Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

кафедра металургійного обладнання
(повна назва кафедри)

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

На тему Аналіз режимів роботи вузлів механізму нахилу міксера з метою підвищення їхньої довговічності

Виконав: магістрант групи 8.1334

Скрипка Р.С.
(ПІБ) (підпис)

спеціальності

133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма
Металургійне обладнання
(шифр і назва)

Керівник Гречаний О.М.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Н.контроль Васильченко Т.О.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2025 року

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра металургійного обладнання

Рівень вищої освіти магістр
(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Спеціалізація
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Металургійне обладнання
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедрою А.О. Власов

_____

“____” _____20___ року

Завдання
до випускної кваліфікаційної роботи магістра

Скрипки Родіона Сергійовича
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Аналіз режимів роботи вузлів механізму нахилу міксера з метою підвищення їхньої довговічності

керівник кваліфікаційної роботи Ph.D., доцент Гречаний О.М., затверджені наказом вищого навчального закладу від “27“ лютого 2025 року № 319-с.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 11 грудня 2025 року.
3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи техніко-економічні показники роботи мартенівського цеху
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Огляд науково-технічних рішень удосконалення обладнання для збереження рідкого чавуну та обґрунтування обраного напряму роботи; 2. Розрахункова частина; 3. Дослідно-експериментальна частина; 4. Охорона праці та техногенна безпека в галузі. Загальні висновки та рекомендації
5. Перелік графічного матеріалу (плакати та кресленики): 1. Міксер стаціонарний 1300 т – 2А1; 2. Механізм нахилу - 1А1; 3. 3. Рейкова коробка – 1А1; 4. Деталіровка (кришка роликоопори, вісь роликоопори, рейка) – 1А1; 5. Кореляційний аналіз (плакат) – 1А1; 6. Результати дослідження впливу кута повороту міксера на зусилля в рейці (плакат) – 1А1; 7. Технічні засоби захисту – 1А1

6. Консультанти кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Гречаний О.М., Ph.D., доцент		
2	Гречаний О.М., Ph.D., доцент		
3	Гречаний О.М., Ph.D., доцент		
4	Гречаний О.М., Ph.D., доцент		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційої роботи	Примітки
1	Збір матеріалу на кваліфікаційну роботу	29.05.2025 – 25.06.2025	
2	Групування та аналіз зібраного матеріалу. Уточнення завдань кваліфікаційної роботи	01.09.2025 – 17.09.2025	
3	Виконання теоретичної частини кваліфікаційної роботи	18.09.2025 – 18.10.2025	
4	Виконання графічної частини кваліфікаційної роботи	19.10.2025 – 19.11.2025	
5	Написання та оформлення пояснювальної записки	20.11.2025 – 30.11.2025	
6	Перевірка кваліфікаційної роботи консультантами	01.12.2025 – 03.12.2025	
7	Попередній захист	09.12.2025	
8	Переплітання пояснювальної записки	Згідно з графіком	
9	Захист	Згідно з графіком	

Здобувач _____ Скрипка Р.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційої роботи _____ Гречаний О.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Скрипка Р.С. Аналіз режимів роботи вузлів механізму нахилу міксера з метою підвищення їхньої довговічності

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування, науковий керівник О. М. Гречаний. Запорізький національний університет, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра металургійного обладнання, 2025.

Виконано конструктивний аналіз механізмів нахилу стаціонарного міксеру, проаналізовані переваги та недоліки існуючих технічних рішень. Запропоновано варіант удосконалення вузла рейкової коробки механізму нахилу. Проведено теоретичне та експериментальне визначення зусиль в рейці в залежності від кута нахилу. Розроблено спрощену математичну модель, що має достатньо високу точність визначення зусиль в рейці та низьке середньоквадратичне відхилення.

Ключові слова: СТАЦІОНАРНИЙ МІКСЕР, РЕЙКОВА КОРОБКА, ПЕРЕКИДНИЙ МОМЕНТ, ТЕРТЯ-КОЧЕННЯ, КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ.

ABSTRACT

Skrypka R. S. Analysis o f operating modes o f mixer tilt mechanism components to increase their durability

Qualification final work for obtaining a higher education degree of a master's degree in specialty 133 - Industrial engineering, scientific adviser O.M. Hrechanyi. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebni, Department of Metallurgical Equipment, 2025.

A constructive analysis of the tilting mechanisms of a stationary mixer was performed, the advantages and disadvantages of existing technical solutions were analyzed. A variant of improving the rail box assembly of the tilting mechanism was proposed. Theoretical and experimental determination of the forces in the rail depending on the angle of inclination was carried out. A simplified mathematical model was developed that has a sufficiently high accuracy of determining the forces in the rail and a low standard deviation.

Keywords: STATIONARY MIXER, RACK BOX, OVERTURN MOMENT, FRICTION-ROLLING, CORRELATION ANALYSIS

Зміст

Вступ 7
1 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ РІДКОГО ЧАВУНУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ 9
1.1 Опис технологічного процесу та вантажопотоків мартенівському цеху з визначенням в ньому місця стаціонарного міксера 9
1.2 Аналіз особливостей конструктивного виконання окремих вузлів міксера для збереження рідкого чавуну 14
1.3 Аналіз стану питання надійності роботи механізму повороту міксера на підґрунті літературного огляду на патентного пошуку 22
2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА 30
2.1 Конструктивне обґрунтування запропонованого удосконалення рейкової коробки механізму нахилу міксера 30
2.2 Теоретичне визначення перекидних моментів, що створюються від ваги рідкого метала 40
2.3 Теоретичне визначення перекидних моментів, що створюються вагою порожнього міксера 46
2.4 Теоретичне визначення моментів, що створюються від ваги рухомих роликових обойм 47
2.5 Теоретичне визначення моментів від тертя та тертя-кочення в роликових опорах та зусиль. Визначення зусиль, що діють на рейку 48
3 ДОСЛІДНО–ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА 55
3.1 Методика проведення досліджень 55
3.2 Обробка результатів проведення експерименту 57
3.3 Кореляційний аналіз результату проведення експерименту 60
3.4 Розробка спрощеної математичної моделі залежності зусиль в рейці від кута нахилу міксера 66
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА В ГАЛУЗІ 70

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів міксерного відділення мартенівського цеху 70
4.2 Визначення заходів та обладнання для нівелювання впливу виявлених шкідливих виробничих факторів 71
4.3 Дослідження засобів захисту від тепла 77
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ 84
ДОДАТКИ 89

Вступ

На металургійних підприємствах повного циклу широке застосування отримали стаціонарні міксери, основним призначенням яких є формування необхідного резерву рідкого чавуну. Одним із ключових елементів їх конструкції виступає механізм нахилу, що забезпечує поворот міксера під час зливання чавуну в чавуновозні ковші.

До механізмів нахилу висувають низку підвищених вимог, серед яких:

- з огляду на відповідальність операції – висока експлуатаційна надійність;
- простота та технологічність конструкції;
- зручність і безпечність обслуговування та ремонтних робіт;
- автоматичне повернення міксера у вихідне положення в аварійних ситуаціях.

Надійність усього міксера значною мірою залежить від працездатності механізму нахилу, оскільки саме він забезпечує безпечне маніпулювання агрегатом, що містить великі об’єми розплавленого металу. У світовій і вітчизняній практиці запропоновано низку конструктивних рішень, спрямованих на підвищення надійності цього вузла, проте кожне з них має свої специфічні обмеження та недоліки.

Враховуючи високу відповідальність агрегату, до розрахунку навантажень, потужності приводу та міцності елементів механізму нахилу висувають особливо жорсткі вимоги. Під час роботи привод механізму формує крутний момент, величина якого визначається сумарною дією таких складових:

- моменту від ваги рідкого чавуну та порожнього міксера;
- моменту від ваги рухомих елементів роликових опор;
- сил тертя в роликових обоймах;
- динамічних складових, що виникають у період несталого руху приводу.

З огляду на комплексність дії навантажень та необхідність забезпечення високого рівня безпеки, механізм нахилу потребує подальшого удосконалення

та уточнення методик розрахунку діючих сил і моментів. Саме тому вибраний напрям дослідження є актуальним і відповідає сучасним вимогам до підвищення надійності металургійного обладнання.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження роботи механізму нахилу стаціонарного міксера та вдосконалення його конструкції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проведення аналізу раніше проведених досліджень в питаннях вдосконалення конструкції механізму нахилу з метою підвищення надійності його роботи;
- теоретичне визначення діючих навантажень на роликові опори.
- теоретичне визначення зусиль діючих на рейку.
- експериментальне визначення зусиль в рейці в залежності від кута нахилу міксера.
- побудова спрощеної математичної моделі залежності зусиль в рейці від кута нахилу міксера.

Предмет дослідження – конструктивні параметри механізма нахилу стаціонарного міксера та навантаження, що діють на його основні вузли.

Об'єкт дослідження – рейкова коробка механізму нахилу стаціонарного міксеру ємністю 1300 т.

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи доповідалися на: 2nd International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity Athens: International Scientific Unity, 2025. Опубліковано тези доповіді та наукова стаття.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи включає 97 сторінок, у тому числі 83 сторінки основного тексту, на яких 26 рисунків, 11 таблиць, 51 найменування використаних джерел на 5 сторінках, 8 додатків.

Робота виконана на кафедрі металургійного обладнання, інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні, Запорізького національного університету.

1 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ РІДКОГО ЧАВУНУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ

1.1 Опис технологічного процесу та вантажопотоків мартенівському цеху з визначенням в ньому місця стаціонарного міксера

Мартенівський процес є традиційною технологією виробництва сталі у стаціонарних регенеративних печах (рис.1.1, 1.2) [1], де отримують сталь із заданим хімічним складом та властивостями шляхом плавлення і рафінування залізовмісних матеріалів. Основа процесу – окиснювальна плавка чавуну, сталевого брухту, залізняку та флюсів, що супроводжується складними фізико-хімічними реакціями між рідким металом, шлаком та газовою атмосферою печі [2]. Саме ці процеси забезпечують очищення металу від домішок, коригування складу і формування необхідної структури сталі.



Рисунок 1.1 – Мартенівська піч Криворізького металургійного заводі [1]



Рисунок 1.2 – Розливання сталі на мартенівській печі металургійного комбінату ПАТ «Запоріжсталь» [1]

У загальному циклі чорної металургії мартенівське виробництво займає проміжну позицію: після доменного переділу, де виготовляється чавун, і перед прокатним виробництвом, де сталь перетворюється у готові зливки та заготовки [3, 4]. Завдяки гнучкості, можливості використання широкої номенклатури сировини та здатності до регулювання температурно-хімічного режиму мартенівський процес тривалий час залишався основним способом виплавки сталі. Важливою його перевагою була можливість використовувати значні обсяги сталевого лому, що становив приблизно половину маси шихти [5].

Сучасний мартенівський цех (рис.1.3) складається з кількох спеціалізованих відділень, з окремими функціями у загальному технологічному ланцюзі: підготовку шихтових матеріалів, їх транспортування, проведення плавки, розливання сталі та обслуговування виливних форм. Кожне відділення має характерне обладнання, від ефективності роботи якого залежить ритмічність роботи всієї сталеплавильної системи [6].

Шихтовий двір забезпечує приймання, сортування, тимчасове зберігання та підготовку твердих компонентів шихти – брухту, флюсів, заправних

матеріалів, залізняку.

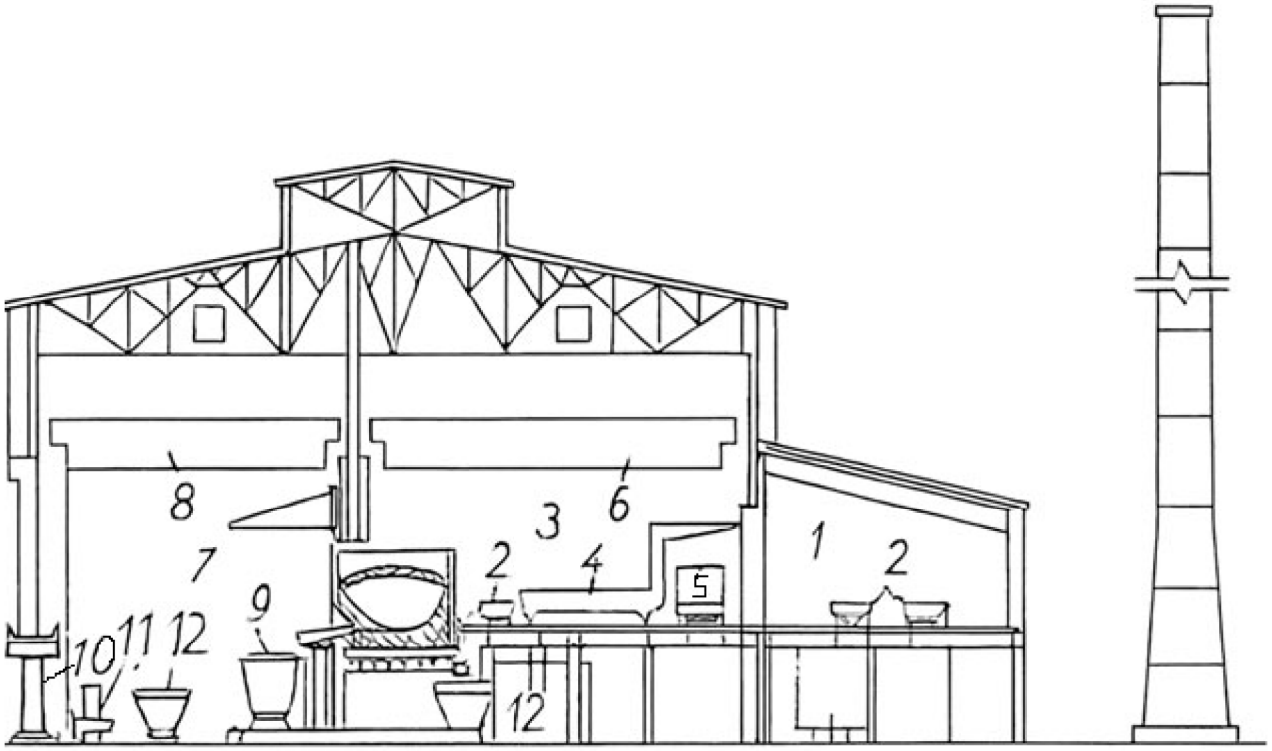


Рисунок 1.3 – Поперечний розріз головної будівлі мартенівського цеху [6]: 1 – шихтове відділення (відкрилок); 2 – склад з потягами мульд; 3 – основний (пічний) проліт; 4 – завалочна машина (підлгова); 5 – ківш для перевезення чавуну; 6 – заливальний кран мостового типу; 7 – проліт (розливний); 8 – кран розливний мостового типу; 9 – сталерозливний ківш; 10 – майданчик; 11 – виливниці в складі залізничного потягу; 12 – ковші для переміщення шлаку

До основного обладнання шихтового двору відноситься:

- мостові магнітні крани – застосовуються для переміщення великих шматків сталевого брухту та завдяки електромагнітам дозволяють швидко формувати партії матеріалів;
- грейферні крани – використовуються для сипких або нерегулярних матеріалів (рудних дрібняків, флюсів), забезпечують точніше дозування;
- мульди та платформні візки – основний засіб подачі шихти до печей у цехах з рейковою транспортною системою;

- вагові станції – для точного формування шихтових порцій відповідно до технологічної карти плавки.

Правильна організація роботи шихтового двору гарантує безперебійне забезпечення печей матеріалами. Прості затримки на цьому етапі можуть призвести до зупинки печі, що є економічно невигідним та технологічно небажаним [7].

Головна будівля об'єднує всі етапи плавки та розливання сталі.

Шихтовий відкрилок 1 (рис.1.3) призначений для подачі твердих шихтових матеріалів безпосередньо до печей та обладнано:

- коліями для мульдових ешелонів 2;
- підлоговими машинами завалення (завальні машини) 4, які подають шихту у робочий простір печі;
- пультами керування подачею.

У пічному прольоті 3 (рис.1.3) встановлені мартенівські печі – головне технологічне обладнання.

Характерні елемент, що відповідають формуванню основної технологічної лінії мартенівського цеху:

- мартенівські печі з регенеративними камерами, де відбувається нагрівання повітря та газу;
- робочий майданчик на висоті 6-7 м;
- заливальні крани для подачі чавуну;
- колії для чугуновозів та мульдових ешелонів;
- пульти керування печами.

Кожна піч оснащена механізмами для нахилу та випуску сталі, сталевипускними жолобами, пальниковими пристроями, системами газопостачання та димовідведення [8].

Розливний проліт – це зона, де сталь виходить з печі та розливається у виливниці.

Обладнання розливного прольоту:

- сталерозливні крани великої вантажопідйомності;

- консольно-поворотні крани для обслуговування сталевипускних жолобів;
- стенди для розміщення ковшів;
- сушарки для стопорів і надставок;
- шлакові чаші та стенди для них;
- ремонтні ями для ковшового обладнання;
- залізничні колії для транспортування виливниць та шлаку.

Двір виливниць або відділення підготовки виливниць призначений для підготовки комплектів виливниць під кожну плавку.

До оосновного обладнання відділення підготовки виливниць відноситься:

- декілька колій для формування потягів з виливницями;
- стелажі та сушила для надставок;
- газові пальники для підігрівання холодних виливниць перед розливанням;
- печі для сушки центрових;
- мостові крани, які забезпечують перестановку виливниць та комплектування розливних агрегатів.

Від якісної підготовки виливниць залежить відсутність тріщин у зливках та рівномірність охолодження сталі.

Міксерне відділення – ключова ланка у стабільності мартенівського виробництва, яка забезпечує приймання, накопичення та вирівнювання складу рідкого чавуну, що надходить з доменного цеху.

Функції міксерів [9]:

1. Збереження рідкого стану чавуну. Міксер – це теплоізольована сталева ємність великої місткості (інколи понад 1000 тонн), футерована вогнетривкими матеріалами. Він працює за принципом термоса, мінімізуючи теплові втрати. Збереження чавуну в рідкому стані є критичним, оскільки його повторне розплавлення потребувало б значних енерговитрат та часу.
2. Вирівнювання хімічного складу. Оскільки чавун надходить з різних домен,

він може мати коливання за вмістом кремнію, сірки, марганцю та інших елементів. У міксері чавун перемішується, що забезпечує стабільний хімічний склад подачі до мартенівських печей.

3. Регулювання ритмічності роботи печей. Доменні печі працюють безперервно, а мартенівські – циклічно. Міксер слугує буфером між цими виробництвами, забезпечуючи безперервність подачі чавуну незалежно від режимів доменного випуску.
4. Безпечне накопичення надлишків чавуну. Якщо доменний цех тимчасово виробляє більше чавуну, ніж потрібно сталеплавильним печам, міксер приймає цей надлишок. Це запобігає аварійним сливам та технологічним втратам.

Обладнання міксерного відділення:

- один або два великі міксери, встановлені на спеціальних опорах;
- чувуновозні ковші на рейкових візках – для транспортування рідкого чавуну від домни до міксера;
- мостові крани для обслуговування ковшів;
- системи контролю температури та рівня металу;
- газовідвідні системи для безпечного відведення чадних газів.

Завдяки роботі міксерів мартенівський процес отримує стабільне, рівномірне живлення рідким чавуном, що є однією з умов високої якості сталі.

1.2 Аналіз особливостей конструктивного виконання окремих вузлів міксера для збереження рідкого чавуну

Міксери відіграють ключову роль у забезпеченні безперервності металургійного циклу, оскільки слугують резервуаром для тимчасового накопичення рідкого чавуну. Їх наявність дозволяє стабілізувати роботу сталеплавильних агрегатів і знизити залежність ритму сталеплавильного виробництва від коливань у доменному процесі, де тривалість і інтенсивність плавок змінюється в широких межах [9].

У сучасній практиці промислових підприємств застосовують дві основні технологічні схеми транспортування рідкого чавуну з доменного переділу до сталеплавильних цехів. Перша – класична, передбачає використання відкритих чавуновозних вагонів у поєднанні з роботою стаціонарного міксера. У цій схемі рідкий чавун транспортується чавуновозами до міксерного відділення, де його переливають у стаціонарний міксер за допомогою міксерного крана. Після вирівнювання складу та температури металу чавун подають до сталеплавильних агрегатів у самохідних або причіпних чавуновозних ковшах.

Друга схема базується на застосуванні пересувних міксерів, які поєднують у собі функції транспортної ємності та резервуара для тимчасового зберігання. У цьому випадку чавун транспортується з доменного цеху локомотивною тягою у міксерних ковшах прямого призначення. У відділенні переплаву з пересувного міксера метал переливають у ковші самохідних чавуновозів, що подають його безпосередньо до сталеплавильних агрегатів. При цьому мобільний міксер залишається у сталеплавильному відділенні до повного завершення процесу зливання, виконуючи роль буферної ємності та забезпечуючи стабільність подачі металу [10]. При застосуванні пересувних міксерів зменшується число переливів чавуну та його витрат при переливанні, зменшується інтенсивність втрати температури, відсутні витрати тепла, знижуються капітальні витрати на будування міксерного відділення. Разом з тим зниження капітальних витрат у будівництво міксерного відділення в значній мірі компенсується витратами на будування депо ремонту міксерних ковшів.

Перевага та основне функціональне призначення стаціонарних міксерів – забезпечення однорідності температури та хімічного складу чавуну, що надходить з різних випусків доменних печей. Це створює стабільні умови для подальших сталеплавильних процесів. Водночас організація міксерного господарства потребує значних капітальних інвестицій, а також постійних витрат на паливо для підігріву агрегату, необхідного для утримання температури рідкого чавуну на належному рівні та недопущення його надмірного охолодження [9].

Порівнюючи переваги та недоліки обох способів все ж таки переважним є використання стаціонарного міксеру. На користь застосування такої схеми можуть слугувати ще й наступні аргументи:

– пересувні міксери не виконують основної своєї ролі – не забезпечують вирівнювання складу та температури чавуну;
– при організації відбору проб чавуну з пересувних міксерів на перетікання плавки негативно впливають коливання міксеру.

