3 , Вт	Серія дослідів			Середнє	Серія дослідів			Середнє
				Q_1 , т/г	Q_2 , т/г	Q_3 , т/г		V_{c1} , %	V_{c2} , %	V_{c3} , %	
1	0,27	0,27	0,27	1,178	1,074	1,14	1,13	15,78	14,65	15,65	15,36
2	0,31	0,31	0,31	2,35	2,42	2,416	2,40	2,54	2,78	2,98	2,77
3	0,30	0,30	0,305	2,045	2,07	2,052	2,06	4,65	4,87	4,32	4,61
4	0,28	0,28	0,28	1,88	1,87	1,98	1,91	7,46	7,65	7,65	7,59
5	0,28	0,27	0,28	1,62	1,65	1,67	1,65	7,65	6,65	7,90	7,40
6	0,3	0,3	0,29	1,34	1,35	1,45	1,38	12,48	11,64	12,64	12,26
7	0,305	0,3	0,305	1,15	1,023	1,147	1,11	15,65	14,57	14,65	14,96
8	0,275	0,275	0,28	1,24	1,235	1,34	1,27	10,54	11,49	11,78	11,27

Отримані показники (наведені в табл. 3.4) дозволяють описати залежність якості змішування матеріалу та продуктивності від обраних факторів за допомогою лінійної моделі

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3, \quad (3.4)$$

Коефіцієнти регресії b_0 та b_i визначаються за формулою

$$b_i = \frac{\sum_{n=1}^n x_i}{n}, \quad (3.5)$$

де $\bar{y}_u$ – середнє арифметичне значення відгуку при і-тому сполученні факторів; x_i – кодоване значення і-го фактору на і - тому поєднанні факторів, з табл. 3.4.

Розрахункове значення коефіцієнтів регресії наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Розрахункове значення коефіцієнтів регресії

$V_c, \%$		$Q, \text{т/г}$	
Коефіцієнт регресії	Розрахункове значення	Коефіцієнт регресії	Розрахункове значення
b_0	9,527	b_0	1,614
b_1	-4,019	b_1	0,373
b_2	-0,823	b_2	0,129
b_3	-0,934	b_3	0,147

З урахуванням розрахункових значень коефіцієнтів регресії було отримано лінійні математичні моделі, які відображають залежність якості суміші і продуктивності від обраних факторів:

$$V_c = 9,527 - 4,019 \cdot x_1 - 0,823 \cdot x_2 - 0,934 \cdot x_3, \quad (3.6)$$

$$Q = 1,614 - 0,373 \cdot x_1 - 0,129 \cdot x_2 - 0,147 \cdot x_3, \quad (3.7)$$

Адекватність моделі вважалась обґрунтованою, якщо його розрахункове значення було менше або дорівнювало його табличному значенню при 5%-му рівні значимості. Було встановлено, що рівняння (3.6) та (3.7) адекватно описують процес, так як $\Delta b_{i(V_c)} = 0,582$; $\Delta b_{i(Q)} = 0,06$.

Отримані математичні моделі (3.6) та (3.7) були піддані графічному аналізу, що дозволило наочно встановити ступінь впливу кожного фактору на параметр оптимізації. Дані графіки характеризують залежність коефіцієнта

варіації продуктивності від варійованих факторів: висоти шару матеріалу, частоти обертання роторів та вібраційного прискорення стрічки конвеєра.

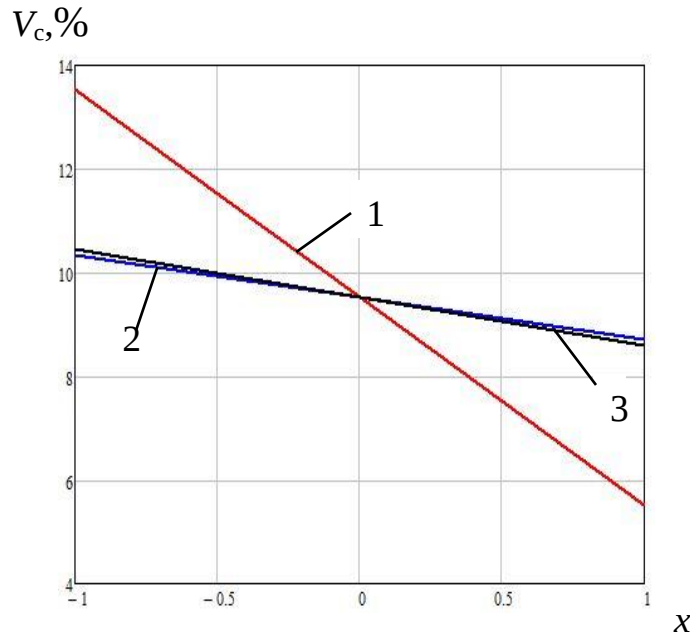


Рис. 3.6 – Залежність коефіцієнта варіації від факторів: 1 – інтенсивність завантаження (висота шару); 2 – частота обертання валів моделі; 3 – вібраційне прискорення стрічки конвеєра.

З наведеної залежності (рис. 3.6) видно, що найбільш впливовим фактором є висота шару матеріалу ($H = 20$ мм). Для обраних діапазонів частот обертання роторів та прискорень коливань конвеєрної стрічки при їх безпосередньому збільшенні приводять і до збільшення якості змішування суміші, а саме при збільшенні оборотів ротора на 15 %, а при прискоренні до 16 %.

З приведенного графіку на рис. 3.7 залежності продуктивності від дослідних факторів виходить, що зі збільшенням висоти шару матеріалу зростає і продуктивність змішувача. При максимумі діапазону частот обертання роторів та прискорень коливань конвеєрної стрічки збільшується і продуктивність системи, а саме при збільшенні оборотів ротора та прискорення на 8%.

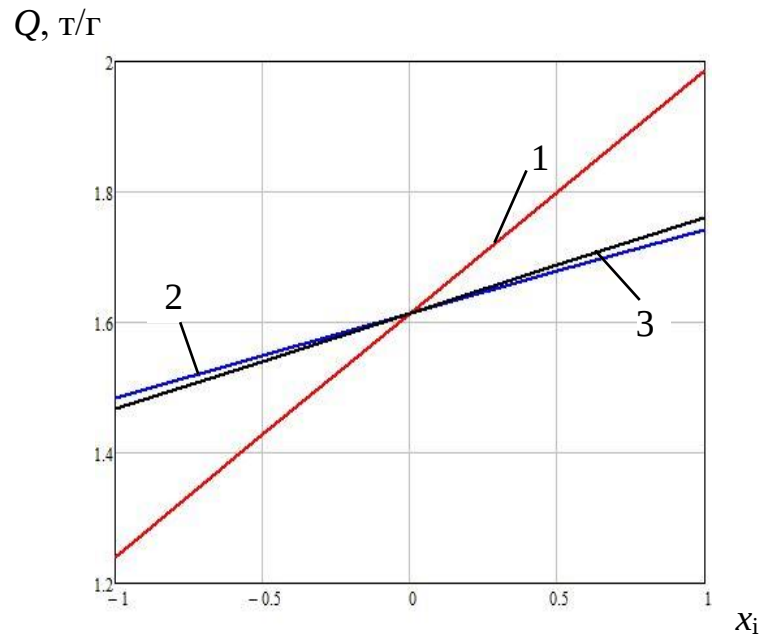


Рис. 3.7 – Залежність продуктивності від факторів: 1 – інтенсивність завантаження (висота шару); 2 – частота обертання валів моделі; 3 – вібраційне прискорення стрічки конвеєра.

Для оцінки взаємовпливу інтенсивності завантаження та вібраційного прискорення стрічки конвеєра був побудований графік двовимірного перерізу поверхні відгуку (рис. 3.8). З графіку видно, що максимальне значення продуктивності відповідає максимальним значенням інтенсивності завантаження та вібраційного прискорення стрічки.

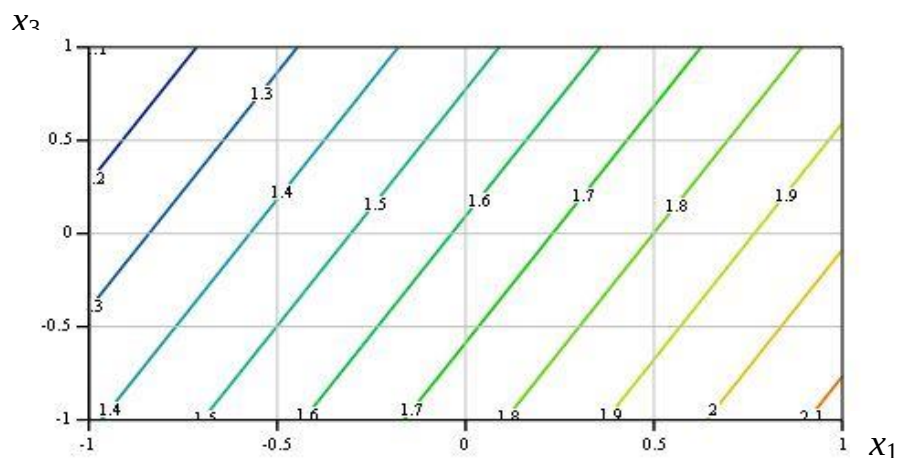


Рис. 3.8 – Двовимірний переріз поверхні відгуку при взаємодії факторів x_1 та

x_2

Оскільки для опису процесу змішування використовувались два параметри оптимізації, було проведено оцінку кореляції між коефіцієнтом варіації та продуктивністю.

Розрахунки показали, що одержаний коефіцієнт кореляції становить $r = -0,96$, отже, залежність між коефіцієнтом варіації і продуктивністю є сильно залежними.

На рис. 3.9 представлена залежність коефіцієнта варіації суміші від продуктивності, звідки видно, що в досліджуваному діапазоні зміни завантаження конвеєрної стрічки та якість суміші збільшуються прямо пропорційно при збільшенні продуктивності.

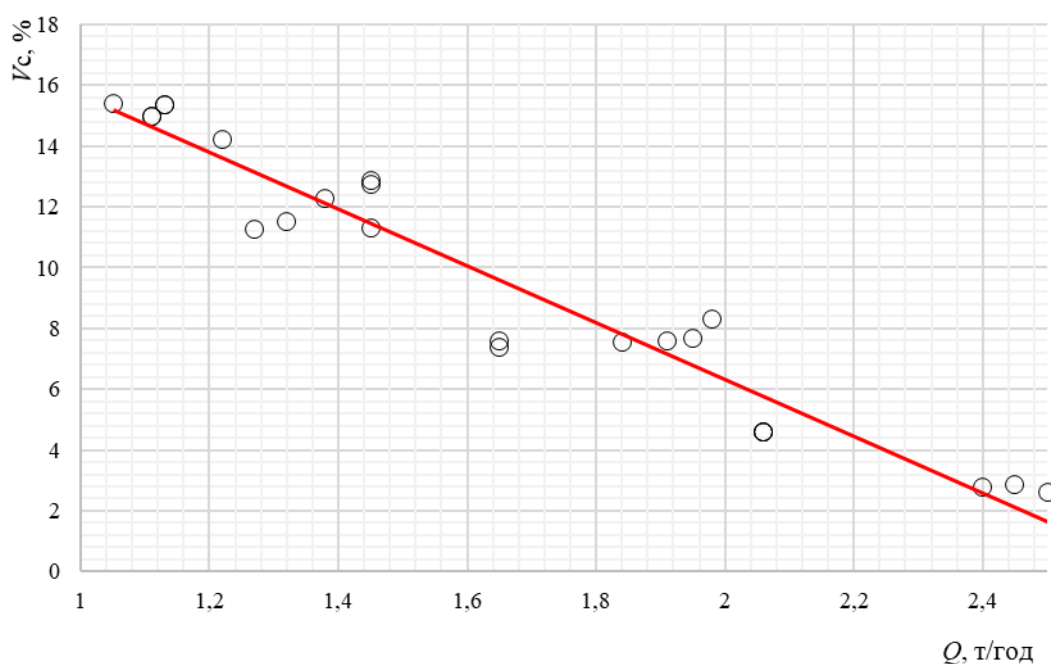


Рис. 3.9 – Залежність коефіцієнту варіації від продуктивності

Таким чином, проведені лабораторні експериментальні дослідження на моделі технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» дозволили встановити вплив її конструктивних і кінематичних параметрів на основні технологічні показники процесу змішування матеріалу.