На рисунку 1.4 представлений міксер ємністю 1300 т, який за формою відноситься до коротких циліндричних міксерів з опуклими днищами (відношення довжини до діаметру (L/D)<1,3). В порівнянні з іншими ця конструкція володіє деякими перевагами: зменшені теплові втрати, покращені умови перемішування чавуну, підвищений термін служби футерування.

Циліндрична частина міксера і бічні сферичні днища клепані. Щоб полегшити демонтаж міксера під час проведення капітальних ремонтів, їх днища скріпляють з циліндричною частиною болтами. Усередині міксер викладений вогнетривким футеруванням, між кожухом і футеруванням поміщають теплоізоляційний матеріал. Для перевірки стану футерування у верхній частині днищ виконані особливі оглядові вікна.

Щоб забезпечити самоповернення нахиленого міксера у вихідне положення (при аварії механізму повороту міксера або при припиненні подачі електроенергії), центр тяжіння міксера лежить вище за його геометричну вісь на 300 мм і убік у напрямку до носка також на 300 мм. Опорно-ходова частина міксера конструктивно виконана таким чином. Циліндрична частина міксера опоясана по краях двома бандажами 10, які спираються на ролики, встановлені в двох обоймах 9. Роликові обойми спираються на дві дугоподібні опори, закріплені на залізобетонному фундаменті. У кожній обоймі поміщено дванадцять роликів циліндричної форми (з ребордами і без них) діаметром 500 мм. Механізм повороту 6 міксера – рейкового типу. Експлуатаційний кут нахилу 30°, максимальний 47°.

Кришку заливального отвору відкривають і закривають механізмом з барабанною лебідкою, встановленим на міксерному майданчику. Канат від барабана проходить через систему блоків і з'єднується з кришкою ланцюгом. Для відкриття кришки випускного носка міксера служить лебідка, встановлена на майданчику в стороні від носка і сполучена з кришкою канатом.

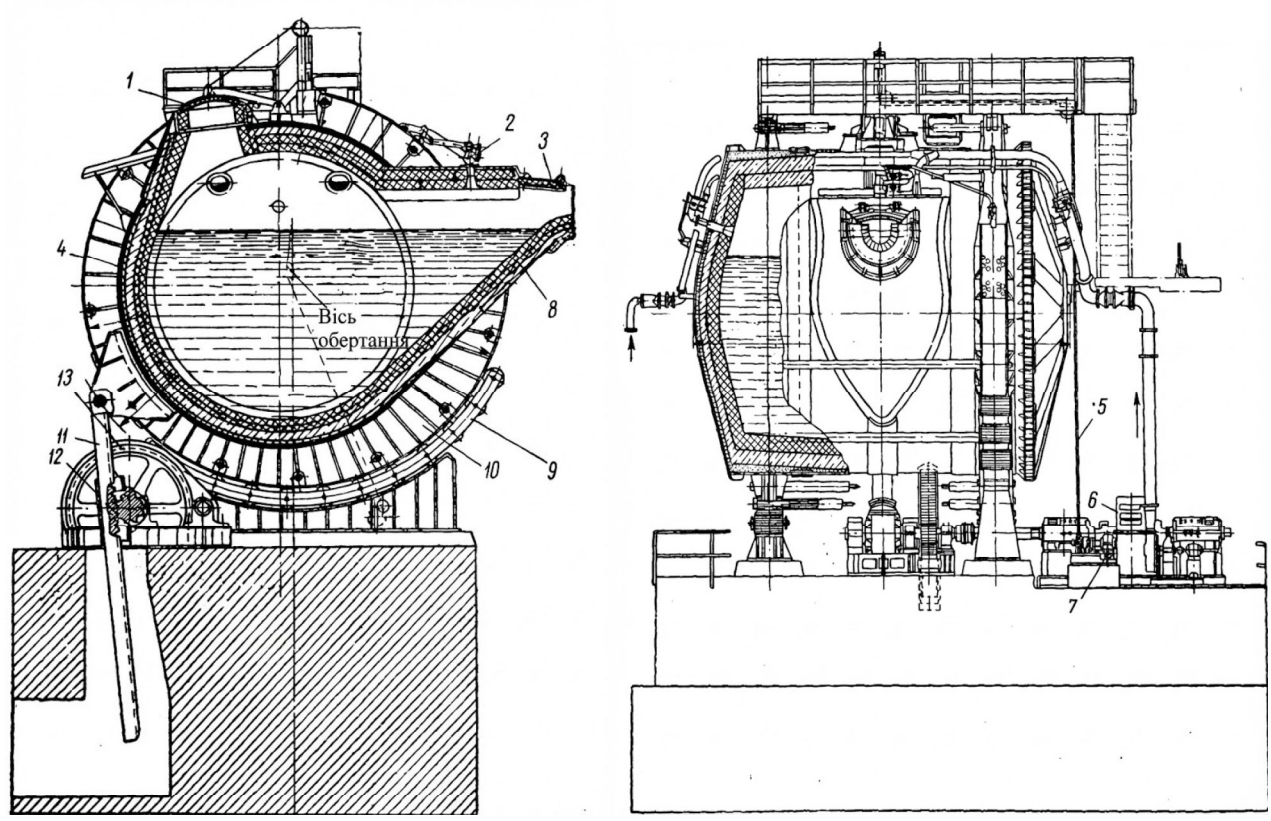


Рисунок 1.4 – Загальний вид міксера ємністю 1300 т: 1 – кришка заливного отвору; 2 – горілки; 3 – кришка носка; 4 – циліндрична бочка; 5 – канат; 6 – механізм повороту міксера; 7 – лебідка відкривання кришки; 8 – носок; 9 – обойма з роликами; 10 – опорні бандажі; 11 – рейкова передача; 12 – обойма, 13 – відкрита зубчата передача

Механізм нахилу міксера призначений для нахилу міксера при зливі чавуну в чугуновозні ковши при поданні їх до мартенівських печей. Технічна характеристика стаціонарного міксера мартенівського цеху наведена в таблиці 1.1.

На міксері є два бандажі 2, які спираються на ролики 3, ув'язнені в 2-х обоймах 4 (рис. 1.5). Роликові обойми 4 спираються на дві дугоподібні опори 5,

встановлені на залізобетонному фундаменті.

На міксері місткістю 1300 т встановлений рейковий механізм нахилу (рисунок 1.5).

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика стаціонарного міксера ємністю 1300 т

Найменування	Величина
Експлуатаційний кут нахилу міксера	$\alpha = 35°30'$
Максимальний кут нахилу міксера	$\alpha_{макс} = 47°$
Швидкість нахилу	V = 0,046 м/с
Тип електродвигуна	ДП–62
Потужність електродвигуна	P = 60 кВт
Частота обертання електродвигуна	$n = 470$ хв$^{-1}$
Режим роботи	4М (середній)
Тривалість включення	ТВ = 25 %
Тип редуктора	ЦТ2 190
Передатне число	$U_р = 51,8$
Зубчаста передача	відкрита
Модуль зачеплення зубчастої передачі	m = 3 0мм
Передатне число зубчастої передачі	$U_{з.п.} = 6,77$
Діаметр початкового кола рейкової шестерні	d=650 мм
Модуль зачеплення рейкового механізму	m = 65 мм

Конструкція механізму нахилу дозволяє розташувати електродвигун і редуктор в стороні від міксера, в безпечному місці, зручному для обслуговування і ремонту. Установка двох електродвигунів, що працюють на один редуктор, викликана вимогами підвищеної надійності роботи механізму: в разі виходу з ладу одного електродвигуна роботу міксера забезпечує другий, резервний

електродвигун. Привод механізму нахилу забезпечений командо-апаратом 9. Змащення механізму нахилу і опорно-ходової частини міксера – централізоване.

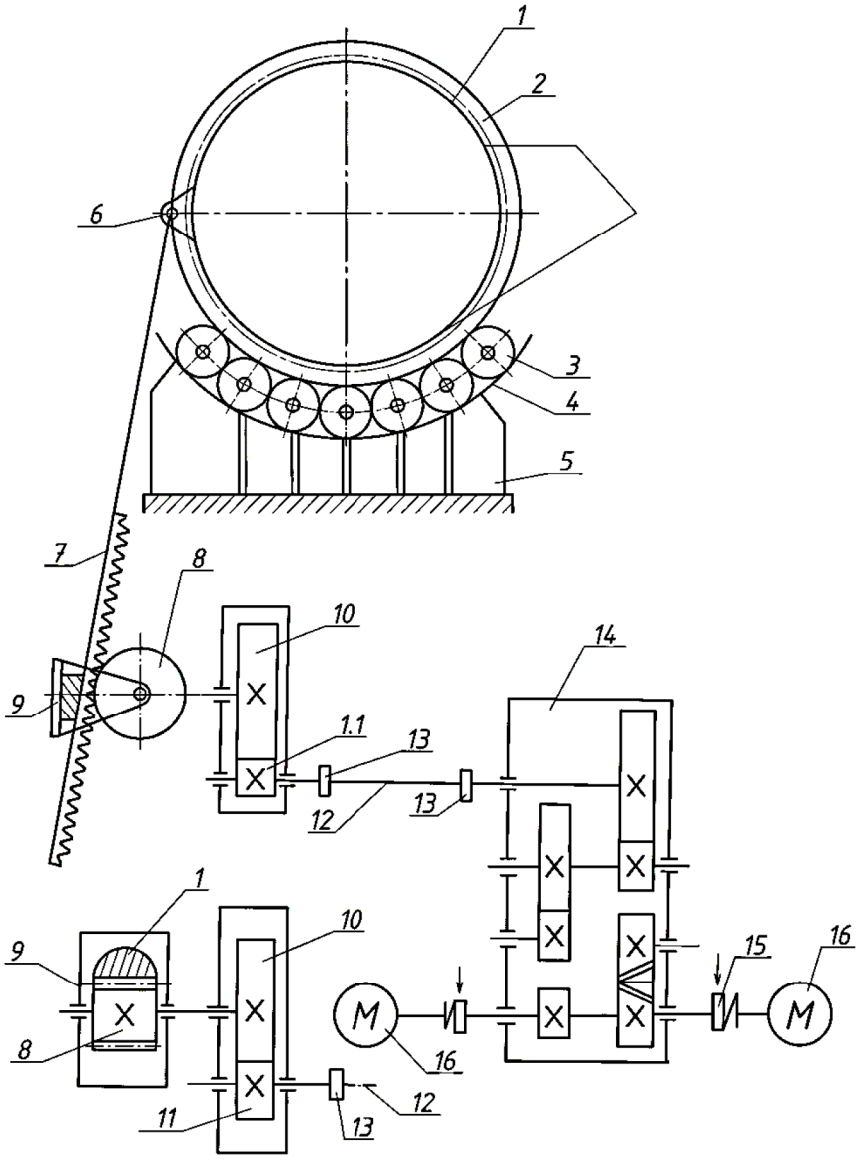


Рисунок 1.5 – Схема механізму нахилу міксера (позиції наведено в тексті)

У механізмі нахилу міксера є два вузли – приводний і рейковий, сполучені між собою проміжним валом 12 із зубчастими муфтами 13 (МЗП). Приводний вузол складається з двох реверсивних електродвигунів 16 постійного струму, гальм 15 і триступінчатого редуктора 14, перша пара якого виконана косозубою, а дві інші пари прямозубі. Привод розрахований на роботу з одним двигуном, другою є резервним.

Електросхема передбачає підключення на робочий режим як одного з

електродвигунів, так і можливе підключення 2-х електродвигунів. Особливість гальм полягає в тому, що вони зворотної дії, тобто у момент припинення струму гальмо розгальмовується, що необхідно для повернення міксера в початкове положення. При нормальній роботі міксера струм подається в ланцюг електродвигуна не подається в котушку електромагніту, гальмо при цьому розгальмовує.

За відсутності струму в ланцюзі якоря струм подається в котушку електромагніту і гальмо загальмовує.

Рейковий вузол складається із закритої зубчастої пари 11 і 12 і рейкової пари 7 і 8, складеної в напрямній коробці 9. усередині коробки встановлені два бронзові вкладиші, в яких переміщається зубчаста рейка 7, з'єднана з проушиною в міксері за допомогою кільця. Коробка напрямної 9 виконана такою, що коливається. Це забезпечує нормальне зачеплення шестерень 8 з рейкою 7 при зміні кута нахилу міксера.

За типом приводу механізми повороту міксера поділяють на системи з електричним приводом та на гідравлічні приводи, хоча останні у сучасній практиці фактично не застосовуються. З конструктивної точки зору поширення набули три основні різновиди механізмів: гвинтові, секторні зубчасті та рейкові системи (рис. 1.6–1.7) [11].

Гвинтові механізми, у свою чергу, класифікують на три підтипи:

– конструкції з рухомим гвинтом (рис. 1.6, а);

– механізми з рухомою гайкою (рис. 1.6, б);

– комбіновані шатунно-гвинтові системи (рис. 1.6, в).

Особливості їх роботи визначаються кінематичними схемами, що ілюструють передачу руху та принцип перетворення обертання у поступальне переміщення.

Попри конструктивну різноманітність, гвинтові приводи мають низку суттєвих недоліків [12]:

– у разі аварійної ситуації міксер, що перебуває в нахиленому стані, не здатний повернутися у вихідне положення самостійно;

– складність конструкції ускладнює виконання ремонтних робіт;
– низький коефіцієнт корисної дії призводить до необхідності встановлення електродвигунів підвищеної потужності.

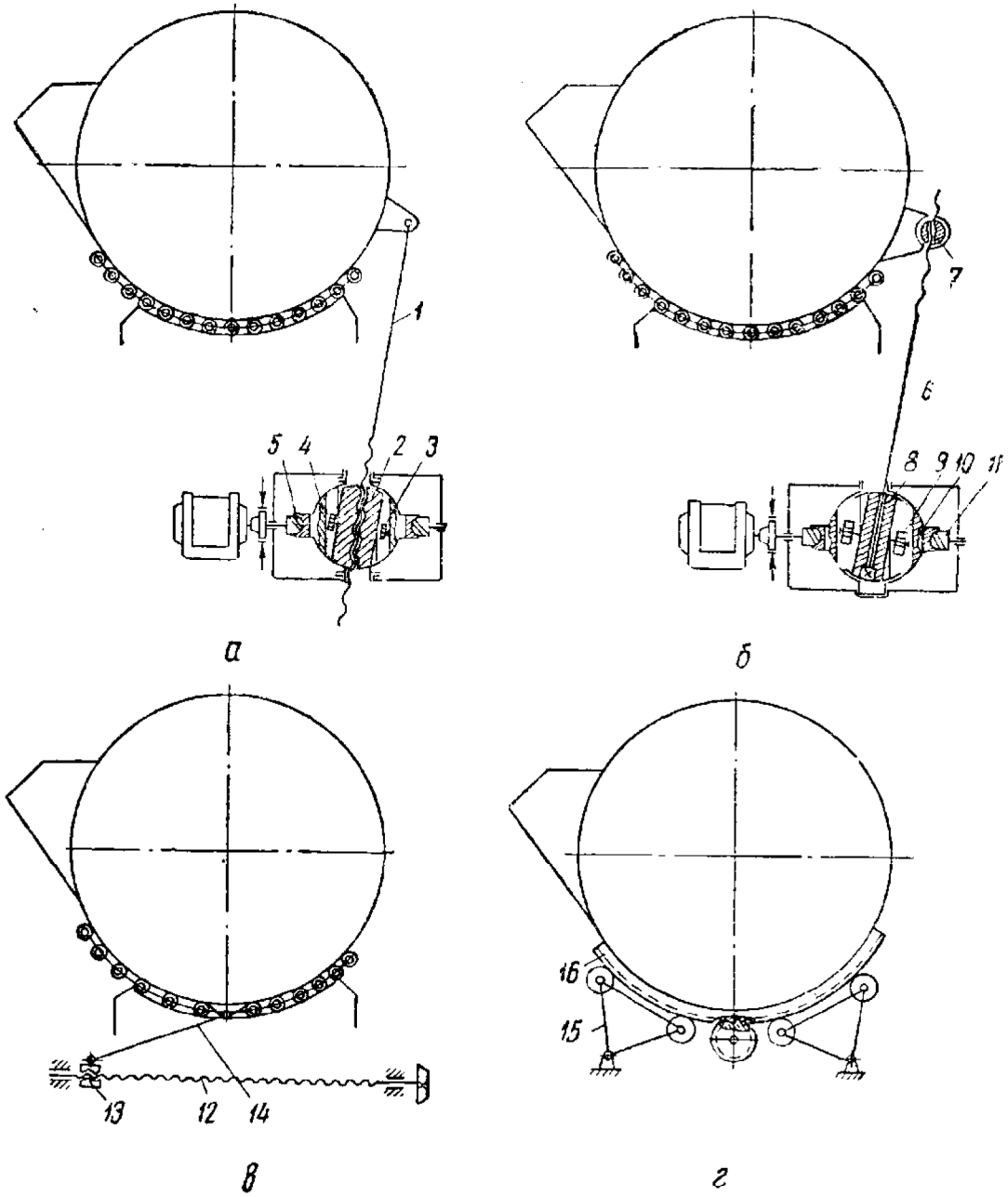


Рисунок 1.6 – Типи механізмів нахилу міксера: 1 – гвинт; 2 – сферична гайка; 3 – ролики; 4 – обойма; 5 – черв'ячна передача; 6 – гвинт; 7 – гайка; 8 – сферична втулка; 9 – ролики; 10 – обойма; 11 – черв'ячна передача; 12 – гвинт; 13 – гайка; 14 – шатун; 15 – роликовий балансир; 16 – зубчатий сектор

Механізм із зубчастим сектором (рис. 1.6, г) характеризується простішою будовою, однак його практичне застосування також обмежене. Основною причиною є складність технічного обслуговування та зниження точності зачеплення сектора з шестернею внаслідок деформацій корпусу міксера.

Експлуатаційний досвід металургійних підприємств свідчить, що найбільш ефективним та надійним варіантом для системи повороту міксера є рейковий механізм з електроприводом, який найкраще відповідає вимогам щодо надійності, обслуговуваності та стабільності роботи.

1.3 Аналіз стану питання надійності роботи механізму повороту міксера на підґрунті літературного огляду на патентного пошуку

Механізми повороту міксера є високовідповідальними вузлами тому мають відповідати натсупним критеріям: висока надійність під час експлуатації, конструкція має бути максимально простою та зручною в обслуговуванні та ремонті, у випадку непередбачуваних аварійних ситуаціях нахилений міксер повинен мати змогу самостійно повернутися у стартове положення [14].

В світовій та вітчизняній практиці відомі декілька рішень по підвищенню надійності вузла нахилу міксера. Основними напрямки підвищення надійності механізму нахилу є:

- вдосконалення конструкції опорно-поворотного пристрою;
- зниження інерційних навантажень при нахилі;
- зниження навантажень на привод механізму нахилу за рахунок поліпшення умов тертя в рейковій парі;
- підвищення надійності та довговічності рейкового зачеплення.

Багато робіт присвячено вивченню можливості удосконаленню опорно-поворотної частини електродугових печей, яка є досить схожою за своїм конструктивним виконанням з конструкцією поворотної частини нахилу стаціонарного міксера. Лідером у дослідженнях в даному напрямі були і представники кафедри металургійного обладнання. Так ще в другій половині

минулого сторіччя колектив дослідників під керівництвом тодішнього завідувача кафедри Сапко Олександра Івановича досліджували можливість використання в якості опорних поверхонь катків, осі яких з вальницями кочення закріплені у вкладишах, встановленими у вертикальних напрямних кронштейнах. Завдяки запропонованому технічному рішенню забезпечується рівномірне розподілення навантаження між катками, що підтверджується авторським свідоцтвом на патент.

Суттєвим недоліком запропонованої конструкції є те, що в багатоопорних конструкціях з жорстким закріпленням роликів загальне навантаження між ними розподіляється різко, нерівномірно, внаслідок впливу похибок монтажу та виготовлення, а це в свою чергу призводить по швидкого зношування поверхонь кочення, руйнування опорних вальниць та виникнення значних згинальних моментів, що можуть перевищувати допустимі.

Для розширення технологічних можливостей та зниження витрат на експлуатацію міксера в роботі [15] пропонується заливальне вікно зробити симетричним зливальному носку щодо вертикальної осі корпуса міксера. Міксер спирається на опорно-поворотний механізм і зв’язаний з механізмом хитання міксера. Недолік запропонованої конструкції – значні теплові втрати.

В роботі [16] розглядається технічне рішення, спрямоване на підвищення надійності та безпеки стаціонарного міксеру, а також підвищення надійності опорно-поворотного пристрою міксера . Для досягнення поставленої мети пропонується корпус міксера виконати симетричним відносно вертикальної осі, а опорні бандажі та опорно-споворотний механізм виконати симетричним вищезазначеної осі з певною відстанню між ними (рис.1.7). Недолік запропонованого технічного рішення полягає в підвищенній металоємності міксера через збільшені габарити опорно-поворотного пристрою та елементів копрусу.

В роботі [17] пропонується зміна співвідношення опорно-поворотної частини, що дозволить досягти оптимального співвідношення міцнісних

характеристик елементів опорно-поворотної частини міксера, та дозволить знизити металоємність при збереженні надійності (рис.1.8).

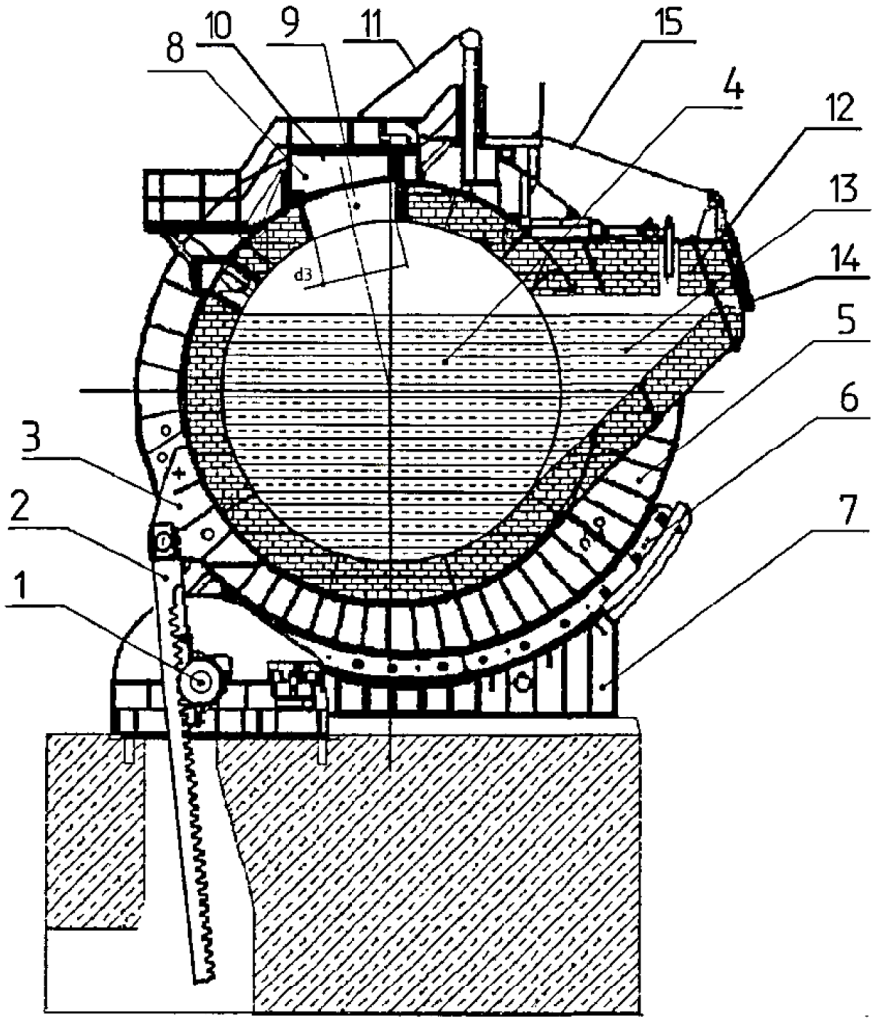


Рисунок 1.7 – Стаціонарний міксер в перерізі [16]: 1 – рушій, 2 – рейкова передача, 3 – механізм гойдання, 4 – рідкий чавун, 5 – опорні бандажі, 6 – роликові обойми, 7 – опорна рама, 8 – заливальний пристрій, 9 – заливальне вікно, 10 – кришка, 11 – механізм відкривання, 12 – розливальний пристрій, 13 – горловина, 14 – кришка, 15 – механізм відкривання

Недоліком такої конструкції (рис.1.8) є складність технічного обслуговування запропонованої конструкції.

В роботі [18] пропонується конструкція стаціонарного міксеру, в якій підвищується його надійність та довговічність завдяки оптимізації дії поперечних сил на рейкову передачу та навантажень, які спрямовані уздовж

зубчастої рейки механізму нахилу його корпусу.

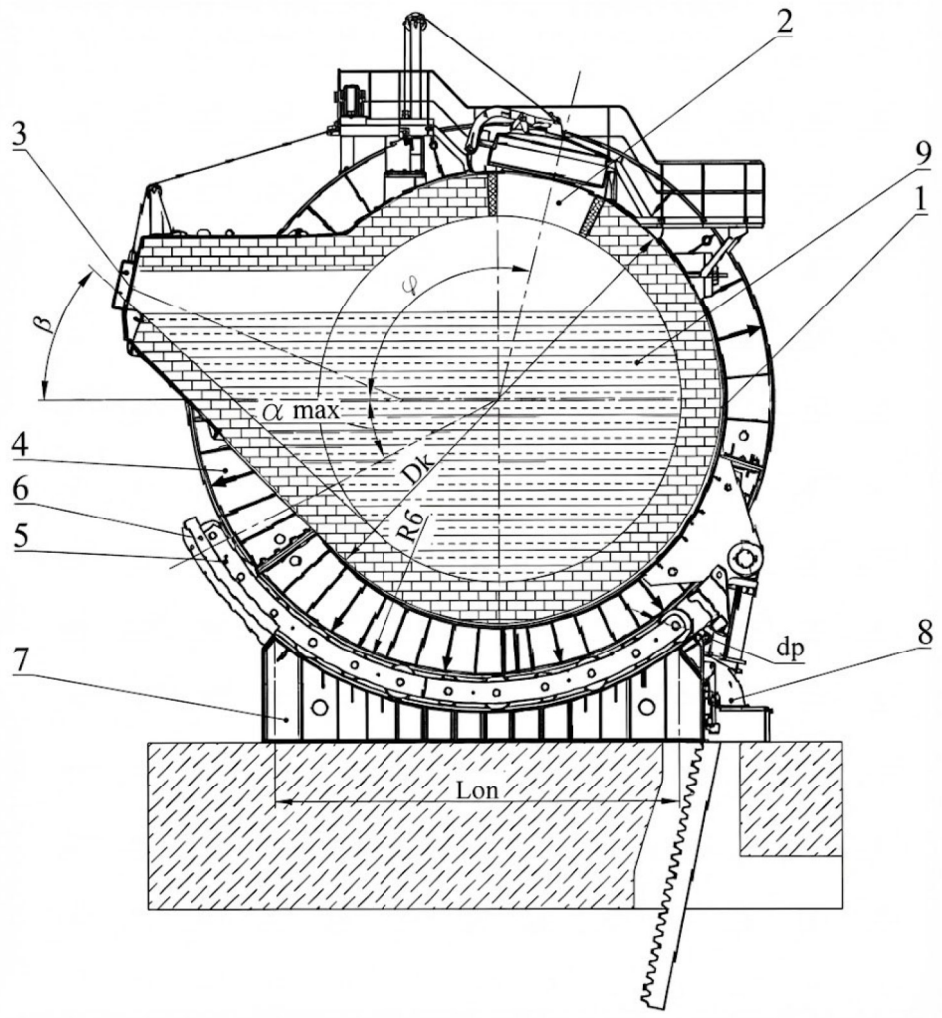


Рисунок 1.8 – Поперечний переріз стаціонарного міксеру: 1 – корпус, 2 – заливальне вікно, 3 – зливальний носос, 4 – бандаж, 5 – роликові обойми, 6 – напрямні , 7 – нерухомі опори, 8 – механізм нахилу, 9 – рідкий чавун

Зазначені ефекти досягаються наступним чином. Корпус стаціонарного міксеру встановлений котковими обоймами на напрямних опорах. Механізм нахилу міксеру складається з рушія, трансмісійного валу та рейкової передачі, складеної з редуктора з вихідною вал-шестернею, напрямної коробки та зубчастої рейки, яка, в свою, чергу за допомогою вісі шарнірно сполучена із шарніром поворотного корпусу. Рейка рухомо уздовж своєї повздовжньої вісі встановлена в напрямну коробку і зв’язана зубчастим зачепленням з вал-шестернею. Напрямна коробка за допомогою втулок встановлена на вал-шестерні з можливістю обертання навколо її вісі. Шарнір зубчастої рейки

виеонаний сферичним, втулки напрямної коробки мають загальну сферичну поверхню, а зачеплення вал-шестерні з зубчастою рейкою виконано бочкоподібно-модифікованими зубами (рис.1.9). Саме наявність сферичних поверхонь та модифікованого бочкоподібного зачеплення забезпечує компенсацію поперечного перекошування рейки зубчастої від зсуву поворотного корпусу, що забезпечує спрямування робочих зусиль уздовж подовжньої вісі зубчастої рейки.

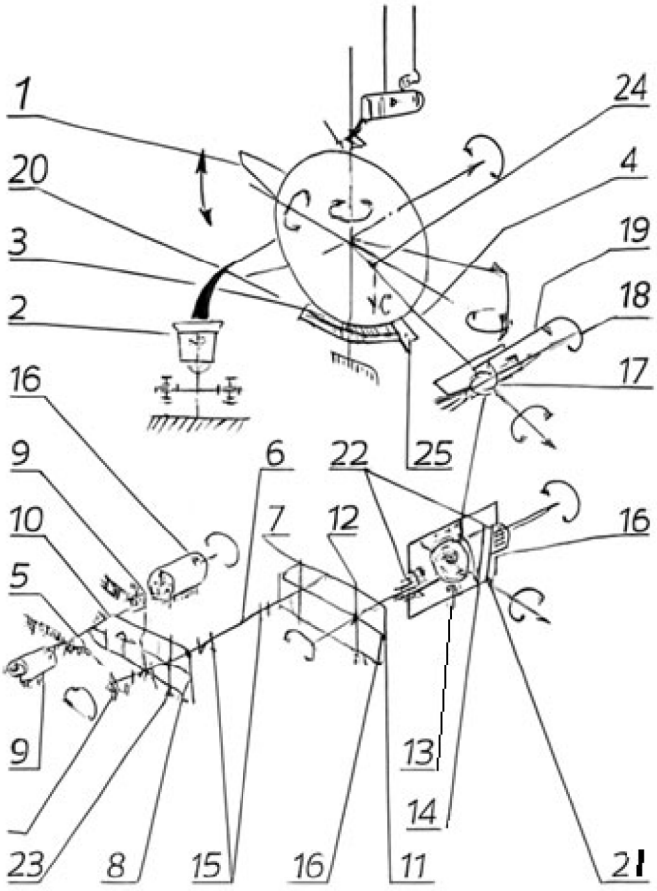


Рисунок 1.9 – Кінематична схема стаціонарного міксера: 1 – корпус міксеру; 2 – коткові обойми, 3 – напрямні, 4 - механізм нахилу, 5 – рушій, 6 – трансмісійний вал , 7 – рейкова передача, 8 – редуктор, 9 – електродвигун, 10 – гальмо, 11 – вхідний вал редуктора, 12 – вал-шестерня, 13 – напрямна коробка, 14 – зубчаста рейка, 15 – зубчасто-фланцева муфта, 16 – фундамент, 17 – сферичний шарнір, 18 – вісь, 19 – кронштейн, 20 – гідравлічний буфер, 21 – зубчасте зачеплення, 22 – втулка, 23 – кодовий датчик, 24 – центр ваги, 25 – буфер

Недоліком запропонованої конструкції є просідання напрямних опор,зношування коткових опор та загальне ускладнення будови. До того ж контакт в бочкоподібних зуб'ях відбувається не по всій довжині зуба, а на межовій ділянці Збільшення вусиль поруч з торцевою поверхнею може призвести до швидкого зношення або розкришення зубів коліс.

Під час дослідження роботи міксера особлива увага повинна бути приділена механізму нахилу за наступними напрямами:

- підвищення загальної надійності агрегату;
- максимальне спрощення конструкції вузлів та деталей;
- ергономіка та безпека обслуговуючого персоналу;
- удосконалення процесу самоповернення нахиленого міксера у початкове положення в разі виникнення форс-мажорних обставин.

Тривала практика експлуатації міксерів показала, що поряд з гвинтовими механізмами, механізмами із зубчастим сектором найбільш повно вказаним вимогам відповідає механізм повороту міксера рейкового типу з електроприводом, який і застосовується в мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь» (рисунок 1.10).

У механізмі два вузли приводний і рейковий, сполучені між собою проміжним валом 5 із зубчастими муфтами 4. Приводний вузол складається з двох електродвигунів 1, триступінчатого редуктора 3 і двох гальм 2; рейковий вузол – з циліндричної зубчастої передачі 6 і шестерні з рейкою, змонтованих в обоймі, що коливається, 7. Рейка 8 верхнім кінцем шарнірно сполучена з проушиною на кожусі міксера. Рейковий вузол механізму встановлений на масивній рамі, розташованій під міксером. При обертанні приводної шестерні рейка переміщується вгору або вниз і повертає міксер на роликових опорах.

Конструкція механізму нахилу дозволяє розташувати електродвигун і редуктор в стороні від міксера, в безпечному місці, зручному для обслуговування і ремонту. Установка двох електродвигунів, що працюють на один редуктор, викликана вимогами підвищеної надійності роботи механізму: в разі виходу з ладу одного електродвигуна роботу міксера забезпечує другий, резервний

електродвигун. Привод механізму нахилу забезпечений командо-апаратом 9. Змащення механізму нахилу і опорно-ходової частини міксера – централізоване.

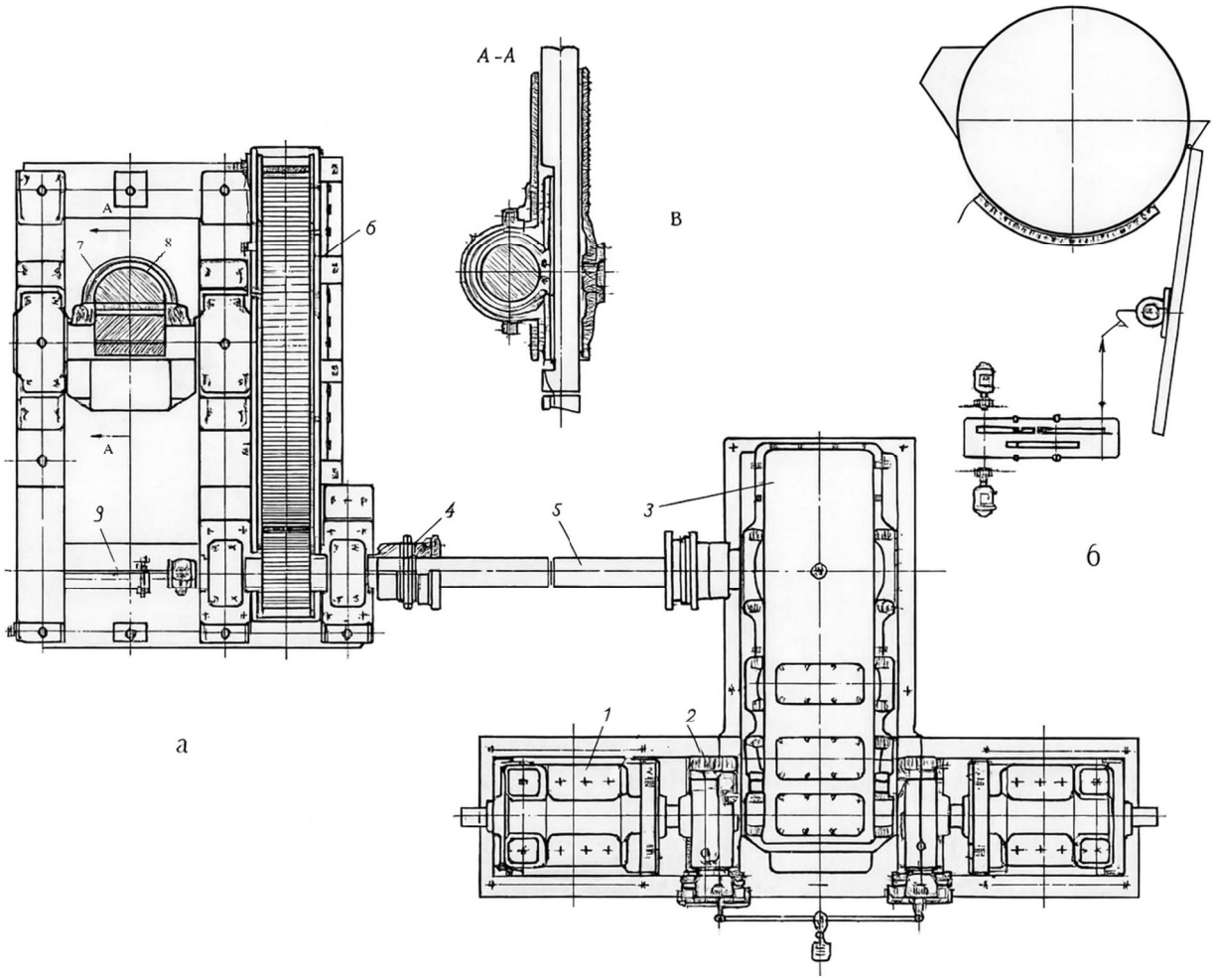


Рисунок 1.10 – Механізм нахилу міксера ємністю 1300 т (позиції наведено в тексті)

Привод механізму нахилу міксера розвиває крутний момент, який дорівнює сумі наступних складових моментів: від ваги рідкого металу і порожнього міксера, від ваги рухомих роликових обойм, від сил тертя в роликових опорах і динамічного моменту в період несталого руху приводу [13].

До розрахунку діючих навантажснь, потужності і міцності дсталсй механізму нахилу пред'являють підвищені вимоги, маючи на увазі забезпечення надійності і безпеки роботи такого відповідального агрегату з великим об'ємом рідкого металу, яким є міксер.

Механізм повороту міксера оснащено рейковою коробкою з направляючими тертя-ковзання. Проаналізувавши вищезгадані літературні джерела, патенти та авторські свідоцтва, пропонується обладнати механізм повороту рейковою коробкою з направляючими тертя-кочення, що дозволить зменшити втрати потужності на подолання сил тертя при повороті міксера; виключити складний вузол, який потребує регулярного змащення; збільшити ремонтопридатність рейкової коробки та зменшити простій обладнання в аварійних ситуаціях при виході з ладу деталей тертя. Запропонована конструкція представлена на рис.1.11. Також слід зазначити, що проєктом пропонується замінити рейкову пару із прямозубим зачепленням на рейкову пару з шевронним зачепленням для підвищення плавності роботи; ресурсу рейкової передачі та збільшення надійності найбільш навантаженого вузла механізму повороту міксера.

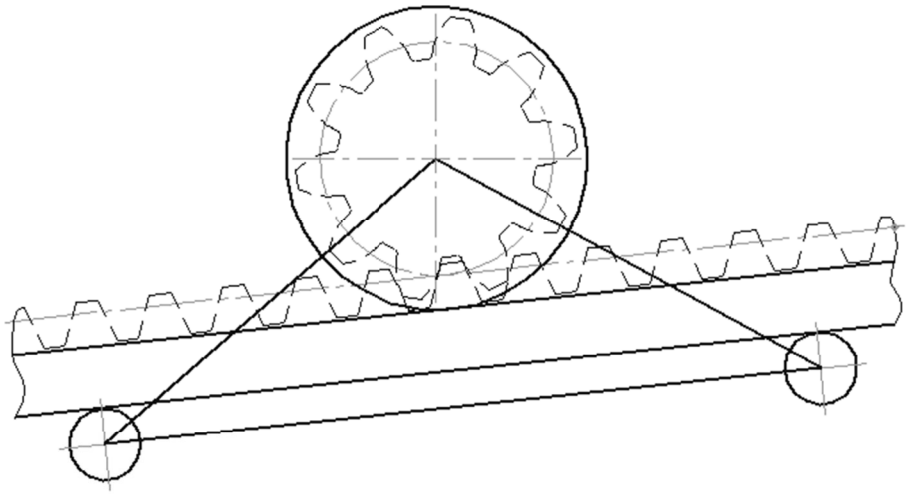


Рисунок 1.11 – Конструкція рейкової коробки з направляючими тертя-кочення

Впровадження запропонованої модернізації дозволить керуючись відомими розрахунковими методиками шляхом експериментального підтвердження розробити спрощену математичну модель для визначення діагностичної моделі роботоздатності вузла шляхом встановлення залежності зусиль, що виникають в рейці, від кута нахилу міксера.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Конструктивне обґрунтування запропонованого удосконалення рейкової коробки механізму нахилу міксера

З метою спрощення спрощення конструкції, поліпшення технічного огляду, зменшення витрат на змащення вузлів тертя пропонується встановлення рейкової коробки механізму нахилу міксера з використанням опор кочення. Схема конструкції рейкової коробки механізму нахилу міксера наведено на рисунку 2.1.

Для зменшення тертя та навантаження на зубчате зачеплення встановлюємо на рейкову вал-шестерню циліндричні диски. При обертанні вал-шестерні та переміщенні рейки диски будуть перекочуватись по поверхні рейки виключаючи тертя ковзання та нейтралізуючи додаткові навантаження на зубчасте зачеплення.

Для виключення тертя ковзання рейки по корпусу рейкової коробки встановлюємо роликові опори. Схеми для визначення зусиль, діючих на роликові опори наведено на рисунку 2.2.

Схема (а) наведена для випадку, коли сила, що згинає рейку направлена в бік зубчастого зачеплення. В такому випадку ролик В знаходиться в ненавантаженому стані.