3.3 Висновки

В результаті лабораторних експериментальних досліджень були отримані наступні результати:

- розроблено лабораторну модель технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної горизонтально-направленої дії;
- розроблено методику проведення досліджень;
- отримано 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;
- встановлено, що для дослідної системи «роторний змішувач-конвеєр», при постійних конструктивних та кінематичних параметрах стрічки конвеєра якість змішування прямо пропорційно залежить від висоти шару матеріалу;
- встановлено, що раціональний режим роботи технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» забезпечується при висоті шару матеріалу на конвеєрній стрічці $H = 0,002$ м та частоті обертання валів ротора змішувача $\omega = 15 \text{ c}^{-1}$.

Відповідно до геометричної подоби моделі оптимальна висота шару матеріалу в реальних умовах повинна становити $H = 0,2$ м.

Р О З Д І Л 4

ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ «РОТОРНИЙ ЗМІШУВАЧ-КОНВЕЄР»

4.1 Мета і задачі промислових випробувань. Опис удосконаленої технологічної схеми виробництва окатишів.

Метою промислових випробувань була перевірка наведених в розділі 2.1 даної роботи визначення енергосилових параметрів роторного змішувача, а також оцінка ефективності використання технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» в процесі підготовки різноманітних сумішей. Так в роботах [110, 111] наведені дослідження, які стосувались підготовки вугільної шихти до коксування з використанням технічної системи «роторний змішувач-конвеєр». В даній роботі наведені дослідження, які були проведені при підготовці суміші для отримання якісних окатишів на фабриці огрудкування.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- визначено енергосилові витрати роботи роторного змішувача в холостому ході та під навантаженням;
- визначено енергосилові витрати роботи конвеєра встановленого під роторним змішувачем;
- визначено ефективність підготовки суміші в технологічному процесі виробництва окатишів;
- встановлені недоліки в роботі роторного змішувача та запропоновано шляхи щодо його удосконалення.

Промислові дослідження проводилися на фабриці огрудкування Центрального гірничо-збагачувального комбінату (м. Кривий Ріг) на ділянці підготовки шихтових матеріалів за технологічною схемою наведеною на рис. 4.1 та має наступний принцип дії: шихтовий матеріал з бункерів 1 транспортується в барабанний змішувач 2, далі він поступає на магістральний конвеєр 3, над

яким встановлено роторний змішувач типу СР-620×1,4-4 позиція 4 виробництва «КВМШ плюс, як показано на фото (рис. 4.2), технічна характеристика котрих наведена в табл. 1.5, розділу 1 даної роботи. Після змішування матеріалу на магістральному конвеєрі він поступає на огрудкування 5 для утворення сирих окатишів. Далі сирі комки розподіляються роликовим укладачем на верхній клас – плюс 10 мм, який надходить до машини спікання 7, а нижній клас – мінус 10 мм (некондиційний), повертається до технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» 4. Остаточно після спікання готові окатиші транспортуються з печі, охолоджуються продувкою та надходять на ділянку сортування 8, де відсівається некондиційний клас 0 – 5 мм.

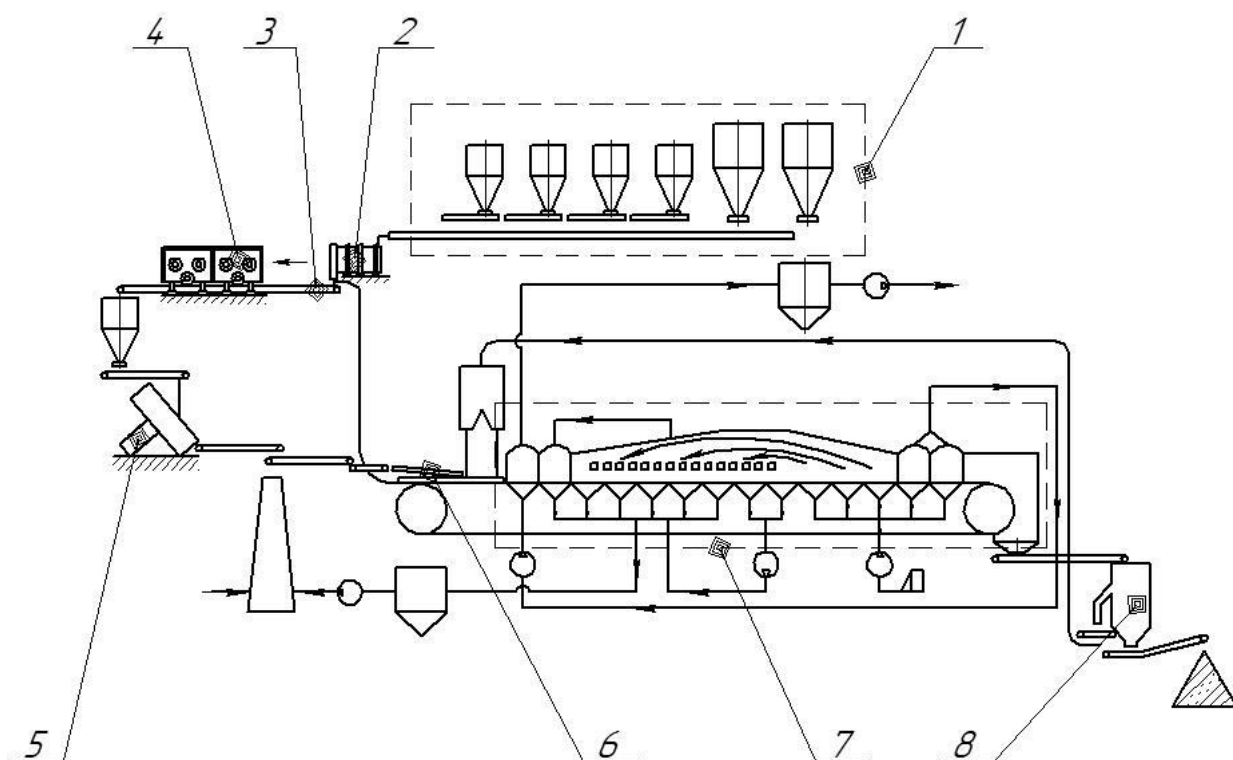


Рис. 4.1 – Удосконалена технологічна схема виробництва окатишів

- 1 – складання шихти; 2 – барабанний змішувач; 3 – магістральний конвеєр; 4 – роторний змішувач; 5 – огрудковувач; 6 – роликовий укладач; 7 – машина для спікання; 8 – сортування готового продукту.



Рис. 4.2 – Фото технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» встановленої на ПАТ «ЦГЗК»

4.2 Методика проведення промислових випробувань та отримані результати досліджень

Для перевірки теоретичних досліджень пов'язаних з розрахунками енерговитрат змішувача були проведені заміри фактичної потужності встановлених двигунів на кожній секції впровадженого устаткування.

Енергосилові витрати вимірялись для кожної секції змішувача в холостому ході та під дією навантаження в процесі переміщення матеріалу. В якості показника енерговитрат кожної секції вимірялась потужність її привода з застосуванням вимірювального комплексу К-50.

В таблиці 4.1 наведені отримані дані потужності привода кожної секції роторного змішувача та показники, які були розраховані за розробленою методикою в розділі 2.1 даної роботи.

З отриманих результатів видно, що потужність приводів в робочому режимі не перевищує максимальних значень згідно їх характеристик (див. табл. 1.5) й зменшується від секції до секції під дією навантаження, що на наш погляд обумовлено впливом первинної дії розпушення шару матеріалу на перших приймальних тросових елементах.

Таблиця 4.1 – Потужність привода роторного змішувача

№ п/п	Виміри	Секції по ходу руху матеріалу на конвеєрній стрічці				Розрахована потужність, кВт
		I	II	III	IV	
1	В холостому ході	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9
2	Під навантаженням	14,4	14,0	13,8	13,8	15,4

В холостому ході вона практично однакова для всіх секцій змішувача і не перевищує 3,9 кВт. Порівнюючи отримані результати промислових випробувань потужності з результатами розрахунків видно, що різниця між ними при роботі змішувача в холостому ході відрізняється не більше чим на 3%, а під навантаженням не більш ніж 10 %.

Окрім визначення енерговитрат роторного змішувача оцінювалась і ефективність використання змішувача в удосконаленій технологічній схемі підготовки окатишів до спікання. Так на кожному магістральному конвеєрі було встановлено по змішувачу типу СР-620×1,4-4 де на одному з них у робочій зоні змішування шихтового матеріалу використовувались конвеєрні роликові опори з примусовим дисбалансом шляхом встановлення додаткової полуобічайки, як показано на рис. 4.3.

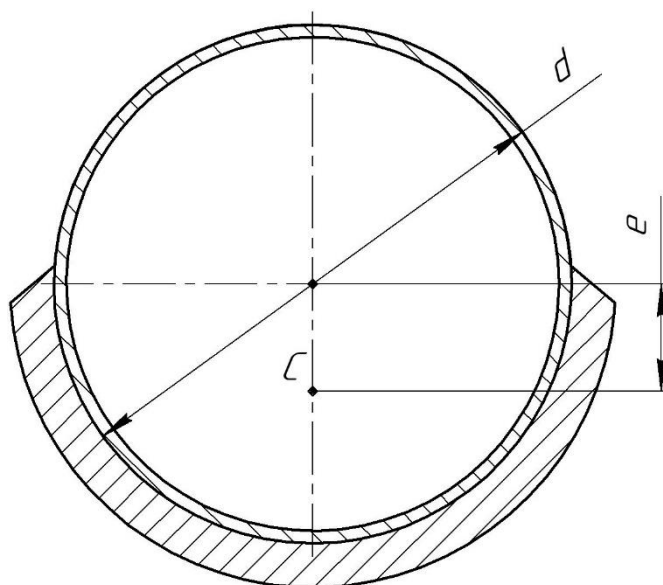


Рис. 4.3 – Переріз профілю удосконаленого ролику

Такий конструктив застосованої роlikової опори дозволив, в робочій зоні переміщення і змішування матеріалу, отримати вібраційне прискорення яке дорівнювало $15,5 \text{ м/с}^2$, яке розраховувалось за формулою:

$$u = A\omega^2, \quad (4.1)$$

де $A = \frac{me}{M}$, – амплітуда коливання ролика, мм; m – маса ролика, кг; M – маса осередку конвеєрної стрічки й матеріалу над роlikовою опорою, кг; e – ексцентриситет роlikової опори, м; ω – частота коливань ролика, $\omega = \frac{2V}{d}$, с^{-1} ; V – лінійна швидкість конвеєрної стрічки; d – діаметр ролика.