Силу F_A, розраховуємо з умови рівноваги [19]:

$$\sum M(B) = 0 : F_A \cdot a - F_{зг.р} \cdot b_{зг} = 0,$$

$$F_A = \frac{F_{зг.р} \cdot b_{зг}}{a}, \text{ Н} \qquad (2.1)$$

де $a = 1000$ мм – відстань від осі ролика до осі рейкової вал-шестерні;

$b_{зг} = 2593$ мм – відстань від шарніра рейки до осі рейкової вал-шестерні;

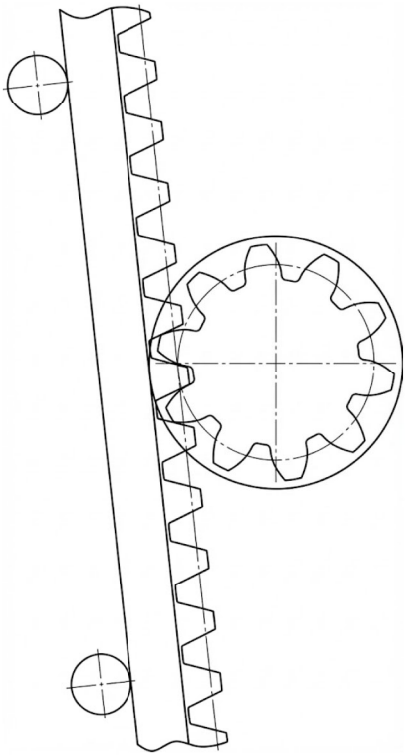
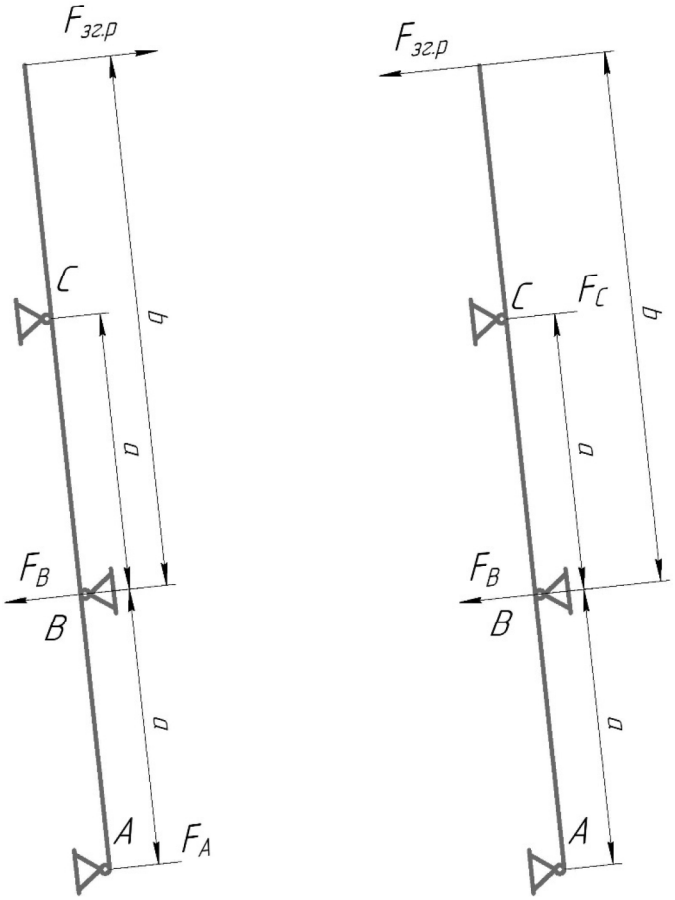


Рисунок 2.1 – Схема конструкції рейкової коробки



а б

Рисунок 2.2 − Схема для визначення зусиль, діючих на роликові опори

$$F_A = \frac{304990 \cdot 2593}{1000} = 790830.$$

Силу F_B, Н, розраховуємо з умови:

$$\sum M(A) = 0 : F_B \cdot a - F_{зг.р} \cdot (b_{зг} + a) = 0, \quad (2.2)$$

$$F_B = \frac{F_{зг.р} \cdot (b_{зг} + a)}{a}, \text{ Н} \quad (2.3)$$

$$F_B = \frac{304990 \cdot (2593 + 1000)}{1000} = 1095820 \text{ Н}$$

Схема (б) наведена для випадку, коли сила, що згинає рейку направлена в бік протилежний зубчатому зачепленню. В такому випадку ролик А знаходиться в ненавантаженому стані [20].

Силу F_B, розраховуємо з умови [21]:

$$\sum M(C) = 0 : -F_B \cdot a + F_{зг.р} \cdot (b_{зг} - a) = 0, \quad (2.4)$$

$$F_B = \frac{F_{зг.р} \cdot (b_{зг} - a)}{a}, \text{ Н} \quad (2.5)$$

$$F_B = \frac{6430 \cdot (4477 - 1000)}{1000} = 22360 \text{ Н}$$

Силу F_C, Н, розраховуємо з умови (2.6) за формулою (2.7),

$$\sum M(B) = 0 : -F_C \cdot a + F_{зг.р} \cdot b_{зг} = 0, \quad (2.6)$$

(2.7)

$$F_C = \frac{F_{зг.р} \cdot b_{зг}}{a}, \text{ Н}$$

$$F_C = \frac{6430 \cdot 4477}{1000} = 28790 \text{ Н}$$

Роликова опора (рис. 2.3) представляє собою вісь на яку встановлено декілька вальниць кочення, а саме голчатих роликових. Центральні вальниці не мають внутрішнього кільця, це спрощує їх монтаж та демонтаж. Крайні вальниці передбачають своєю конструкцією внутрішнє кільце. Вони призначені для фіксації вальниці на осі [22].

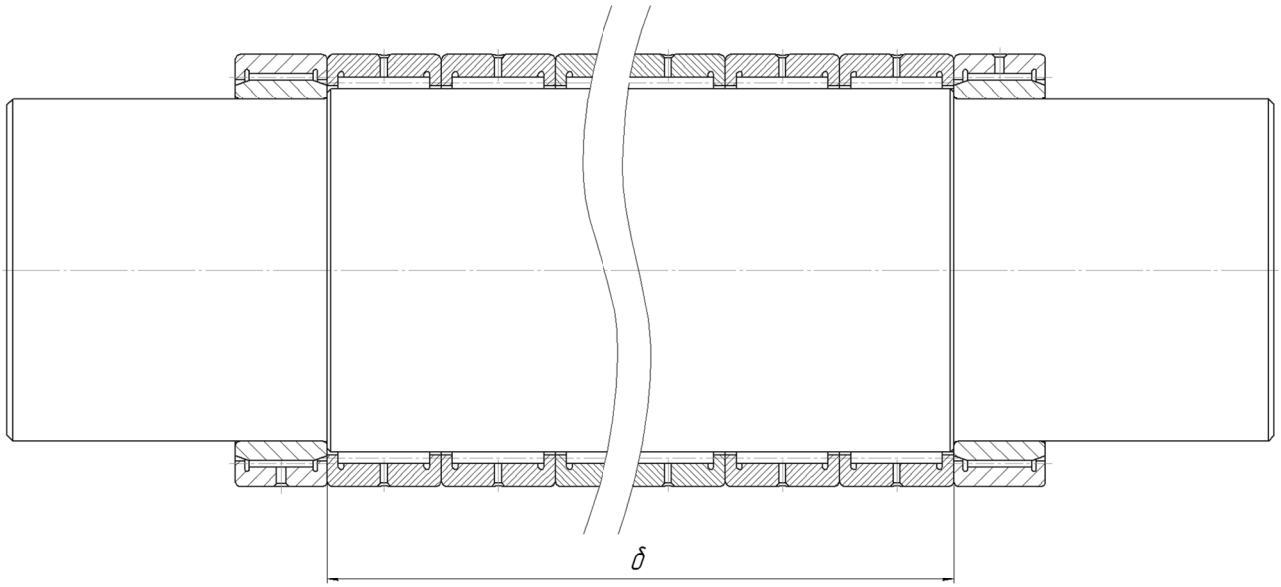


Рисунок 2.3 – Схема роликової опори

Результати розрахунків зусиль, що діють на опорні вальниці для інших кутів нахилу міксера з кроком 3° наведено в таблиці 2.1.

З представлених в таблиці 2.1 результатів розрахунків бачимо, що при куті повороту $\varphi = 44°$ роликова опора сприймає найбільше навантаження. Для подальших розрахунків приймаємо $F_{р.о} = 1250000$ Н.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку зусилля, що діє на опорні ролики з урахуванням кута нахилу міксера

Кут повороту φ, град	Сила, що згинає рейку $F_{зг.р}$, Н	Відстань $b_{зг}$, мм	Сила F_A, Н	Сила F_B, Н	Сила F_C, Н
0	304990	2593	790830	1095820	
3	248015	2876	713230	961250	
6	188215	3158	594470	782685	
9	135675	3441	466890	602565	
12	89605	3724	333685	423290	
15	49280	4007	197445	246725	
18	14220	42 89	61000	75220	
21	-15990	4572		57110	73100
24	-41840	4854		161295	203135
27	-64015	5138		264880	328895
30	-83435	5420		368825	452265
33	-101265	5703		476270	577535
36	-119030	5986		593485	712520
39	-138740	6269		730965	869705
42	-163195	6551		905975	1069170
44	-184890	6740		1061255	1246145

Перш за все необхідно виконати проєктний розрахунок осі, тобто визначити її мінімальний діаметр. Визначивши діаметр осі оберемо вальниці спираючись на розміри осі та визначенні навантаження.

Розрахункову схему осі наведено на рисунку 2.4.

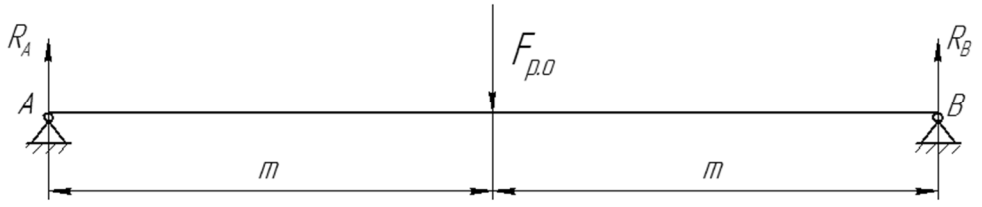


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема роликової опори

Реакцію в опорі А, розраховуємо як [21]:

$$\sum M(B) = 0 : R_A \cdot 2 \cdot m - F_{р.о} \cdot m = 0, \tag{2.8}$$

$$R_A = \frac{F_{р.о} \cdot m}{2 \cdot m}, \text{ Н} \tag{2.9}$$

де $m = 445$ мм – відстань від точки А до центру прикладання навантаження;

$$R_A = \frac{1250000 \cdot 445}{2 \cdot 445} = 625000 \text{ Н}$$

Реакція $R_B = R_A = 625000$ Н, так як навантаження прикладається по центру опори.

Максимальний згинаючий момент $M_{зг}$, Нм, розраховуємо за формулою:

$$M_{зг} = R_a \cdot m \cdot 10^{-3}, \tag{2.10}$$

$$M_{зг} = 625000 \cdot 445 \cdot 10^{-3} = 278125.$$

Діаметр осі d_o мм, розраховуємо з умови :

$$\sigma_{зг} = \frac{M_{зг}}{W} = \frac{32 \cdot M_{зг}}{\pi \cdot d_o^3} \le [\sigma_{гн}], \quad (2.11)$$

$$d_o = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{зг} \cdot 10^3}{\pi \cdot [\sigma_{зг}]}}, \text{ мм} \quad (2.12)$$

де $[\sigma_{зг}] = 1{,}2 \cdot \sigma_T = 1{,}2 \cdot 295 = 355$ МПа – допустиме напруження згину [23];

$\sigma_T = 295$ МПа – межа плинності матеріалу, для матеріалу осі сталь 40Х[23];

$$d_o = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 278125 \cdot 10^3}{\pi \cdot 355}} = 200 \text{ мм}$$

Діаметр осі з умови міцності на зрізання розраховуємо як [24]:

$$\tau_{зр} = \frac{F_{р.о}}{A} = \frac{4 \cdot F_{р.о}}{\pi \cdot d'^2_B} \le [\tau_{зр}], \quad (2.13)$$

$$d'_B = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{р.о}}{\pi \cdot [\tau_{зр}]}}, \text{ мм} \quad (2.14)$$

де $[\tau_{зр}] = 75$ МПа – допустиме напруження на зрізання;

$$d'_B = \sqrt{\frac{4 \cdot 1250000}{\pi \cdot 75}} = 145 \text{ мм}$$

Діаметр осі з умови міцності на зминання розраховуємо по формулам [25]:

$$\sigma_{см} = \frac{F_{р.о}}{\delta \cdot d} \le [\sigma_{см}], \quad (2.15)$$

$$d''_{в} = \frac{F_{р.о}}{[\sigma_{см}] \cdot \delta}, \text{ мм} \qquad (2.16)$$

де $\delta = 800$ мм – довжина осі між опорами;

$[\sigma_{см}] = 150$ МПа – допустиме напруження на зминання;

$$d''_{в} = \frac{1250000}{150 \cdot 800} = 10.$$

Остаточно приймаємо діаметр осі $d_{в2} = 220$ мм, $d_{в1} = 200$ мм, конструктивне виконання осі наведено на рисунку 2.5.

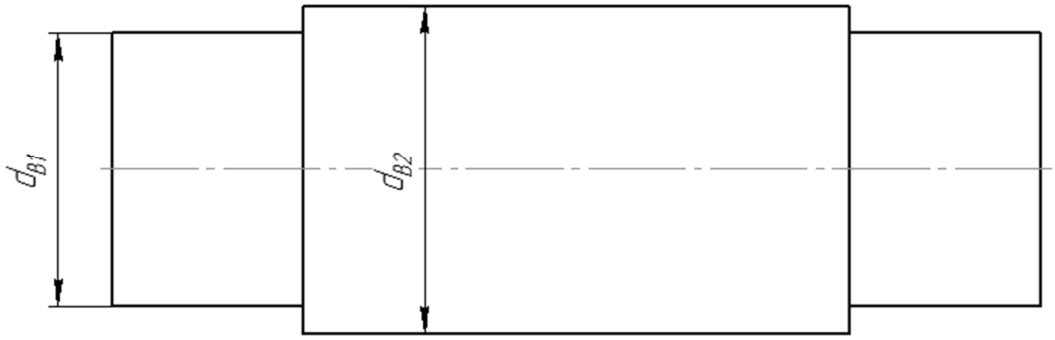


Рисунок 2.5 – Розміри осі

Розрахунок рейки з умови міцності на стиск виконуємо виходячи з поперечного перерізу рейки (рис.2.6)

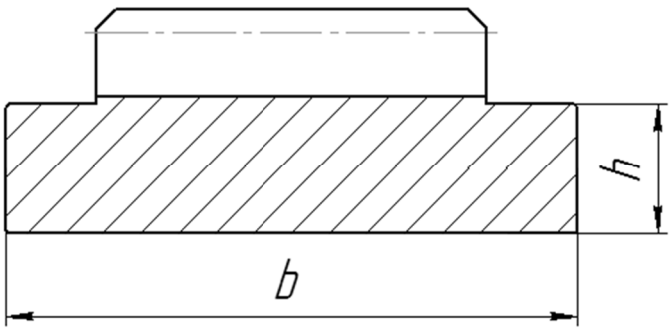


Рисунок 2.6 – Перетин рейки

Умова міцності на стиск [26]:

$$\sigma_{ст} = \frac{P_р}{A_р} \le [\sigma_{ст}], \qquad (2.17)$$

де $P_р = 656615$ Н – максимальне значення зусилля, що діє на рейку;

$A_р = b_р \cdot h'_р$ мм^2 – площа поперечного перерізу рейки;

$[\sigma_{ст}] = 200$ МПа – допустиме напруження стиску;

Тоді,

$$\sigma_{ст} = \frac{P_р}{b_р \cdot h'_р} \le [\sigma_{ст}]$$

Висоту рейки розраховуємо за формулою:

$$h'_р = \frac{P_р}{[\sigma_{ст}] \cdot b_р}, \text{ мм} \qquad (2.18)$$

де $b_р = 760$ мм – ширина поперечного перерізу рейки;

$$h'_р = \frac{656615}{200 \cdot 760} = 5 \text{ мм}$$

Розрахунок рейки з умови міцності на згин виконуємо з умови:

$$\sigma_{зг} = \frac{M_{зг}}{W_{хр}} \le [\sigma_{зг}], \qquad (2.19)$$

де $M_{зг} = F_{зг} \cdot b_{зг}$ – максимальний момент, що згинає рейку, Нм;

$W_{хр} = \frac{b_р \cdot h''^2_р}{2}$ – полярний момент інерції перерізу рейки, мм^3 [27];

$[\sigma_{зг}] = 150$ – допустиме напруження згину, МПа;

Тоді,

$$\sigma_{зг} = \frac{2 \cdot F_{зг} \cdot b_{зг}}{b_р \cdot h''^2_р} \le [\sigma_{зг}]$$

Висоту рейки розраховуємо за формулою:

$$h''_р = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{зг} \cdot b_{зг}}{[\sigma_{зг}] \cdot b_р}}, \text{ мм} \qquad (2.20)$$

де $F_{зг} = 184890$ – максимальна сила, що згинає рейку, Н;

$b_{зг} = 6740 - 1000 = 5740$ – плече дії сили $F_{зг}$, мм;

$$h''_р = \sqrt{\frac{2 \cdot 184890 \cdot 5740}{150 \cdot 760}} = 136 \text{ мм}$$

З конструктивних міркувань приймаємо висоту рейки $h_р$=170 мм.

Момент інерції перерізу рейки розраховуємо за формулою:

$$I_{хр} = \frac{b_р \cdot h^3_р}{12}, \text{ мм}^4 \qquad (2.21)$$

$$I_{хр} = \frac{760 \cdot 170^3}{12} = 3{,}11 \cdot 10^8 \text{ мм}^4$$

Максимальний прогин розраховуємо за формулою:

$$f_{зг} = \frac{F_{зг} \cdot b_{зг}^3}{3 \cdot E \cdot I_{хр}}, \text{ мм} \qquad (2.22)$$

де $E = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль Юнга;

$$f_{зг} = \frac{184890 \cdot 5740^3}{3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 3{,}11 \cdot 10^8} = 187{,}3 \text{ мм}$$

Тоді кут повороту рійки від дії згинаючого моменту

$$\theta_р = \frac{F_{зг} \cdot b_{зг}^2}{2 \cdot E \cdot I_{хр}}, \text{ град} \qquad (2.23)$$

$$f_{зг} = \frac{184890 \cdot 5740^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 3{,}11 \cdot 10^8} = 2{,}8°.$$

Що цілком допустимо для данного типу обладнання.

Проведені розрахунки на міцність найбільш навантажених деталей і вузлів запропонованої конструкції рейкової коробки механізму нахилу стаціонарного міксераі вказують на високу працездатність і надійність запропонованого вузла.

2.2 Теоретичне визначення перекидних моментів, що створюються від ваги рідкого метала

Універсальних аналітичних методів вирішення задачі з визначення перекидних моментів ємності довільної форми, що заповнена рідиною, не існує. Тому при розрахунках користуємось наближеними графоаналітичними методами. Сутність цього методу полягає в тому, що загальний об’єм металу розсікають на елементарні об’єми, знаходять величини об’ємів та їх центри тяжіння для різних кутів нахилу ємності. Потім, користуючись відомими з

теоретичної механіки рівняннями, знаходять центр тяжіння загального об'єму метала для даного кута нахилу [28-30].

В нашому випадку, розбивши міксер на три складові частини − циліндр, сферичні днища та носок, можна приблизно визначити об'єми метала та центри тяжіння цих частин за допомогою готових формул, не розбиваючи загальний об'єм, зайнятий металом, на елементарні частини.

Розрахунок виконуємо для нормального положення міксера ($\varphi = 0°$).

Площу кругового сегменту, займаного металом розраховуємо за формулою [31]:

$$F_{ц} = \pi \cdot \frac{R^2}{360} \cdot (360 - \theta) + \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \sin\theta, \text{ м}^2 \qquad (2.24)$$

де $R = 3{,}05$ м − внутрішній радіус міксера;

$\theta = 125{,}35°$ − центральний кут;

$$F_{ц} = \pi \cdot \frac{3.05^2}{360} \cdot (360 - 125{,}35) + \frac{1}{2} \cdot 3{,}05^2 \cdot \sin 125{,}35 = 22{,}83 \text{ м}^2$$

Об'єм метала в циліндричній частині міксера розраховуємо за формулою (2.2),

$$V_{ц} = F_{ц} \cdot L, \text{ м}^3 \qquad (2.25)$$

де $L = 7{,}2$ м − довжина циліндричної частини міксера;

$$V_{ц} = 22{,}83 \cdot 7{,}2 = 164{,}39 \text{ м}^3$$

Об'єм метала в сферичних днищах, розраховуємо за формулою [32]:

$$V_{д} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot H}{2} + R^2 \cdot H \cdot \arcsin\frac{R-h}{R} + \frac{H \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot h - h^2}}{3 \cdot R^2} \cdot \left(3 \cdot R^3 + R^2 \cdot h - 6 \cdot R \cdot h^2 + 2 \cdot h^3\right), \quad (2.26)$$

де $H = 0{,}69$ м – висота сферичного днища;

$h = 1{,}65$ м – рівень заповнення міксера;

$$V_{д} = \frac{\pi \cdot 3{,}05^2 \cdot 0{,}69}{2} + 3{,}05^2 \cdot 0{,}69 \cdot \arcsin\frac{3{,}05-1{,}65}{3{,}05} + \frac{0{,}69 \cdot \sqrt{2 \cdot 3{,}05 \cdot 1{,}65 - 1{,}65^2}}{3 \cdot 3{,}05^2} \times$$
$$\times \left(3 \cdot 3{,}05^3 + 3{,}05^2 \cdot 1{,}65 - 6 \cdot 3{,}05 \cdot 1{,}65^2 + 2 \cdot 1{,}65^3\right) = 17{,}13 \text{м}^3$$

Об’єм метале в носку з деяким допущенням представляємо як об’єм піраміди віднявши від неї об’єм, обмежений сегментом (рис. 2.7).

Об’єм метале в носку розраховуємо за формулою:

$$V_{н} = V_{п} - V_{с}, \text{ м}^3 \quad (2.27)$$

Об’єм піраміди, розраховуємо за формулою (2.28),

$$V_{п} = \frac{a \cdot h_1}{2} \cdot b, \text{ м}^3 \quad (2.28)$$

де $a = 5{,}12$ м – довжина основи трикутника АВС (рис. 2.7);

$h_1 = 2{,}174$ м – висота трикутника АВС;

$b = 0{,}52$ м – висота піраміди;

$$V_{п} = \frac{5{,}12 \cdot 2{,}174}{2} \cdot 0{,}52 = 2{,}89 \text{ м}^3$$

Об’єм сферичного сегмента V_c, розраховуємо як:

$$V_{с} = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\theta_2}{180} - \sin\theta_2\right) \cdot b, \text{ м}^3 \quad (2.29)$$

де $\theta_2 = 72{,}32°$ – центральний кут кругового сегмента;

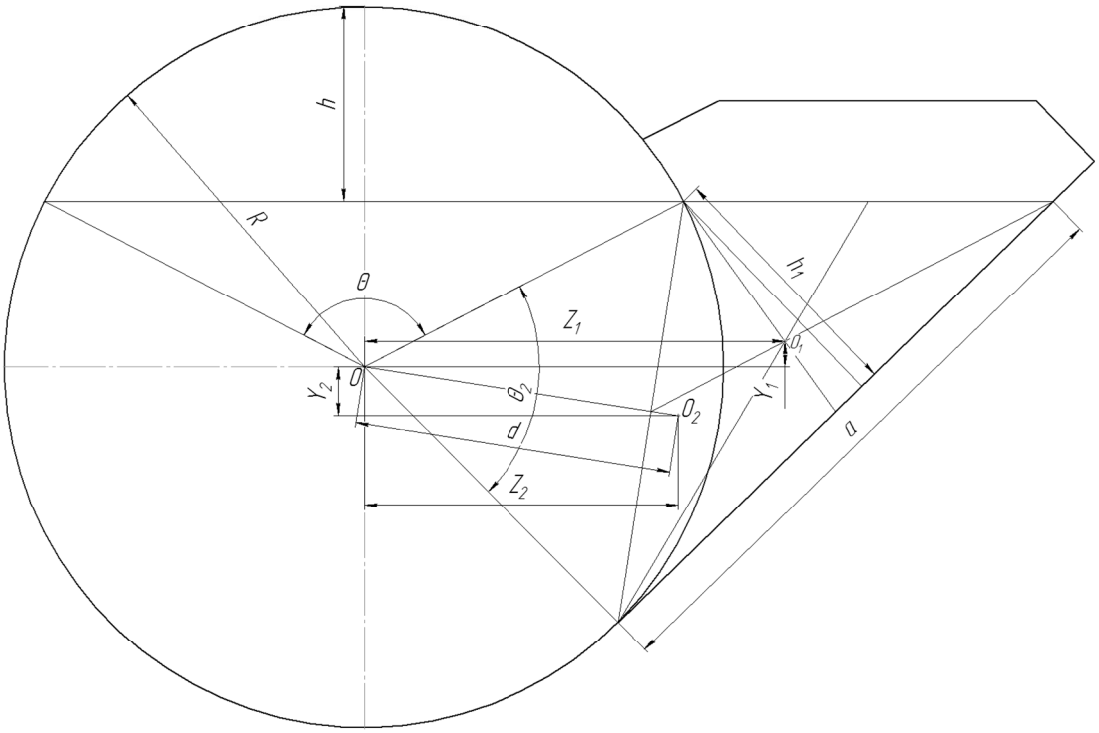


Рисунок 2.7 – Схема до розрахунку перекидних моментів міксера

$$V_c = \frac{1}{2} \cdot 3{,}05^2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{72{,}32}{180} - \sin 72{,}32 \right) \cdot 0{,}52 = 0{,}748 \ \text{м}^3$$

По отриманим даним розраховуємо об'єм метала в носку за формулою

$$V_н = 2{,}89 - 0{,}748 = 2{,}145 \ \text{м}^3$$

Відстань від центра круга до центра тяжіння сегмента d, м:

$$d = \frac{4}{3} \cdot \frac{R \cdot \sin^2 \frac{\theta_2}{2}}{\theta_2 - \sin \theta_2}, \text{ м} \qquad (2.30)$$

$$d = \frac{4}{3} \cdot \frac{3{,}05 \cdot \sin^2 \frac{72{,}32}{2}}{72{,}32 - \sin 72{,}32} = 2{,}699\,\text{м}$$

Визначаємо за схемою координати точок O_1 та O_2, відповідно центрів тяжіння піраміди та сегмента: $z_1 = 3{,}569\,\text{м}$, $z_2 = 2{,}668\,\text{м}$.

Координату центра тяжіння рідкого метала в носку $z_н$, розраховуємо за формулою:

$$z_н = \frac{V_п \cdot z_1 - V_с \cdot z_2}{V_п - V_с},\ \text{м} \qquad (2.31)$$

$$z_н = \frac{2{,}89 \cdot 3{,}569 - 0{,}748 \cdot 2{,}668}{2{,}89 - 0{,}748} = 3{,}883\,\text{м}$$

Радіус-вектор між геометричною віссю міксера та його дійсною віссю обертання, розраховуємо за формулою:

$$r_e = \sqrt{y_e^2 + z_e^2},\ \text{м} \qquad (2.32)$$

де $y_e = 0{,}3\,\text{м}$, $z_e = 0{,}3\,\text{м}$ – координат дійсної осі обертання міксера в нормальному положенні;

$$r_e = \sqrt{0{,}3^2 + 0{,}3^2} = 0{,}424\,\text{м}$$

Кут між радіус-вектором та горизонталлю в нормальному положенні міксера, розраховуємо по формулі:

$$\alpha_e = \text{arctg}\frac{y_e}{z_e}, \text{ град} \qquad (2.33)$$

$$\alpha_e = \text{arctg}\frac{0,3}{0,3} = 45°.$$

Плече дії ваги метала в циліндричній частині та днищах, розраховуємо за формулою:

$$e = r_e \cdot \cos(\alpha_e - \varphi), \text{ м} \qquad (2.34)$$

$$e = 0,424 \cdot \cos(45 - 0) = 0,300 \text{ м}$$

Плече дії ваги метала в носку відносно осі обертання розраховуємо за формулою:

$$l_н = z_н - e, \text{ м} \qquad (2.35)$$

$$l_н = 3,883 - 0,299 = 3,584 \text{ м}$$

Вагу рідкого метала в міксері розраховуємо за формулою:

$$G_м = (V_ц + V_д + V_н) \cdot \gamma, \text{ т} \qquad (2.36)$$

де $\gamma = 7$ т/м^3 – питома вага рідкого чавуну;

$$G_м = (164,39 + 17,13 + 2,142) \cdot 7 = 1285,7 \text{ т}$$

Перекидний момент, створюваний вагою рідкого метала, розраховуємо за

формулою:

$$M_м = (V_ц + V_д) \cdot \gamma \cdot 1000 \cdot g \cdot e - V_н \cdot \gamma \cdot 1000 \cdot g \cdot l_н, \text{ Нм} \qquad (2.37)$$

де $g = 9{,}81$ м/с^2 – прискорення вільного падіння;

$$M_м = (164{,}39 + 17{,}13) \cdot 7 \cdot 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}299 - 2{,}142 \cdot 7 \cdot 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}584 = 3209426 \text{ Нм}$$

2.3 Теоретичне визначення перекидних моментів, що створюються вагою порожнього міксера

Радіус-вектор центра тяжіння міксера відносно осі обертання, розраховуємо по формулі:

$$r_o = \sqrt{(y_o - y_e)^2 + (z_o - z_e)^2}, \text{ м} \qquad (2.38)$$

де $y_o = -0{,}179$ м, $z_o = 0{,}343$ м – координати центра тяжіння порожнього міксера;

$$r_o = \sqrt{(-0{,}179 - 0{,}3)^2 + (0{,}343 - 0{,}3)^2} = 0{,}48 \text{ м}$$

Кут між радіус-вектором та горизонталлю розраховується за формулою:

$$\alpha_o = \operatorname{arctg} \frac{y_o - y_c}{z_o - z_e}, \qquad (2.39)$$

$$\alpha_o = \operatorname{arctg} \frac{-0{,}179 - 0{,}3}{0{,}343 - 0{,}3} = 84{,}87°.$$

Перекидний момент, створюваний вагою порожнього міксера розраховуємо по формулі:

$$M_{о} = G_{о} \cdot r_{о} \cdot \cos(\alpha_{о} + \varphi), \text{ Нм} \qquad (2.40)$$

де $G_{о} = 650 \cdot 10^{4}$ Н – вага порожнього міксера;

$$M_{о} = 650 \cdot 10^{4} \cdot 0{,}48 \cdot \cos(84{,}87 + 0) = 278977{,}3 \text{ Нм}$$

2.4 Теоретичне визначення моментів, що створюються від ваги рухомих роликових обойм

При повороті міксера на кут φ роликові обойми переміщуються на кут 0,5φ. Роликову обойму розглядаємо як частину кругового сегменту з центральним кутом 2ψ.

Відстань від центра обертання міксера до центра тяжіння роликових обойм розрахуємо як:

$$R_{р} = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{R_1^3 - R_2^3}{R_1^2 - R_2^2} \right) \cdot \frac{\sin\psi}{\psi}, \text{ м} \qquad (2.41)$$

де $R_1 = 5{,}55$ м – зовнішній радіус роликової обойми;

$R_2 = 5{,}05$ м – внутрішній радіус роликових обойм;

$\psi = 50°$ – центральний кут кругового сегмента;

$$R_{р} = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{5{,}55^3 - 5{,}05^3}{5{,}55^2 - 5{,}05^2} \right) \cdot \frac{\sin 50 \cdot 57{,}3}{50} = 3{,}55 \text{ м}$$

Момент, створюваний вагою рухомих роликових обойм, розраховуємо за

формулою:

$$M_р = G_р \cdot R_р \cdot \cos\left(\beta + \frac{\varphi}{2}\right), \text{ Нм} \qquad (2.42)$$

де $G_р = 311000\,Н$ – вага обойм з роликами;

$\beta = 76°$ – кут між радіус-вектором центра тяжіння роликової обойми та горизонтальною віссю;

$$M_р = 311000 \cdot 3{,}55 \cdot \cos\left(76 + \frac{0}{2}\right) = 534187{,}7 \text{ Нм}$$

2.5 Теоретичне визначення моментів від тертя та тертя-кочення в роликових опорах та зусиль. Визначення зусиль, що діють на рейку

Момент сил опору від тертя-ковзання в цапфах роликів обойм розраховуємо за формулою [33]:

$$M_{тр1} = G_р \cdot f \cdot R_2 \cdot \frac{d_ц}{D_р}, \text{ Нм} \qquad (2.43)$$

де $f = 0{,}1$ – коефіцієнт тертя-ковзання в цапфах роликів;

$d_ц = 0{,}1\,м$ – діаметр цапфи ролика;

$D_р = 0{,}5\,м$ – діаметр ролика;

$$M_{тр1} = 311000 \cdot 0{,}1 \cdot 5{,}05 \cdot \frac{0{,}1}{0{,}5} = 31411 \text{ Нм}$$

Загальне навантаження, що діє на роликові опори міксера розраховуємо за

формулою:

$$Q = G_м + G_о + G_р, \text{ т} \tag{2.44}$$

$$Q = 1285{,}7 \cdot 1000 \cdot 9{,}81 + 6500000 + 311000 = 19734996 \text{ т}$$

Коефіцієнт ξ, розрахуємо:

$$\xi = \frac{4 \cdot \sin \frac{z \cdot \alpha_1}{2}}{z \cdot \sin \alpha + \sin z \cdot \alpha_1}, \tag{2.45}$$

де $z = 12$ – загальна кількість роликів в обоймі;

$\alpha_1 = 9{,}25°$ – кут між суміжними роликами;

$$\xi = \frac{4 \cdot \sin \frac{12 \cdot 9{,}25}{2}}{12 \cdot \sin 9{,}25 + \sin 12 \cdot 9{,}25} = 1{,}15.$$

Момент сил опору підчас кочення роликів в обоймі з урахуванням тертя в ребордах, розраховуємо як

$$M_{тр2} = Q \cdot \xi \cdot k \cdot \left(1 + \frac{D_б}{D_р}\right) \cdot c, \text{ Нм} \tag{2.46}$$

де $k = 0{,}05$ см – коефіцієнт тертя-кочення роликів;

$D_б = 10{,}1$ м – діаметр бігової доріжки бандажа міксера;

$c = 2{,}5$ – коефіцієнт, враховуючий тертя в ребордах;

$$M_{тр2} = 19423996 \cdot 1{,}15 \cdot 0{,}05 \cdot 10^{-2} \cdot \left(1 + \frac{10{,}1}{0{,}5}\right) \cdot 2{,}5 = 601424 \text{ Нм}$$

Момент від тертя в роликових опорах, розраховуємо як

$$M_{тр} = M_{тр1} + M_{тр2}, \text{ Нм} \qquad (2.47)$$

$$M_{тр} = 31411 + 601424 = 632835 \text{ Нм}$$

Загальний перекидний момент, який діє на міксер під час нахилу його на злив:

$$M_{оп} = M_{м} - M_{о} - M_{р} + M_{тр}, \text{ Нм} \qquad (2.48)$$

$$M_{оп} = 3209426 - 278977{,}3 - 534187{,}7 + 632835 = 3029096 \text{ Нм}$$

Значення перекидних моментів та ваги металу в міксері аналогічно розраховуються для інших кутів повороту з кроком 3° до повного спустошення міксера. Отримані результати наведені в таблиці 2.2. За ними виконуємо побудову графіка зливу метала та перекидних моментів в функції кута нахилу (рис. 2.8).

Для знаходження монета на рейковій шестерні та зусилля діючого на рейку необхідно визначити плече *h* (рис. 2.9) зусилля в рейці, які знаходимо аналітичним методом.

Довжину рейки від шарніра А до точки дотику С з приводною шестернею, розраховуємо по формулі

$$l_{р} = \sqrt{R_1^2 + H^2 - r_1 - 2 \cdot R_1 \cdot H \cdot \cos(\gamma + \varphi)}, \text{ мм} \qquad (2.49)$$

де $R_1 = 5400$ мм – довжина коромисла;

$H = 6726$ мм – відстань між вісями коромисла та рейкової шестерні;

$r_1 = 325$ мм – початковий радіус шестерні;

$\gamma = 21{,}66°$ – кут нахилу коромисла до лінії центрів;

$$l_р = \sqrt{5400^2 + 6726^2 - 325^2 - 2 \cdot 5400 \cdot 6726 \cdot \cos(21{,}66 + 0)} = 2605 .$$

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку перекидних моментів та ваги металу в міксері в функції кута нахилу

Кут повороту φ, град	Вага метала в міксері $G_м$, т	Момент від ваги метала $M_м$, Нм	Момент від ваги міксера $M_о$, Нм	Момент від ваги ролико-вих обойм $M_р$, Нм	Момент від тертя в ролико-вих опорах $M_{тр}$, Нм	Загальний перекидний момент $M_{оп}$, Нм
0	1285,8	3209426	278977,3	534187,7	632835	3029096
3	1285,8	3278042	115960,9	477920,3	632825,3	3316986
6	1188,1	3176981	−47373,4	421325,3	603649,8	3406678
9	1078,1	3009654	−210578	364441,6	570772,7	3426563
12	963,5	2789697	−373205	307308,1	536489,3	3392084
15	846,4	2526086	−534809	249964	501479,4	3312411
18	728,8	2228512	−694948	192448,6	466327,2	3197338
21	612,8	1907321	−853182	134801,3	431652,4	3057353
24	500,3	1574164	−1009077	77061,58	398032,6	2904212
27	393,5	1241547	−1162206	19269,06	366101,2	2750585
30	294,4	922189,6	−1312150	−38536,7	336475,9	2609352
33	204,8	627639,1	−1458497	−96316	309691,4	2492144
36	126,8	370809,7	−1600847	−154029	286360,8	2412047
39	62,7	165588,9	−1738809	−211637	267211,8	2383246
42	16,3	29999,3	−1872004	−269100	253317,4	2424421
44	0	0	−1957973	−307308	248454	2513735

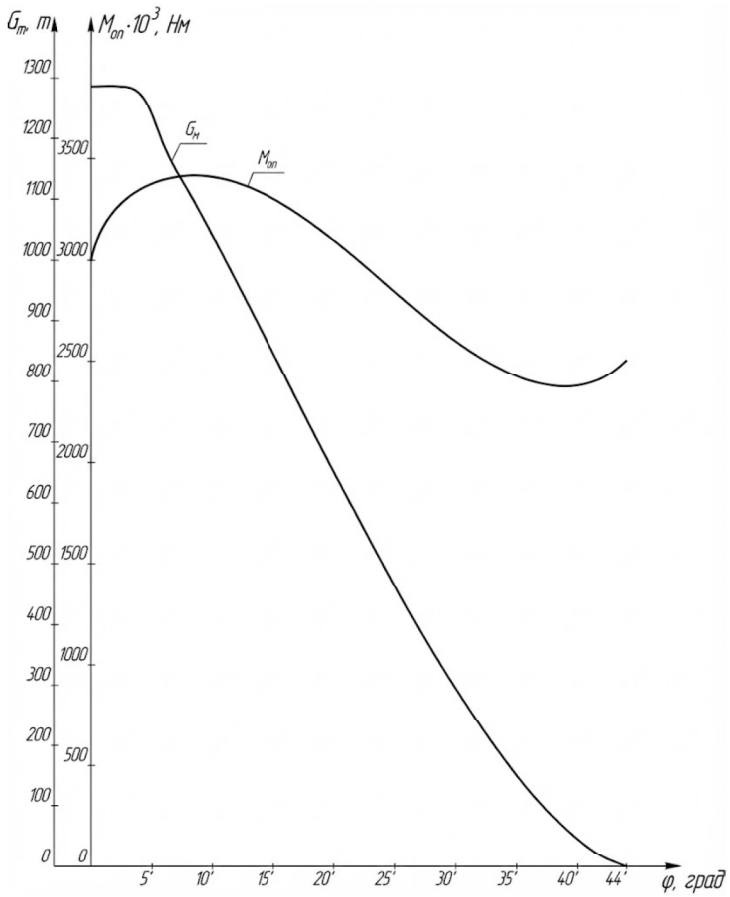


Рисунок 2.8 − Графік зливу метала та загального перекидного моменту в функції кута нахилу

Кут між напрямом рейки та коромислом, знаходимо з прямокутних трикутників ABN та ABC, розраховуючи за формулою:

$$\delta = \operatorname{arctg}\frac{H\cdot\sin(\gamma+\varphi)}{R_1 - H\cdot\cos(\gamma+\varphi)} + \operatorname{arctg}\frac{r_1}{l_p},\ \text{град} \qquad (2.50)$$

$$\delta = \operatorname{arctg}\frac{6726\cdot\sin(21{,}66+0)}{5400 - 6726\cdot\cos(21{,}66+0)} + \operatorname{arctg}\frac{325}{2592} = 116\,.$$

Плече дії сили вздовж рейки:

$$h_p = R_1\cdot\sin(180-\delta),\ \text{мм} \qquad (2.51)$$

$$h_p = 5400\cdot\sin(180-116) = 4852\ \text{мм}$$

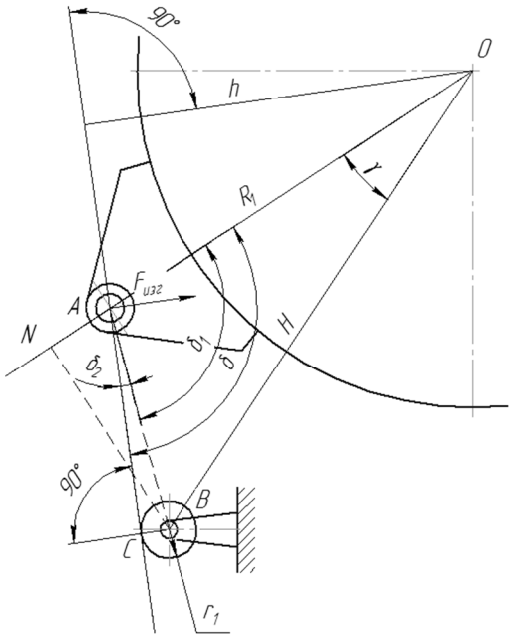


Рисунок 2.9 – Схема до визначення зусилля в рейці

Зусилля в рейці:

$$P_р = \frac{M_{оп}}{h_р \cdot 10^{-3}}, Н \qquad (2.52)$$

$$P_р = \frac{3029096}{4852 \cdot 10^{-3}} = 624300\,Н$$

Крутний момент рейкової шестерні розраховуємо як:

$$M_{рш} = P_р \cdot r_1 \cdot 10^{-3}, Нм \qquad (2.53)$$

$$M_{рш} = 624300 \cdot 325 \cdot 10^{-3} = 255650\ Нм$$

Силу, що згинає рейку знайдемо з виразу:

$$F_{зг.р} = P_р \cdot tg(\delta - 90°), \qquad (2.54)$$

$$F_{зг.р} = 6243002 \cdot tg(116 - 90) = 304990\ Н$$

Значення зусиль в рейці, моментів рейкової шестерні та сил, що згинають рейку аналогічно розраховуються для інших кутів повороту з кроком 3° до повного спустошення міксера. Отримані результати наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 − Розрахункові значення зусиль в рейці та моментів на валу рейкової шестерні

Кут повороту φ, град	Довжина рейки l_p, мм	Кут між рейкою та коромислом δ, град	Плече дії сили вздовж рейки h_p, мм	Зусилля в рейці P_p, Н	Момент рейкової шестерні $M_{рш}$, Нм	Сила, що згинає рейку $F_{зг.р}$, Н
0	2605	116	4852	624300	255650	304990
3	2877	110	5052	656615	268885	248015
6	3155	106	5191	656295	268755	188215
9	3436	102	5285	648295	265480	135675
12	3719	98	5347	634400	259785	89605
15	4003	95	5383	615375	251995	49280
18	4286	91	5398	592270	242535	14220
21	4569	88	5398	566400	231940	−15990
24	4850	85	5384	539430	220900	−41840
27	5130	83	5358	513315	210200	−64015
30	5407	80	5323	490165	200725	−83435
33	5681	78	5280	472010	193290	−101265
36	5953	76	5229	461305	188905	−119030
39	6221	73	5171	460905	188740	−138740
42	6486	71	5107	474755	194410	−163195
44	6660	70	5061	496710	203405	−184890

Для значень зусиль, що згинають рейку, знак «−» показує зворотній напрямок прикладання зусилля $F_{зг.р}$.

Таким чином, виконавши попередні розрахунки можна зробити висновки, що теоретичні методи визначення перекидних моментів та зусиль, що діють на рейку запропонованої конструкції коробки механізму нахилу стаціонарного міксера є доволі складними та громіздкими і у випадку їхнього використання в умовах діючого металургійного виробництва потребують якомога більшого спрощення.

3 ДОСЛІДНО–ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Методика проведення досліджень

Дослідження механізму нахилу стаціонарного міксеру виконувалися теоретично-експериментальним методом.