Ефективність застосованої технологічної схеми оцінювалась по класу 0...10 мм сирих окатишів на конвеєрі повернення, встановленого під роlikовим укладачем без роторного змішувача та з ним (з надаванням вібраційного впливу та без нього).

На діаграмі рис. 4.4 наведені середні показники в відсотках змісту некондиційної частки сирих окатишів після проходження роlikового укладача.

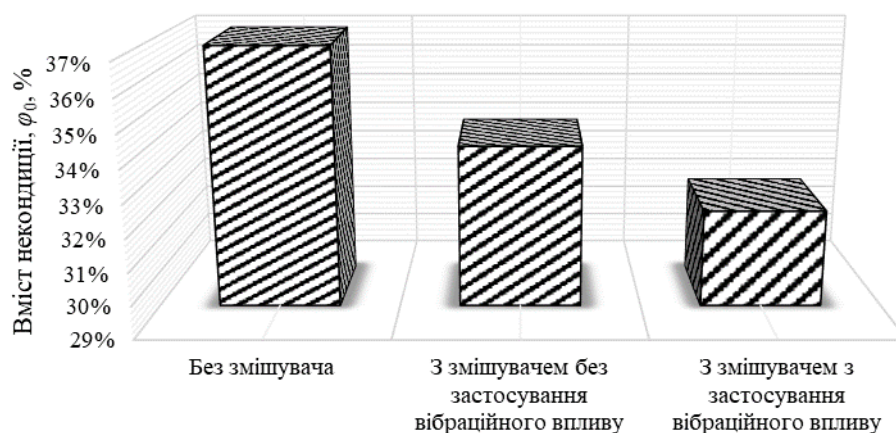


Рис. 4.4 – Середні показники вмісту некондиційних сирих окатишів в залежності від застосованого обладнання

З отриманих даних видно, 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.

При визначенні ефективності підготовки суміші з вібраційним впливом і без нього одночасно проводились заміри потужності привода конвеєра встановленого під роторним змішувачем. Визначення його енергосилових параметрів також як і в випадку вимірів потужності привода секції роторного змішувача здійснювалась шляхом застосування вимірювального комплексу K50 з включенням блока трансформаторів U508M. В таблиці 4.2 наведені отримані дані потужності привода конвеєра при його роботі без змішувача та з ним, під дією вібраційного впливу та без нього. З отриманих даних видно, що максимальна потужність привода конвеєра при роботі зі змішувачем й вібраційним впливом на конвеєрну стрічку збільшується на 10 кВт та становить 128 кВт, що не є критичним, так як його встановлена потужність більше й дорівнює 160 кВт.

Таблиця 4.2 – Потужність привода конвеєра

№ п/п	Виміри	Визначена потужність, кВт
1	Під навантаженням без технічної системи	118
2	Під навантаженням з технічною системою без вібраційного впливу	121
3	Під навантаженням з технічною системою з вібраційним впливом	128

В період досліджень також були встановлені характерні недоліки і переваги, щодо окремих конструктивних вузлів і елементів змішувача. Так додаткові примусові коливання роликової опори ведуть до збільшення шуму та значного зносу посадкового її місця. Крім цього встановлено, що вібраційний вплив на матеріал дозволяє зменшити навантаження на привод ротору змішувача, а саме на можливість зменшення зносу елементів його робочого органу,

але водночас веде і до зачеплення тросовими елементами поверхні конвеєрної стрічки, тим самим зменшуючи строк її експлуатації.

Окрім цього в теперішній час було проведено удосконалення технологічної схеми шляхом впровадження замість барабанного змішувача шихти роторного змішувача «Айріх» та встановлення двохдечного роликового укладача замість однодечного. Таке удосконалення дало можливість підвищити якість готового продукту (обпалених окатишів), але підвищилась і частка повернення продукту по сирим окатишам після роликового укладача до 50%, що обумовлює необхідність використання роторного змішувача, як устаткування направлено на дроблення матеріалу, фракційний розмір котрого перевищує 15 мм.

Таким чином виявлені недоліки роботи роторного змішувача в технологічній схемі підготовки огрудкування окатишів потребує знайти шляхи його удосконалення, і можливості ефективного його використання в нових умовах технологічного виробництва окатишів.

4.3 Шляхи удосконалення роторного змішувача

Провівши промислові дослідження роботи роторного змішувача з гнучким тросовим елементом були виявлено деякі недоліки, які мають безпосередній вплив на його ефективне використання в умовах фабрики огрудкування ПАТ «ЦГЗК». Так існує проблема наявності суттєвого збільшення кількості повернення продукту по сирим окатишам після роликового укладача.

Отже оскільки некондиційний клас за рахунок сегрегаційних та технологічних процесів укладається на поверхні шару матеріалу, що транспортується, доцільним є виконати першу секцію роторного змішувача в вигляді молоткової дробарки (рис. 4.5) яка складається з: ротору 1 на який насаджені диски з короткими молотками та конвеєрної стрічки 2, що виконує транспортування продукту. Принцип дії даної схеми наступний: ротори 1 обертаючись в напрямку руху матеріалу, що транспортується конвеєрною стрічкою 2 спричиняють механічний руйнуючий вплив на поверхневий шар некондиційного продукту.

Молотки ротору 1, виконані досить короткими, що унеможливило зачеплення ними конвеєрної стрічки 2, яка транспортує матеріал, а тільки подрібнює верхній шар.

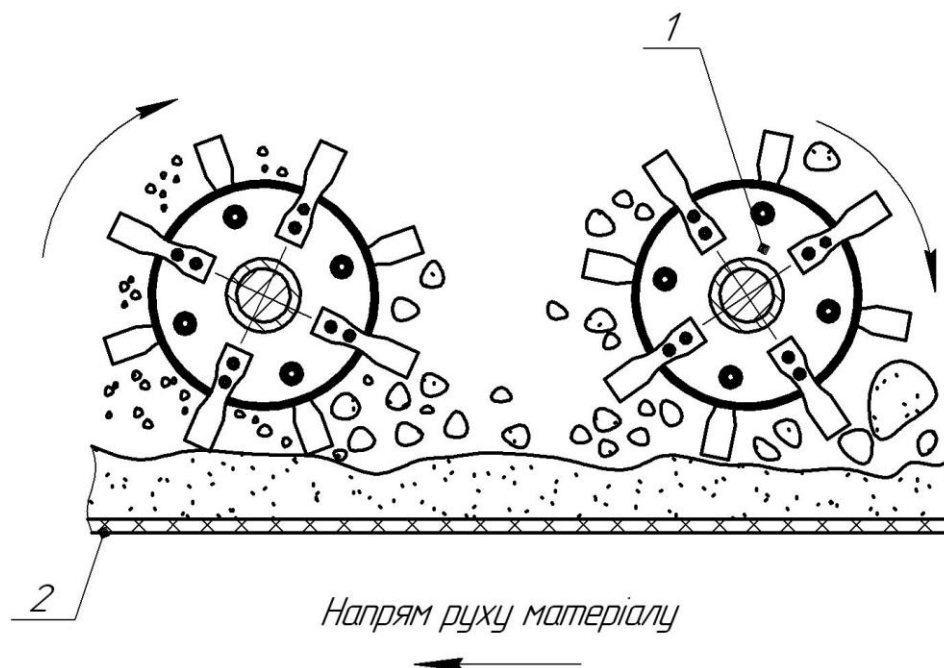


Рис. 4.5 – Схема удосконаленої першої секції змішувача для руйнування поверхневого шару матеріалу

З огляду на те, що наведена схема несе руйнівний характер поверхневого шару матеріалу вона потребує і іншого підходу для визначення потужності її приводу. Так в відповідності до [44], витрачена потужність секції, що практично виконує функцію молоткової дробарки, затрачена на відновлення енергії, яка витратилась молотками при ударах по шматкам дробимого матеріалу N' , а також в опорах ротора N'' .

Потужність необхідна на відновлення енергії, яка витрачена всіма молотками при ударах по шматку дробимого матеріалу визначається як:

$$N' = \frac{v_m^2 \cdot m_m \cdot m_u \cdot z \cdot n_p}{120 \cdot (m_m + m_u)}, \text{ Вт} \quad (4.2)$$

де v_m – швидкість молотка відносно шматка дробимого матеріалу до удару,

$$v_m = \frac{\pi D_p \cdot n_p}{60}, \text{ м/с; } m_m - \text{ маса молотка, кг; } m_u - \text{ середня маса дробимого шмат-}$$

$$\text{ка, } m_u = \frac{16,7 \cdot Q}{n_p \cdot z}, \text{ кг; } Q - \text{ продуктивність дробарки (в нашому випадку можна}$$

приймати продуктивність конвеєра по поверхневому шару); n_p – число обертів ротора, об/хв; z – число дробимих молотків в секції.

Потужність витрачена на подолання сил тертя в опорі ротора буде дорівнювати:

$$N'' = G \cdot \mu \cdot \frac{d_u}{2} \cdot \omega_p, \text{ Вт} \quad (4.3)$$

де G – сила тяжіння ротору, м³; d_u – діаметр цапфи валу, мм; μ – коефіцієнт тертя в підшипниках.

Аналізуючи залежності (4.2), (4.3) можна зробити висновки, про те, що при постійних технологічних та геометричних параметрах конвеєрного тракту, регулювання дробимості поверхневого шматка матеріалу може бути здійснено або зміною обертів ротора змішувача, або регулюванням числа його дробимих молотків. Але оскільки останнє являється менш раціональним, аніж перший спосіб, тому пропонується на першу секцію, що здійснює функцію молоткової дробарки встановити частотний перетворювач, який дозволить підібрати необхідне число обертів на валу ротора дробарки, виходячи з ефективного дроблення некондиційного продукту.

Виконавши дроблення в першій стадії (на першій секції) можна переходити на ефективне змішування матеріалу (на наступних секціях).

Також з метою усунення негативної взаємодії робочих поверхонь тросового елемента роторного змішувача з конвеєрною стрічкою, під час роботи системи з вимушеними вібраційними коливаннями, розроблена удосконалена секція роторного змішувача, схема якої наведена на рис. 4.6 (а, б). Складниками

запропонованої удосконаленої секції роторного змішувача є: тросовий ротор 1, який є першим по ходу руху матеріалу та має тросові елементи різної довжини; лопатевий ротор 2, вібраційний (ексцентриковий) ролик 3 та конвеєрна стрічка 4, яка транспортує матеріал.