В теоретичних дослідженнях використані прикладні програми аналізу та числового вирішення аналітичних виразів. Теоретичні розрахунки базуються на положення теоретичної механіки, теорії машин та механізмів, опору матеріалів тощо.

Експериментальні дослідження проводилися з метою підтверження отриманих теоретичних значень та розробки математичної моделі, яка дозволить значно спростити методику визначення зусиль, що діють на рейку.

Вимірювання зусиль, що діють на рейку, виконувалося методами тензометрії з використанням тензометрів опору (тензорезисторів).

Обробка експериментальних данних проводилася за прийнятими методиками оцінки дослідних данних [29, 34-36]. При аналізі похибок експериментальних вимірів прийнято наступні припущення:

– похибки вимірів носять випадковий характер та підпорядковуються розподілу Стьюдента;

– всі виміри в експериментах відносяться до числа прямих вимірів.

Вимірювання зусиль, що діють на рейку, виконуємо шляхом використання тензометрів опору (тензорезисторів). Встановлення тензорезисторів виконано у вигляді мостової схеми (рис.3.1).

Серед різноманітних типів електротензометрів (індуктивних, ємнісних, магнітопружніх та інших) тензометри опору відповідають найбільш високим вимогам точності вимірювання при роботі в особливо важких умовах. Вони мають малі габарити, володіють високою конструктивною пристосовністю та малою інерцією, що є важливою якістю при їх використанні для дослідження швидкозмінних в часі процесів.

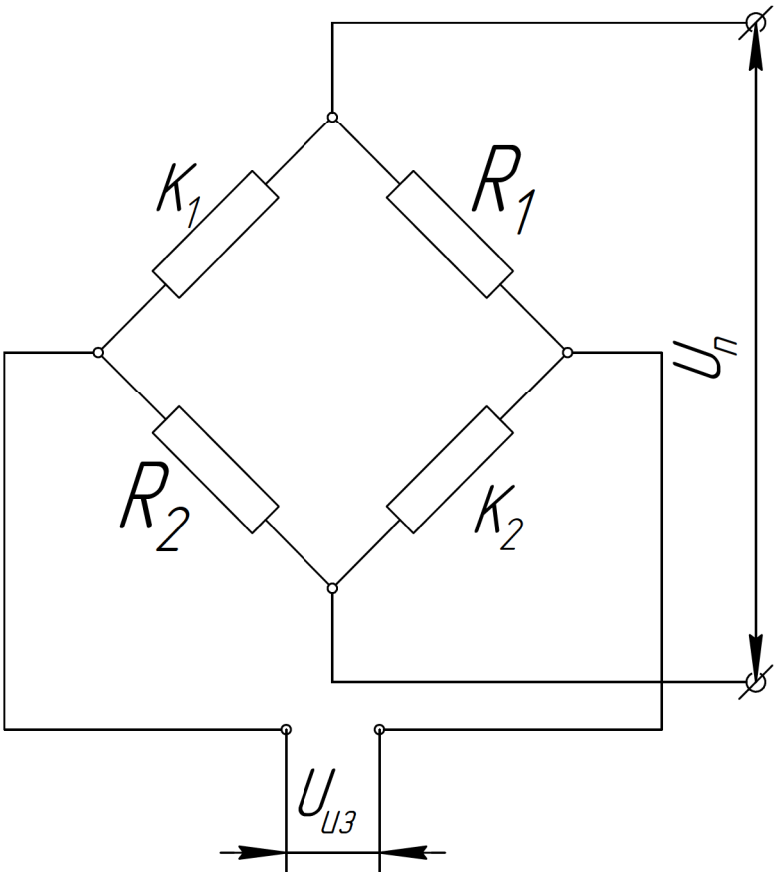


Рисунок 3.1 – Схема з’єднання тензорезисторів

Робота тензометрів основана на явищі тензоефекту, що полягає в зміні опору провідників при їх механічній деформації.

Тензорезистори включено в схему таким чином, щоб отримати найбільшу різницю в рівнянні для визначення струму:

$$I = U \cdot \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{M}. \qquad (3.1)$$

Тензорезистори R_1 та R_2 сприймаючи деформацію зтискування, зменшують свій опір. При цьому отримуємо найбільше значення струму.

Тензорезистори R_1 та R_2 наклеюємо на зубчату рейку, а K_1 та K_2 наклеюємо на спеціально встановлену ненавантажену пластину. Вони предназначені для компенсації впливу температури.

3.2 Обробка результатів проведення експерименту

Експериментальні, теоретичні та середні значення зусиль в рейці, в залежності від кута нахилу міксера наведені в таблиці 3.1 та представлені у вигляді графічної залежності на рисунку 3.2.

Відхилення експериментальної величини від теоретичної ΔP, розраховуємо за формулою:

$$\Delta P = P_{р.е} - P_{р.т}, \tag{3.2}$$

$$\Delta P = 630100 - 624300 = 5800.$$

Розрахунки виконуємо для всіх значень кутів.

Дисперсію розподілення D, розраховуємо за формулою:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta P^2}{n}, \tag{3.3}$$

де $n = 16$ – кількість значень;

$$D = \frac{5800^2 + 4700^2 + ... + 6890^2}{16} = 1{,}59 \cdot 10^7.$$

Середньоквадратичне відхилення σ, розрахуємо за формулою:

$$\sigma = \sqrt{D}, \tag{3.4}$$

$$\sigma = \sqrt{1{,}59 \cdot 10^7} = 3985.$$

Побудувавши верхню та нижню границю відхилень у вигляді кривих та зобразивши на цьому графіку криву експериментальних значень ми бачимо, що практично усі точки лежать в межах середньоквадратичних відхилень. Виходячи з цього можемо зробити висновок, що теоретична модель процесу нахилу міксера 1300 т є адекватною (рис. 3.3).

Таблиця 3.1 – Значення зусиль в рейці в залежності від кута нахилу

Кут нахилу φ, град	Зусилля в рейці теоретичні $P_{p.m}$, Н	Зусилля в рейці експериментальні $P_{p.e}$,Н	Відхилення ΔP, Н	Середнє значення $P_{p.cp.}$
0	624300	630100	5800	627200
3	656615	661315	4700	658965
6	656295	659945	3650	658120
9	648295	651275	2980	649785
12	634400	636550	2150	635475
15	615375	617125	1750	616250
18	592270	593390	1120	592830
21	566400	566960	560	566680
24	539430	538650	-780	539040
27	513315	511445	-1870	512380
30	490165	487315	-2850	488740
33	472010	468360	-3650	470185
36	461305	456435	-4870	458870
39	460905	455345	-5560	458125
42	474755	468505	-6250	471630
44	496710	489820	-6890	493265

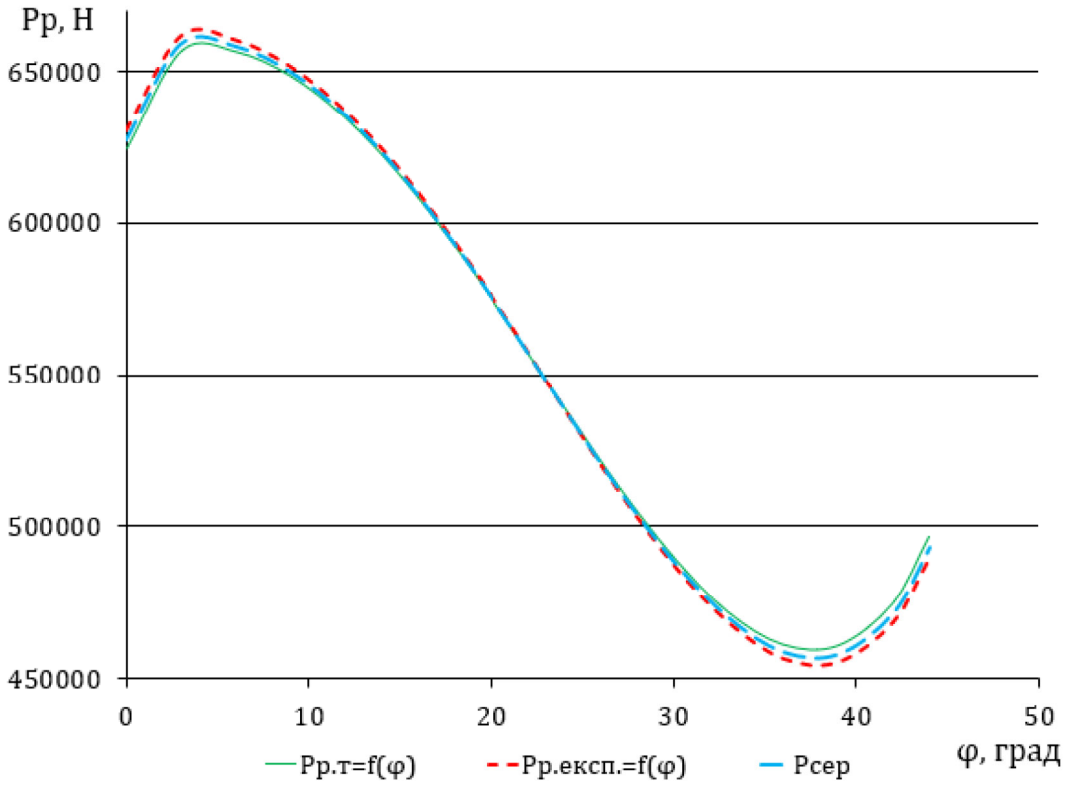


Рисунок 3.2 – Графік залежності зусиль в рейці від кута нахилу міксера

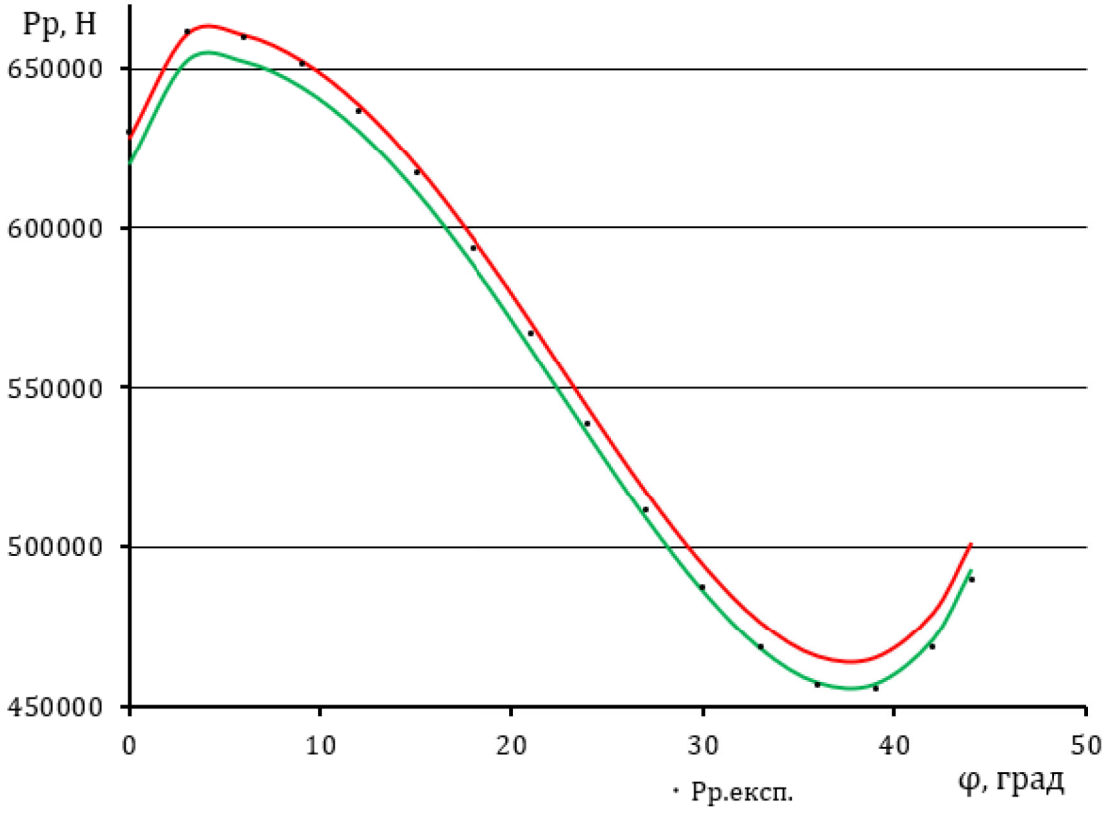


Рисунок 3.3 – Графік аналізу адекватності теоретичної моделі

3.3 Кореляційний аналіз результату проведення експерименту

Проведення кореляційного аналізу є важливою складовою експериментального дослідження, оскільки забезпечує виявлення закономірностей між параметрами, підтвердження теоретичних положень та структуризацію даних для подальшого моделювання і оптимізації досліджуваного процесу. Кореляційний аналіз виконано для середніх значень зусиль в рейці представлених в табл. 3.1.

Для спрощення розрахунку коефіцієнта кореляції складемо таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – До розрахунку коефіцієнта кореляції

φ	$P_{ср}$	φ^2	P_p^2	$\varphi \cdot P_{р.н}$
0	627200	0	$3{,}93 \cdot 10^{11}$	0
3	658965	9	$4{,}34 \cdot 10^{11}$	1976895
6	658120	36	$4{,}33 \cdot 10^{11}$	3948720
9	649785	81	$4{,}22 \cdot 10^{11}$	5848065
12	635475	144	$4{,}04 \cdot 10^{11}$	7625700
15	616250	225	$3{,}80 \cdot 10^{11}$	9243750
18	592830	324	$3{,}51 \cdot 10^{11}$	10670940
21	566680	441	$3{,}21 \cdot 10^{11}$	11900280
24	539040	576	$2{,}91 \cdot 10^{11}$	12936960
27	512380	729	$2{,}63 \cdot 10^{11}$	13834260
30	488740	900	$2{,}39 \cdot 10^{11}$	14662200
33	470185	1089	$2{,}21 \cdot 10^{11}$	15516105
36	458870	1296	$2{,}11 \cdot 10^{11}$	16519320
39	458125	1521	$2{,}10 \cdot 10^{11}$	17866875
42	471630	1764	$2{,}22 \cdot 10^{11}$	19808460
44	493265	1936	$2{,}43 \cdot 10^{11}$	21703660
$\sum 359$	∑8897540	$\sum 11071$	$\sum 5{,}04 \cdot 10^{12}$	∑184062190

Коефіцієнт кореляції $r_{P\varphi}$, розраховуємо за формулою:

$$r_{P\varphi} = \frac{n \cdot \sum \varphi_i \cdot P_i - \sum \varphi_i \cdot \sum P_i}{\sqrt{\left[n \cdot \sum \varphi_i^2 - \left(\sum \varphi_i\right)^2\right] \cdot \left[n \cdot \sum P_i^2 - \left(\sum P_i\right)^2\right]}}. \quad (3.5)$$

де $n = 16$ – кількість значень вибірки;

$$r_{XY} = \frac{16 \cdot 184062190 - 359 \cdot 8897540}{\sqrt{\left[16 \cdot 11071 - 359^2\right] \cdot \left[16 \cdot 5{,}04 \cdot 10^{12} - 8897540^2\right]}} = -0{,}94.$$

Коефіцієнт кореляції $\left|r_{P\varphi}\right| = 0{,}935 > 065$ – тому розраховуємо коефіцієнти *a* та *b*. Знак «–» вказує на те, що залежність спадаюча.

Коефіцієнт *a*, розраховуємо як:

$$a = \frac{n \cdot \sum \varphi_i \cdot P_i - \sum \varphi_i \cdot \sum P_i}{n \cdot \sum \varphi_i^2 - \left(\sum \varphi_i\right)^2}. \quad (3.6)$$

$$a = \frac{16 \cdot 184062190 - 359 \cdot 8897540}{16 \cdot 11071 - 359^2} = -5165.$$

Коефіцієнт *b*, розраховуємо за формулою:

$$b = \frac{\sum P_1 - a \cdot \sum \varphi_1}{n}. \quad (3.7)$$

$$b = \frac{8897540 - (-5165) \cdot 359}{16} = 671985.$$

Тоді пряма залежність зусилля в рейці від кута нахилу міксера буде мати вигляд, Н:

$$P'_{р} = a \cdot \varphi + b = (-5165) \cdot \varphi + 671985 . \quad (3.8)$$

$$P'_{р} = -5165 \cdot 0 + 671985 = 671985 .$$

Достовірність зв'язку $\rho_{р}$, розраховуємо за формулою:

$$\rho_{р} = t_{qk} \cdot \frac{1 - r_{P\varphi}^{2}}{\sqrt{n}}, \quad (3.9)$$

де $t_{qk} = 2{,}145$ – коефіцієнт, що відображає розподілення Стьюдента [37];

$k = n - 2 = 16 - 2 = 14$ – число ступенів свободи;

$q = (1 - \beta) \cdot 100\% = (1 - 0{,}95) \cdot 100\% = 5$ – ймовірнісний інтервал;

$\beta = 0{,}95$ – надійність;

$$\rho_{р} = 2{,}145 \cdot \frac{1 - (-0{,}94)^{2}}{\sqrt{16}} = 0{,}062 .$$

Відхилення розрахункового значення від середнього ΔP_{K}, Н, розраховуємо за формулою:

$$\Delta P_{К} = P'_{р} - P_{ср}, \quad (3.10)$$

$$\Delta P_{К} = 671985 - 624300 = 44785 .$$

Середньоарифметичне відхилення S', Н, розраховуємо за формулою:

$$S' = \frac{\sum \Delta P_{К}}{n}, \quad (3.11)$$

$$S' = \frac{346355}{16} = 21650.$$

Середнє значення зусилля в рейці $P'_{p.cp}$, Н, розраховуємо за формулою:

$$P'_{p.cp} = \frac{\sum P'_p}{n}, \tag{3.11}$$

$$P'_{p.cp} = \frac{8897525}{16} = 556095.$$

Коефіцієнт варіації ν_P, розраховуємо за формулою:

$$\nu_P = \frac{S'}{P'_{p.cp}}, \tag{3.12}$$

$$\nu_P = \frac{21650}{556095} = 0{,}039.$$

Дисперсію розподілення D'_2, розраховуємо за формулою:

$$D'_2 = \frac{\sum \Delta P'^2_к}{n}, \tag{3.13}$$

$$D'_2 = \frac{(44785)^2 + (-2475)^2 + \ldots + (-48540)^2}{16} = 6{,}26 \cdot 10^8.$$

Середньоквадратичне відхилення σ'_2, розрахуємо за формулою:

$$\sigma'_2 = \sqrt{D_2}, \tag{3.14}$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{6{,}26 \cdot 10^8} = 25015.$$

Остаточно рівняння лінійної залежності зусиль в рейці від кута нахилу має вигляд:

$$P'_p = a \cdot \varphi + b = (-5165) \cdot \varphi + 671985 \pm 25015.$$

Результати обчислень зводимо до таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – До розрахунку середньоквадратичного відхилення

φ	$P_{ср}$	P'_p	ΔP_K
0	627200	671985	44785
3	658965	656490	-2475
6	658120	640995	-17125
9	649785	625500	-24285
12	635475	610005	-25470
15	616250	594510	-21740
18	592830	579015	-13815
21	566680	563520	-3160
24	539040	548025	8985
27	512380	532530	20150
30	488740	517035	28295
33	470185	501540	31355
36	458870	486045	27175
39	458125	470550	12425
42	471630	455055	-16575
44	493265	444725	-48540
∑*359*	∑8897540	∑8897525	∑346355

Будуємо пряму лінійної залежності зусилля в рейці від кута нахилу міксера. Наносимо межі середньоквадратичних відхилень. На цьому ж графіку зображуємо криві залежності зусиль в рейці від кута нахилу отримані експериментальним та теоретичним шляхом (рис. 3.4).

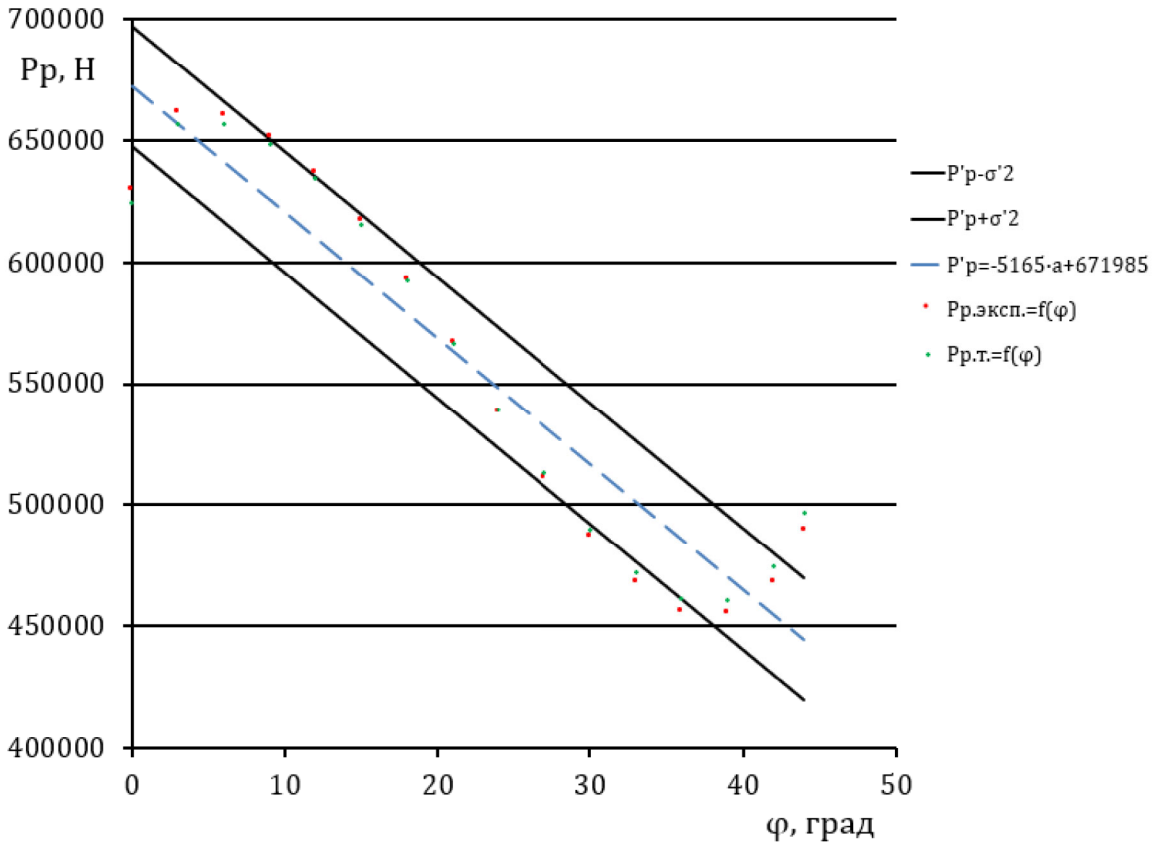


Рисунок 3.4 – Результати кореляційного аналізу

Кореляційний аналіз є одним із базових інструментів статистичної обробки експериментальних даних і застосовується для оцінювання характеру та інтенсивності взаємозв’язку між досліджуваними параметрами. Необхідність його проведення зумовлена тим, що в більшості технічних систем зміна одного показника нерідко супроводжується зміною інших величин, що впливають на кінцевий результат експерименту. Встановлення таких залежностей дозволяє отримати більш повне уявлення про поведінку об’єкта дослідження та забезпечити обґрунтованість подальших висновків.

Першочерговим завданням кореляційного аналізу є визначення наявності та сили статистичного зв'язку між параметрами. Розрахунок коефіцієнтів кореляції дозволяє оцінити, наскільки варіації одного фактора пов'язані зі змінами іншого, а також визначити напрям взаємодії (прямий або обернений). Виявлення таких зв'язків є важливим кроком під час інтерпретації експериментальних даних, оскільки дає змогу відокремити суттєві фактори від другорядних.

Як ми бачимо з представленого на рисунку 3.4 графіку, заміна теоретичної моделі процесу нахилу міксера на лінійну є досить наближеною і не виключає досить значних помилок та допущень.

3.4 Розробка спрощеної математичної моделі залежності зусиль в рейці від кута нахилу міксера

За попередніми розрахунками побудували криву залежності зусиль в рейці від кутів нахилу міксера за середніми значеннями. Для отриманої кривої задали лінію тренда − поліноміальну (рис. 3.4).

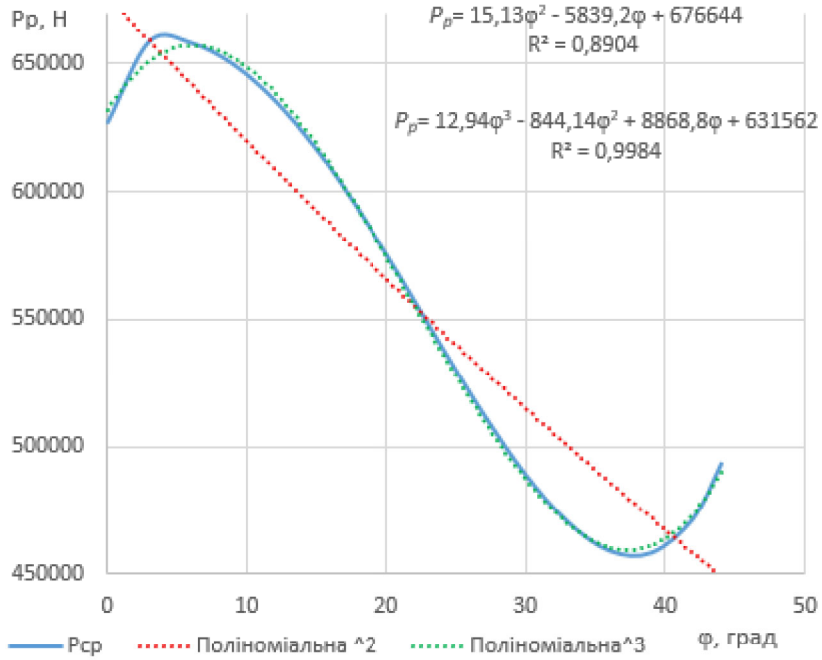


Рисунок 3.5 – Крива до визначення спрощеної математичної моделі.

Аналіз даних кривих на рис. 3.4 дозволяє встановити закон, якому підпорядковується залежність зусиль в рейці від кута нахилу міксера, яка має вигляд:

- для поліноміальної кривої 2-го ступеня:

$$P_р = 15{,}13 \cdot \varphi^2 - 5839{,}2 \cdot \varphi + 676644; \qquad (3.15)$$

величина достовірності апроксимації $R^2 = 0{,}8904$;

- для поліноміальної кривої 3-го ступеня:

$$P_р = 12{,}94 \cdot \varphi^3 - 844{,}14 \cdot \varphi^3 + 8868{,}8 \cdot \varphi + 631562; \qquad (3.16)$$

величина достовірності апроксимації $R^2 = 0{,}9984$.

Порівнняння рівнів величини апроксимації дозволяє зробити висновок, що поліноміальна крива 3-го ступеня набагато точніше описує процес нахилу міксера.

За рівнянням (3.16) розраховуємо значення зусиль у рейці: $P''_р$, Н:

$$P_р = 12{,}94 \cdot 0^3 - 844{,}14 \cdot 0^3 + 8868{,}8 \cdot 0 + 631562 = 631562.$$

Відхилення теоретичної величини від наближеної ΔP_2, розраховуємо за формулою:

$$\Delta P_2 = P''_р - P_{ср}, \qquad (3.17)$$

$$\Delta P_2 = 631562 - 627200 = 4362.$$

Розрахунки виконуємо для всіх значень кутів. Результати розрахунків заносимо до таблиці 3.4.

Дисперсію розподілення D_2, розраховуємо як

$$D_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta P_2^2}{n}, \qquad (3.18)$$

де $n = 16$ – кількість значень;

$$D_2 = \frac{4362^2 + (-8045)^2 + \ldots + (-3450)^2}{16} = 9{,}18 \cdot 10^6.$$

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку відхилення теоретичної величини від наближеної

Кут повороту φ, град	Середні значення зусилля в рейці $P_{p.m}$, Н	Зусилля в рейці за спрощеною моделю P''_p, Н	Відхилення ΔP_2
0	627200	629390	4362
3	658965	648345	-8045
6	658120	654715	-940
9	649785	650410	2655
12	635475	637380	3315
15	616250	617590	2085
18	592830	593050	335
21	566680	565795	-1300
24	539040	537900	-1970
27	512380	511460	-2040
30	488740	488605	-1460
33	470185	471505	-195
36	458870	462350	1690
39	458125	463375	2970
42	471630	476835	2060
44	493265	493845	-3450

Середньоквадратичне відхилення σ_2, розрахуємо по формулі:

$$\sigma_2 = \sqrt{D_2}, \qquad (3.19)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{9{,}18 \cdot 10^6} = 3030$$

Остаточно рівняння спрощеної моделі визначення зусиль в рейці в залежності від кута нахилу має вигляд:

$$P_p = 12{,}94 \cdot \varphi^3 - 844{,}14 \cdot \varphi^3 + 8868{,}8 \cdot \varphi + 631562 \pm 3030 \quad (3.20)$$

Будуємо криву залежності зусилля в рейці від кута нахилу міксера. Наносимо межі середньоквадратичних відхилень. На цьому ж графіку зображуємо криві залежності зусиль в рейці від кута нахилу отримані експериментальним та теоретичним шляхом (рис. 3.5).

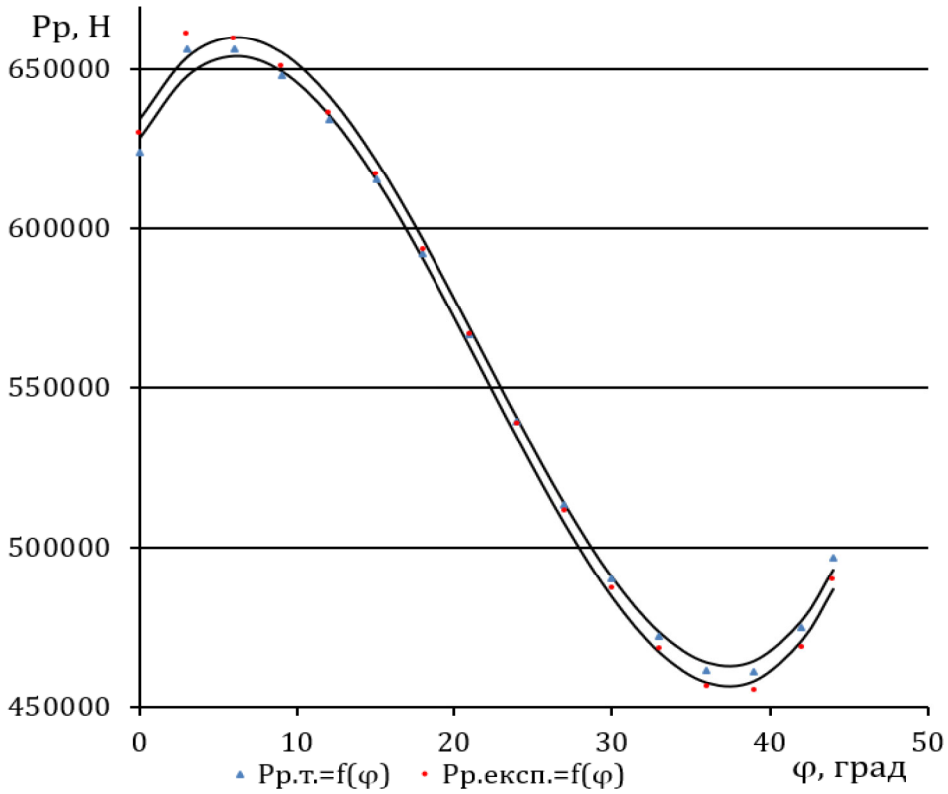


Рисунок 3.6 – Результати розробки спрощеної математичної моделі

Аналіз графічних залежностей отриманих за розробленою спрощеною математичною моделлю (рис.3.6) дозволяє зробити висновок, що має запропонована модель має достатньо високу точність визначення зусиль рейці та низьке значення відхилення. Запропонована математична модель на відміну від складного та занадто громіздкого теретичного методу, дозволяє визначати навантаження на елементи механізму нахилу міксера в декілька дій без потреби використання значних розрахункових потужностей комп'ютерної техніки.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА В ГАЛУЗІ

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів міксерного відділення мартенівського цеху

Розглянемо карту умов праці слюсаря ремонтника, (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Технологічна карта умов праці, професія ремонтний персонал, місце роботи: міксерне відділення

№ п/п	Фактори виробничого середовища	Нормат-не значення ГДК, ГДР	Факт-не значення	III клас – шкідливі і небезпечні умови праці			Трива-лість дії,%
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3						
	1 клас небезпеки						
	Ангідрид хромовий	0,01	0,01	1,33			89,6
	Марганцю оксиди	0,05	0,15		3,01		89,6
	3-4 клас небезпеки						
	Ангідрид сірчастий	10	13,33	1,33			89,6
	Азоту діоксид	2	2,34	3,63			89,6
	Вуглецю оксид	20	22,5	1,125			89,6
	Заліза оксид	6	17,17	2,86			89,6
2	Пил переважно фіброгенної дії, мг/м^3						
	Кремнію діоксид кристалічний	4	102,21			25,55	89,6
3	Шум, дБА	80	95,8			15,8	
4	Мікроклімат у приміщенні, теплий період						
	- температура повітря, °С	15-26	47,5			21,5	90,4
	- швидкість руху повітря, м/сек	0,5-0,6	0,5				90,4
	- відносна вологість повітря, %	55	65	10			90,4
	- інфрачервоне випромінювання, Вт/м^2	140	6970			6970	82,5
	Кількість факторів			7	1	4	
5	Категорія важкості і напруженості праці	важка III; помірно напружена					

Умови й характер праці відносяться до III класу 3 ступеня.

Атестація робочого місця

Робочі місця мають у наявності: 4 фактора 3 ступеня (пил, шум, температура повітря, інфрачервоне випромінювання), 1 фактор 2 ступеня (шкідливі хімічні речовини – марганцю оксид), 7 факторів 1 ступеня (шкідливі хімічні речовини, відносна вологість повітря, робоча поза). Це відповідає показникам списку №1 та має такі пільги: доплати − 20%, додаткова відпустка 14 календарних днів, молоко, скорочена робоча неділя до 36 годин. Робочий має право, за умови відпрацювання обов'язкової кількості років робочого стажу, на вихід на пенсію за пільговим віком [38].

4.2 Визначення заходів та обладнання для нівелювання впливу виявлених шкідливих виробничих факторів

У таблиці 4.2 наведені основні небезпечні та щкідливі показники виробничого середовища трудового процесу, які мають місце у міксерному відділенні та відносяться до фізичної групи згідно [39] й заходи щодо їхнього усунення,

Таблиця 4.2 – Пропозиції технічних засобів для захисту від впливу небезпечних (шкідливих) факторів виробничого середовища

№ п/п	Небезпечний або шкідливий фактор виробничого середовища	Захисний пристрій	Тип пристрою	Параметри пристрою	Місце установки
1	Запилованість	Витяжна вентиляція	Механічна	До 10000 $м^3$/год.	Біля джерел виділення
2	Запиленість	Респіратор ЗІЗОД	Росток Тополь	≤ 30 мг/$м^3$	Індивідуально
3	Шум	Навушники противошумові	шумозахисні навушники НІОТ	Придатний до 110 дБА	Індивідуально
4	Температура	Утеплена куртка, ватяні штани,	ІПФ – 1	≤ -20 °С	Індивідуально
5	Шкідливі хімічні речовини	Теж що й при запилованості + костюм х/б, рукавиці	ШБ-1	≤ 13 мг/$м^3$	Індивідуально

У виробничих приміщеннях під вентиляцією розуміють організовану систему технічних засобів і заходів, спрямованих на створення та підтримання нормативних метеорологічних параметрів у робочій та обслуговуваній зонах, а також на забезпечення необхідного рівня чистоти повітряного середовища. Ефективна вентиляція є одним із ключових чинників формування безпечних і комфортних умов праці, оскільки вона забезпечує видалення надлишкового тепла, вологи, шкідливих домішок та пилу, а також підтримання оптимальних параметрів температури, вологості та швидкості руху повітря.

За принципом переміщення повітря вентиляційні системи поділяють на природні та механічні. Природна вентиляція ґрунтується на використанні гравітаційних і вітрових потоків, що виникають унаслідок різниці температур або тисків. Механічна вентиляція реалізується за допомогою вентиляторних агрегатів та інших технічних пристроїв, що забезпечують примусове подавання й відведення повітря незалежно від зовнішніх умов.

У технологічних приміщеннях міксерного відділення значна кількість забруднень, зокрема пилу й газоподібних домішок, утворюється внаслідок високотемпературних процесів та руху матеріальних потоків. Для зменшення пилоутворення й запобігання його осіданню на робочих поверхнях усе технологічне обладнання обладнується локальними відсмоктувальними пристроями типу зонтових укриттів (витяжною вентиляцією) [40]. Ці укриття з’єднуються системою повітропроводів із фільтраційно-очисними агрегатами, які забезпечують очищення видаленого повітря відповідно до вимог діючих нормативних документів [41]. Такий підхід дозволяє ефективно локалізувати джерела забруднення та мінімізувати надходження шкідливих факторів у робочу зону.

Нормативні параметри мікроклімату на постійних робочих місцях у міксерному відділенні визначаються чинними стандартами та санітарно-гігієнічними нормами. Основні допустимі значення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Нормативно встановлені показники температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні для умов виконання робіт середньої важкості категорії III [41]

Період року	Параметри мікроклімату		
	t, °C	$W_{пов}$, м/с	φ,%
Холодний	17 – 19	0,2	75
Теплий	20 – 22	0,3	70 при 25 °C

Раціональна організація освітлення виробничих приміщень є одним із ключових чинників створення безпечних і комфортних умов праці. Якісне світлове середовище забезпечує чітке розпізнавання об'єктів, знижує напруження зору та сприяє підвищенню точності виконання технологічних операцій. Недостатній рівень освітленості або неправильний розподіл світлового потоку ускладнюють виконання виробничих завдань, знижують продуктивність праці, спричиняють швидку втомлюваність органів зору та можуть призводити до професійних захворювань і нещасних випадків [42, 43].

У промисловій сфері штучне освітлення поділяють на кілька функціональних груп залежно від призначення. Робоче освітлення забезпечує нормальні умови для виконання технологічних операцій у темний період доби або у приміщеннях із недостатнім природним світлом. Аварійне освітлення підтримує мінімально необхідний рівень освітленості у разі виходу з ладу робочої системи. Евакуаційне освітлення призначене для безпечного виведення персоналу з приміщення у разі аварійних ситуацій і, як різновид аварійного, функціонує автономно. Охоронне освітлення використовується для контролю території та запобігання несанкціонованому доступу. За потреби частина світильників будь-якого виду може застосовуватися як чергове освітлення [44, 45].

З метою підвищення енергоефективності на підприємствах упроваджуються сучасні джерела світла – зокрема енергозберігаючі світлодіодні (LED) лампи потужністю 150 Вт та світильники типу «глибоковипромінювач»,

які забезпечують високу світлову віддачу та стабільність параметрів у складних виробничих умовах.

Відповідно до вимог нормативного документа [46], для міксерного відділення встановлено такі характеристики умов освітлення:

- характер роботи – середня точність;
- розмір об’єкта розпізнавання, мм – 0,5–1,0;
- розряд зорової роботи – IV;
- підрозряд – В;
- контрастність об’єкта розпізнавання – середня;
- яскравість оточення – середня;
- нормований рівень освітленості (ЕН) – штучна освітленість 400 лк.

Проєктування штучного освітлення здійснюється за двома основними схемами. Загальне освітлення може бути рівномірним або локалізованим і формується з урахуванням просторового розташування робочих місць. Комбіноване освітлення передбачає використання додаткових місцевих світильників, що підсилюють освітлення безпосередньої робочої зони. Використання лише місцевих світильників забороняється, оскільки різкі перепади яскравості між освітленими та затемненими ділянками спричиняють перенапруження зору, знижують продуктивність та підвищують ризик травматизму.

Шум на виробництві є поширеним шкідливим чинником, що суттєво впливає на стан здоров’я працівників. За природою виникнення його поділяють на кілька типів.

Механічний шум утворюється внаслідок тертя деталей машин та механізмів при холостому або робочому ході.

Аерогідродинамічний шум зумовлений рухом повітря, газів чи рідин зі значними швидкостями.

Імпульсний шум виникає в момент зіткнення твердих тіл, ударних технологічних процесів.

Термічний шум характерний для процесів згоряння газоподібного палива у пальникових пристроях.

Тривалий вплив шуму різної інтенсивності призводить до зниження гостроти слуху та розвитку професійної глухоти. Окрім цього, шум негативно впливає на функціональний стан організму: порушує діяльність центральної нервової системи, сприяє виникненню стресових реакцій, підвищує втому, що погіршує увагу та швидкість реакції працівників.

Зменшення шуму досягається через сукупність технічних і організаційних заходів. На рівні джерела його утворення застосовують заміну ударних взаємодій деталей безударними, перехід від зворотно-поступальних рухів до обертальних, зменшення інтенсивності коливань і вібрацій. Ефективними є методи демпфування, що передбачають використання матеріалів із високим внутрішнім тертям – гуми, пробки, бітуму, повсті, азбесту тощо. Для зниження рівня вібрацій поверхні покривають звукопоглинальними облицювальними матеріалами.

Як засоби індивідуального захисту працівників застосовуються протишумні навушники, зокрема малогабаритні моделі типу ВЦНІІОТ-4А, які забезпечують зниження рівня шуму до нормативно допустимих величин [47].

Основними чинниками, що призводять до виникнення пожеж і вибухів у промислових умовах, є різноманітні теплові імпульси, серед яких найбільшу небезпеку становлять електричні іскри, пробої в електрообладнанні та явища статичної електризації. Накопичення зарядів статичної електрики на поверхнях обладнання або технологічних матеріалів може спричинити неконтрольований розряд, що у відповідних умовах здатний ініціювати займання. З огляду на особливості технологічного процесу та специфіку матеріалів, що знаходяться в обігу, міксерне відділення відповідно до класифікації вибухонебезпечності [48] належить до категорії Д, тобто до приміщень, у яких обробляються негорючі речовини у холодному стані. За показниками пожежної небезпеки згідно [49] приміщення віднесено до II ступеня вогнестійкості, що характеризує будівлі з несучими огороджувальними конструкціями з природних та штучних кам’яних

матеріалів, бетону або залізобетону, із застосуванням листових негорючих облицювальних матеріалів.

Система пожежного захисту міксерного відділення включає комплекс первинних засобів пожежогасіння, призначених для оперативного реагування на загоряння на початковій стадії. До них належать:

- порошкові вогнегасники типу ВП-1 (10 одиниць),
- вуглекислотні вогнегасники ВВК-2 (14 одиниць),
- повітряно-пінні вогнегасники ВПП-1Д (18 одиниць),
- пожежний інвентар: покривала з негорючого теплоізоляційного матеріалу, ящики з піском, бочки з водою, пожежні відра та лопати;
- спеціальний інструмент для ліквідації осередків загоряння (багри, ломи, сокири тощо).

Крім того, у цеху змонтовано внутрішній протипожежний водопровід, обладнаний пожежними кранами, рукавами та приєднувальною арматурою, що забезпечує подачу води з необхідним тиском.