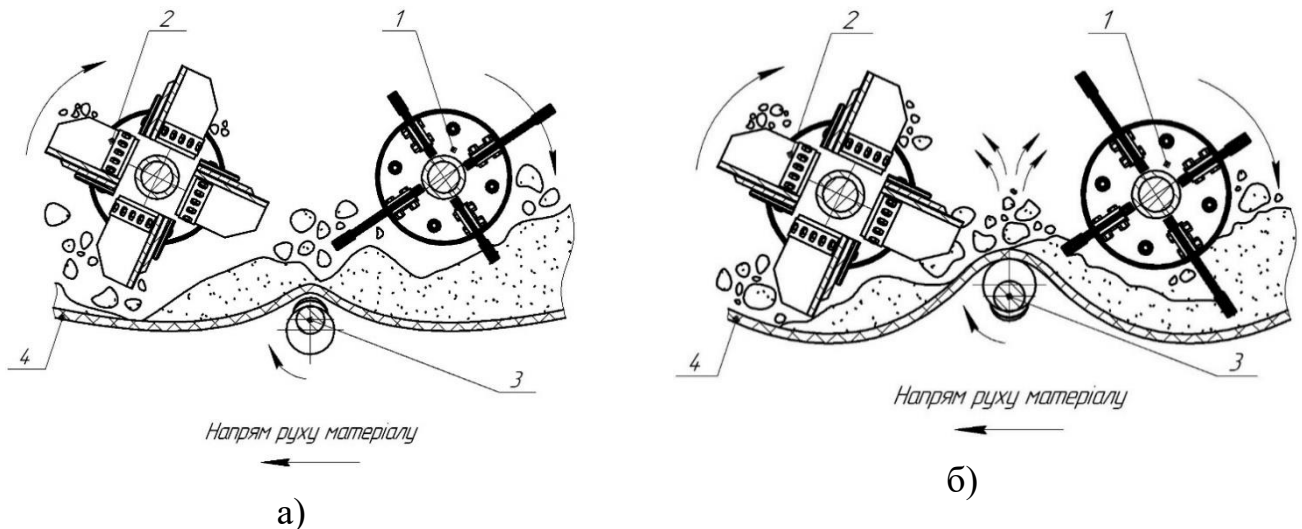


Рис. 4.6 – Схеми удосконаленого тросового ротору змішувача

Ідея удосконалення полягає в наступному: в момент коли вібраційний ролик 3 не контактує з холостою поверхнею конвеєрної стрічки 4 (вимушений вібраційний вплив відсутній), тросовий ротор 1 взаємодіє з прошарком матеріалу рядом довгих тросових елементів (рис. 4.6, а). В іншому випадку, коли вібраційний ролик 3 контактує з холостою поверхнею конвеєрної стрічки 4, внаслідок чого матеріал потрапляє під вплив гармонійних коливань, створених роликом, тросовий ротор 1 взаємодіє з прошарком матеріалу рядом коротких тросових елементів (рис. 4.6, б). Таке налаштування забезпечується завдяки з'єднанню шківів роторів 1, 2 та ролика 3 пасовою передачею та забезпечує виключення можливості зачеплення тросовим елементом поверхні конвеєрної стрічки 4 в момент впливу гармонійних коливань спричинених вібраційним роликом 3.

Інша модифікація стосується вібруючих роликів опор. Модифікація представлена на рис. 4.7 в вигляді мобільної секції (незалежної) роликової опори стрічкового конвеєра з віброзбудниками, яка може бути розміщена на ділянці роботи роторного змішувача. Секція складається з рами 1, на яку через пружинні амортизатори 2, встановлена роликова опора 3. Гармонійні коливання роликової опори передаються двома вібраційними моторами 4 працюючими в режимі самосинхронізації й генеруючими вимушені вертикально направлені коливання. Вібраційні мотори встановлені на проміжній рамі 5, що сполучає між собою роликові опори. Така модифікація дозволяє в залежності від навантаження матеріалу автономно, через частотний перетворювач регулювати коливання конвеєрної стрічки.

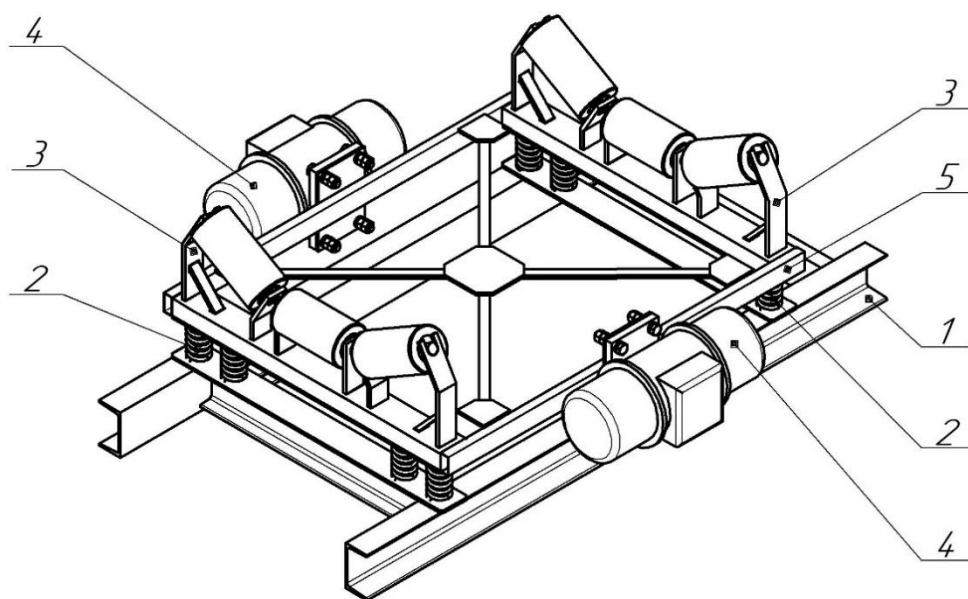


Рис. 4.7 – Вібруюча роликова опора стрічкового конвеєра

1 – рама; 2 – амортизатор; 3 – роликова опора; 4 – вібраційний мотор;
5 – проміжна рама.

4.4 Висновки

В ході промислових досліджень отримано наступні результати:

- розроблено методику проведення промислових досліджень за визначенням енергосилових параметрів роторного змішувача та конвеєра;
- розроблено методику оцінки ефективності роботи системи «роторний змішувач-конвеєр»;
- визначено енергосилові витрати роботи роторного змішувача в холостому ході, які 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 %;
- 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%;
- 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;
- встановлено недоліки в роботі роторного змішувача та запропоновано шляхи щодо його удосконалення.

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна наукова задача, що має важливе практичне значення по удосконаленню 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.

Основні наукові і практичні результати полягають в наступному:

1) Згідно проведеного аналізу роботи устаткування, яке застосовується для змішування металургійних шихтових матеріалів встановлено, що одним з можливих способів поліпшення її якості може бути застосована технічна система «роторний змішувач-конвеєр» горизонтально-направленої дії з наданням вібраційного впливу на конвеєрну стрічку;

2) Одержано аналітичні залежності розрахунків енерговитрат технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної, горизонтально-направленої дії, які дозволяють визначити навантаження і обґрунтувати раціональні параметри його силових елементів на стадії проектування;

3) Для змішувача горизонтально-направленої 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 рухаються разом з конвеєрною стрічкою можна вважати певним;

4) 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;

5) На основі експериментальних лабораторних досліджень одержано регресійні залежності технологічних показників технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» у вигляді лінійного полінома з урахуванням взаємного впливу варійованих параметрів і на їх основі визначено ступінь впливу кожного з факторів на продуктивність і якість змішування матеріалу;

6) На підставі одержаних математичних моделей встановлено, що найбільший вплив на якість змішування матеріалу має поєднання тросового та лопатевого роторів. Також встановлено, що для дослідної системи роторний змішувач-конвеєр, при постійних конструктивних та кінематичних параметрах стрічки конвеєра якість змішування прямо пропорційно залежить від висоти шару матеріалу;

7) В результаті експериментальних лабораторних досліджень встановлено, що раціональний режим для роботи системи «роторний змішувач-конвеєр» досягається при оптимальній висоті шару матеріалу, $H = 0,2$ м та частоті обертів валів ротору $\omega = 15 \text{ с}^{-1}$;

8) Достовірність отриманих експериментальних результатів обґрунтована достатньою кількістю дослідів, які визначались методами планування експериментів, а адекватність отриманих рівнянь перевірялась за критерієм Стюдента. Окрім цього 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 %;

9) Визначено ефективність підготовки суміші в технологічному процесі виробництва окатишів та з'ясовано, що застосування роторного змішувача в удосконаленій технологічній схемі підготовки окатишів до спікання дозволяє не менш як на 2,5% знизити вміст некондиційного класу по сирих окатишам без вібраційного впливу на матеріал та на 3,8% з ним;

10) Встановлено недоліки в роботі роторного змішувача та запропоновано шляхи щодо його удосконалення в сучасній технологічній схемі виробництва окатишів, а саме: першу секцію технічної системи «роторний змішу-

вач-конвеєр» виконати в вигляді молоткової дробарки для руйнування некондиційного шару продукту; в наступних секціях технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» виконати гнучкі елементи тросового ротору різної довжини та здійснити налаштування згідно позиції вібруючого ролика; створити мобільну вібруючу роликову опору конвеєрної стрічки;

11) Розроблено методики з визначення потужності приводу технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної, горизонтально-направленої дії, а також по вибору її раціональних конструктивних і режимних параметрів, які запроваджені і використовуються в інституті «Криворізька вища металургійна школа» і на підприємстві ТОВ «КВМШ плюс». На їх основі виконано необхідні розрахунки, що дозволили удосконалити модельний ряд роторних змішувачів типу СР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов М.: Машиностроение, 1973. 216 С.
2. Гусев Ю.И., Карасев И.Н., Кольман-Иванов Э.Э., Макаров Ю.И., Макевинин М.П., Рассказов Н.И. Конструирование и расчет машин химических производств. *Учебник для вузов*. М.: Машиностроение, 1985. 406 С.
3. Способ смешивания веществ и смеситель для его осуществления: пат. 2155632 РФ: МПК7 B01F3/18, 13/00. №99121487/12; заявл. 08.10.1999; опубл. 10.09.2000.
4. Смеситель сыпучих материалов.: пат. 2256493 РФ: МПК B01F11/00. №2004103198/15; заявл. 04.02.2004; опубл. 20.07.2005. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2256493C1_20050720.pdf
5. Змішувач шихтових матеріалів.: пат. 68612 Україна: МПК: B01F 9/00. опубл. 16.08.2004 URL: <http://uapatents.com/5-68612-zmishuvach-shikhtovikh-materialiv.html>
6. Змішувач сипких матеріалів.: пат. 85174 Україна: B01F 7/24, B01F 3/12, B01F 3/18. № u2013 06477; заявл. 24.05.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл.№ 21. URL: <http://uapatents.com/6-85174-zmishuvach-sipkikh-materialiv.html>
7. Бакин М.Н., Капранова А.Б., Верлока И.И. Исследование распределения сыпучих компонентов в рабочем объеме барабанно-ленточного смесителя // Фундаментальные исследования. 2014, № 5 (ч. 5), С. 928-933. URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10003288.
8. Спиральный змішувач сипких матеріалів.: пат. 117550 Україна: B01F 7/08, B01F 13/00, B65G 33/00. № u2017 01158; заявл. 08.02.2017; опубл. 26.06.2017, Бюл.№ 12. URL: <http://uapatents.com/5-117550-spiralniij-zmishuvach-sipkikh-materialiv.html>

9. Змішувач барабанний.: пат. 5978 Україна: 7 C22B1/14,C21B3/00. №2004031625; заявл. 05.03.2004; опубл. 15.04.2005, Бюл. № 4. URL: <http://uapatents.com/4-5978-zmishuvach-barabannijj.html>
- 10.Змішувач.: пат. 38856 Україна: 7 B01F9/06. № 2000116209; заявл. 02.11.2000; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4. URL: <http://uapatents.com/4-38856-zmishuvach.html>
- 11.Змішувач гвинтовий відцентровий.: пат. 75583 Україна: МПК B01F 7/08. № u2012 05325; заявл. 28.04.2012; опубл. 10.12.2012, Бюл.№ 23. URL: <http://uapatents.com/6-75583-zmishuvach-gvintovijj-vidcentrovijj.html>
- 12.Вертикальний гвинтовий змішувач.: пат. 64311 Україна: МПК B65G 33/26. №u201102468; заявл. 02.03.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл.№ 21. URL: <http://uapatents.com/2-64311-vertikalnijj-gvintovijj-zmishuvach.html>
- 13.Універсальний гвинтовий змішувач.: пат. 62658 Україна: МПК B01F 7/00. № u201101266; заявл. 04.02.2011; опубл. 12.09.2011, Бюл.№ 17. URL: <http://uapatents.com/3-62658-universalnijj-gvintovijj-zmishuvach.html>
- 14.Роторний змішувач з гнучким тросовим ротором.: пат. 47571. Україна: МПК B01F 13/00. № u200909165; заявл. 07.09.2009; надрук. 10.02.2010, Бюл.№ 3 URL: <http://uapatents.com/4-47571-rotornijj-zmishuvach-z-gnuchkim-trosovim-rotorom.html>
- 15.Планетарно-роторний змішувач.: пат. 3809. Україна: МПК 7 B01F9/00. № 2004032009; заявл. 18.03.2004; надрук. 15.12.2004, Бюл. №12. URL: <http://uapatents.com/2-3809-planetarno-rotornijj-zmishuvach.html>
- 16.Змішувач безперервної дії.: пат. 30412 Україна: МПК B01F 9/00. № u200712181; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.02.2008. URL: <http://uapatents.com/2-30412-zmishuvach-bezperervno-di.html>
- 17.Бытев Д.О., Зайцев А.И., Макаров Ю.И., Северцев В.А. Движение тонких слоев сыпучего материала по неподвижным поверхностям гравитационных смесителей и расходомеров. *Изд. вузов СССР. Химия и химическая технология.* 11, Т. 23. 1980. С. 1437-1441.