Для підвищення рівня пожежної безпеки на території підприємства діє низка обов’язкових заборон і вимог. Зокрема, забороняється:

- паління у невстановлених місцях, для паління обладнанно у спеціально відведені зони;
- блокувати або захаращувати під’їзні шляхи, проходи, доступи до будівель, протипожежних водопроводів і гідрантів;
- відключати окремі ділянки водогінної мережі чи внутрішні пожежні крани, а також знижувати встановлений тиск у системах водопостачання;
- допускати до проведення вогневих робіт працівників, які не пройшли обов’язковий інструктаж з пожежної безпеки;
- використовувати воду з пожежних водойм і протипожежний інвентар не за призначенням;
- застосовувати відкритий вогонь для огляду технологічного обладнання.

Дотримання зазначених вимог, належне технічне обслуговування протипожежних систем і регулярне навчання персоналу є ключовими елементами забезпечення безпечних умов праці та мінімізації ризику виникнення аварійних ситуацій у міксерному відділенні.

4.3 Дослідження засобів захисту від тепла

Для створення сприятливого мікроклімату на відкрито розташованих фіксованих робочих місцях або місцях переважного перебування персоналу, що характеризуються наявністю теплових випромінювань, слід застосовувати локалізацію тепловиділень від нагрітих поверхонь (теплоізоляцію, екранування), захист від випромінювань відкритих отворів печей, захист робочих місць від опромінення (екранування, водоповітряне душирування, високодисперсне водорозпилення, приплив зовнішнього повітря в робочу мікрозону) [50].

В арсеналі промислового теплозахисту є наступні технічні засоби для практичного застосування в виробничих умовах:

1. По локалізації виділень: екрани різних типів у вигляді перешкод на дорозі теплового потоку від гарячих стін агрегату в навколишнє середовище цеху; завіси різного вигляду, призначені в основному для обгороджування відкритих джерел; високодисперсне розпилення води; обдування стін повітряним потоком; індивідуальні захисні засоби.

2. По зниженню дії тепла на організм: души повітряні і водоповітряні з попередньою обробкою повітря; кондиціонери, призначені для зниження температури повітря в закритих мікрооб'ємах; екрани радіаційного охолоджування; високодисперсне розпилення води для зниження температури повітря на робочому місці.

3. По асиміляції виділень: провітрювання цехів (аерація) загальне і місцеве.

Що стосується аерації, то вона має самостійне значення як технічний засіб санації повітряного середовища в цехах від тепла, пилу і газів.

Використання технічних засобів 1 і 2 груп залежно від призначення можна розділити на засоби локалізації джерел і засоби захисту робочих місць. Окрім технічних засобів, є гігієнічні і організаційні засоби.

Раціональне чергування праці і пауз відпочинку, питний режим, вентиляція переслідують мету зменшити дію опромінення на організм. Практика експлуатації гарячих цехів показує, що єдиного універсального засобу немає. Лише вживанням комплексу заходів можна досягти успіху.

Залежно від типа робочого місця: відкритого нефіксованого (горнові, сталевари, зварювальники печей), фіксованого (вальцівник, клеймовщики) або закритого (оператор, кранівник) завдання захисту вирішується по-різному.

Для захисту від зовнішнього джерела випромінювання закритого робочого місця можуть бути застосовані будь-які засоби і перш за все засоби зниження інтенсивності потоку опромінення, які ділять на наступні типи:

- теплоізоляція:
- екранування;
- комбіновані засоби.

В даний час в практиці застосовують сотні різних теплоізоляційних матеріалів і конструкцій.

Ізоляцію в більшості випадків виконують легковісною цеглою. Додатковим теплоізоляційним шаром може служити зовнішня ущільнююча обмазка завтовшки до 2 см, до складу якої входить азбест. Інколи застосовують засипку з сипких або волокнистих матеріалів між зовнішнім сталевим кожухом і цегельною кладкою.

Мастична ізоляція здійснюється шляхом нанесення на гарячу поверхню ізольованого об'єкту ізоляційної мастики. Мастика є штукатурним розчином з теплоізоляційним наповнювачем. Мастичну ізоляцію можна застосовувати на об'єктах будь-якої конфігурації; вона дає міцний гладкий шар, але вимагає попереднього розігрівання поверхні і високої кваліфікації ізолювальників.

Обгорткова ізоляція виготовляється з волокнистих матеріалів - вати, войлока, матів або тканини. Устрій обгорткової ізоляції простіший, ніж

мастичною, але на об'єктах великого розміру і складної конфігурації її важко закріплювати. Поверхню обгорткової ізоляції необхідно закривати кожухом з щільного матеріалу.

Засипну ізоляцію застосовують рідше, оскільки необхідний жорсткий кожух довкола ізольованого об'єкту. Простір усередині кожуха заповнюють сипким або волокнистим матеріалом. Під дією вібрації, зволоження, власної маси ізоляційний матеріал осідає і якість ізоляції різко погіршується. Контролювати стан ізоляції важко. Для об'єктів складної конструкції неможливо виготовити кожух з однаковим зазором по всій поверхні. В результаті з'являються місця із зайвою товщиною ізоляції, що веде до перевитрати ізоляційного матеріалу.

Останнім часом широкого поширення набула ізоляція волокнистими матеріалами, призначених для теплової ізоляції устаткування.

Номенклатура волокнистих теплоізоляційних матеріалів, представлена у вигляді:

- матів мінераловатних прошивних безобкладочних або в обкладинках з металевої сітки або склотканини з однієї або двох сторін;
- виробів мінераловатних з гофрованою структурою для промислової теплової ізоляції (ТУ 36.16.22-8-91);
- плит теплоізоляційних мінераловатних на синтетичному зв'язуючому щільністю від 50 до 125 кг/м^3 (ДСТУ Б В.2.7-97-2000);
- виробів із скляного штапельного волокна на синтетичному зв'язуючому (ДСТУ Б В.2.7-56:2010).

Екрани і завіси можна розділити на три типи: 1 – непрозорі, 2 – напівпрозорі, 3 – прозорі.

До 1-го типу відносяться металеві водоохолоджувані і футеровані, азбестові, альфольові, алюмінієві екрани.

До 2-го типу відносяться екрани з металевої сітки, ланцюгові завіси, екрани із скла, армованого металевою сіткою. Для покращення теплоізоляційних властивостей розглянуті екрани можуть омиватися водою.

До 3-го типу відносяться екрани з різного виду скла: силікатного, кварцового і органічного, безбарвного, забарвленого і металізованого, плівкові водяні завіси, вільні і стікаючі по склу, вододисперсні завіси [50].

За принципом роботи теплові екрани зазвичай поділяють на три основні групи: тепловідображаючі, теплопоглинаючі та тепловідвідні. Водночас такий поділ є доволі умовним, адже будь-який екран у тій чи іншій мірі одночасно здатний і відбивати, і поглинати, і відводити теплову енергію. Віднесення конкретної конструкції до певного типу визначається тим, яка з цих властивостей проявляється найсильніше в процесі експлуатації.

Підвищення ефективності теплозахисту досягається за рахунок раціонального поєднання характеристик кожного виду екранів. Тому під час проєктування важливо забезпечити мінімальну ступінь чорноти зовнішніх і внутрішніх поверхонь (що характерно для відбивальних екранів), значний термічний опір конструкції (ознака теплопоглинаючих екранів) та створення умов для вільного природного руху повітря вздовж поверхні екрана, що сприяє інтенсивнішому конвективному охолодженню в тепловідвідних системах.

Найефективнішими на практиці є комбіновані методи теплозахисту, які застосовуються для огородження закритих робочих місць від інтенсивного теплового випромінювання. Вони передбачають не лише теплоізоляцію та встановлення різних типів захисних екранів, а й впровадження цілого комплексу конструктивних та технологічних рішень, спрямованих на зменшення термічного навантаження на працівників. До таких заходів належать:

- використання багатошарових або різнорідних екранів, що поєднують відбивальні, поглинаючі та відвідні властивості;
- застосування додаткової теплоізоляції огороджувальних конструкцій;
- організація постійного обдування кабін, пультів та робочих зон повітрям;
- встановлення систем кондиціонування і вентиляції.

Завдяки застосуванню теплозахисних екранів вдається локалізувати інтенсивні джерела теплового випромінювання, істотно зменшити рівень

опромінення на робочих місцях та знизити температуру навколишніх поверхонь, що забезпечує більш комфортні та безпечні умови праці. Розрахунок втрат тепла нагрітою стінкою міксера й теплозахисних екранів виконують за наступною методикою [51].

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі :

$$\alpha_к = \ell \cdot \sqrt{T_з - T_ц} = 2{,}56 \cdot \sqrt{473 - 314} = 32{,}2 \text{ Дж/(с·К)}, \quad (4.1)$$

де l=2,56 – для вертикальних поверхонь;

$T_з$ – температура зовнішньої поверхні;

$T_ц$ – температура в цеху.

Втрати теплоти конвекцією:

$$Q_k = \alpha_k \cdot (T_з - T_ц) \cdot S = 32.2 \cdot (473 - 314) \cdot 1 = 5119 \text{ Вт/с}, \quad (4.2)$$

де S – площа завалочного вікна, м^2.

Тепловіддача випромінюванням нагрітої стінки:

$$Q_{из} = C \cdot S \cdot \left[\left(\frac{T_з}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{огр}}{100} \right)^4 \right] = 5{,}35 \cdot 1 \cdot \left[\left(\frac{473}{100} \right)^4 - \left(\frac{314}{100} \right)^4 \right] = 2256 \text{ Дж/с}, \quad (4.3)$$

де C=5,35 Дж/(м^2·с·К) – приведений коэффіцієнт випромінення для червоної цегли.

Загальна втрата теплоти стінкою:

$$Q_{заг} = Q_к + Q_{изл} = 5119 + 2256 = 7375 \text{ Дж/с}. \quad (4.4)$$

Ступінь екранізації:

$$\mu = \frac{T_и}{T_е} = \frac{423}{303} = 1{,}4, \quad (4.5)$$

де $T_е$ – задана температура екрана, К;

$T_и$ – температура стінки біля завалочного вікна, К.

Наведений ступінь чорності джерела й екрана:

$$E_{дже} = \frac{1}{\frac{1}{E_{дж}} + \frac{1}{E_е} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,07} - 1} = 0,07, \quad (4.6)$$

де $E_{дж}$, $E_е$ – ступені чорності відповідно джерела й екрана (матеріал – альфоль).

Наведений ступінь чорності джерела й повітря:

$$E_{джпов} = \frac{1}{\frac{1}{E_{дж}} + \frac{1}{E_{пов}} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,82} - 1} = 0,75, \quad (4.7)$$

де $E_{пов}$=0,82 – поглинаюча здатність повітря.

Кількість екранів:

$$n = \frac{1 - \left(\frac{T_и}{T_{дж}}\right)^4}{\frac{1}{\mu^4} - \left(\frac{T_и}{T_и}\right)^4} \cdot \frac{E_{дже}}{E_{джпов}} - 1 = \frac{1 - \left(\frac{318}{473}\right)^4}{\frac{1}{1,4^4} - \left(\frac{318}{473}\right)^4} \cdot \frac{0,07}{0,75} - 1 \approx 1 \text{ екран} \quad (4.8)$$

Екрани потрібно встановлювати у зоні прорізів, що відкриваються, на відстані 500...600 мм від гарячої поверхні й на відстані 15...20 мм від поверхні без прорізів, у результаті чого теплопередача конвекцією в робочу зону значно знижується.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Ознайомлення з технологічним устаткуванням та вантажопотоками мартенівського цеху ПАТ МК«Запоріжсталь» показало, що незадовільна робота стаціонарного міксера для збереження рідкого чавуну, а саме його приводу нахилу, призводить до зниження продуктивності мартенівських печей, і відповідно до підвищення собівартості кінцевої продукції заводу.
2. На підставі наведеного літературного огляду встановлено, що для збереження рідкого чавуну у світовій практиці використовуються різні конструкції машин, серед яких перевага належить міксерам, які мають ті ж самі недоліки у вузлі нахилу, що й стаціонарний міксер мартенівського цеху ПАТ «Запоріжсталь».
3. В результаті запропонованої модернізації приводу нахилу міксера , а саме принципового змінення конструкції рейкової коробки механізму нахилу міксера, можливе досягнення наступних цілей – збільшення продуктивності, терміну служби, а також збільшення міжремонтних періодів.
4. Проведено розрахунки, що обгрунтовують запропоноване конструкторне удосконалення вузлів стаціонарного міксера та вказують на високу працездатність і надійність машини.
5. За результатами виконання дослідницької частини розроблено спрощену математичну модель, що має достатньо високу точність визначення зусиль в рейці та низьке значення відхилення. Наведена модель дозволяє розраховувати навантаження на елементи механізму нахилу міксера в декілька дій та позволяє уникнути виконання складного теоретичного розрахунку за відомими методиками.
6. Результати роботи можуть бути використані при впровадженні не тільки в міксерному відділенні, а й на підприємствах з обладнанням схожого конструктивного та технологічного характеру.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Учасники проектів Вікімедіа. Мартенівська піч – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Мартенівська_піч (дата звернення: 01.07.2025).
2. Мартенівська піч - історія, принцип роботи, схема та актуальність нині. *Metinvest*. URL: https://surl.li/xidaie (дата звернення: 01.07.2025).
3. Теорія металургійних процесів / В. Б. Охотський та ін. К. : ІЗМН, 1997. 512 с.
4. Системи технологій промисловості. Частина 1: конспект лекцій / Л. В. Камкіна та ін. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2014. 53 с.
5. Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посіб. / За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. К.: Вініченко, 2016. 224 с.
6. Мартенівський цех - Мартенівська піч. *Vuzlit*. URL: https://vuzlit.com/746486/martenivskiy (дата звернення: 01.12.2025).
7. Усачов В. П. Технологічні лінії та комплекси металургійних цехів. Частина 2. Технологічні основи компоновки ліній металургійних виробництв. К. : ІСДО, 1994. 416 с.
8. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів: навч. посіб. Кіровоград: КНТУ, 2007. 280 с. ISBN 5-217-00850-4
9. Крячко Г. Ю. Споруди та обладнання сталеплавильних цехів: метод. вказівки. Кам'янське: ДДТУ, 2016 р., 52 с.
10. Мовчан В.П., Бережний М.М. Основи металургії. Дніпропетровськ: Пороги, 2001. 334 с
11. Жук А.Я., Желябіна Н.К. Механічне устаткування цехів по виробництву металів та сплавів. Навчальний посібник Запоріжжя. Видавництво ЗДІА. 1998. 210 с.
12. Гречаний О. М., Васильченко Т.О., Мозгов Д. М. Дослідження шляхів підвищення надійності механізму нахилу електродугової печі. *Матеріали*

IV-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації – 2018». 2018. № 4. С. 84-87.

13. Жук А. Я., Таратута К. В., Гречаний О. М. Обладнання для виробництва металів та сплавів: метод. вказівки. Запоріжжя: ЗДІА, 2016, 67 с.
14. Павлище В. Т. Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія) Дніпропетровськ: РВА "Дніпро-ВАЛ", 2004. 454 с.
15. Дзержинський В.О., Єрін В.В., Ковальов В.В., Жабін С.І., Чаплигін С.А. Пат. 100347 Україна, МПК С21 С 1/06. Міксер для чавуну; заявник та власник ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». № U201500149 заявл. 12.01.15; опубл. 27.07.15, бюл. № 14.
16. Пат. 58188 Україна, МПК С21 С 1/06. Стаціонарний міксер / Г.С. Суков, М.О. Михайлов, В.В. Єрін та ін.; заявник та власник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – № U201009411 заявл. 27.07.10; опубл. 11.04.11, бюл. № 7.
17. Пат. 92866 Україна, МПК С21 С 1/06. Стаціонарний міксер / Г.С. Суков, М.О. Михайлов, В.О. Дзержинський та ін.; заявник та власник ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – № U201402890 заявл. 21.03.14; опубл. 10.09.14, бюл. № 17.
18. Пат. 57603 Україна, МПК С21 С 1/06. Міксер стаціонарний / В.Ф. Сергієнко, Г.С. Суков, Г.С. Протинякта ін.; заявник та власник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – № U20108357 заявл. 05.07.10; опубл. 10.03.11, бюл. № 11.
19. Шваб'юк В. І. Опір матеріалів : навч. посіб. Київ : Знання, 2009. 380 с.
20. Колосов Д.Л., Кіба В.Я. Опір матеріалів у прикладах та завданнях: навч. посібник. Дніпро: Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», 2021. 106 с.
21. Швайко М. Ю. Опір матеріалів. Дніпропетровськ, 1992. 220 с.
22. Павлище В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин:

підручник. 2-ге вид. Львів: афіша, 2003. 560 с.

23. Рудь Ю. С. Основи конструювання машин : підручник. 2–ге вид. Кривий Ріг : ФОП Чернявський Д.О., 2015. 492 с.

24. Мархель І. І. Деталі машин : навч. посіб. К. : Алерта, 2005. 368 с.

25. Стрелец В. В. Деталі машин і основи конструювання. Суми : Сум. держ. ун-т, 2022. 150 с.

26. Колосов Д.Л., Кіба В.Я. Опір матеріалів у прикладах та завданнях: навч. посібник. Дніпро: Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», 2021. 106 с.

27. Писаренко О.Г. Опір матеріалів : З основами пружності й пластичності: У 2 ч., 5 кн. Київ : Вища шк., 1995. Т. 4 : Приклади і задачі. 463 с.

28. Жук А. Я., Желябіна Н.К. Конструкції та розрахунки металургійного обладнання: метод. вказівки Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 48 с.

29. Жук А. Я., Малишев Г. П., Желябіна Н.К. Основи наукових досліджень: навч.-метод. посіб. Ч. 1 : Теоретичні дослідження. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 196 с.

30. Таратута К. В., Власов А. О., Воденнікова О. С. Металургійне обладнання металургійних заводів. Обладнання для виробництва металів і сплавів : метод. рекомендації Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2024. 74 с.

31. Стороженко І.П. Вища математика. Навчальний посібник в 2 частинах. Частина І. Лінійна алгебра і аналітична геометрія: навч. посіб. Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2019. 80 с.

32. Боровик О.В., Боровик Л.В., Матохнюк Л.О. Вища математика: елементи лінійної і векторної алгебри. Аналітична геометрія. Частина І: навч. посіб. Хмельницький: Видавництво Національної академії Державної прикордонної служби України імені Б. Хмельницького (НАДПСУ), 2015. 488 с. ISBN: 978-966-8056-76-5.

33. Жук А. Я., Желябіна Н. К. Основи розрахунків приводів машин: навч. посіб. Запоріжжя: ЗДІА, 1996. 145 с.

34.Жук А. Я., Желябіна Н.К., Малишев Г. П. Основи наукових досліджень в сфері практичної механіки. Кн. 1. Теоретичні дослідження: навч. посіб. Київ : Кондор, 2012. 186 с. ISBN 978-966-2781-10-6

35.Жук А. Я., Желябіна Н.К. , Малишев Г. П. Основи наукових досліджень. Ч. 2: Експериментальні дослідження: навч.-метод. посіб. Запоріжжя: ЗДІА, 2008. 206 с.

36. Жук А. Я., Желябіна Н.К. , Малишев Г. П. Основи наукових досліджень в сфері практичної механіки. Кн. 2. Експериментальні дослідження: навч. посіб. Київ : Кондор, 2012. 224 с. ISBN 978-966-2781-11-3

37.Горонескуль М. М.Таблиці функцій та критичних точок розподілів. Розділи: Теорія ймовірностей. Математична статистика. Математичні методи в психології. Х.: УЦЗУ, 2009. 90 с.

38.Пільговий стаж і достроковий вихід на пенсію - КВПУ, Конфедерація вільних профспілок України. *КВПУ, Конфедерація вільних профспілок України*. URL: https://kvpu.org.ua/profnews/konsultatsiia-uk/pilgovyj-stazh-i-dostrokovyj-vyhid-na-pensiyu/ (дата звернення: 04.12.2025).

39.Державні санітарні норми та правила. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. *БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України*. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58073 (дата звернення: 04.12.2025).

40.ДСТУ EN 12097:2022. Вентиляція будівель. Повітроводи. Вимоги до складових повітроводів для полегшення обслуговування систем повітроводів. На заміну EN 12097:2006, IDT ; чинний від 2024-09-01. Вид. офіц. 2024.

41.ДСН 3.3.6.042–99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень

42.Охорона праці на гірничо–металургійному підприємстві: навч. посібник. Ч.І: Металургійний комплекс. / В.О.Шеремет та ін. Дніпропетровськ: Січ, 2002. 375 с.

43. Геврик Е. О. Охорона праці. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. К.: Ельга, Ніка-центр, 2003. 280 с.

44. Ткачук К. Н. Охорона праці та промислова безпека. Навч.посіб. / К. Н. Ткачук. та ін. К: Основа, 2009. 360 с.

45. Полєтаєв В. П., Крюковська О. А. Охорона праці в галузі (для спеціальності «Металургія чорних металів») : навч. посіб. / під ред. д.т.н., проф. А. П. Огурцова. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2015. 363 с. ISBN 978-966-175-124-7

46. ДБН В.2.5–28–2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення [Електронний ресурс] // Мінбуд України. – 2006. – Режим доступу до ресурсу: http://www.gorsvet.kiev.ua/wp–content/uploads/2016/08/ДБН–В.2.5–28–2006.pdf.

47. ДСН 3.3.6.037–99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Чинний від 1999–12–01. Вид. офіц.

48. ДСТУ 3855-99 Пожежна безпека. Визначення пожежної небезпеки матеріалів та конструкцій. Терміни та визначення. Зі Зміною (ІПС № 1-7-2006) та Поправками (ІПС № 1-7-2006), (ІПС № 5-2007)

49. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об`єктів будівництва. Загальні вимоги. *БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України*. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68456 (дата звернення: 04.12.2025).

50. ДСТУ 2894–94. Пристрої екранувальні для захисту від інфрачервоного випромінювання. Параметри та загальні технічні вимоги. Чинний від 1996–01–01. Вид. офіц. 1994.

51. Румянцев В. Р. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та техногенна безпека» у дипломних роботах (проектах) для студентів ЗДІА спеціальностей МЧМ, МБ та інші / В. Р. Румянцев, І. О. Ткаліч. Запоріжжя: ЗДІА, 2012. 16 с.

ДОДАТКИ