18. Иванец В.Н. Новые конструкции смесителей для многокомпонентных композиций. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1992. №1. С. 20-22.
19. Смесители для сыпучих и пастообразных материалов. Кат. М. *ЦИНТИ-химнефтемаш*, 1985. 78 С.
20. Иванец В. Н. Интенсификация процесса смешивания высокодисперсных материалов направленной организацией потоков: автореф. дис. доктора технических наук. Одесса: ОТИПП, 1989. 32 С.
21. Зайцев А.И. Смесители с разреженными потоками сыпучих материалов. Технология сыпучих материалов: *Тез. докл. Всесоюзн. конф.* Ярославль.: 1989. С. 78-81.
22. Деревякин Н.А. Конструкции вихревых аппаратов для процессов переработки сыпучих материалов. Разработка вихревых электромагнитных аппаратов для интенсификации технологических процессов: *тез. докл. Всесоюзн. конф.* Тамбов.: 1989. 17 С.
23. Першин В.Ф. Модель процесса смешения сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабана. *Порошковая металлургия*. 1986. № 10. С. 1-5.
24. Першин В.Ф. Методы расчета и новые конструкции машин барабанного типа для переработки сыпучих материалов: дис. доктора технических наук. Тамбов.: 1994. 431 с.
25. Засельский В.Й., Вититнев Ю.И., Учитель С.А. Конструкции смесителей и оценка эффективности их работы при подготовке металлургического сырья. *Теория и практика металлургии*. 2011. № 3-4. С. 40-45.
26. Засельский В.Й., Вититнев Ю.И., Учитель С.А. Разработка новых аппаратов для принудительного смешивания компонентов аглошихты. *Черная металлургия* 4 (1324). М.: 2010. - С. 72-76.
27. Rotary batch mixers [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. Електронні дані. Utica, NY 13502. Режим доступу: www.munsonmachinery.com (дата звернення 10.10.2019) Назва з екрана.

28. PlowBlend [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. Електронні дані. Illinois 60031. Режим доступу: www.eirichusa.com (дата звернення 11.10.2019) – Назва з екрана.
29. AJAX Continuous Mixers [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. Електронні дані. UK, BL2 2AR. Режим доступу: www.ajax.co.uk (дата звернення 11.10.2019) – Назва з екрана.
30. Продукция/Смесители [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. Електронні дані. Екатеринбург. Режим доступу: www.spidermash.ru (дата звернення 06.10.2019) Назва з екрана.
31. Vertical mixer/vertical twin-shaft mixer (HM) [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. Електронні дані. 33106 Paderborn Germany. Режим доступу: www.amixon.com (дата звернення 14.10.2019) Назва з екрана.
32. Засельский В.Й., Вититнев Ю.И., Учитель С.А. Совершенствование аппаратов для принудительного смешивания железосодержащих шихт *Материалы V-й Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании»*. 2009 В 2-х т. Т.1. С. 225-227.
33. Ладыгичев М.Г. и др. Сырье для черной металлургии: Справочное издание: В 2-х т. Т.1. Сырьевая база и производство окучкованного сырья (сырье, технологии, оборудование) М.: Машиностроение-1, 2001. 896 С.
34. Змішувач-гомогенізатор.: пат. 56676 Україна: МПК А(51)7В01F7/08. №u2002086737; заявл. 14.08. 2002; надрук. 15.05.2003, Бюл. № 5. – 5 с.: ил.
35. Гернет М.М. Курс теоретической механики: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и сокр. – М.: Высшая школа, 1981. 304 С.
36. иУчитель А.Д., Боклан Б.В., Донсков Е.Г., Засельский В.Й., Бондаренко В.И., Хомич И.Н., Тарановский В.В. Уточнение газодинамических параметров шихтовых материалов. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1982. №1. С. 13-17.
37. Стренк Ф. Перемешивание а аппараты с мешалками. Пер. с польск. под ред. Щупляка И. А. Л.: «Химия», 1975. 384 С.

38. Белай Г.Е., Дембовский В.В. и др. Организация металлургического эксперимента. *Учебное пособие для вузов*. М.: Металлургия, 1993. 256 С.
39. Бакланов Н.А. Перемешивание жидкостей. Л.: Химия, 1979. 64 С.
40. Бакин И.А. Разработка смесительного агрегата для переработки сыпучих материалов с небольшими добавками жидкости: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Кемерово.: 1998. 16 С.
41. Жуков А. Н. Разработка непрерывно действующего смесительного агрегата и исследование процесса приготовления сухих смесей при высоких соотношениях смешиваемых компонентов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Кемерово.: 2004. 16 С.
42. Бородулин Д. М. Разработка и исследование непрерывно действующего смесительного агрегата центробежного типа для получения сухих комбинированных продуктов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Кемерово.: 2003. 16 С.
43. Учитель О.Д., Засельський В.Й., Пополов Д.В., Засельський І.В. Удосконалення технології та обладнання агломераційного виробництва УЗ1 – Кривий Ріг.: Вид. Р. А. Козлов, 2018. – 184 С.
44. Большаков В.И., Учитель А.Д., Засельский В.Й., Пополов Д.В., Учитель С.А., Коноваленко В.В. Расчет металлургических машин. Оборудование обжиговых и агломерационных цехов. Кривой Рог.: 2012. 336 С.
45. Лукашин Н.Д., Кохан Л.С., Якушев А.М. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов. Академкнига. 2003. 456 с.
46. Засельский В.Й., Пополов Д.В., Засельский И.В. Промышленные исследования порталного смесителя-гомогенизатора. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 2/1(74). С. 20-23.
47. Ежегодник Большой Советской энциклопедии Выпуск 17-й. Главный редактор С. М. Ковалев. М.: Советская энциклопедия, 1973. 640 С.
48. Роторний змішувач з вібруючими роликами.: пат. 145404. Україна: МПК В01F 11/00, В01F 13/00. № u202003861; заявл. 26.06.2020; надрук. 10.12.2020, Бюл.№23.

49. Оборудование для приготовления силикатного кирпича [Электронный ресурс] // Eirich смесители, оборудование для помола, сушильная техника, Германия. 2013. Режим доступа до ресурсу: https://www.eirich.ru/fileadmin/user_upload/Eirich_Bilder/2.Branchen/3.Kalksandstein/KS1825_2_ru.pdf.
50. Uchitel A.D., Popolov D.V., Zaselskiy I.V. Determination of technological and power parameters of mixer-homogenizer. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 1. P. 158-162.
51. Федосенков Б. А. Разработка технологических способов и исследование процесса приготовления сухих пищевых композиций в смесительных агрегатах непрерывного действия: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Кемерово.: 1996. 17 с.
52. Ратников С. А. Разработка и исследование непрерывно действующего смесительного агрегата центробежного типа для получения сухих и увлажненных комбинированных продуктов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Кемерово, 2001. 16 С.
53. Засельський І.В. Розробка та створення порталного багатороторного змішувача для забезпечення умов попередньої підготовки залізовмісних відходів в аглошихті, автореф. дис. канд. техн. наук; Нац. металург. акад. України. Дніпропетровськ.: 2016. 20 С.
54. Швед С.В., Пополов Д.В., Засельский И.В. Оценка надежности порталного смесителя-гомогенизатора на основе расчета износа рабочего органа. *Металлург. и горноруд. пром-сть*. 2015. № 7. С. 57-61.
55. Пополов Д.В., Засельський І.В., Вититнев Ю.И. Перспективные направления совершенствования конструкций роторных смесителей непрерывного действия. *Международный научный журнал Acta Universitatis Pontica Euxinus, Специальный выпуск*. Днепропетровск-Варна.: 2015. Т. 2. С. 136-138.
56. Засельский В.Й., Пополов Д.В., Засельский И.В. Экспериментальные исследования по оптимизации параметров смесителя-гомогенизатора. *Нові*

технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. 2014. № 3-4. С. 33–39.

57. Бelay Г.Е., Дембовский В.В., Соценко О.В. Организация металлургического эксперимента – учеб. пособие [для вузов], под ред. В.В. Дембовского. М. : Металлургия, 1993. 256 с.
58. Custom On-Belt Mixing and Aeration Equipment [Електронний ресурс] // Custom Mixing & Aeration Equipment Manufacturing, Tube Bending & Fabrication. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.pekay.com/pdf/mixers.pdf>.
59. Воронов Е.М., Борисов В.Н. Исследование пыли и шламов металлургических заводов в агломерационном производстве. «Черная металлургия». Бюллетень института «Черметинформация». 1980. № 1.
60. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. - М.: Машиностроение. 1973. 216 С.
61. Бытев Д.О., Зайцев А.И., Макаров Ю.И., Северцев В.А. Движение тонких слоев сыпучего материала по неподвижным поверхностям гравитационных смесителей и расходомеров. Изд. вузов СССР. Химия и химическая технология. 11, Т. 23. 1980. С. 1437-1441.
62. Смеситель: а.с. 1667915. СССР: МКИ⁵ SU 5B01F7/04. № 4824085/26; заявл. 06.04.1990; надрук. 30.03.1992, Бюл. №12.
63. Лопасть смесителя: а.с. 1667915. СССР: МКИ⁵ SU SU 5B01F7/00. № 4644908/33; заявл. 01.02.1989; надрук. 07.08.1991, Бюл. №29.
64. Смеситель: пат. 2077942. РФ: МПК⁷ B01F15/00; № 94007664; заявл. 01.03.1994; опубл. 27.04.1997, Бюл. № 12.
65. Зубанов В.А., Чугунов М.И., Юдин Н.А. Механическое оборудование стекольных и шихтовых заводов. М.: Машиностроение, 1975. С. 120-125.
66. Карамзин В.Д. Техника и применение вибрирующего слоя. Киев: Наукова думка. 1977. 239 С.
67. Членов В.А., Михайлов В.И. Виброкипящий слой. М.: Наука, 1972. 343 С.

68. Зверев В.П. Разработка циркуляционных смесителей центробежного типа для получения комбинированных продуктов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Кемерово, 2003. 16 С.
69. Волков А.С. Разработка и исследование непрерывно действующего смешительного агрегата с направленной организацией движения материальных и воздушных потоков для получения сухих комбинированных продуктов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Кемерово, 2005. 17 С.
70. Сатоно И. Смешивание твердых тел. *Пуранто ко-гаку*. М.: 1972. 21 С.
71. Баруча-Рид А.Т. Элементы теории Марковских процессов и их приложения. М. : *Наука*, 1969. 511 С.
72. Ким В.С., Скачков В.В. Диспергирование и смешение в процессах производства переработки пластмасс. М.: *Химия*, 1988. 240 С.
73. Суркова Л.И., Макаров Ю.И. Метод расчета непрерывно-действующих барабанных смесителей. *Химическое и нефтяное машиностроение*. – 1972. № 11. С. 14-15.
74. Tamir A. Applications of Markov Chains in Chemical Engineering. *Elsevier publishers*, Amsterdam, 1998, 604 P.
75. Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация. *ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина*. Иваново. 2008. 116 С.
76. Рыжов П.А. Математическая статистика в горном деле. М.: Высшая школа, 1973. 287 С.
77. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента. Киев-Донецк: Вища школа, 1982. 120 С.
78. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. К.: Техника, 1975. 168 С.
79. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики учебник для студ. ВУЗов. М : Лань, 2002. 764 С.

80. Павловський М.А. Теоретична механіка – підручник для студ. ВУЗів. Київ: «Техніка», 2002. 510 С.
81. Левин М.З., Седуш В.Я. Механическое оборудование доменных цехов. К.: Высшая школа, 1970. 220 С.
82. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: учебник для машиностроительных специальностей ВУЗов. 12-е изд. испр.М.: Высшая школа, 2008. 408 С.
83. Мархель І.І. Деталі машин – навч. посібник. Київ: Алерта, 2005. 368 С.
84. Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В. Распределение времени пребывания частиц сыпучего материала в лопастном смесителе непрерывного действия. *Химическая промышленность сегодня*. № 3. 2009. С. 50-53.
85. Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств. М. : «Издательство Машиностроение-1», 2004. 120 С.
86. Учитель А.Д., Засельский В.И., Швед С.В., Засельский И.В. Экспериментальные исследования динамики вибромашины, работающей в режиме «биений». *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 3. С. 102–104.
87. Учитель А.Д., Засельский В.И., Швед С.В., Засельский И.В. Определение траекторного поля вибромашины с неоднородными и пространственными колебаниями рабочего органа при сортировке металлургической шихты *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 4. С. 114–118.
88. Гуливец А.А., Засельский И.В., Зайцев Г.Л., Федоренко К.В. Методика поиска решения творческих задач по созданию способов воздействия на материальные объекты. *Теорія та методика навчання фундаментальних дисциплін у вищій школі: Зб. наук. праць. Вип. V*. Кривий Ріг: Видавничий відділ НметАУ, 2008. С. 245 – 247.
89. Засельский В.И., Пополов Д.В., Засельский И.В. Пути совершенствования смесителей непрерывного, вертикально направленного действия при под-

- готовке вязко-пластичных материалов. *Сборник научных трудов. Качество минерального сырья*. Кривой Рог, 2014. С. 341-345.
90. Засельский В.И., Пополов Д.В., Засельский И.В. Промышленные исследования портального смесителя-гомогенизатора. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 2/1(74). С. 20-23.
 91. Вентцель В.С., Овчаров Л.А. Теория вероятности и ее инженерное приложение. учеб. пособие. М.: Высшая школа. 2000. 480 С.
 92. Рыжов П. А. Математическая статистика в горном деле. М.: Высшая школа, 1973. 287 С.
 93. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Засельський І.В., Шепеленко М.І. Експериментальні дослідження роботи портального багатороторного віброзмішувача-гомогенізатора безперервної вертикально направленої дії. *Загальнодержавний науково-технічний журнал "Теорія і практика металургії"*. Випуск 1 (118). 2019. С.41 - 48.
 94. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Засельський І.В., Шепеленко М.І. Обґрунтування вибору оптимальних параметрів портального багатороторного віброзмішувача-гомогенізатора безперервної вертикально направленої дії. *Матеріали III Міжнародна конференція "Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід"*. 12-14 листопада 2019 р., м. Дніпро-Амстердам. Дніпро. 2019. С.216-220.
 95. Засельський В.Й., Шепеленко М.І., Тодінг А.Р. Класифікація змішувачів безперервної дії для створення гомогенної суміші шихти. *Збірник матеріалів Всеукраїнської конференції молодих вчених "Молодь і наука. Практика інноваційного пошуку"*. 18 грудня 2019., м. Дніпро, Україна. Дніпро. 2019. С. 53-56.
 96. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Шепеленко М.І. Аналіз змішувачів безперервної дії роторного типу. *Збірник матеріалів Всеукраїнської конференції молодих вчених "Молодь і наука. Практика інноваційного пошуку"*. 18 грудня 2019., м.Дніпро, Україна. Дніпро. 2019. С. 56-59.

97. 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.
98. 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*, 2020.
99. 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*. Випуск 50. Кривий Ріг. 2020. С.45-50.
100. 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. 2020. P. 356-359.
101. Засельський В.Й., Пополов Д.В. С.В., Засельський І.В., Шепеленко М.І. Алгоритм розрахунку енергосилових витрат технічної системи «роторний змішувач-конвеєр». *Вісник КНУ*. Випуск 51. Кривий Ріг. 2020. С.24-29.
102. Засельський В.Й., Пополов Д.В., Шепеленко М.І. Алгоритм визначення енергосилових параметрів роторного змішувача. *Збірник матеріалів Всеукраїнської конференції молодих вчених "Молодь і наука. Практика інноваційного пошуку"*. 17 грудня 2020., м.Дніпро, Україна. Дніпро. 2020. - С. 67-71.
103. Popolov D., Shved S., Zaselskiy I., Pelykh I. Studying of movement kinematics of dynamically active sieve. *Mechanics and Mechanical Engineering*. no. 23 (1). 2019. P. 94-97.
104. Лялюк В.П., Шеремет В. А., Кекух А.В., Оторвин П.И., Писарь С.А., Учитель А.Д. Организация рационального дробления угольной шихты – путь к повышению качества кокса для доменной плавки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. № 2. С. 48-52.

105. Лялюк В.П., Шеремет В.А., Кекух А.В., Оторвин П.И., Писарь С.А., Учитель А.Д. Оценка степени однородности угольной шихты. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. №4. С. 18-21.
106. Справочник коксохимика: в 6 т. / общ. ред. Борисова П. Н., Шаповала Ю. Г. Харьков: Издательский Дом «ИНЖЭК», 2010. Т. 1: Угли для коксования. Обогащение углей. Подготовка углей к коксованию. 536 С.
107. Zasel'skiy, V.I., Popolov D.V., Zaytsev G.L., Sagalay D.V. Steeply Inclined Vibrational Screen in Coal Preparation at Coke Plants. *Coke and Chemistry*. 2020. 63(7). P. 351-355.
108. Popolov, D.V. Investigation of repressed burden sintering process. *Metalurgical and Mining Industry*. 2(6). 2010. P. 434–437.
109. Булгаков В.Г., Харламов А.И. Оригинальное решение проблемы дефицита шихты. *2-я межвузовская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых Волгоградской области*. Волгоград, 27 ноября - 1 декабря 1995; Сб. науч. статей. Вып.5. Волгоград. 1997. С. 11-14.
110. 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>.
111. 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.4. P. 30-35.

ДОДАТКИ

Додаток А. Розрахунок програмою «Змішувач-2»

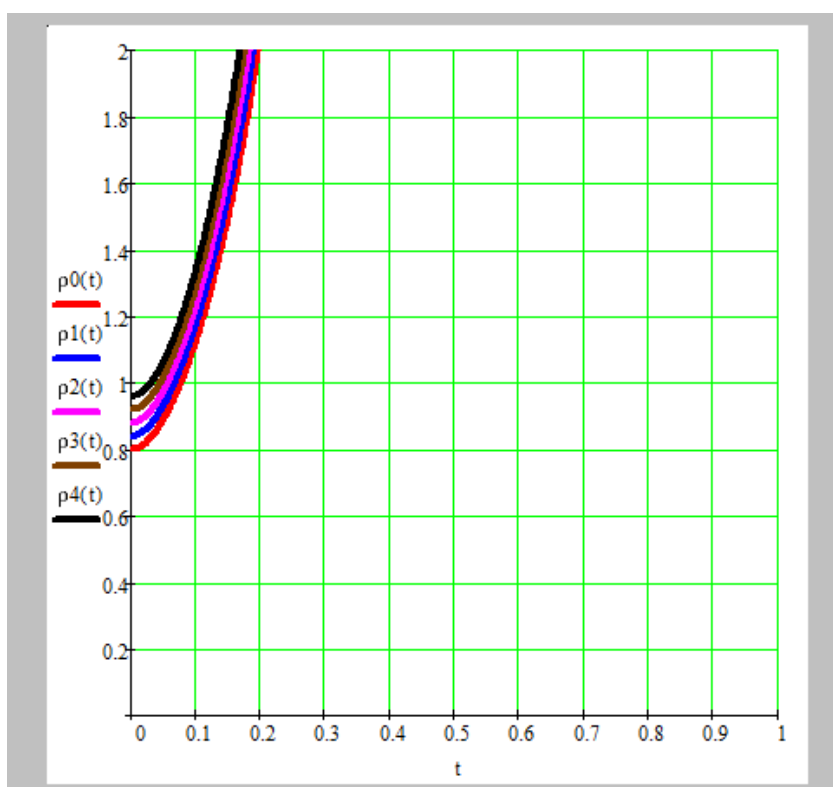
Скольжение частиц по кривым лопаткам	$g := 9.81$
Задаемся наружным радиусом ротора с лопатками, м	$R1 := 1$
Задаемся коэффициентом крупности ротора с лопатками (отношение высоты слоя материала к наружному радиусу ротора с лопатками)	$p := 0.2$
Задаемся высотой слоя материала, м	$h1 := p \cdot R1$ $h1 = 0.2$
Задаемся коэффициентом трения частиц о поверхность лопатки	$k := 0.4$
Задаемся скоростью конвейера с материалом, м/с	$V := 10$
Задаемся количеством частиц на лопатке, начиная от корневой с равномерным распределением по длине лопатки	$n := 5$
Задаемся промежутком между частицами (дискретностью), м	$d := \frac{h1}{n}$

Задаемся функцией угла поворота равномерно вращающегося ротора с лопатками, рад

$$\phi(t) := \left(\phi_0 + \frac{V}{R1} \cdot t \right)$$

$t := 0, 0.001 \dots 1$ $x := \phi_0, \phi_0 + 0.001 \dots \phi_{cr}$ $y := 0, 0.001 \dots R1$

Зависимость радиуса положения частицы от времени при начальном угле положения лопатки, считая от горизонта (фи начальное).



Определяем угол (1.2) опорного сектора ротора с лопатками, рад

$$\alpha_0 := 2 \cdot \arccos\left(\frac{R1 - h1}{R1}\right)$$

Начальный угол скольжения частиц по поверхности лопаток, рад (Это положение полного выхода лопатки на поверхность массива сыпучено материала)

$$\phi_0 := -0.5 \cdot \alpha_0$$

$$\frac{\phi_0}{\text{deg}} = -36.87$$

$$.3 + 0.1 \cdot \text{FRAME}$$

$$.R1 - h1 + 4 \cdot d = 0.96$$

$$.R1 - h1 = 0.8$$

$$.d = 0.04$$

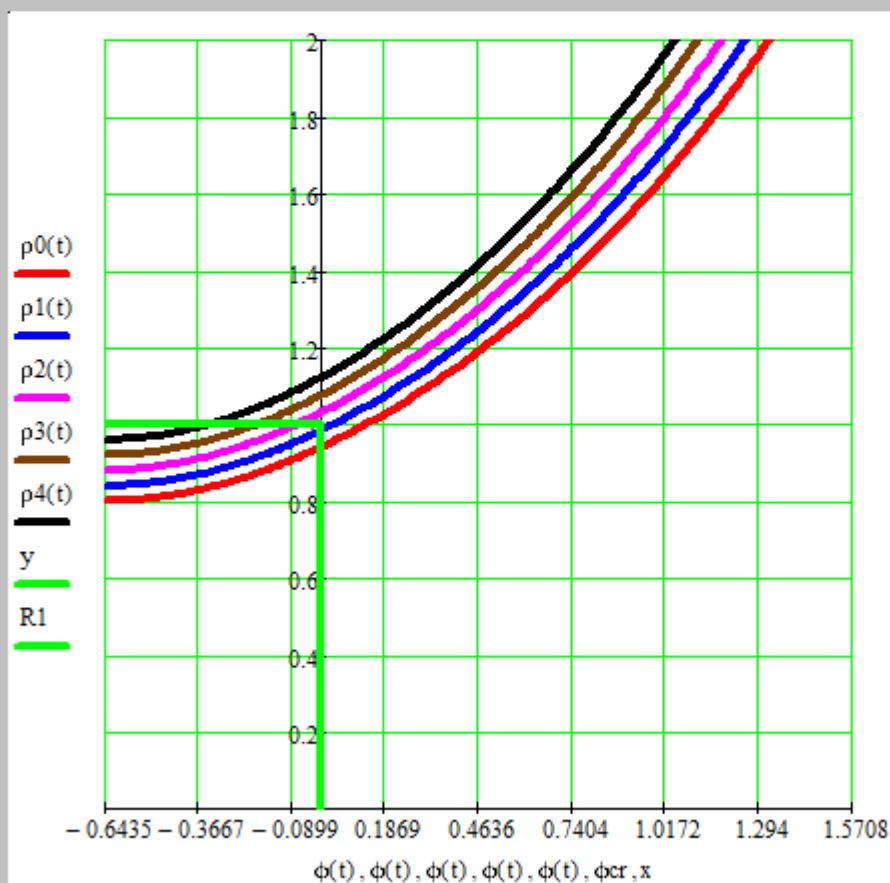
$$\frac{\phi(0.6)}{\text{deg}} = 306.905$$

$$T(\phi) := \frac{(\phi - \phi_0)}{V} \cdot R1$$

$$T(60 \cdot \text{deg}) = 0.169$$

$$.p0(T(60 \cdot \text{deg})) = 1.678$$

Зависимость радиуса положения частицы на лопатке от угла ее поворота при начальном угле положения лопатки, считая от горизонта (фи начальное). На графике выделена рамкой область, в которой частицы находятся на поверхности лопатки за время ее поворота на .фсг градусов

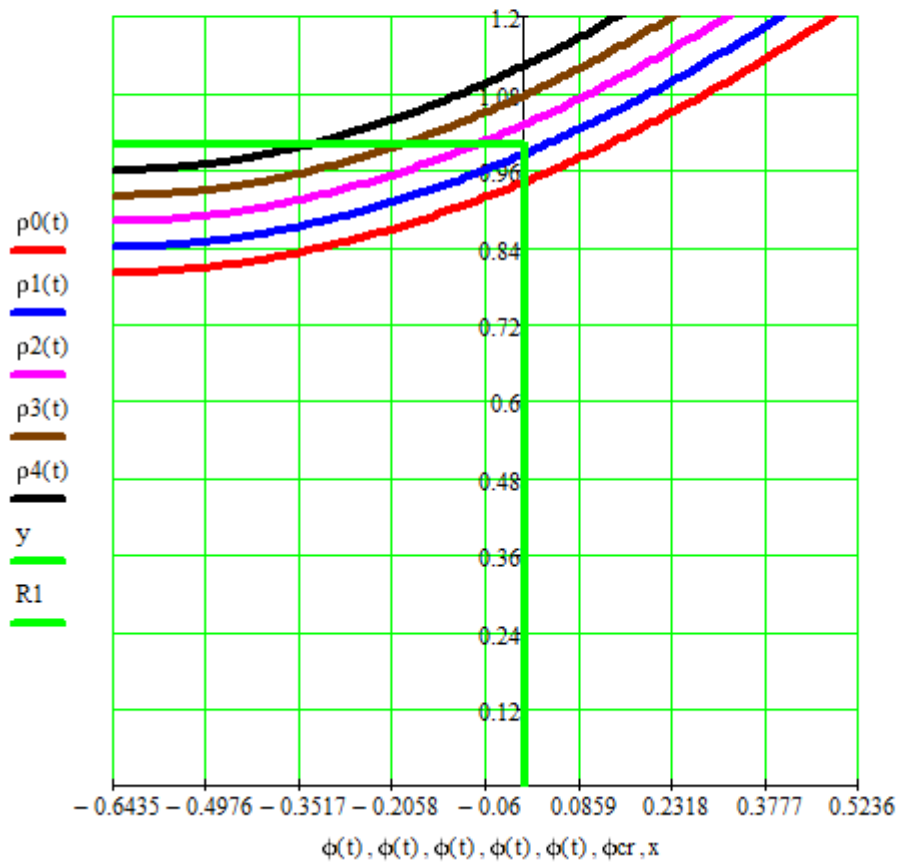


Допустимый угол положения (угловая координата) для лопатки с вылетающей с нее самой медленной частицей составляет 0 градусов. В таком случае, предельный угол отрыва частиц составляет:

$$\phi_{cr} := 0$$

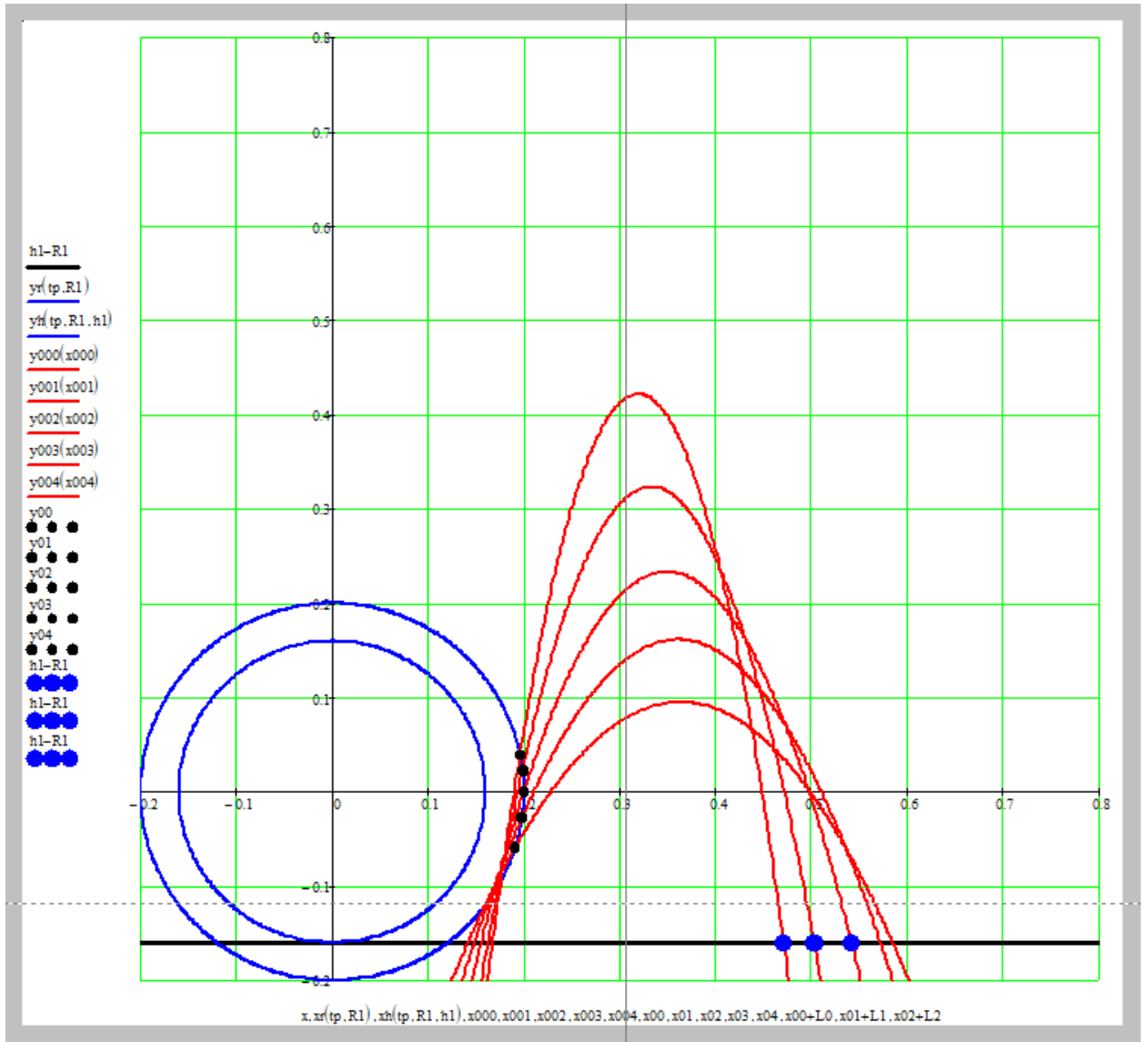
$$T_{cr} := \frac{(0 - \phi_0)}{V} \cdot R1$$

$$T_{cr} = 0.064$$



$$p = 0.2$$

$$V = 10$$



Додаток Б. Значення коефіцієнту варіації при різних частотах обертів із використанням лопастного ротору

№ Пробы	Частота оборотів																			
	132 Об/хв				138 Об/хв				148 Об/хв				154 Об/хв				164 Об/хв			
	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.
1	8,71	7,84	8,62	8,39	9,2	9,36	8,68	9,08	8,23	8,65	8,78	8,553333	8,52	8,78	8,55	8,616667	9,15	8,95	9,57	9,223333
2	9,25	8,11	9,1	8,82	8,41	8,54	8,88	8,61	7,92	8,35	9,12	8,463333	9,8	9,54	9,58	9,64	8,58	9,96	8,15	8,896667
3	10,9	11,2	9,6	10,56667	9,98	9,25	9,68	9,636667	10,3	9,45	8,88	9,543333	9,7	9,26	10,2	9,72	9,35	8,4	8,88	8,876667
4	8,38	8,4	10,2	8,993333	7,98	10,33	8,87	9,06	8,5	9,24	9,84	9,193333	8,92	8,78	8,25	8,65	8,58	8,05	9,41	8,68
5	8,53	9,13	8,5	8,72	10,91	9,55	8,69	9,716667	7,89	10,21	8,38	8,826667	9,41	10,51	9,15	9,69	10,4	9,94	8,55	9,63
6	9,65	10,2	9,1	9,65	8,54	8,92	9,2	8,886667	10,2	9,9	9,72	9,94	10,82	8,36	9,45	9,543333	8,89	10,12	8,86	9,29
7	7,64	8,7	8,4	8,246667	9,56	7,68	9,12	8,786667	8,42	8,29	8,12	8,276667	8,12	9,14	8,55	8,603333	8,52	8,59	9,01	8,706667
8	9,32	8,15	7,62	8,363333	9,91	8,05	8,55	8,836667	8,7	9,84	9,15	9,23	7,65	8,89	8,15	8,23	10,36	9,57	8,45	9,46
9	11,12	9,91	8,94	9,99	8,15	8,58	8,14	8,29	9,32	10,57	10,2	10,03	10,65	8,65	8,95	9,416667	9,92	8,88	8,68	9,16
10	9,31	8,81	10,1	9,406667	9,26	9,54	9,44	9,413333	9,26	8,2	9,48	8,98	9,7	7,34	9,56	8,866667	8,65	9,14	9,18	8,99
Середнє значення				9,114667				9,031667				9,103667				9,097667				9,091333

Додаток В. Значення коефіцієнту варіації при різних частотах обертів із використанням тросового ротору

№ Пробы	Частота оборотів																			
	132 Об/хв				138 Об/хв				148 Об/хв				154 Об/хв				164 Об/хв			
	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.
1	8,41	9,25	9,11	8,923333	8,87	8,25	10,42	9,18	8,82	8,15	8,73	8,56667	8,31	9,75	8,84	8,96667	8,42	9,14	9,52	9,02667
2	8,14	8,48	9,54	8,72	7,56	8,96	8,63	8,383333	9,35	9,85	9,57	9,59	9,03	8,45	8,72	8,733333	9,32	8,86	8,54	8,90667
3	10,4	8,2	10,22	9,60667	9,81	7,98	8,55	8,78	9,91	8,36	9,14	9,13667	10,8	7,32	9,54	9,22	8,44	9,47	9,52	9,143333
4	9,21	9,45	8,92	9,193333	8,82	8,35	7,88	8,35	7,32	8,54	10,14	8,66667	8,87	9,29	10,52	9,56	8,33	9,52	8,77	8,873333
5	8,56	9,25	7,35	8,38667	9,18	7,82	8,85	8,61667	7,85	9,37	8,14	8,453333	8,45	8,54	9,92	8,97	8,72	8,54	8,55	8,603333
6	10,54	10,64	9,66	10,28	9,58	10,4	9,14	9,70667	11,3	11,14	9,58	10,67333	9,65	10,85	8,85	9,783333	9,14	7,87	9,56	8,85667
7	8,25	8,8	8,11	8,38667	8,38	9,92	9,65	9,31667	9,25	7,82	8,56	8,543333	10,2	8,12	8,57	8,963333	7,27	10,71	9,61	9,19667
8	9,84	9,52	8,44	9,26667	10,4	8,58	10,23	9,73667	8,45	8,8	8,56	8,603333	8,85	9,5	7,64	8,663333	7,59	9,82	7,89	8,433333
9	9,9	10,58	9,82	10,1	9,15	9,58	8,94	9,223333	9,53	9,75	9,74	9,673333	9,7	11,07	9,91	10,2267	10,32	9,11	10,23	9,88667
10	8,86	7,23	8,14	8,07667	8,88	9,15	8,59	8,873333	9,5	8,54	8,54	8,86	8,54	9,28	10,57	9,463333	9,22	9,89	9,34	9,483333
Середнє значення				9,094				9,01667				9,07667				9,255				9,041

Додаток Г. Значення коефіцієнту варіації при різних частотах обертів із використанням тросового і лопастного роторів

№ Пробы	Частота обертів																			
	132 Об/хв				138 Об/хв				148 Об/хв				154 Об/хв				164 Об/хв			
	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.
1	9,58	10,2	8,89	9,55667	8,92	9,68	8,56	9,05333	10,54	9,68	9,88	10,0333	8,48	9,25	10,1	9,27667	8,95	9,35	9,57	9,29
2	9,67	9,96	8,71	9,44667	9,27	9,14	9,58	9,33	9,34	8,89	9,14	9,12333	8,64	8,87	9,64	9,05	9,65	9,15	8,58	9,12667
3	10,3	8,85	8,85	9,33333	9,14	8,89	9,64	9,22333	9,78	9,15	8,54	9,15667	9,64	9,54	8,58	9,25333	9,14	8,78	9,24	9,05333
4	8,89	8,96	8,56	8,80333	8,63	8,6	8,98	8,73667	9,25	9,25	8,57	9,02333	9,37	8,96	8,64	8,99	9,73	10,64	8,67	9,68
5	8,54	9,24	8,57	8,78333	9,59	10,58	9,58	9,91667	10,44	9,88	9,45	9,92333	10,32	9,94	9,34	9,86667	10,47	8,94	9,14	9,51667
6	9,65	9,68	8,96	9,43	10,54	9,36	10,69	10,1967	9,85	10,24	8,15	9,41333	9,57	10,54	9,64	9,91667	8,57	9,65	10,58	9,6
7	8,69	9,54	9,47	9,23333	8,92	9,57	8,96	9,15	10,18	9,58	10,3	10,02	8,56	9,34	8,75	8,88333	9,32	10,31	9,35	9,66
8	9,24	9,57	9,47	9,42667	10,2	8,87	9,57	9,54667	9,9	9,68	9,25	9,61	8,24	9,78	10,3	9,44	10,56	9,21	9,84	9,87
9	8,69	8,89	9,57	9,05	9,89	9,87	9,88	9,88	8,63	8,14	8,45	8,40667	9,67	8,47	9,65	9,26333	9,27	8,78	9,35	9,13333
10	9,24	9,84	9,68	9,58667	9,18	9,89	8,89	9,32	9,59	8,86	9,11	9,18667	9,25	9,58	8,87	9,23333	8,62	9,45	9,65	9,24
Середнє значення				9,265				9,43533				9,38967				9,31733				9,417

Додаток Е. Значення коефіцієнту варіації при різних частотах обертів із використанням двох тросових і двох лопастних роторів

№ Пробы	Частота обертів																			
	132 Об/хв				138 Об/хв				148 Об/хв				154 Об/хв				164 Об/хв			
	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.	Експ. 1	Експ. 2	Експ. 3	Ср. знач.
1	9,12	9,52	9,87	9,50333	9,57	9,56	8,96	9,36333	10,2	9,48	9,85	9,84333	8,85	8,97	9,67	9,16333	9,65	10,21	9,65	9,83667
2	8,51	8,95	10,2	9,22	9,78	10,21	9,51	9,83333	8,95	8,29	8,48	8,57333	9,27	8,82	8,88	8,99	9,35	9,85	9,51	9,57
3	11,2	10,14	8,97	10,1033	10,45	10,38	9,55	10,1267	9,2	9,61	8,64	9,15	10,4	9,81	9,94	10,05	9,45	9,56	9,25	9,42
4	8,41	9,36	8,88	8,88333	11,02	9,87	10,2	10,3633	7,94	9,85	9,64	9,14333	9,6	9,93	8,96	9,49667	10,64	8,67	9,35	9,55333
5	9,2	10,62	9,95	9,92333	10,12	9,56	8,89	9,52333	9,25	10,18	9,37	9,6	8,89	10,91	9,94	9,91333	8,94	9,14	9,58	9,22
6	9,61	9,27	9,64	9,50667	9,12	8,87	9,21	9,06667	10,84	9,9	10,32	10,3533	9,25	8,58	10,54	9,45667	9,65	10,58	10,35	10,1933
7	10,3	9,25	9,52	9,69	9,52	9,26	9,56	9,44667	8,62	8,63	8,36	8,53667	8,45	9,92	9,34	9,23667	10,31	9,35	9,65	9,77
8	8,59	9,38	9,31	9,09333	8,89	8,57	9,36	8,94	8,95	9,59	9,68	9,40667	9,53	10,3	9,78	9,87	9,21	9,84	8,98	9,34333
9	9,65	11,02	9,84	10,17	9,45	8,84	10,34	9,54333	9,65	10,54	9,75	9,98	9,5	9,31	9,25	9,35333	8,78	9,35	9,75	9,29333
10	8,95	9,36	8,89	9,06667	10,22	9,95	9,49	9,88667	9,84	8,92	9,85	9,53667	8,68	10,42	10,44	9,84667	9,45	9,65	10,37	9,82333
Середнє значення				9,516				9,60933				9,41233				9,53767				9,60233

Додаток Є. АКТ про використання дисертаційної роботи ТОВ «КВМШ-плюс» (м. Кривий Ріг)

ЗАТВЕРЖУЮ

Директор

ТОВ «КВМШ-плюс»

С.О. Учитель

« 15 » листопада 20 21 р.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
аспіранта Шепеленко Марії Іванівни
на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня доктор філософії

Представники ТОВ «КВМШ-плюс»: головний конструктор Смородова І.В. та ведучий конструктор Тукало О.І., склали цей акт про те, що при роботі технічної схеми «роторний змішувач-конвеєр» для умов ПАТ «ЦГЗК» Кривий Ріг використовувались та впроваджувались дослідження дисертаційної роботи аспіранта Шепеленко М.І., а саме:

- методика з визначення потужності приводу технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної, горизонтально-направленої дії;
- комп'ютерна програма «Змішувач-2», 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;
- рекомендації по вибору раціональних конструктивних і режимних параметрів, які впливають на якість змішування.

На основі вказаних даних виконані необхідні розрахунки, що дозволили удосконалити модельний ряд роторних змішувачів типу СР.

Головний конструктор

Смородова І.В.

Ведучий конструктор

Тукало О.І.

**Додаток Ж. Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи
на ДП КВМШ (м. Кривий Ріг)**

ДОВІДКА
про використання результатів дисертаційної роботи
аспіранта Шепеленко М.І.
на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня доктор філософії

Видана аспіранту Шепеленко Марія Іванівні на підставі, того що результати її дисертаційного дослідження на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня доктор філософії впровадженні та застосовувались державним підприємством «Криворізька вища металургійна школа» при удосконаленні технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» безперервної, горизонтально-направленої дії з метою поліпшення якості підготовки шихтової суміші для умов ПАТ «ЦГЗК», а саме:

- аналіз характеру руху частинок матеріалу після сходу з лопаток ротора, що рівномірно обертається, у горизонтальній площині псевдов'язкого середовища;
- рекомендації по вибору раціональних конструктивних та кінематичних параметрів;
- методика з розрахунку енергосилових параметрів технічної системи.

Впровадження результатів на підприємстві «Криворізька вища металургійна школа» дало змогу удосконалити високопродуктивну технічну систему «роторний змішувач-конвеєр» для умов ПАТ «ЦГЗК».

Директор
ДП «Криворізька вища
металургійна школа»



Учитель О.Д.

**Додаток 3. Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи
в навчальний процес Криворізького національного університету (м.
Кривий Ріг)**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Криворізького
національного університету



Моркун В.С.
2021 р.

ДОВІДКА

**про використання результатів дисертаційної роботи аспіранта
Шепеленко М.І. у навчальному процесі**

Результати дисертаційної роботи аспіранта Шепеленко Марії Іванівни використовуються у навчальному процесі Криворізького національного університету на кафедрі Гірничих машин та обладнання при підготовці здобувачів за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування при виконанні кваліфікаційних робіт магістра.

Завідувач кафедри ГМО,
канд. техн. наук, доц

Хруцький А.О.